



**Optimización del Diseño de Protecciones Solares Perforadas para el
Aprovechamiento de la Iluminación Natural**

Design Optimization of Perforated Solar Shadings to Enhance Daylighting

Chi-Pool, D.A.*, Moreno, D., Navarro, J.

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de
Arquitectura, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes N°2, Sevilla 41012, España.

* e-mail: abigailchi@gmail.com

Innovación tecnológica: Metodología para la evaluación de la iluminación natural mediante el modelado de la luz natural basado en el clima y la aplicación del diseño experimental con arreglos ortogonales.

Área de aplicación industrial: Arquitectura Sustentable y Energía.

Recibido: 19 Junio 2017.

Aceptado: 24 Agosto 2017.

Resumen

Este estudio analiza la influencia de diferentes configuraciones de protecciones solares perforadas (PSP) en las condiciones anuales de iluminación natural expresadas mediante la métrica dinámica basada en clima: Iluminación Natural Útil (UDI). El diseño de PSP requiere estudios paramétricos que son a menudo complejos y requieren demasiado tiempo de simulación computacional. Por tanto, se plantea una metodología para optimizar el diseño de las PSP mediante la aplicación del “Diseño de Experimentos con Arreglos Ortogonales (DOA)”. El objetivo es evaluar el efecto y la relevancia que las siguientes variables de diseño de las PSP tienen en la iluminación natural: porcentaje de perforación (PP), matriz (M), forma (F) y orientación (O). La metodología propuesta es aplicada al caso de estudio de Sevilla, España. Los resultados del DOA indican que los valores óptimos para cada variable son: PP 25–37.5 %, M 12x48, F hexagonal/circular, O: norte. Con estos valores se diseñan PSP que maximizan las iluminancias útiles en un 13.08 % y minimizan las iluminancias excesivas en un 33.78 %, respecto al modelo de referencia sin PSP. La aplicación del DOA permite reducir el número de simulaciones, y/o combinaciones de las variables, de 256 requeridas a 16. Finalmente, la PSP óptima es simulada para verificar los resultados del DOA, confirmándose su efectividad y, por tanto, la validez de la metodología propuesta.

Palabras clave: Protecciones solares perforadas, arreglos ortogonales, iluminancia útil de luz natural.

Abstract

This paper analyses the influence of different perforated solar screens (PSP) in annual daylight conditions expressed using the climate-based daylight metric: Useful Daylight Illuminance (UDI). The PSP design requires parametric studies that are often complex and time consuming due to a large number of simulations. Hence, a new methodology is proposed to optimize PSP design by applying Design of Experiments using Orthogonal Arrays (DOA). The aim is to assess the effect of the following PSP design variables in daylighting performance: perforation percentage (PP), matrix (M), shape (S) and orientation (O). A case study from the DOA perspective has been conducted, which involves an office space in Seville, Spain. DOA results reveal that optimized levels to design PSP are PP 25–37.5 %, M 12x48, F Hexagonal/Circular, O: North. These levels increase the useful illuminances in 13.08 % and reduce the excessive illuminances in 33.78 %, in comparison with a reference model with no PSP. DOA method reduces the number of simulations from the 256 required to 16, so it could save time during the initial stages of building design. Finally, optimal PSP is simulated to verify the DOA results, confirming its efficacy and the validity of the proposed methodology.

Key Words: Perforated solar screens, orthogonal arrays, useful daylight illuminance.

1. Introducción

La Directiva del Rendimiento Energético de Edificios enfatiza la importancia de reducir el consumo energético del sector de la edificación, dado que éste representa hasta un 40 % del consumo de energía en la Unión Europea [1]. En climas mediterráneos, donde hay muchas horas de radiación solar directa, existe una gran disponibilidad de luz natural que no se aprovecha en su totalidad [2]. En efecto, en España, el consumo en iluminación artificial alcanza el 28 % del total del consumo eléctrico en edificios del sector terciario [3].

No obstante, la iluminación natural es una forma de reducir el consumo energético de la instalación de iluminación. Mediante un adecuado diseño arquitectónico, y considerando las condiciones climáticas locales, es posible conseguir un buen ambiente térmico–visual interior y disminuir el uso de la iluminación artificial y de los sistemas activos de acondicionamiento

térmico [4, 5]. En el aprovechamiento de la luz natural, la envolvente de los edificios es un elemento de suma importancia pues es la interfaz edificio–medio urbano [6]. Ella protege de los agentes climáticos, provee de luz natural y permite el contacto visual [7].

Las PSP son comúnmente utilizadas en la arquitectura contemporánea como una doble piel frente a las fachadas altamente acristaladas de los edificios. Aunque las PSP son utilizadas más con funciones decorativas, ellas tienen otras funciones: Sus grupos organizados de huecos funcionan como filtros de la luz incidente permitiendo que ésta penetre directamente al interior de los espacios y que los usuarios mantengan una visión del exterior; asimismo, sus partes opacas reflejan la luz solar y actúan como sistemas de control solar [8, 9]. Diversos estudios muestran la efectividad de las PSP en su rendimiento energético [10–12]. Otros hacen referencia a su contribución en la iluminación natural [8, 13–15]. No obstante,

estos estudios se centran en la aplicación de pantallas solares en ventanas y en climas desérticos. Hace falta entonces, abordar el estudio de las PSP como dobles fachadas y en otras condiciones climáticas.

Aunado esto, el diseño de las PSP conlleva la consideración de multitud de variables. Un estudio completo de las posibles combinaciones de variables implica una gran cantidad de modelos diferentes, resultando difícilmente abarcable. Esto provoca que los trabajos estudien una sola variable de diseño independientemente de su relación con otras. Aquí, el Diseño de Experimentos con Arreglos Ortogonales (DOA) puede simplificar el estudio interrelacionado de una mayor cantidad de variables, reduciendo el número de experimentos o simulaciones y obteniendo la máxima información que pueda ser de utilidad en el diseño de las PSP [16]. Este método ha sido utilizado eficientemente en diferentes áreas científicas, aportando conclusiones válidas y optimizando los procesos [17]. Aunque no ha sido aplicado específicamente en el diseño de las PSP, sí se ha aplicado en el diseño formal de edificios mostrando resultados exitosos [18–23].

En este trabajo se desarrolla una metodología para aplicar el método DOA en la optimización del diseño de las PSP. El objetivo es el estudio interrelacionado del impacto que las siguientes variables de diseño de las PSP, tienen sobre las condiciones anuales de iluminación natural interior: porcentaje de perforación (PP), matriz (M), forma (F) y orientación (O). La metodología propuesta es aplicada a un caso de estudio con clima mediterráneo, concretamente a la ciudad de Sevilla, España.

2. Método DOA

El Diseño de Experimentos (DOE) es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. Se aplica en experimentos que constan de dos o más variables (factores), cada una con diversos valores (niveles), y puede ser factorial o fraccional. En el diseño factorial, las corridas (simulaciones) cubren todas las posibles combinaciones de los niveles con todos los factores. La desventaja de este diseño es que el número de combinaciones puede ser demasiado alto para su procesamiento, sobre todo cuando el tiempo es una limitante importante. En cambio, el diseño fraccional puede omitir algunas de las combinaciones posibles, llegando a las mismas conclusiones. Un ejemplo del diseño fraccional, es el Diseño Experimental utilizando Arreglos Ortogonales (DOA).

En el método DOA, la selección de los experimentos está basada en el arreglo ortogonal (AO). Éste es representado por una matriz que se expresa de como $L_N (l)^k$, donde L es el arreglo ortogonal, N es el número de experimentos, l es el nivel de los factores, y k es el número de factores o columnas [16]. El AO sigue estos dos principios: en cada columna, el número de ocurrencias de cada factor en sus diferentes niveles es igual; en cualquier fila, la combinación de los niveles de los factores es completa y balanceada. Estos dos principios representan las ventajas del AO: distribución uniforme y regular. En otras palabras, cualquier factor en cada nivel es comparado con todos los otros factores en sus diferentes niveles [21].

Otras ventajas importantes de utilizar AO es que el número de experimentos o simulaciones computacionales es relativamente pequeño y los resultados pueden analizarse mediante el análisis de medias (ANOM) y el análisis de varianzas (ANOVA). Así, el método es altamente eficiente para arreglos de experimentos multifactoriales consiguiendo predecir la óptima combinación de niveles [21].

3. Modelado de la Luz Natural Basado en el Clima

El modelado de la luz natural basado en el clima (CBDM - Climate-based daylight modelling,) es la predicción de las cantidades de irradiancia, iluminancia, radiancia y luminancia, derivados de la información sobre las condiciones de sol y cielo contenidas en los archivos climáticos estandarizados por localidad. La principal ventaja del CBDM es que cuantifica la distribución luminosa del cielo no uniforme y las intensidades de la radiación solar que varían según la localización geográfica y las diferentes inclinaciones del sol a través de las horas y de las estaciones. Así, el CBDM predice las cantidades absolutas que ingresan a un espacio, considerando las condiciones particulares de la localidad, la orientación de las aberturas, las propiedades de los materiales y la geometría del espacio [24].

El uso del CBDM tiene la finalidad de representar las condiciones prevalecientes durante un periodo de tiempo, en lugar de considerar simplemente las condiciones específicas de un instante estático. Debido a la variabilidad de la luz natural, el periodo de evaluación es normalmente un año, aunque ciertas estaciones o meses también

pueden ser analizados. Igualmente, se pueden incluir el uso del espacio y ciertas estrategias de control solar. El CBDM requiere el uso de un software de modelado tridimensional y un software de simulación de la luz natural.

En la práctica, el CBDM genera archivos que contienen 8760 valores horarios. Debido a la gran cantidad de información generada, se han formulado las métricas dinámicas de iluminación natural (DDM - Dynamic Daylight Metrics). Éstas métricas permiten establecer la cantidad anual de luz natural para un determinado espacio, mediante cálculos horarios o sub-horarios de las iluminancias en cada punto de cálculo del plano de trabajo, a partir de la información de la distribución de luminancias del Modelo All-Weather y de los archivos climáticos [24]. Las métricas dinámicas son, por tanto, medidas obtenidas mediante el análisis y el tratamiento estadístico de las series temporales de iluminancias en el plano de trabajo. De esta manera, los 8760 valores horarios se pueden convertir en un único valor intuitivo.

Dos pasos son determinantes en esta conversión:

- Decidir el periodo de tiempo (horas del día) en que se evaluará la iluminación natural. Una elección común es concentrarse en el tiempo cuando el espacio investigado está ocupado debido a que la luz natural “necesita testigos” para tener un efecto [25,26].
- Decidir los niveles de iluminancias naturales que se consideran “adecuados” para las tareas y actividades del espacio investigado.

Una DDM ampliamente utilizada en los últimos años es la Iluminación Natural Útil (UDI - Useful Daylight Illuminance) que se define como la ocurrencia anual de iluminancias sobre el plano de trabajo que se consideran ‘útiles’ para los ocupantes [27]. Conforme a esto, UDI establece un límite de iluminancia bajo (100 lux) y otro alto (3000 lux) para la luz natural ‘útil’. Debido a estos dos niveles, cada punto del espacio obtiene tres valores UDI. El rango superior representa el tiempo cuando existe una sobre-iluminación de luz natural que puede traer problemas de discomfort térmico y visual [26, 27]. El rango inferior representa el tiempo cuando existe ‘poca iluminación’ y el rango intermedio representa la ‘iluminación natural útil’. Estos rangos fueron sugeridos según los reportes de preferencias de ocupantes en oficinas iluminadas con luz natural [28, 29].

El rango útil puede ser subdividido en UDI-suplementario (UDI-s) y en UDI-autónomo (UDI-a). El UDI-s contabiliza las ocurrencias de iluminancias de 100-300 lux. Para estos niveles de iluminancias, iluminación artificial adicional podría ser necesitada para complementar la luz natural requerida para realizar actividades comunes como la lectura. UDI-a contabiliza la ocurrencia de iluminancias de 300-3000 lux, durante las cuales no se debe requerir iluminación artificial adicional.

En resumen, el esquema UDI cuantifica, para cada punto de cálculo, la ocurrencia de niveles de iluminación natural donde:

- **UDI-b** (bajo): La iluminancia es menor que 100 lux.

- **UDI-s** (suplementario): La iluminancia es igual o mayor que 100 lux y menor que 300 lux.
- **UDI-a** (autónomo): La iluminancia es igual o mayor que 300 lux y menor que 3000 lux.
- **UDI-e** (excesivo): La iluminancia es igual o mayor que 3000 lux.

4. Caso de Estudio

El método DOA y CBDM se aplican a un caso de estudio en particular: una oficina de planta libre en Sevilla, España. Se utiliza el archivo climático IWEC de Sevilla [30], ciudad española situada a 37°42’N, 5°9’W. Los cálculos de iluminación natural se realizan con software basado en Radiance, Daysim 3.1e, que utiliza el método de Coeficientes de Luz Natural y el Modelo de Cielo General Estándar CIE [31, 32]. Se considera un horario de ocupación de 8-18h, de lunes a viernes. El modelo de referencia tiene dimensiones de 12 m de ancho x 12 m de largo y 3 m de altura (Ver Figura 1). Se establece una fachada 100 % acristalada, en el cual se incorporan las diferentes configuraciones de PSP. La altura del plano de trabajo es 0.80 m sobre el piso, con sensores de iluminancias ubicados a cada metro. Los materiales de las superficies se definen como ‘plásticos’, según Radiance [33]; es decir, sin especularidad ni rugosidad. Las reflectancias en techo, suelo, y pared son de 0.85 y en PSP de 0.80.

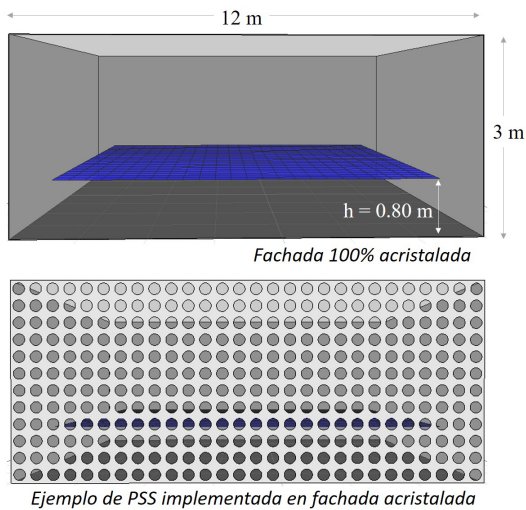


Figura 1. Modelo de referencia.

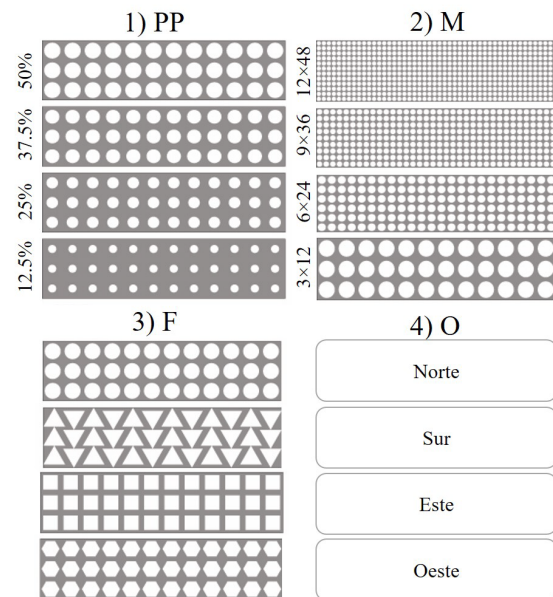


Figura 2. Variables de diseño de PSP.

Para la caracterización de las PSP se contemplan cuatro variables de diseño con cuatro niveles cada una (Ver Figura 2):

- 1) Porcentaje de perforación (PP): Relación entre la superficie total de los huecos respecto a la superficie de la pared. Niveles: 50 %, 37.5 %, 25 % y 12.5 %.
- 2) Matriz (M): Distribución de los huecos en la pared según proporción 1:4 (alto: largo) del muro. Niveles: 12x48, 9x36, 6x24 y 3x12.
- 3) Forma (S): Figura de cada hueco individual. Niveles: circular, triangular, cuadrada y hexagonal.
- 4) Orientación (O): Se analizan las cuatro orientaciones cardinales.

La combinación de los cuatro valores de cada variable resulta en 256 series de PSP. Esto conllevaría a realizar 256 modelos informáticos, representando un considerable tiempo y esfuerzo computacional invertido. Sin embargo, el método DOA puede reducir lo más posible el número de modelos de estudio (o simulaciones) mediante la elección de un AO previamente diseñado. En este trabajo se elige el arreglo $L_{16}(4^4)$ del catálogo Taguchi [34]. Consiste en cuatro factores con cuatro niveles cada uno, tal como se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1. Factores y niveles en DOA.

Niveles	Factores			
	PP	M	F	O
1	50 % (50)	12x48 (1)	Circular (C)	Norte (N)
2	37.5 % (37)	9x36 (2)	Triangular (T)	Sur (S)
3	25 % (25)	6x24 (3)	Cuadrada (Q)	Este (E)
4	12.5 % (12)	3x12 (4)	Hexagonal (H)	Oeste (W)

La aplicación del arreglo ortogonal $L_{16}(4^4)$ permite utilizar sólo 16 combinaciones de las 256 posibles. La Tabla 4 presenta estas 16 series de PSP, obtenidas mediante programa de análisis estadístico Minitab [34].

Tabla 2. Combinaciones para el DOA.

PSP	Factores			
	PP	M	F	O
501CN	1 (50)	1 (12x48)	1 (C)	1 (N)
502TS	1 (50)	2 (9x36)	2 (T)	2 (S)
503QE	1 (50)	3 (6x24)	3 (Q)	3 (E)
504HW	1 (50)	4 (3x12)	4 (H)	4 (W)
371TE	2 (37)	1 (12x48)	2 (T)	3 (E)
372CW	2 (37)	2 (9x36)	1 (C)	4 (W)
373HN	2 (37)	3 (6x24)	4 (H)	1 (N)
374QS	2 (37)	4 (3x12)	3 (Q)	2 (S)
251QW	3 (25)	1 (12x48)	3 (Q)	4 (W)
252HE	3 (25)	2 (9x36)	4 (H)	3 (E)
253CS	3 (25)	3 (6x24)	1 (C)	2 (S)
254TN	3 (25)	4 (3x12)	2 (T)	1 (N)
121HS	4 (12)	1 (12x48)	4 (H)	2 (S)
122QN	4 (12)	2 (9x36)	3 (Q)	1 (N)
123TW	4 (12)	3 (6x24)	2 (T)	4 (W)
124CE	4 (12)	4 (3x12)	1 (C)	3 (E)

Nota: Nomenclatura PSP = PP + M + S. Donde PP puede ser 50 (50 %), 37 (37.5 %), 25 (25 %) o 12 (12.5 %); M puede ser 1 (12x28), 2 (9x21), 3 (6x14) o 4 (3x7); y S puede ser C (circular), H (hexagonal), Q (cuadrangular) o T (triangular).

5. Resultados de las Simulaciones

El análisis del AO tiene como finalidad estimar la combinación de los niveles óptimos de las variables y proponer las series óptimas para maximizar las iluminancias útiles (en rangos 300–3000 lux: UDI-a) y minimizar las iluminancias que exceden los 3000 lux (UDI-e), en el plano de trabajo. La Tabla 3 presenta los resultados

obtenidos en las 16 simulaciones computacionales del arreglo $L_{16}(4^4)$.

Tabla 3. Resultados UDI.

PSP	UDI-b (%)	UDI-s (%)	UDI-a (%)	UDI-e (%)
501CN	6.92	4.13	75.32	13.63
502TS	6.95	3.02	47.75	42.29
503QE	6.93	3.55	56.94	32.58
504HW	7.11	3.71	60.57	28.62
371TE	7.80	4.85	65.65	21.71
372CW	8.04	6.08	67.60	18.28
373HN	8.10	7.20	80.05	4.65
374QS	7.76	4.31	56.25	31.68
251QW	9.70	13.42	66.55	10.33
252HE	9.46	10.36	68.40	11.78
253CS	9.15	8.06	64.15	18.64
254TN	10.11	18.09	71.35	0.45
121HS	14.55	20.98	58.52	5.95
122QN	21.83	48.85	29.32	0.00
123TW	18.34	33.23	45.62	2.81
124CE	15.64	30.23	50.27	3.87

6. ANOM y ANOVA

La Tabla 4 presenta los resultados para UDI-a y UDI-e que se derivan del análisis de varianzas (ANOVA) para una significancia estadística (valor- p) de los resultados experimentales, cuando $\alpha=0.05$. La suma de cuadrados (SC) indica la importancia relativa de cada factor; el factor con la suma de cuadrados más grande tiene el mayor impacto [34]. La significancia al 5 % únicamente es de PP y O para UDI-e.

Tabla 4. ANOVA.

	Factor	GL	SC	F	p
UDI-a	1 (PP)	3	1240.3	7.42	0.067
	2 (M)	3	361.70	2.16	0.271
	3 (F)	3	526.00	3.15	0.186
	4 (O)	3	107.90	0.65	0.636
	Error residual	3	167.20		
	Total	15	2403.1		
UDI-e	1 (PP)	3	1527.9	80.49	0.002 *
	2 (M)	3	58.15	3.06	0.191
	3 (F)	3	91.14	4.80	0.115
	4 (O)	3	818.90	43.14	0.006 *
	Error residual	3	18.98		
	Total	15	2515.07		

Nota: El asterisco indica significancia estadística cuando $\alpha=0.05$.

La Tabla 5 presenta las respuestas del análisis de medias (ANOM) del arreglo $L_{16}(4^4)$. El valor Delta es un índice estadístico usado para comparar la magnitud relativa de los efectos y se obtiene de la diferencia entre la media más alta menos la media más baja para cada factor [16]. El valor Delta tiene dos funciones principales en la tabla ANOM. Primero, clasifica la importancia relativa de cada factor, según la respuesta de los indicadores. Las clasificaciones se asignan basadas en los valores Delta: 1 para el valor Delta más alto, 2 para el segundo más alto, y así sucesivamente [34]. Asimismo, el valor Delta determina cuál nivel de cada factor provee el mejor resultado. La combinación de estos niveles predice la PSP óptima. En este estudio, el objetivo es maximizar el UDI-a, por tanto, la combinación de los niveles resaltados en negrita en la Tabla 5 originan la configuración óptima, que es la 251HN.

Tabla 5. ANOM.

	Valores medios	UDI-a (%)	UDI-e (%)
PP			
T1 (50 %)	60.14	29.28	
T2 (37.5 %)	67.38	19.08	
T3 (25 %)	67.61	10.30	
T4 (12.5 %)	45.93	3.16	
Delta	21.68	26.12	
Clasificación	1	1	
M			
T1 (12x48)	66.51	12.90	
T2 (9x36)	53.27	18.09	
T3 (6x24)	61.69	14.67	
T4 (3x12)	59.61	16.15	
Delta	13.24	5.18	
Clasificación	3	4	
F			
T1 (Circular)	64.33	13.60	
T2 (Triangular)	57.59	16.81	
T3 (Cuadrada)	52.26	18.65	
T4 (Hexagonal)	66.88	12.75	
Delta	14.62	5.90	
Clasificación	2	3	
O			
T1 (N)	64.01	4.68	
T2 (S)	56.67	24.64	
T3 (E)	60.31	17.48	
T4 (W)	60.08	15.01	
Delta	7.34	19.96	
Clasificación	4	2	
Serie óptima	251HN		

Nota: Los valores en negrita son los niveles que proveen el valor más alto para el UDI-a.

Para UDI-a, el orden de los efectos es PP (21.68) > F (14.62) > M (13.24) > O (7.34). La Figura 3 indica que PP 25 % y 37.5 % son los más favorable para aumentar UDI-a en el plano de trabajo, seguidos por 50 % y en último término 12.5 %; esto confirma que los PP intermedios son los más adecuados y que los PP pequeños consiguen menos iluminancias útiles para tareas de mediana y alta dificultad. La forma más favorable es hexagonal, seguida por circular, triangular y cuadrada. La matriz más favorable es 12x48, seguida por 6x24, 3x12 y 9x36 La mejor orientación es N y la más desfavorable es S; E y W consiguen resultados muy similares.

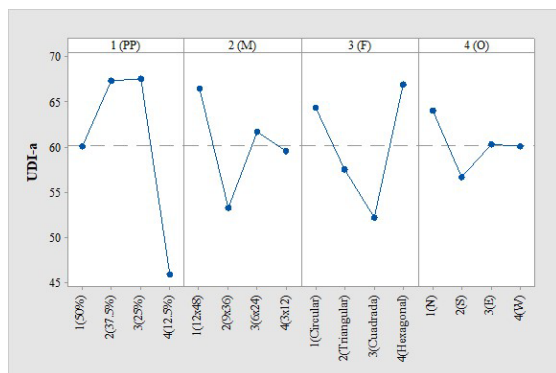


Figura 3. ANOM en UDI-a.

Respecto a UDI-e, el orden de los efectos es PP (26.12) > O (19.96) > M (5.90) > F (5.18). La Figura 4 muestra que UDI-e aumenta conforme aumenta PP. La orientación óptima porque aporta considerablemente un menor UDI-e es N y la más desfavorable es S; E y W son similares. La forma hexagonal y la matriz 12x48 son las óptimas porque aportan menor porcentaje de UDI-e; en cambio la forma cuadrada y la matriz 9x36 consiguen mayor porcentaje iluminado excesivamente.

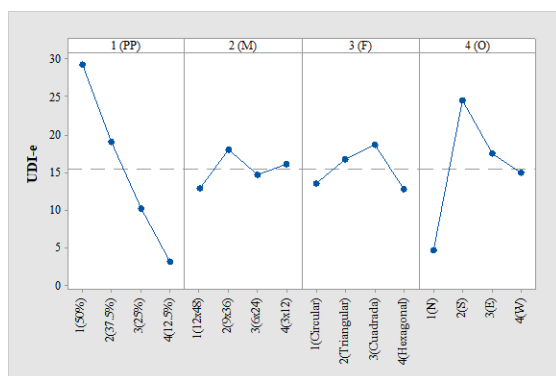


Figura 4. ANOM en UDI-e.

7. Criterios de Diseño derivados del AO

Los resultados UDI-a y UDI-e, derivados del AO, permiten concluir que los PP intermedios son los más adecuados para conseguir iluminancias útiles. Asimismo, la

orientación N, mientras que los otros puntos cardinales pueden ocasionar mayor deslumbramiento y discomfort térmico al aportar iluminancias excesivas durante más horas de ocupación, sobre todo al S. La matriz más adecuada es 12x48 (mayor número de huecos) y la 9x36 la menos recomendable. Las formas más favorables son la hexagonal seguida por la circular porque consiguen mayor iluminancia útil con menor UDI-e; lo contrario sucede con la forma cuadrada por lo que resulta la menos recomendable.

Del método ortogonal se obtienen las siguientes directrices de diseño:

- 1) El porcentaje de perforación es la variable que debe regir el diseño de las PSP. Los PP del 25 % y del 37.5 % permitieron obtener mayores porcentajes de iluminancias autónomas con los menores porcentajes de iluminancias excesivas.
- 2) La orientación es la variable en segundo orden de relevancia. En la latitud estudiada, el Norte resultó el nivel más favorable porque consigue mayor porcentaje anual en los rangos útiles y menor iluminancia excesiva. Por el contrario, el Sur obtuvo mayormente iluminancias excesivas.
- 3) La matriz es una variable de diseño de menor relevancia; sin embargo, los resultados indican que es mejor utilizar mayor número de huecos para maximizar las iluminancias autónomas en el plano de trabajo.
- 4) La forma es otra variable de menor relevancia; no obstante, los resultados permiten deducir que las formas hexagonal y circular

potencian las iluminancias autónomas; en cambio, la forma cuadrada disminuye estas iluminancias y maximiza las excesivas por lo que resulta el nivel menos favorable.

8. Contrastación de utilizar o no PSP en fachadas acristaladas

En la Tabla 5 se resaltan los niveles óptimos de cada factor. La combinación de estos niveles permite especificar las series óptimas para maximizar las iluminancias autónomas. Esta nueva serie optimizada se simula computacionalmente para verificar la efectividad del arreglo ortogonal. Sus resultados se detallan en la Tabla 6, junto con los obtenidos del modelo de referencia orientado al norte (REF100N) para establecer una correspondencia con el nivel óptimo de O. Así, REF100N se simula para contrastar las condiciones de iluminación natural generadas por utilizar o no PSP. Adicionalmente, la Figura 5 muestra una comparativa entre los resultados obtenidos en 251HN y REF100N en el plano de trabajo.

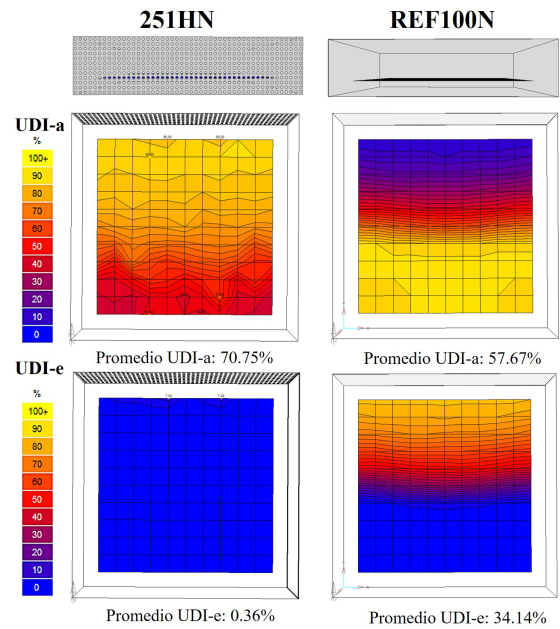


Figura 5. Plano de trabajo con los resultados UDI-a y UDI-e: 251HN vs REF100N.

De todas las simulaciones realizadas, la configuración 251HN es la que consigue el más alto porcentaje de UDI-a con el menor porcentaje de UDI-e. Por tanto, se confirma que 251HN es la PSP óptima y se corrobora la efectividad del DOA. En la Figura 6 se evalúa el desempeño lumínico de la PSP optimizada respecto al modelo de referencia sin PSP. Es decir, se grafican las diferencias absolutas de 251HN menos REF100N, para las métricas UDI-a y UDI-e.

Tabla 6. PSP optimizada.

PSP optimizada	UDI-a (%)	UDI-e (%)
251HN	70.75	0.36
REF100N	57.67	34.14

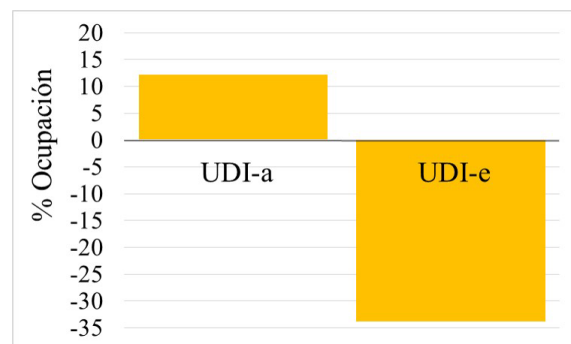


Figura 6. Rendimiento del uso de la PSP optimizada.

Así, se aprecia que la PSP optimizada logra incrementar los niveles de iluminación autónomos en un 13.08 % respecto a la fachada acristalada sin protección. Este valor se puede traducir en que un 70.75 % de las horas ocupadas durante el año, el espacio no requerirá el uso de la iluminación artificial, en comparación con el 57.67 % obtenido sin PSP.

Además, también se obtiene una disminución del 33.78 % del UDI-e, respecto a la fachada acristalada. Este resultado mejora el ambiente luminoso considerablemente pues sólo se obtiene un 0.36 % de las horas de ocupación anual con problemas de deslumbramiento y discomfort térmico debidos a iluminancias excesivas de luz natural, en comparación con el 34.14 % de horas obtenidas en REF100N.

Por lo anterior, es conveniente utilizar PP a partir del 25 % para maximizar las iluminancias autónomas que son las requeridas para las tareas visuales comunes, como la lectura y la escritura. Asimismo, el PP 25 % es conveniente para disminuir lo más posible el deslumbramiento y el discomfort térmico atribuibles a iluminancias que superan los 3000 lux en el plano de trabajo.

9. Discusión

Desde hace años, la sociedad ha venido concienciando sobre la necesidad de ahorrar energía y hacer un uso eficiente de la misma. No obstante, aún queda camino por recorrer respecto a la implementación de estándares y requerimientos de carácter obligatorio para optimizar los recursos naturales y conseguir edificios eficientes energéticamente.

En el campo de la iluminación natural, el uso de CBDM significa una considerable mejora respecto a los antiguos métodos de cuantificación de la luz natural, como el Factor de Iluminación Natural (FIN) que no considera la orientación, el clima, la localidad ni la variabilidad anual de la luz natural [35]. Tales inconvenientes producen una falta de realismo en sus resultados; no obstante, el FIN permanece vigente en la mayoría de los estándares de edificios verdes.

Es importante, entonces, promover el uso de las métricas dinámicas e incorporarlas en los estándares y procesos de diseño de edificios en todo el mundo. En 2007, el IESNA incorporó el uso de métricas dinámicas en sus recomendaciones [36]. En 2016, el sistema LEED V.4 [37] estableció ciertos mínimos de métricas dinámicas, necesarios de alcanzar para obtener los créditos en la certificación energética.

En la aplicación del CBDM, es importante considerar que se requiere el uso de diferentes programas computacionales, entre los que destaca Radiance. Este software ha sido ampliamente validado y se han desarrollado diferentes interfaces amigables para su utilización, tales como DAYSIM y DIVA. Sin embargo, el número de investigadores activos en este campo aún está en crecimiento. Los profesionales deben tener conocimientos básicos sobre los parámetros de Radiance y entrenarse en el manejo de sus interfaces; adicionalmente, se requiere que estén familiarizados con la ciencia de las mediciones climáticas, su manipulación y el análisis/reducción de grandes cantidades de datos [29].

Considerando las ventajas del CBDM, es importante dar énfasis en su implementación

para el análisis y evaluación de la luz natural, pues éste es un recurso renovable que puede traducirse en grandes ahorros de energía eléctrica cuando se diseña adecuadamente y cuando se consideran las condiciones particulares de la localidad de estudio. Asimismo, las métricas dinámicas pueden ser útiles en estudios sobre las cargas térmicas, al estar asociadas a problemas de deslumbramiento y discomfort térmico [27]. Estos temas son necesarios de profundizar en futuras investigaciones. En suma, es conveniente dar a conocer el manejo de estas nuevas técnicas y herramientas; y difundir su aplicación práctica en el campo del diseño de edificios eficientes.

10. Conclusiones

Este trabajo implementa el método DOA junto con el CBDM para optimizar el diseño de las PSP respecto a su impacto en las condiciones de iluminación natural. La metodología propuesta demuestra ser efectiva y de gran utilidad en el diseño de las PSP, pues permite identificar los niveles óptimos de las variables de diseño y, por tanto, las series óptimas para maximizar las iluminancias útiles y minimizar las iluminancias excesivas sobre el plano de trabajo. Lo anterior con el mínimo número de simulaciones y modelos computacionales que disminuyen de 256 a sólo 16 con el arreglo ortogonal. Por tanto, la metodología implementada demuestra que es posible reducir considerablemente el tiempo invertido durante las etapas iniciales del diseño de edificios.

Los resultados del arreglo ortogonal indican que el factor con mayor relevancia para el

diseño de las PSP es PP y que sus niveles óptimos para maximizar las iluminancias autónomas son 25–37.5 %. En segundo orden de importancia, el factor O al nivel N es el más adecuado para la latitud estudiada; en cambio el S potencia las iluminancias excesivas. M y F tienen una significancia menor en el diseño, sin embargo, se infiere que los niveles óptimos para aumentar las iluminancias autónomas y disminuir las iluminancias excesivas resultan M 12x48 y F hexagonal y circular. En suma, el uso de PSP optimizadas en fachadas completamente acristaladas puede maximizar en un 13.08 % las iluminancias útiles y minimizar en un 33.78 % las iluminancias excesivas.

Este estudio se centra en las condiciones de iluminación natural, sin embargo, otros parámetros como la infiltración, ventilación y pérdida de calor a través de las PSP también tienen un papel importante en los consumos energéticos de los espacios interiores. Consecuentemente, en futuros trabajos será relevante explorarlos e identificar cómo intervienen en los niveles óptimos propuestos para las variables de diseño.

11. Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte técnico y económico provisto por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), de México y el Instituto de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla por miembros del Grupo de investigación TEP-130.

12. Referencias

- [1] EC (European Commission), Directive 2010/31/EU on Energy Performance of Buildings, EC, Brussels, 2010.
- [2] Y.-W. Lim, M. Ahmad, D. Ossena, Internal shading for efficient tropical daylighting in Malaysian contemporary high-rise open plan office, *Indoor Built Environ.* 22 (2013) 932–937. doi:<https://doi.org/10.1177/1420326X12463024>.
- [3] MITC (Ministerio de Industria Turismo y Comercio), Plan de Accion 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España, MITC, Madrid, 2007.
- [4] M. Bodart, A. De Herde, Global energy savings in office buildings by the use of daylighting., *Energy Build.* 34 (2002) 412–429. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00117-7).
- [5] A. Galasiu, M. Atif, R. MacDonald, Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls, *Sol. Energy.* 76 (2004) 523–544. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.007>.
- [6] C. Lai, S. Hokoi, Solar façades: A review, *Build. Environ.* 30 (2015) 1–14. doi:[10.1016/j.buildenv.2015.01.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.007).
- [7] M. Zawidiski, L. Kahn, Dynamic shading of a building envelope based on rotating polarized film system controlled by one-dimensional cellular automata in regular tessellations (triangular , square and hexagonal), *Adv. Eng. Informatics.* 29 (2014) 87–100. doi:[10.1016/j.aei.2014.09.008](https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.008).
- [8] E. Aljofi, Theory of direct sunlight transmission through orthogonal screens cells, in: *Proc. Int. Symp. Renew. Energy Environ. Prot. Energy Solut.*, Malaysia, 2003: p. 762.
- [9] A. Pattini, A. Villalba, L. Córica, R. Rodríguez, L. Ferrón, Características ópticas de chapas metálicas perforadas de control solar en fachadas vidriadas., *Av. En Energías Renov. y Medio Ambient.* 15 (2011) 123–132.
- [10] A. Sherif, A. El-Zafarany, R. Arafa, External perforated window Solar Screens: The effect of screen depth and perforation ratio on energy performance in extreme desert environments, *Energy Build.* 52 (2012) 1–10. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.025>.
- [11] A. Sherif, H. Sabry, T. Rakha, External perforated solar screens for daylighting in residential desert buildings: Identification of minimum perforation percentages, *Sol. Energy.* 86 (2012) 1929–1940. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.029>.
- [12] A. Pino, W. Bustamante, F. Encinas, R. Escobar, Thermal and lighting behaviour of office buildings in Santiago of Chile, *Energy Build.* 47 (2012) 441–449. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.016>.
- [13] H. Sabry, A. Sherif, T. Rakha, M. Anees, Daylighting efficiency of external perforated solar screens: Effect of screen axial rotation under clear skies, in: *Proc. Int. Conf. Sustain. Des. Constr.*, American Society of Civil Engineers, Kansas City, Missouri, USA, 2011: pp. 283–291.

- [14] O. Etman, O. Tolba, S. Ezzeldin, Double-Skin façades in Egypt between parametric and climatic approaches., in: *Comput. Performance-Proceedings 31 St eCAADe Conf., Delft, The Netherlands*, 2014: pp. 459–465. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.026>.
- [15] G.A. Mainini, T. Poli, M. Zinzi, A. Speroni, Spectral light transmission measure of metal screens for glass façades and assessment of their shading potential, *Energy Procedia*. 48 (2013) 1292–1301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.146>.
- [16] G. Park, *Analytic Methods for Design Practice*, Springer London, Korea, 2007. doi:10.1007/978-1-84628-473-1.
- [17] L. Franek, X. Jiang, Orthogonal design of experiments for parameter learning in image segmentation, *Signal Processing*. 93 (2013) 1694–1704. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.08.016>.
- [18] H. Yi, R. Srinivasan, W. Braham, An integrated energy–energy approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, energy analysis and Taguchi-regression method, *Build. Environ.* 84 (2015) 89–104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.013>.
- [19] F. Chlela, A. Husaunndee, C. Inard, P. Riederer, A new methodology for the design of low energy buildings, *Energy Build.* 41 (2009) 982–990. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.001>.
- [20] L. Huang, J. Wu, Effects of the splayed window type on daylighting and solar shading, *Build. Environ.* 81 (2014) 436–447.
- [21] J. Zhu, D. Chew, S. Lv, W. Wu, Optimization method for building envelope design to minimize carbon emissions of building operational energy consumption using orthogonal experimental design (OED), *Habitat Int.* 37 (2013) 148–154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.006>.
- [22] J. Wei, J. Zhao, Q. Chen, Optimal design for a dual-airflow window for different climate regions in China, *Energy Build.* 42 (2010) 2200–2205. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.016>.
- [23] W. Wang, H. Rivard, R. Zmeureanu, Floor shape optimization for green building design, *Adv. Eng. Informatics*. 20 (2006) 363–378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.07.001>.
- [24] C. Reinhart, O. Walkenhorst, Dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a full-scale test office with outer venetian blinds., *Energy Build.* 33 (2001) 683–697. doi:10.1016/S0378-7788(01)00058-5.
- [25] C. Reinhart, J. Mardaljevic, Z. Rogers, Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design, *Leukos*. 3 (2006) 7–31. doi:10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001.
- [26] C. Reinhart, J. Wienold, The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylit spaces, *Build. Environ.* 46 (2011) 386–396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>.
- [27] J. Mardaljevic, M. Andersen, N. Roy,

- J. Christoffersen, Daylighting metrics: Is there a relation between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability?, in: Proc. Build. Simul. Optim. Conf. BSO12, Loughborough, UK, 2012: pp. 189–196.
- [28] A. Nabil, J. Mardaljevic, Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings, *Light. Res. Technol.* 37 (2005) 41–59. doi:10.1191/1365782805li128oa.
- [29] J. Mardaljevic, L. Hescong, E. Lee, Daylight metrics and energy savings., *Light. Res. Technol.* 41 (2009) 261–283. doi:10.1177/1477153509339703.
- [30] DOE (U.S. Department of Energy), Energy Plus Energy Simulation Software: Weather Data, EnergyPlus. (2017). <https://energyplus.net/weather> (accessed June 12, 2017).
- [31] D. Fuller, A. McNeil, Radiance - A validated lighting simulation tool - Radsite, 2012. (2012). <http://www.radiance-online.org> (accessed April 7, 2015).
- [32] C. Reinhart, Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design, 2010.
- [33] G. Ward, The RADIANCE 4.2 Synthetic Imaging System, Univ. Calif. (1994) 1–7. <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/ray.html#Materials> (accessed January 15, 2015).
- [34] Minitab, MINITAB. User's Guide 2 : Data analysis and quality tools., Minitab Inc, State College, PA, USA, 2000.
- [35] A. Nabil, J. Mardaljevic, Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, *Energy Build.* 38 (2006) 905–913. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>.
- [36] IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), Daylight Metrics Committee, Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), IESNA, New York, 2013.
- [37] USGBC (U.S. Green Building Council), LEED: leadership in energy and environmental design., (2015). <http://www.usgbc.org/leed> (accessed February 9, 2015).