

SIMULACIÓN DINÁMICA DE LUZ NATURAL: NUEVAS TÉCNICAS E INDICADORES PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN ILUMINACIÓN

**¹Esquivias Fernández, Paula M.; ¹Moreno Rangel, David; ¹Fernández Expósito, Manuel
¹Grupo TEP 130: “Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía”. Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC). Universidad de Sevilla.
Avenida de la Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España
e-mail: *pesquivias2@us.es**

RESUMEN

Tras la crisis energética de 1973 se ha incrementado exponencialmente el control de las condiciones higrotérmicas de la edificación, desarrollándose nuevas tecnologías para obtener una mayor eficiencia energética en los edificios, incluyendo la iluminación artificial.

Así como un adecuado acondicionamiento térmico permite reducir el consumo energético, disminuyendo la demanda térmica, una adecuada iluminación natural permite reducir el consumo de la iluminación eléctrica y evitar el sobrecalentamiento de los espacios, aumentando la eficiencia energética mediante el aprovechamiento de una fuente natural, limpia y gratuita.

Pero, mientras existe una larga trayectoria en la predicción de las condiciones de higrotérmicas, el análisis de la iluminación natural se basa, desde hace más de 50 años, en el cálculo del Factor de Iluminación Natural.

Este factor, pese a su gran expansión internacional y reconocimiento, por ejemplo en los sistemas LEED o BREEAM, no considera la acción directa del Sol. Esta situación sólo corresponde en la realidad a condiciones de cielo nublado, dando lugar a que dicho factor no varíe con la orientación.

Además, debido a la baja frecuencia de días nublados en los climas más soleados del Sur de Europa, el estudio la iluminación natural ha caído en desuso, considerando este factor, en el mejor de los casos, como las peores condiciones de iluminación natural de dicho espacio, por lo que habitualmente la iluminación artificial se diseña sin considerar la luz natural.

Sin embargo, la reciente aparición de la simulación dinámica de luz natural permite obtener los niveles de iluminación natural que se obtienen a lo largo del año debido a las condiciones climáticas locales, considerando la presencia y acción del Sol. Con esta nueva técnica se han creado nuevos indicadores que permiten predecir, por ejemplo, durante cuánto tiempo la luz natural es suficiente o debe complementarse con la iluminación eléctrica para obtener confort visual.

En este trabajo se muestra cómo el análisis de las métricas dinámicas permite obtener una mejor comprensión de las condiciones de iluminación natural, permitiendo la toma de ciertas decisiones que afectan al confort y al consumo de energía.

Para ello se muestra no sólo la importancia de estas nuevas métricas sino también su integración con la iluminación artificial, permitiendo un mejor diseño de la misma y una mejor adaptación de los sistemas de regulación, obteniendo ahorros energéticos de hasta aproximadamente el 30%.

Keywords: Simulación dinámica de Luz Natural, Métricas Dinámicas de Luz Natural, Ahorro energético de Iluminación Artificial

1.-Introducción

La Directiva Europea de Eficiencia Energética de los edificios (EPBD) señala la importancia de reducir el consumo energético de los edificios, ya que representa el 40% del consumo de energía total en la Unión Europea [1]. En los climas mediterráneos, caracterizados por altas horas de radiación solar directa, se tiene una gran disponibilidad de luz natural pero ésta no suele aprovecharse completamente [2]. De hecho, en España, el consumo de iluminación artificial en edificios de oficinas asciende hasta el 30% del consumo de energía total de los mismos [3].

Es bien sabido que la cantidad de luz natural que entra en un edificio es fundamental, ya que es un medio para reducir el consumo de iluminación eléctrica [4] [5] y es un elemento de gran influencia en las condiciones de confort visual, en el estado de ánimo de los usuarios, en las ganancias solares y en diversos aspectos cualitativos del espacio iluminado [6]. Para hacer un buen uso de la entrada de la luz natural se necesita encontrar también un punto de equilibrio ya que también hay que considerar que si entra demasiada luz natural ésta normalmente provoca discomfort visual y unas ganancias solares excesivas, que llevan a un incremento considerable de las cargas térmicas de refrigeración [7] [8].

El estudio de la iluminación natural tradicionalmente se ha basado en valores relativos, más que en valores absolutos, de niveles de iluminación en conjunción con estudios cualitativos sobre los patrones de sombras. En base a esto, el cálculo tradicional se aproxima a la realidad de la iluminación natural mediante la división artificial de la misma en dos categorías: el estudio de la luz difusa proveniente de un cielo nublado (sin Sol) y la presencia de incidencia directa proveniente del Sol (pero en un modelo sin cielo). Bajo este enfoque la principal métrica cuantitativa es el Factor de Iluminación Natural (Daylight Factor –DF). Este factor no depende ni de las condiciones climáticas locales ni de la orientación del edificio [9].

Sin embargo, el desarrollo de la Modelización de la Luz Natural basada en el Clima (Climate-based Daylight Modelling –CBDM) y la aparición de las métricas dinámicas de iluminación natural como la Autonomía de Luz Natural (Daylight Autonomy –DA) y las Iluminancias Útiles de Luz Natural (Useful Daylight Illuminances –UDIs) [10] proporcionan más información de la variabilidad anual de la luz natural. Esto significa que ahora es posible considerar la luz natural en toda su complejidad a la hora de tomar decisiones que afecten al diseño arquitectónico [11].

La iluminación natural sólo proporciona ahorros energéticos si es capaz de reemplazar temporalmente la iluminación eléctrica. Pero los ahorros energéticos obtenidos por la entrada de luz natural en un espacio no sólo dependen de la disponibilidad de iluminación natural en el lugar de trabajo sino que también depende de cuándo y cómo los ocupantes utilizan los dispositivos de sombra (como las persianas) o los elementos de regulación y control del sistema de iluminación artificial [12].

En este trabajo se introducen las nuevas técnicas de cálculo de la iluminación natural de un espacio, así como las nuevas métricas, y se muestra la diferencia en cuanto a la precisión de los resultados y su aproximación a la realidad cuando se plantea mejorar la eficiencia energética del sistema de iluminación artificial a través de la regulación de la instalación en base a las condiciones de iluminación natural obtenidas en el espacio de estudio.

2.-Pronóstico de iluminación natural

2.1-Factor de iluminación natural

Formulado en Gran Bretaña aproximadamente sesenta años atrás, el Factor de Iluminación Natural (DF) no es más que la relación entre la iluminancia interior y la iluminancia horizontal exterior (ec. 1) proveniente de toda la bóveda celeste bajo un cielo completamente nublado, cuya distribución de luminancias está normalizada por la CIE [9] (fig. 1).

$$DF = \frac{E_{int}}{E_{out}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

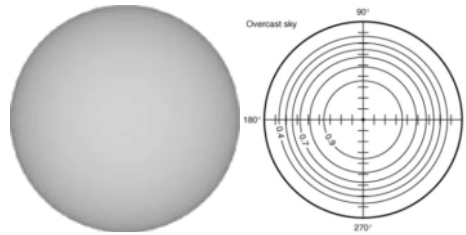


Fig. 21 “Distribución de luminancias del Cielo Nublado Normalizado CIE”. Fuente: Hopckinson [13].

Normalmente se expresa como un porcentaje por lo que no se consideran los valores absolutos de iluminancia y se suele representar mediante curvas isoFIN sobre el plano de trabajo (fig. 2). La luminancia del Cielo Nublado Normalizado CIE tiene una simetría cilíndrica alrededor del eje vertical (es decir, alrededor del cénit). Y, por supuesto, no hay Sol. Por lo que para un determinado diseño arquitectónico, los valores DF calculados no varían ni al cambiar la orientación del edificio (debido a la simetría cilíndrica del cielo) ni al cambiar de localización (ya que sólo representa una proporción de las condiciones exteriores) [14]. En otras palabras, los valores DF calculados serían iguales si el edificio tuviera las ventanas orientadas al Norte en Santander o estuvieran orientadas al Sur en Sevilla.

Existen diversas guías donde se requiere un valor mínimo de DF para que un espacio se considere iluminado naturalmente lo que provoca la sensación de que a mayores valores de DF mejor será la iluminación natural de un espacio. Las guías y recomendaciones en las que se requiere un valor mínimo de DF, como los propuestos en algunas normas o sistemas de créditos como LEED o BREEAM, normalmente dan como resultado edificios sobre-acristalados con excesivas ganancias solares. Por lo que los esperados beneficios de la luz natural no se consiguen ya que, en los edificios con excesivo acristalamiento, los dispositivos de sombra (como las persianas) se mantienen echados la mayor parte del tiempo con la luz artificial encendida.

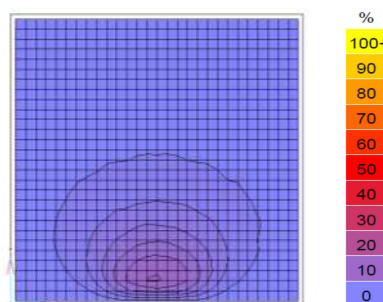


Fig. 22 “Representación gráfica de la distribución de los valores DF en el plano de trabajo”. Fuente: P.M. Esquivias

2.2- Modelización de la luz natural basada en el clima

La modelización de la Luz Natural basada en el Clima (CBDM) es la predicción de varias cantidades radiantes o luminosas (p.ej. irradiancia, iluminancia, radiancia y luminancia) utilizando las condiciones de Sol y cielo obtenidos a partir del conjunto de datos recogidos en los archivos meteorológicos estandarizados (p.ej. EPW, TMY2 o años de diseño CIBSE) (fig. 3).

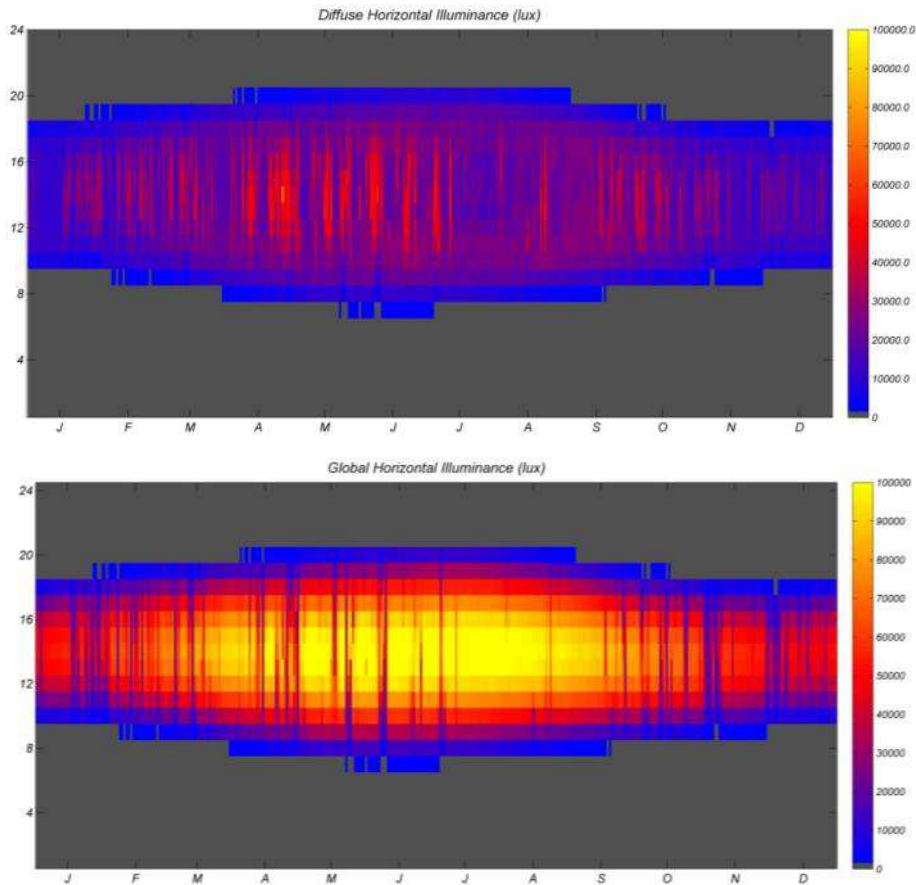


Fig. 23 “Iluminancia Horizontal Difusa y Global tomados del archivo climático EPW para Sevilla [15]”. Fuente: P.M. Esquivias

A pesar de la simplicidad del cálculo del DF, existen diversas razones para cambiar a la Modelización de la Luz Natural basada en el Clima:

- Predice valores absolutos de iluminación utilizando descripciones reales de las condiciones de Sol y cielo
- Considera un periodo de evaluación anual para obtener toda la variabilidad que naturalmente tiene lugar en las condiciones meteorológicas.
- Las condiciones de Sol y la variabilidad de las condiciones de cielo se valoran conjuntamente.

Normalmente, para evaluar el potencial total de iluminación natural de un edificio, la presencia de iluminación excesiva, como datos de entrada en modelos del comportamiento humano para predecir la utilización de los dispositivos de control de la iluminación artificial o de los dispositivos de sombra, o la evaluación del comportamiento de los controles de iluminación sensibles a la luz natural se utilizan series temporales. El análisis de series temporales implica la predicción de medidas instantáneas (p.ej. iluminancia) basadas en todos los valores horarios (o sub-horarios) contenidos en el conjunto de datos climáticos anuales.

Por cada punto de cálculo se puede obtener un perfil de iluminancias variable en el tiempo con la misma descripción temporal que los datos climáticos (fig. 4). En la mayoría de los archivos climáticos esta descripción suele ser horaria por lo que se general 4380 valores de iluminancia (conforme al número de horas diurnas anuales) por cada punto de cálculo [10].

Un análisis de iluminación natural en base climática pretende representar las condiciones predominantes para un periodo de tiempo, en vez de simplemente ofrecer una “instantánea” de unas condiciones específicas en un instante determinado.

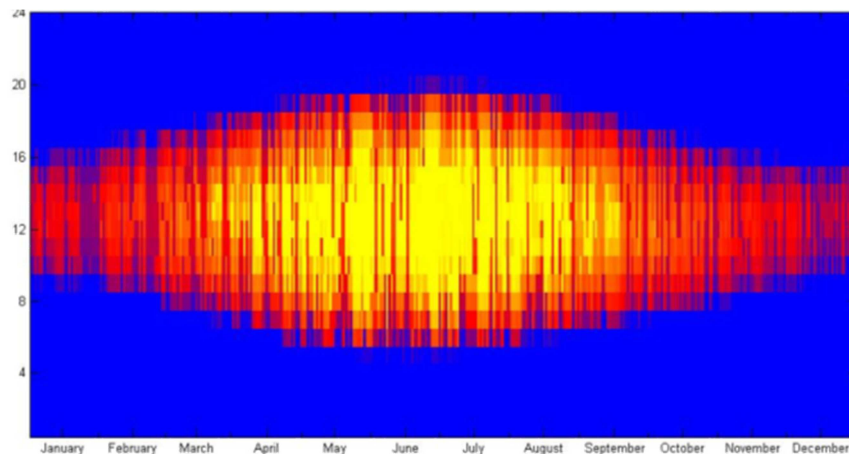


Fig. 24 “Mapa temporal mostrando los valores de iluminancia natural calculados en cada hora del año para un punto del plano de trabajo”. Fuente: P.M. Esquivias

2.3- Métricas de iluminación natural basadas en el clima

La evaluación de la iluminación natural basada en el Clima puede generar una gran cantidad de datos de iluminancia variables en el tiempo por lo que necesitan ser procesados, reducidos e interpretados. Mientras que el objetivo final podría ser la obtención de una métrica resumen, la dinámica espacio temporal de la iluminación natural contiene mucha información que puede servir al diseñador para conocer el carácter dominante de la iluminación natural de un espacio [14].

Las métricas de iluminación natural basadas en el clima nos permiten estudiar la cantidad de luz natural anual para un espacio dado utilizando cálculos horarios o subhorarios de iluminancia en cada sensor ubicado en el plano de trabajo [16].

Tanto la Autonomía de Luz Natural (DA) como las Iluminancias Útiles de Luz Natural (UDI) son herramientas que permiten procesar una gran cantidad de datos de iluminancia por cada punto del plano de trabajo. Ambas métricas analizan los datos de iluminancia mediante el establecimiento de un rango temporal y un nivel de iluminación adecuado para desarrollar las tareas visuales que se requieran [9] [10] [17]. DA es una métrica de disponibilidad de luz natural que corresponde con el porcentaje del tiempo de ocupación del espacio en que se obtiene mediante luz natural un determinado nivel de iluminación en un punto del espacio [10].

La Iluminancia Útil de Luz Natural alcanzada (UDI-a) se define como la presencia anual de iluminancias en el plano de trabajo que se encuentran dentro de un rango considerado “útil” por los ocupantes. Este rango “útil” se basa en informes sobre estudios sobre las preferencias de los usuarios y el funcionamiento en espacios de oficinas iluminadas naturalmente de los dispositivos de sombras operadas manualmente por los usuarios.

Las iluminancias naturales en un rango entre 100 y 500 lux se consideran efectivas ya sean la única fuente de iluminación o junto con iluminación artificial. Las iluminancias naturales en un rango entre 500 y 2000 lux normalmente se perciben

como ideales o al menos tolerables. Tomando 100 lux como el valor mínimo de iluminación y 2000 lux como el valor máximo para desarrollar las tareas visuales más normales con confort, UDI-a se define, entonces, como la presencia anual de iluminancias naturales que se encuentran en un rango entre 100 y 2000 lux. Sin embargo estos límites podrían cambiar a medida que se obtengan más datos sobre las preferencias de iluminación de los usuarios [9] [10] [18].

El esquema UDI se aplica mediante la determinación en cada punto de cálculo de la presencia de iluminancias naturales que:

Se encuentran en un rango definido como útil (de 100 a 2000 lux): UDI-alcanzado

Están por debajo del rango útil (menos de 100 lux): UDI-insuficiente

Superan el rango útil (más de 2000 lux): UDI-excesiva

De modo que sólo se necesitan tres métricas para proporcionar una representación compacta de la variación horaria de las iluminancias de luz natural a lo largo del año para cada punto de cálculo [18].

En base a los estudios sobre las preferencias de los usuarios, existe una certeza razonable de que con iluminancias en el rango útil UDI-a no se encenderá la iluminación artificial. Por lo tanto, la obtención de los máximos valores de UDI-a puede considerarse como el indicador más fiable de que se obtendrá el menor consumo de iluminación eléctrica (para dicho espacio) [10].

3.- Un caso de estudio

Veamos el caso en que queramos conocer la disponibilidad de iluminación natural en una pequeña oficina para vincular el funcionamiento del sistema de iluminación artificial.

En base al esquema UDI se puede decir que el porcentaje del plano de trabajo con un UDI-insuficiente requerirá que se tenga la iluminación eléctrica encendida. El porcentaje que se encuentre con una UDI-excesiva probablemente presente problemas de deslumbramiento y de desconfort térmico, empujando a los ocupantes a cerrar las persianas y encender las luces, pero la experiencia en estos casos dicta que una vez que se cierran las persianas éstas permanecen en dicha posición incluso cuando hayan pasado las condiciones adversas [14] [19].

El porcentaje del plano de trabajo en un rango útil puede o no requerir de iluminación artificial suplementaria para llevar a cabo las tareas visuales [20]. La cuestión es, entonces, cuál sería el valor de iluminancia aceptable para considerar que un espacio está iluminado naturalmente, reduciendo de esta forma el consumo energético de iluminación artificial. Otro concepto a tener presente cuando se trabaja con datos variables en el tiempo es el mantenimiento o la consecución de dicho valor a lo largo del tiempo: la suficiencia de luz natural de un espacio que puede definirse como un nivel de iluminación natural alcanzado durante un determinado periodo de tiempo.

De acuerdo con el concepto sostenible de reducir la demanda energética para reducir el consumo energético, primero es necesario proporcionar mediante el diseño arquitectónico de la cantidad de luz natural suficiente para realizar las tareas visuales y luego vincular el funcionamiento del sistema de iluminación con dicha disponibilidad para conocer los ahorros energéticos conseguidos.

Por lo que en primer lugar mostraremos las diferencias entre considerar el DF o las Métricas de Iluminación Natural basadas en el Clima para mostrar la predicción de la disponibilidad de luz natural de un espacio. En segundo lugar, veremos las diferencias entre tener el sistema de iluminación artificial funcionando todo el día o manejado manualmente y su mejora mediante la incorporación de elementos de control vinculados a la disponibilidad de luz natural.

3.1-Modelo de referencia

El modelo de estudio es un espacio geoméricamente sencillo de 3x3x3 m de anchura, profundidad y altura. Las guías recomiendan un tamaño de ventana del 10% de la superficie de fachada. Esta recomendación da lugar a una ventana de 0'95x0'95 m que se encuentra centrada en la fachada Sur con una altura de alféizar de 1'025 m (fig. 5).

El plano de trabajo se encuentra a 0'80 m del suelo, con sensores cada 0'20 m, separado 0'20 m de las paredes. Los coeficientes de reflexión del suelo, paredes y techo son 20%, 50% y 80% respectivamente. El acristalamiento se realiza mediante un vidrio simple claro con una transmitancia visible del 88'36%. El modelo no cuenta con persianas ni dispositivos fijos o móviles de sombra.

El modelo cuenta con un sistema de iluminación general mediante lámparas fluorescentes que proporcionan una iluminancia media de 387 lux con una potencia instalada de 118 W, es decir, con una densidad de 13'11 W/m². Este sistema tiene un control manual de iluminación que corresponde con un interruptor manual de encendido y apagado del sistema ubicado cerca de la puerta.

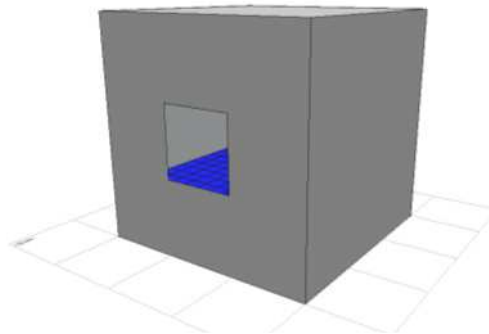


Fig. 25 “Modelo de referencia”. Fuente: P.M. Esquivias

3.2-Requerimientos de iluminación natural para la suficiencia de luz natural de un espacio

En base a diversos estudios, un nivel de iluminación de 300 lux puede definirse como el nivel de iluminación mínimo a conseguir para llevar a cabo de las tareas visuales más comunes. Este límite de iluminancia se encuentra en concordancia con algunas normativas y recomendaciones [21].

Una vez que se define este límite, la cuestión era: “¿qué porcentaje de la superficie del espacio tiene que estar iluminada naturalmente a 300 lux o más durante al menos x porcentaje del tiempo para considerar la suficiencia de iluminación natural de un espacio?” El Comité de Métricas de Iluminación Natural de la IES acordó utilizar el 50% del tiempo como límite temporal para considerar un espacio iluminado naturalmente.

Mientras la obtención del porcentaje del plano de trabajo que alcanza al menos 300 lux durante el 50% del tiempo utilizando DA es inmediata, no es tan directa si se utiliza el DF. En este punto debe señalarse que el rango temporal que se utiliza en el cálculo de DA, y aprobado por el Comité, corresponde con las horas de trabajo, normalmente desde las 8'00 h a las 18'00 h.

De acuerdo con la ecuación del DF (ec. 1), 300 lux es el dato de entrada de la iluminancia interior, pero para obtener el valor del DF que represente una frecuencia del 50% en el año, debemos fijarnos en el dato de entrada de la iluminancia horizontal exterior difusa.

Tradicionalmente, para obtener los valores de DF se tomaba el valor del cielo de diseño, pero este concepto no se adecua a los requisitos. Por lo tanto es necesario analizar el archivo climático local para saber cuál es el valor de iluminancia horizontal exterior difusa que tiene una frecuencia del 50% de las horas de trabajo. Este valor puede obtenerse utilizando una curva acumulada (fig. 6).

Así que, en términos de $DA_{300 \text{ lux}}$ el criterio de iluminación natural consiste en obtener valores mayores o igual al 50% y en términos de DF, los puntos de cálculo deben tener un valor igual o mayor a 1'51%, que representa la contribución de iluminancia difusa que asegura la obtención de 300 lux al menos la mitad del rango temporal considerado.

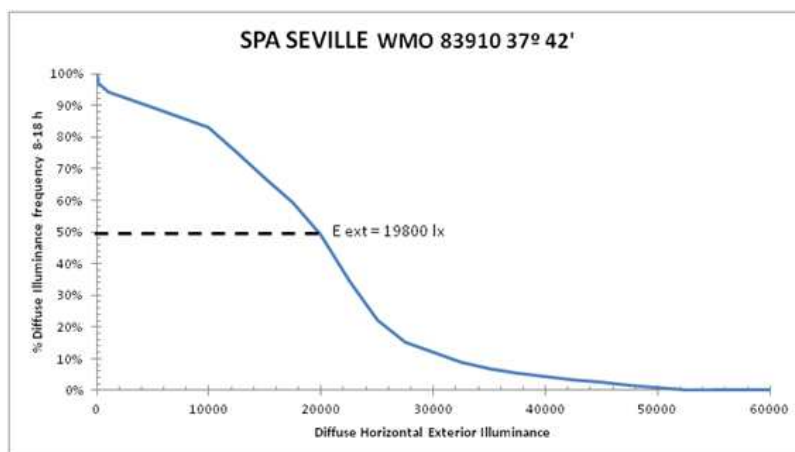


Fig. 26 “Curva acumulada de Iluminancia horizontal exterior difusa para un periodo comprendido entre las 8’00h y las 18’00h”. Fuente: P.M. Esquivias

3.3-Control de la iluminación artificial

Un interruptor manual de encendido y apagado es el sistema de control de iluminación más simple y más utilizado (fig. 7). Este sistema de control no puede por sí mismo mejorar la eficiencia energética ya que depende del comportamiento del usuario. El control de iluminación puede proporcionar ahorros energéticos mediante el ajuste de su funcionamiento a la ocupación real [22]. Algunos autores, como Dubois [5], Galasiu [23] y Newsham [24], entre otros, coinciden en el impacto positivo de los sistemas de control de iluminación, pero ofrecen diferentes opiniones sobre la cuantificación de los ahorros que proporcionan. Por ejemplo, la regulación manual da un rango entre un 7% y un 25%, mientras que los sensores de ocupación pueden proporcionar un rango de ahorros energéticos entre un 20% y un 35%.

En este trabajo se combina un sensor de ocupación con un retardo de apagado de 5 minutos con un control manual de iluminación para evaluar su vínculo e impacto en el consumo energético de iluminación a lo largo del año (fig. 7).



Fig. 27 “Interruptor manual y sensor de ocupación”.

Con este sistema de control, el sistema de iluminación sólo puede activarse manualmente a través del interruptor. Sin embargo puede apagarse o bien manualmente por el usuario o automáticamente por el sensor de ocupación, que

consumo una potencia en stand-by de 0'3 W cuando el sistema de iluminación está en funcionamiento.

Otra opción es la incorporación de un sistema de regulación de la intensidad controlador por un fotosensor. Este sistema corresponde con un sistema de regulación de la intensidad configurado idealmente, controlado por un fotosensor. La fotocélula regula la intensidad del sistema de iluminación hasta que la iluminación de todo el plano de trabajo (natural y artificial) alcanza el nivel de iluminación deseado. Con una salida mínima de iluminación del 1% el sistema consume el 20% del balasto de regulación como mínimo. El sistema de iluminación artificial sólo puede encenderse con un interruptor manual de encendido y apagado, pero la fotocélula regula la intensidad, con un consumo en stand by de 0'3 W.

3.4-Metodología de simulación

En base al análisis de las herramientas de simulación disponibles, para realizar el cálculo dinámico de Iluminación Natural, está internacionalmente reconocido el proceso de trabajo basado en la combinación del programa ECOTECT con DAYSIM, un programa específico basado en RADIANCE.

ECOTECT Versión 5.5, desarrollado por Andrew Marsh de Square One, se utiliza para generar los archivos geométricos 3D para exportarlos a formato de lectura del motor de cálculo RADIANCE.

DAYSIM, que se basa en este motor de cálculo, utiliza el método del coeficiente de luz natural desarrollado por Tregenza en 1983 junto con el modelo de cielo "All-weather" de Perez para calcular los niveles de iluminación en cada sensor definido en la plano de trabajo para cada hora del año [25]. Esto permite simulaciones anuales horarias (8760 horas) de iluminación natural utilizando un archivo climático EPW para una determinada localidad, dando como resultado informes horarios de niveles de iluminación en diferentes sensores dentro de los modelos espaciales [12] [25].

Mediante la definición de un horario anual y un nivel mínimo de iluminación en el plano de trabajo DAYSIM calcula el Factor de Iluminación Natural (DF), la Autonomía de Luz Natural (DA) y los valores del esquema de las Iluminancias Útiles de Luz Natural (UDI) así como otros parámetros. El archivo climático utilizado se obtuvo de la base de datos internacional de registros climáticos para simulaciones energéticas (IWECC) [15].

DA y el consumo de iluminación artificial se han calculado considerando un rango temporal de 8'00h a 18'00h durante todos los días laborales, un modelo de usuario activo por defecto y un interruptor manual de encendido y apagado localizado cerca de la puerta. Esto implica que la zona está ocupada por un usuario que es activo a la hora de manejar la iluminación y los dispositivos de sombra, por falta o excesiva iluminación natural [26].

El caso base que estudia el máximo consumo energético de iluminación se ha simulado sin ventanas para asegurar que la iluminación permanece encendida todas las horas de trabajo.

4.-Resultados

4.1-Suficiencia de luz natural y diseño arquitectónico

Los resultados obtenidos para el modelo de referencia (tabla 1) muestran que sólo el 43% de los sensores tienen un DF mayor del 1'51%, pero si se considera la iluminancia global (DA) casi todos los sensores tienen 300 lux o más durante al menos la mitad de las horas de trabajo. En climas soleados, existe una gran diferencia entre analizar los valores de DF (iluminancia difusa) y las métricas de iluminación natural basadas en el clima (iluminancia global) (fig. 8). Incluso la

mediana de los valores de DF no alcanza el valor mínimo requerido para obtener suficiencia de iluminación natural.

Análisis	criterio	máximo	mínimo	mediana
DF	43.20%	11.41%	0.50%	1.33%
DA	98.22%	91.00%	28.00%	77.00%
UDI<100	-	22.00%	7.00%	12.00%
UDI 100-2000	-	87.00%	25.00%	81.00%
UDI>2000	-	68.00%	0.00%	7.00%

Tabla 7 “Resultados para el modelo de referencia”

Si observamos los valores de UDI nos encontraremos que el 50% de los sensores del plano de trabajo se encuentran en un rango útil durante el 81% de las horas de trabajo, pero debemos recordar que UDI-a comprende un rango de 100 a 2000 lux por lo que la diferencia con DA es que UDI-a considera los sensores que se encuentran entre 100 y 300 lux.

En cualquier caso, al analizar los datos estadísticos de los tres indicadores UDI, se puede ver que una parte de los sensores de la zona más profunda del espacio, no presentan problemas de deslumbramiento (fig. 9) pero necesitarán siempre iluminación artificial.

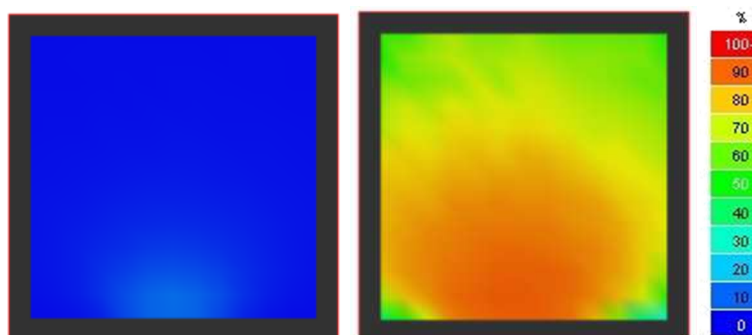


Fig. 28 “Distribución de valores de DF y DA”. Fuente: P.M. Esquivias.

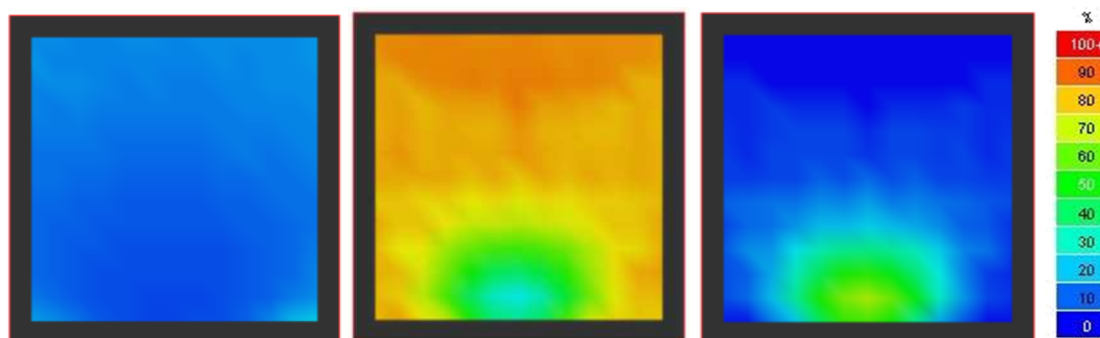


Fig. 29 “Distribución de valores de UDI-insuficiente, UDI-alcanzado y UDI-excesivo”. Fuente: P.M. Esquivias.

Si estuviésemos optando por un crédito LEED no lo hubiéramos obtenido ya que sólo el 31% de los sensores tienen un valor DF igual o mayor de 2% y el requisito especifica que el porcentaje de plano de trabajo igual o mayor de 2% debe ser al menos del 75%. Si hubiéramos considerado este requisito en las primeras fase del proyecto arquitectónico, la estrategia más inmediata hubiera sido la de incrementar el tamaño de la ventana, siguiendo el instinto: “a mayor ventana, mejores resultados de iluminación natural”.

Pero, ¿qué pasa si seguimos la tendencia arquitectónica actual de tener las fachadas completamente acristaladas? En el caso de que hubiéramos decidido acristalar completamente la fachada Sur, los resultados de simulación serían los siguientes:

Análisis	criterio	máximo	mínimo	mediana
DF	100.00%	24.17%	5.69%	11.11%
DA	100.00%	92.00%	90.00%	91.00%
UDI<100	-	8.00%	7.00%	7.00%
UDI 100-2000	-	28.00%	7.00%	14.00%
UDI>2000	-	86.00%	64.00%	79.00%

Tabla 2 “Resultados para la fachada Sur completamente acristalada”

En esta situación, todos los sensores alcanzan el criterio expuesto en el apartado 3.2 pero a base de que la mayor parte del plano se encuentre con demasiada iluminancia, por lo que es posible que se presenten problemas de deslumbramiento y de discomfort térmico a lo largo del año.

El cambio hacia las métricas de iluminación natural basadas en el clima nos proporcionará una información más útil sobre la cantidad de luz natural que entra en el espacio dependiendo de la variabilidad climática pero también su contribución a los diferentes rangos que pueden ser de utilidad en el diseño arquitectónico y en el diseño del sistema de iluminación artificial.

4.2-Consumo energético de iluminación

Ahora echemos un vistazo a lo que sucede al modificar los controles de iluminación. Cuando se define un horario de ocupación de Lunes a Viernes de 8’00h a 18’00h y teniendo en cuenta que el usuario deja su puesto de trabajo tres veces al día (½ h en la mañana, 1h a mediodía y ½ h por la tarde), el número total de horas de ocupación anuales asciende a 2066 horas.

Primero supongamos el caso de que la iluminación no está vinculada con la luz natural, por lo que estará encendida todas las horas de trabajo (fig. 10). Teniendo una densidad de potencia de iluminación instalada de 13.11 W/m² da lugar a un consumo energético de 31’9 kWh/m²_{año}.



Fig. 30 “Ambiente de oficina en el que la iluminación permanece encendida a pesar de la disponibilidad de luz natural en el espacio”. Fuente: Illuminet

Considerando el control manual de la iluminación, ésta se encenderá y apagará cada vez que el usuario tenga la impresión de no tener suficiente o excesiva luz natural y esto dependerá de lo activo o pasivo que sea el ocupante para levantarse de su puesto para adaptar el funcionamiento de la iluminación eléctrica a la

disponibilidad de luz natural. Por defecto, se considera un usuario activo, lo que proporciona un consumo energético de $23.9 \text{ kWh/m}^2_{\text{año}}$.

Una opción de mejora es la incorporación de sensores de ocupación que permiten apagar automáticamente el sistema de iluminación, pero no encenderlo. La iluminación sólo se puede encender manualmente a través del interruptor. En este caso, la predicción del consumo anual de iluminación asciende a $13.3 \text{ kWh/m}^2_{\text{año}}$.

Otra opción es cambiar los sensores de ocupación por un sistema de regulación de la intensidad que se basa en una configuración ideal de un fotosensor. En este caso, el consumo energético anual de iluminación eléctrica es de $16.4 \text{ kWh/m}^2_{\text{año}}$.

Puede decirse que una pequeña mejora en el sistema de regulación puede dar lugar a una reducción del consumo energético en iluminación de alrededor del 50%.

5.-Conclusiones y discusión

Los Edificios de Consumo de Energía Casi Nula requieren que prestemos atención no sólo al comportamiento energético de los sistemas activos de los edificios sino también en cómo se diseñan los edificios para mejorar su comportamiento energético pasivo. Un edificio con una demanda energética muy reducida consumirá menos energía y estará mucho más cerca de un Edificio de Consumo de Energía Casi Nula que aquel que confíe su eficiencia energética sólo en el funcionamiento de los sistemas activos.

Mientras algunos aspectos ambientales se pueden corregir una vez que se ha terminado el edificio, la iluminación natural está especialmente ligada al diseño arquitectónico y provoca consecuencias energéticas a largo plazo.

Si un espacio parece demasiado oscuro se tendrá la iluminación encendida todo el tiempo y además es un indicador de una posible mayor demanda de calefacción debido a la ausencia de radiación solar directa entrando en dicho espacio que la de un espacio con una equilibrada iluminación natural.

Si un espacio parece demasiado brillante probablemente tendrá problemas de deslumbramiento y de sobrecalentamiento debido a la presencia de grandes cantidades de radiación solar directa en el espacio. En este caso las consecuencias energéticas pueden dividirse en dos.

Si el espacio no cuenta con dispositivos que bloqueen la entrada de radiación solar directa en el espacio demandará un mayor consumo energético de refrigeración de los sistemas térmicos para compensar el sobrecalentamiento que un espacio iluminado adecuadamente. Si cuenta con dichos dispositivos móviles, los usuarios cerrarán las persianas y encenderá la luz. En este caso, en base a diferentes estudios, las persianas permanecerán echadas incluso cuando las condiciones de insolación hayan pasado, por lo que los supuestos beneficios de la iluminación natural sobre los ahorros energéticos de iluminación artificial se obvian.

Un espacio iluminado adecuadamente requiere de un gran esfuerzo y dedicación en las fases de diseño del proceso arquitectónico incluso cuando actualmente no existen requisitos legales sobre iluminación natural. Los arquitectos necesitan ser conscientes de las consecuencias en el ambiente interior de sus decisiones de diseño. También necesitan evaluar sus diferentes opciones utilizando los métodos de cálculo y las métricas apropiadas que les proporcionen una información más realista de lo que puede pasar en el espacio que están diseñando.

Una vez que se ha optimizado la forma del edificio en base a los aspectos ambientales interiores es hora de estudiar y diseñar el sistema de iluminación y su sistema de regulación y control. En lo que respecta a los ahorros energéticos en iluminación, éstos no sólo dependerán del adecuado diseño arquitectónico sino también de la interacción del usuario con el sistema de control y con los dispositivos de sombra.

Un ocupante medioambientalmente inconsciente mantendrá las luces encendidas todo el tiempo incluso cuando haya suficiente luz natural para desarrollar las tareas visuales. Además de cambiar las conductas medioambientales, que está fuera de nuestro alcance como técnicos, podemos mejorar el funcionamiento del sistema de regulación manual, que es el más común, con la incorporación de sensores de ocupación o con reguladores mediante fotocélulas provocando importantes ahorros energéticos.

REFERENCIAS

- [1] European Parliament and the Council of the European Union (2010), Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD recast). *Official Journal of the European Union*. **L153**, 13-35.
- [2] Lim, Y.-W.; Ahmad, M. H. and Ossena, D. R. (2013), Internal Shading for efficient Tropical Daylighting in Malaysian Contemporary High-Rise Open Plan Office. *Indoor Built Environment*, **20**, 932-951.
- [3] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2007). *Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España*, 1ª ed., pp. 234, Madrid.
- [4] Bodart, M. and De Herde, A. (2002), Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, **34**, 421-429.
- [5] Dubois, M.-C. and Blomsterberg, A. (2011), Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. *Energy and Buildings*, **43**, 2572-2582.
- [6] Veitch, J. (2003), Principles of healthy lighting: role for daylight. *International Daylighting RD&A*, **5**, 5-6.
- [7] Aries, M. B.; Veitch, J. A. and Newsham, G. R. (2010), Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, **30**, 533-541.
- [8] Laforgue, P.; Souyri, B.; Fontoynt, M. and Achard, G. (1997), Simulation of visual and thermal comfort related to daylighting and solar radiation in office buildings. In *Fifth International IBPSA Conference*, IBPSA (Eds), Prague, Czech Republic.
- [9] Nabil, A. and Mardaljevic, J. (2005), Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, **37**, 41-59.
- [10] Reinhart, C.; Mardaljevic, J. and Rogers, Z. (2006), Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, **3**, 1-25.
- [11] Munoz, C.; Esquivias, P.; Rangel, D.; Acosta, I. and Navarro, J. (2014), Climate-based daylighting analysis for the effects of location, orientation and obstruction. *Lighting Research and Technology*, **46**, 268-280.
- [12] Reinhart, C. F. (2011), Daysim. [Online]. Available: <http://daysim.ning.com/>.
- [13] Hopkinson, R.; Petherbride, P. and Longmore, J. (1966), *Daylighting*, pp. 640. Butterworth-Heinemann Ltd, London.
- [14] Mardaljevic, J. (2008), *Climate-Based Daylight Analysis: Conclusion to Reportership R3-26*, pp. 16. CIE (Eds), Paris.
- [15] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy- U.S. Department of Energy (2010), EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data. [Online]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm.
- [16] Reinhart, C. and Wienold, J. (2011), The daylighting dashboard-A simulation - based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment*, **46**, 386-396.
- [17] Mardaljevic, J.; Hescong, L. and Lee, E. (2009), Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research and Technology*, **41**, 261-283.
- [18] Nabil, A. and Mardaljevic, J. (2006), Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, **38**, 905-913.
- [19] Reinhart, C. and Voss, K. (2003), Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *Lighting Research and Technology*, **35**, 243-260.

- [20] Mardaljevic, J. (2006), Examples of climate-based daylight modelling. In *CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future*, CIBSE, 1-11, London, UK.
- [21] Heschong Mahone Group (2012), *Daylight metrics: PIER Daylighting Plus Research Program*, pp. 384. California Energy Commission (Eds.), California, USA.
- [22] Moreno, D.; Munoz, C.; Esquivias, P.; Acosta, I. and Navarro, J. (2013), Energy and cost savings by using lighting controls in offices. In *International Lighting Conference SLL-CIBSE*, 1-7. CIBSE (Eds.), Dublin, Ireland.
- [23] Galasiu, A.; Newsham, G.; Suvagau, C. and Sander, D.M. (2007), Energy saving lighting control systems for open-plan offices: a field study. *Leukos*, **4**, 7-29.
- [24] Newsham, G.; Aries, M.; Mancini, S. and Faye, G. (2008), Individual control of electric lighting in a daylit space. *Lighting Research & Technology*, **40**, 25-41.
- [25] Reinhart, C. F. (2010), *Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design*. [Online]. Available: <http://daysim.com/pub/Daysim3.0.Tutorial.pdf>.
- [26] Reinhart, C.F. (2004), Lightswitch-2002: A model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, **71**, 15-28.