



Confort lumínico interior y desempeño termo-energético para edificio no-residencial en clima cálido seco extremoso

Indoor light comfort and energy performance for non-residential building in extreme hot dry climate

Santibáñez-Halphen Ana-Sofía , Luna-León Aníbal , Bojórquez-Morales Gonzalo 

Universidad Autónoma de Baja California, Bulevar Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, ssantibanez@uabc.edu.mx

Autor de correspondencia: Santibáñez Halphen Ana Sofía, Maestría en Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Bulevar Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali. E-mail: ssantibanez@uabc.edu.mx, ORCID: [0000-0002-3321-1774](https://orcid.org/0000-0002-3321-1774).

Recibido: 13 de Febrero del 2021

Aceptado: 17 de Julio del 2021

Publicado: 27 de Agosto del 2021

Resumen. – Los efectos de iluminación natural en espacios interiores tienen una notable influencia sobre el ambiente de la edificación, pero más aún, en el bienestar del usuario. El objetivo de este estudio fue analizar la iluminación natural y el cumplimiento del rango de iluminación de 300 lux que la NOM-025-STPS-2008 establece como óptimo, mismo que estándares internacionales consideran como mínimo. Se realizó un diagnóstico ambiental y termo-energético a partir del simulador *Design Builder*, se analizó una oficina del sector privado situada en clima cálido seco extremoso, así mismo, se estudiaron cinco escenarios de cielo distintos: un día de cielo nublado y cuatro días representativos de cielo claro. El análisis para identificar la iluminación natural se determinó a partir del Factor Luz Día expresado en lux. Se establecieron deficiencias o excesos de calidad de iluminación a partir de los resultados del caso base, además, se simuló otros nueve escenarios con diferentes sistemas de acristalamiento con el fin de analizar los efectos sobre ganancias de calor. Las propiedades del material que permiten un mejor comportamiento térmico y lumínico son aquellos con menor coeficiente por ganancias de calor solar y mayor coeficiente visible térmico. El mejor sistema de acristalamiento se encuentra con un doble ultra claro, al mantener la iluminación solo 5% por debajo que el caso base y disminuir el 18% las ganancias de calor por acristalamiento. La mejor condición termo-energética fue con un vidrio sencillo tinte azul turquesa ya que a pesar de disminuir en 25% la iluminación, permitió cumplir con la norma mexicana y disminuir en 55% las ganancias de calor. Se requiere continuar el estudio y modificar la relación ventana-suelo y ventana-muro, así como la forma y ubicación del vano para establecer si realmente el vidrio sencillo tintado es mejor que los sistemas de acristalamiento doble.

Palabras clave: Confort lumínico interior; Factor Luz Día; Desempeño termo-energético; Clima cálido seco extremoso; Edificio no residencial.

Abstract. - The effects of daylight in interior spaces have a significant influence on the environment of the building, but even more, on the well-being of the user. The objective of this study was to analyze natural lighting and compliance with the range of 300 lux that NOM-025-STPS-2008 establishes as optimal, the same as international standards consider as a minimum. An environmental and energy diagnosis was carried out using the Design-Builder simulator, a private-sector office located in an extremely dry hot climate was analyzed, five different sky scenarios were studied: one day with cloudy sky and four representative days with clear skies. The analysis to identify natural lighting was determined from the Daylight Factor expressed in lux. Lighting quality deficiencies or excesses were established from the results of the base case, in addition, another nine scenarios were simulated with different glazing systems to analyze the effects on heat gains. The properties of the material that allow a better thermal and light behavior are those with the lowest coefficient for solar heat gains and the highest coefficient for visible thermal light. The best glazing system is found with double ultra-clear glass, by keeping the lighting only 5% lower than the base case and decreasing the heat gains per glazing by 18%. The best thermo-energetic condition was with a simple turquoise-blue tinted glass since despite reducing the lighting by 25%, it allowed to comply with the Mexican standard and reduce heat gains by 55%. It is necessary to continue the study and modify the window-floor and window-wall ratio, as well as the shape and location of the opening to establish whether the single tinted glass is better than double glazing systems.

Keywords: Indoor light quality; Daylight Factor; Energy performance; Extreme hot dry climate; Non-residential building.



1. Introducción

La iluminación natural en la edificación tiene un efecto positivo a la salud física y mental del usuario [1], [2]; en el ámbito laboral, estos beneficios pueden mejorar la productividad del trabajador al disminuir tensión, ansiedad, síntomas de claustrofobia y mejorar su estado de ánimo [2], [3], [4].

Distintos estudios [5], [6], [7] destacan el impacto significativo que el diseño de envolventes tiene en el ambiente interior; sin embargo, muchos edificios no incorporan medidas que propician un ambiente iluminado naturalmente [8], por lo que es necesario considerar sistemas artificiales para lograr una buena calidad de iluminación.

Actualmente el diseño y construcción de edificios sustentables [9], tiene entre sus prioridades disminuir el consumo energético de la edificación [10] por lo que optimizar las condiciones del espacio al implementar medidas que propicien la iluminación natural, permitirá un mejor ambiente interior [10], [11] y, a su vez, mejorar el desempeño energético del mismo [12].

La literatura enfatiza que los aspectos que afectan principalmente la calidad de iluminación natural interior son: el diseño de envolventes y su distribución espacial [5], [6], también especifica que se deben de tomar en cuenta factores como la geometría del espacio [13], reflectancia de muros y techos [14], tamaño y ubicación de vanos [15], tipo de acristalamiento y marcos para ventanas [16], [17], sistemas pasivos y activos de sombreado [18], [19], [20], entre otros [21]; destaca que el adecuado manejo de estos factores resultará en una conexión entre el usuario y naturaleza [3]. Sin embargo, las ventanas pueden afectar significativamente el comportamiento térmico del espacio [22], ya que para algunos

edificios puede representar el 50% del calor a retirar por sistemas de climatización [23].

Los fundamentos de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), detallan tres relaciones principales para la optimización de elementos traslucidos y opacos en la envolvente, el primero por las propiedades de los sistemas de acristalamiento, a través de la diferencia de calor causada por la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, el intercambio de radiación solar y la fuga de aire; el segundo, por la relación ventana-muro (V-M), definido como la relación entre el área de acristalamiento y el área de muro; y por último, por la relación de área de acristalamiento y el área de suelo (V-S) [24].

Algunos investigadores consideran esta relación (V-S) como la clave para la correcta iluminación [2], [25] y la eficiencia energética [26], [27], ya que si la iluminación natural es deficiente, se requerirá de iluminación artificial lo que generará un consumo eléctrico mayor [12], sin embargo, cada espacio debe analizarse para determinar la mejor posición, configuración y tamaño de la ventana; los vanos ubicados en la parte superior del muro incrementan los niveles de iluminación natural, mientras que la forma rectangular horizontal permiten vistas al exterior, pero, aquellas de forma rectangular vertical permiten una distribución más uniforme de iluminación natural en espacios donde el área de suelo es pequeña [28].

Para climas cálido secos, Shaeri et al., [23] aseveran que en fachadas norte y sur una relación V-M de 20%-40% permite una buena calidad de iluminación y mantiene ganancias internas bajas, ya que, si es mayor, el consumo eléctrico por climatización incrementa exponencialmente. En



el caso de fachadas este y oeste, se recomienda un V-M del 50%; sin embargo, en general, con una relación V-S mayor al 10% se podrá aprovechar de forma eficiente la luz natural dentro del espacio, por lo que una relación V-M de 20% será lo ideal para reducir el consumo energético por ganancias de calor y obtener iluminación natural eficiente, principalmente en fachada oeste, debido a sus altas ganancias por radiación solar durante la tarde.

1.1 Normatividad para iluminación natural interior

Una de las principales herramientas regulatorias que se utiliza en México para impulsar la eficiencia energética son las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), ya que son obligatorias y establecen características técnicas para equipos, materiales y especificaciones para espacios interiores [29], así pues la NOM-024-ENER-2012 establece características térmicas y óptimas para sistemas de acristalamiento en edificaciones[30]; NOM-030-ENER-2016, para la eficiencia energética mediante lámparas led [31]; NOM-035-STPS-2018, establece factores de riesgo psicosocial para propiciar el bienestar del trabajador [32]; y la NOM-025-STPS-2008, establece requerimientos de iluminación que propician un ambiente saludable para los trabajadores[33].

Además, hay otras normas para edificación encaminadas a la sustentabilidad, pero se usan como sistema de evaluación y no de aplicación obligatoria para diseñar y construir. No obstante se basan en normatividad internacional, principalmente aquellas emitidas por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) [34] y la ASHRAE [35], además, el Consejo de la Construcción Sostenible de los Estados Unidos (USGBC, por sus siglas en inglés) y el IWB, también juegan un rol importante al definir características que

propician la eficiencia energética, bienestar al usuario y reducción de emisiones de CO₂ mediante la Certificación en Energía y Diseño Ambiental (LEED) [36] y la Certificación para el Bienestar (WELL) [1].

1.2 Simulación termo-energética

En espacios interiores, la disponibilidad de luz natural depende de la cantidad de radiación solar incidente en una superficie dada según su orientación, para poder determinarla se le atribuyen aspectos como luz directa del sol, luz directa del cielo y luz reflejada en las superficies aledañas; así pues diversos autores [37], [38] hacen referencia al Factor Luz Diurna (FLD) como un método eficiente para definir este parámetro ya que describe la iluminación natural medida en un punto situado normalmente al centro de un plano determinado.

La simulación térmica, energética y de iluminación se lleva a cabo por medio de programas computacionales cada vez más avanzados[39]. El programa *Design Builder* utiliza el motor de cálculo de *EnergyPlus* para evaluar con precisión diversos aspectos que afectan el desempeño ambiental y termo-energético de los edificios[40]; permite dos tipos de informe de simulación para iluminación natural, el primero mediante un mapa de luz diurna que expresa los niveles de luz natural en lux (lx) y FLD. El segundo informe, permite analizar los datos en una tabla con valores numéricos.

El adecuado uso de iluminación natural en oficinas es favorable[12] ya que se produce un efecto positivo en la productividad y bienestar de los empleados[6], [19], además, al reducir el uso de iluminación artificial, se logra una eficiencia energética en las edificaciones [41], [42], [43] lo que puede aumentar la plusvalía del mismo [8]; sin embargo, tras revisar la literatura, se encontró



que en la mayoría de los casos, se analiza en términos de iluminación natural sin tomar en cuenta las ganancias térmicas por acristalamiento. Por otro lado, aquellos estudios que correlacionan las variables están situados en climas templados o fríos, más no en cálido seco extremosos.

El presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la adecuada iluminación natural en el espacio interior y las repercusiones hacia el desempeño termo-energético de un edificio no-residencial, situado en un clima cálido seco extremo, para establecer así, sistemas de acristalamiento que permitan ganancias de iluminación natural sin aumentar las ganancias de calor por ventanas.

El análisis de iluminación por simulación para identificar la calidad de iluminación natural se determina a partir del FLD y su equivalente en lx. Se busca cumplir el rango de iluminación que la NOM-025 establece como mínimo de 300 lx, mismo que el USGBC y IWB establecen como mínimo a cumplir en al menos 55% del área de suelo del espacio. Para el estudio se simularon nueve escenarios con diferentes sistemas de acristalamiento, con el fin de analizar los efectos sobre ganancias de calor y poder establecer el escenario óptimo que logre un mejor desempeño termo-energético y adecuada iluminación natural en el edificio.

2. Metodología

Para el estudio se analizó la correlación entre iluminación natural y consumo energético de la edificación al cambiar el tipo de acristalamiento, a partir de un caso de estudio ubicado en Mexicali, Baja California, México en el que se analizó el cumplimiento de índices de iluminación de acuerdo con las normas mexicanas NOM-024-ENER-2012, NOM-025-STPS-2008, NOM-030-ENER-2016 y NOM-

035-STPS-2018, así como de estándares internacionales WELL, LEED y ASHRAE.

En el sector no-residencial, existe una gran demanda por modernizar edificios para reducir su consumo energético, y a su vez, maximizar el uso de luz natural, sobre todo para aquellos edificios limitados espacialmente en sus remodelaciones (Koh et al). En México, es común que edificios de vivienda se transformen en oficinas, lo que genera espacios de trabajo sin las condiciones necesarias para un ambiente de calidad, por lo que, una de las soluciones para mejorar la iluminación del edificio, con el menor costo de inversión es a través de las ventanas del edificio.

En climas cálido seco extremo, las propiedades del vidrio como tipo, color, espesor y su impacto al ambiente interior del edificio ha sido poco explorada (Mohamed y Fikryb), por lo que, para el diagnóstico de calidad de iluminación, se utilizó la herramienta de análisis *Design Builder* v.5.4.0 para evaluar diferentes propuestas de sistemas de acristalamiento (espesor, tono y materiales del vidrio, así como capas del sistema).

Los resultados obtenidos del simulador se compararon con la normatividad nacional e internacional y se establecieron deficiencias o excesos de calidad de iluminación en cada uno de los espacios interiores del caso de estudio. Finalmente, se determinó la propuesta óptima, que permitió mantener niveles de iluminación adecuados y disminuir el consumo energético de la edificación.



2.1 Caso de estudio

El caso de estudio fue un edificio no-residencial usado como oficina del sector privado. El edificio está emplazado sobre de un terreno de forma rectangular de 284.8 m², con un área construida de 266.7 m² y un volumen de 746.7 m³ dividido en dos niveles. La planta alta (PA) de 135.9 m² con un volumen de 380.7 m³ y planta baja (PB) de 130.8 m² con un volumen de 366.3 m³. La fachada principal del edificio está orientada al norte, mientras que las fachadas este y oeste se encuentra colindantes a otros edificios como se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Fachada principal edificio estudio.

Para el estudio de iluminación natural y termo-energético, se tomó como base el análisis de espacios con acristalamiento en fachadas norte y sur, es decir, siete de los 20 espacios. No se estudió la zona oeste de planta alta, ya que forma parte de otra empresa.

Los espacios analizados en PB se ubican en fachada norte. Dos de ellos son zonas usadas como oficinas y están afectadas con aleros que provocan sombreado; la ubicación de estas se muestra en la figura 2. La zona O1, con 13 m² y 36m³ de volumen, cuenta con una ventana orientada al oeste; mientras que la zona O2, con 4 m² y 11 m³, tiene una ventana orientada al este. Por último, la zona C1, con 9 m², volumen de 25 m³, es utilizada como cafetería y cuenta con una ventana orientada al norte.

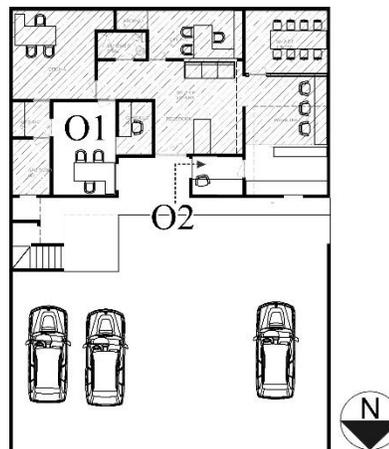


Figura 2. Planta arquitectónica baja.

Los espacios analizados en PA se encuentran en la fachada norte y sur. Cuenta con vanos que iluminan tres zonas de oficina y el vestíbulo principal: O3 y O4 con 15 m² y volumen de 41 m³ ubicados con ventanas orientación sur; O5 con 8 m² y volumen de 22 m³ y V1 con 5 m² y volumen de 13.9 m³ con ventanas en orientación norte; su distribución se muestra en la figura 3.

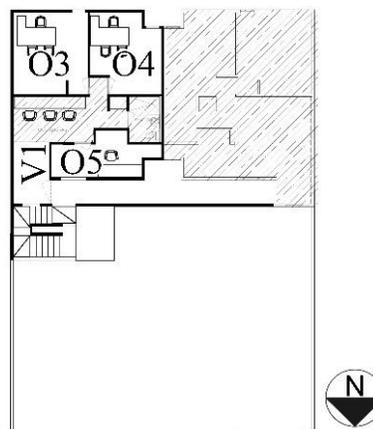


Figura 3. Planta arquitectónica alta.

2.2 Sistemas constructivos y parámetros de simulación.

La programación de parámetros de simulación fue obtenida a partir del proyecto arquitectónico, por levantamiento físico del caso de estudio y monitoreo ambiental, los cuales se muestran en



la tabla 1. Dicha tabla, describe los sistemas constructivos de la envolvente y su interior, la configuración del sistema de aire acondicionado necesario para el periodo de verano, las ganancias térmicas por ocupación, equipos electrónicos e iluminación artificial y, por último, se establece el rango iluminación óptimo recomendado para el tipo de edificio analizado.

2.3 Simulación

El simulador utilizado para modelar el caso de estudio fue *Design Builder v.5.4.0* debido a que permite evaluar con precisión el comportamiento térmico de la edificación, así como la calidad de iluminación natural.

Para el estudio se realizó la programación de las condiciones climáticas en el simulador, mediante el archivo tipo EPW (*Energy Plus Weather*) de la estación climática No.747185, ubicada a una latitud 32.8N y longitud 115.66O al ser la más cercana al caso de estudio, obtenida a partir de *Climate Consultant 6.0*, la cual registra una temperatura de bulbo seco (TBS) promedio de 22.95°C, máxima de 47.1°C y mínima de -1.1°C. La radiación global horizontal máxima promedio anual de 751 W/m².

Después, se programaron las características de la envolvente, cargas internas, de climatización e iluminación natural descritos en la tabla 1.

Para la simulación base, se estableció el caso real de acristalamiento con vidrio claro de 6 mm, además, se realizaron nueve simulaciones con diferentes tipos de vidrio con características distintas de transmitancia solar, transmitancia de luz visible y valor U, variables que afectan de manera directa en los resultados del simulador, ya que los efectos derivadas de las ganancias solares por el tipo de acristalamiento, afectan la calidad de iluminación y su respectivo incremento o decremento de iluminación

artificial. Por otro lado, se evaluaron las ganancias térmicas del espacio y su incremento o reducción de capacidad de climatización artificial.

Finalmente, con los resultados de simulación se determinó el acristalamiento con el mejor desempeño energético en la edificación que permitió cumplir con las normas mexicanas e internacionales; en la figura 4 se muestra el esquema metodológico seguido para la simulación para estimar el confort lumínico sin comprometer el desempeño energético del edificio.

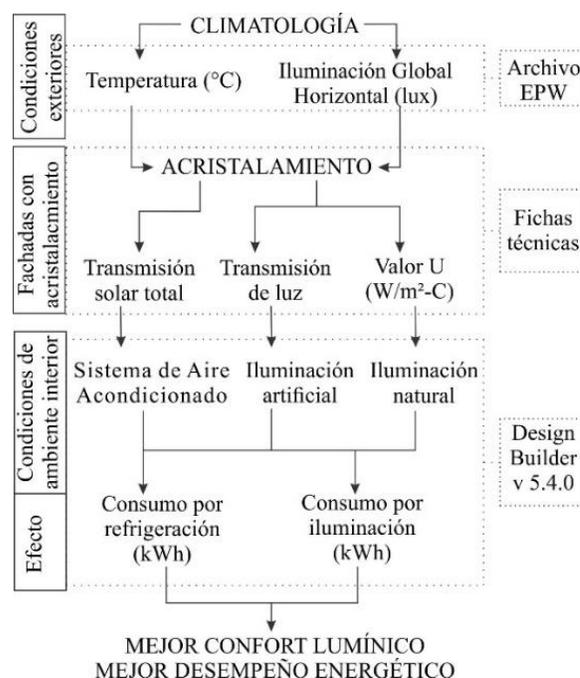


Figura 4. Esquema metodológico general para el estudio.



Tabla 1. Sistemas constructivos, cargas internas, sistemas de climatización y parámetros de iluminación del edificio.

	Parámetro	Descripción	Unidad
Sistema constructivo	Piso	Concreto armado de 0.10m, loseta cerámica rectificada	198.8 m ²
			Emisividad: 0.90 ⁽¹⁾
			Absortancia: 0.60 ⁽¹⁾
	Cubierta	0.003m pintura elastomérica exterior, vigueta y bovedilla de 0.17m	198.8 m ²
			Emisividad: 0.90 ⁽¹⁾
			Absortancia: 0.30 ⁽¹⁾
	Plafón	Rígido, tablaroca y yeso de 0.015 m	174.0 m ²
			Emisividad: 0.77 ⁽²⁾
			Absortancia: 0.23 ⁽²⁾
	Muros perimetrales	Mortero cemento arena 0.015, bloque de concreto de 0.20m x 0.40m x 0.15m y yeso de 0.015	223.2 m ²
			Emisividad: 0.82 ⁽¹⁾
			Absortancia: 0.18 ⁽¹⁾
	Muros interiores	Yeso 0.015m, cartón de yeso de 0.013m, fibra en rollo de 0.12m, Yeso 0.015m	266.8 m ²
			Emisividad: 0.82 ⁽¹⁾
Absortancia: 0.18 ⁽¹⁾			
Ventanas perimetrales	Marquetería de aluminio, vidrio claro 6 mm	10.9 m ²	
		Transmisión solar: 0.82	
		Transmisión de luz: 0.85	
Ventanas interiores	Marquetería de aluminio, vidrio claro 6 mm	0.50	
		Valor U: 5.8 W/m ² -K	
Puertas exteriores	Madera	17.2 m ²	
		Transmisión solar: 0.82	
Puertas interiores	Tipo tambor	Transmisión de luz: 0.85	
		Valor U: 5.8 W/m ² -K	
Cargas internas	Ocupación	Densidad	6.5 m ²
		Tasa metabólica	29 m ²
		Factor metabólico	0.17 persona/m ²
		Vestimenta	119 W/persona
	Equipo electrónico	Potencia absoluta de zona	0.93 met
		Fracción radiante	Verano (0.50 clo)
	Iluminación artificial	Potencia absoluta	Invierno (1.00 clo)
		Fracción radiante	66.99 W/m ²
		Fracción visible	0.2
		Fracción convección	2.26 W/m ²
Sistema de climatización	Equipo de aire acondicionado de paquete	SEER	0.45
		Toneladas	Planta baja: 15 Planta alta:15
		Consigna de temperatura	Planta baja: 5 ton (6,000 btu) Planta alta: 3 ton (3,600 btu)
	Equipo de aire acondicionado tipo mini-split	SEER	9am-9pm:24°C, < 9am:28°C, > 9pm:28°C
		Toneladas	Oficina A Planta baja: 16
		Consigna de temperatura	2 (2400 btu) 2pm-4pm: 24°C
Iluminación natural	Programación	Límite inferior áreas de trabajo	300 lux
		Límite inferior áreas de servicio	200 lux
		Deslumbramiento	900 lux
		Altura de plano de trabajo	0.75 m

Anotaciones: ⁽¹⁾ Valor para superficie exterior. ⁽²⁾Valor para superficie interiores.



2.4 Factor Luz Día

Para el estudio del FLD, se buscó que la calidad de iluminación de los espacios estuviera entre los 300 lx y 900 lx en un plano de trabajo a 0.75m.

Con la intención de conocer el comportamiento lumínico de la edificación en distintos escenarios, se evaluaron cuatro condiciones de cielo claro (CIE claro), a las 12 horas del día. El estudio se realizó para el 21 de marzo con una altitud solar de 57° y una iluminancia global de cielo de 91,169 lx, 21 de junio con una altitud solar de 81° e iluminancia global de 10,737 lx, el 21 de septiembre a una altitud solar de 58° e iluminancia global de 88,917 lx y el 21 de diciembre con altitud solar de 34° con una iluminancia global de cielo de 34,070 lx.

Finalmente, se evaluó un día de cielo nublado (CIE nublado) con iluminancia global horizontal de cielo de 34,324 lx, que representa el día promedio mínimo de iluminancia de cielo para día nublado para el clima analizado.

2.5 Tipos de acristalamiento

El análisis de acristalamiento se realizó con 10 sistemas distintos. El caso base, corresponde a las condiciones reales del edificio: vidrio claro de 6 mm (S-SC) en todos los vanos acristalados. Se continuó con el análisis de cuatro casos de vidrios sencillos, de los cuales tres cuentan con un espesor de 6 mm y uno de 9.5mm; por último, se analizaron cinco sistemas con doble acristalamiento de 25 mm de espesor, cuatro de ellos cuentan con dos vidrios de 6 mm separados por espacio de aire y uno más, también con dos vidrios de 6 mm, pero separado por espacio con gas argón.

La selección de tinte, recubrimiento, propiedades de transmisividad y valor U de los sistemas de acristalamiento, se basó en la literatura revisada y fichas técnicas de vidrios [44] comercializados en la industria mexicana.

Entre las muestras de vidrio sencillo se encuentran: vidrio de tinte azul turquesa (S-AZ), tinte gris medio (S-FS), tinte azul ligero y tenue (S-OB) y vidrio tinte azul cielo brillante (S-SB). De la misma manera, la muestra de sistemas doble acristalamiento se compone de: D-SP con doble vidrio ultra claro, D-SBSC con un vidrio S-SB y uno S-SC, D-AZSC que incluye un vidrio S-AZ y uno S-SC, D-S7 conformado por dos vidrios Low-E claro con recubrimiento de triple plata pulverizado y, por último, D-AC de doble vidrio Low-E claro con bajo contenido en hierro.

Las propiedades de cada sistema mostradas en la tabla 2, se obtuvieron de la ficha técnica del fabricante del vidrio, información importante para el simulador como: transmitancia, para establecer el porcentaje de radiación incidente transmitida en el material; reflectancia para el porcentaje de radiación incidente reflejada; el coeficiente global de transferencia de calor (U), para establecer la densidad de transferencia de calor por diferencia de temperatura entre ambientes; el coeficiente visible térmico (LSG), que estableció la razón entre la transmitancia visible y U del sistema de acristalamiento; y por último, el coeficiente de ganancia de calor solar (CGCS), para establecer la ganancia de calor que entra a través de un sistema por radiación solar incidente [30].



Tabla 2. Propiedades de sistemas de acristalamiento simulados.

CÓDIGO	TIPO	TRANSMITANCIA (%)	REFLECTANCIA (%)	U (W/m ² K)	CGCS	LSG
S-SC	Vidrio claro 6 mm	85%	8%	5.82	0.82	1.08
S-SB	Vidrio azul cielo brillante 9.5 mm	41%	5%	5.69	0.51	0.8
S-OB	Vidrio tinte azul tenue y neutral 6 mm	64%	6%	5.47	0.74	0.87
S-FS	Vidrio gris medio 6 mm	45%	5%	5.82	0.59	0.76
S-AZ	Vidrio azul turquesa 6 mm	68%	7%	5.82	0.52	1.31
D-SP	Low-E: Vidrio claro 6mm + aire 13 mm + claro 6mm	80%	14%	1.82	0.73	1.1
D-SBSC	Vidrio tinte azul cielo brillante 6mm + aire 13 mm + claro 6mm	50%	9%	0.66	0.49	1.02
D-S7	Low-E con recubrimiento triple plata: Vidrio ultra claro 6mm + argón 13 mm + ultra claro 6mm	64%	13%	1.58	0.27	2.37
D-AZSC	Vidrio tinte azul turquesa 6mm + aire 13 mm + claro 6mm	61%	11%	2.66	0.39	1.56
D-AC	Vidrio bajo contenido en hierro: Claro 6mm + aire 13 mm + claro 6mm	53%	12%	1.34	0.23	2.22

Fuente: Vitro Vidrio Arquitectónico [44].

Transmitancia y reflectancia, referente a luz visible.

U: Coeficiente global de transferencia de calor.

CGCS: Coeficiente de ganancia de calor solar.

LSG: Coeficiente visible térmico.

3. Resultados

3.1 Iluminación natural estacional

La iluminación natural en un edificio está condicionada por el diseño de elementos traslucidos presentes en la envolvente. Cuando la iluminación natural es el principal método de iluminación interior, se debe prestar especial atención en la ubicación y diseño de ventanas, aunque el valor óptimo para equilibrar la iluminancia y ganancia de calor solar, se logrará al analizar el caso específico mediante las propiedades térmicas del material, así como la correcta selección de elementos de sombreado [24].

En términos generales, se encontró que el edificio tiene problemas de iluminación mayores en

fachada sur que en fachada norte ya que al comparar la relación V-S y V-M con la investigación de Shaeri, et al., se encontró que las zonas O3 y O4 tienen una relación V-S menor al 10% recomendado, como se puede observar en la tabla 3; sin embargo, a pesar de que fachada norte tiene mejor iluminación natural, solo dos zonas están cercanas al 20% de relación V-M que Shaeri, et al. recomiendan para iluminación óptima.

Así pues, se encuentra iluminación óptima en V1 con V-M de 26% y V-S de 24%, y O2 con un V-M de 18% y V-S de 24%, lo que representa que la relación V-M no es el único factor para obtener condiciones de confort lumínico natural en espacios, sino que, la relación V-S también es un factor importante al analizar la situación particular de cada zona.



Tabla 3. relación vano-suelo, vano-muro e iluminación promedio por zona analizada.

ZONA	ÁREA (m ²)			RELACIÓN DE ÁREAS (%)		ILUMINACIÓN PROMEDIO (lux 12:00pm)				FLD PROMEDIO (%)				ÁREA DE SUELO DENTRO DE LÍMITES (%)			
	S ^a	M ^b	V ^c	V-M ^d	V-S ^e	21-mar	21-jun	21-dic	Nub ^f	21-mar	21-jun	21-dic	Nub ^f	21-mar	21-jun	21-dic	Nub ^f
C1 (Norte)	10.5	10.7	1.0	9%	10%	300	458	221	435	2.6	2.6	2.3	2.2	17%	41%	5%	25%
O1 (Oeste)	15	13.7	1.6	12%	11%	373	475	250	189	2.7	2.5	2.2	1.0	26%	41%	12%	2%
O2 (Este)	5.5	7.5	1.3	18%	24%	424	577	312	155	4.8	4.5	4.0	1.1	99%	100%	49%	0%
O3 (Sur)	17.3	10.6	1.0	9%	6%	643	643	824	337	1.2	1.2	1.8	0.6	5%	5%	9%	2%
O4 (Sur)	16.4	11.2	1.0	9%	6%	482	482	765	258	1.0	1.0	1.7	0.5	5%	5%	10%	1%
O5 (Norte)	10	14.6	1.7	11%	17%	607	607	472	321	5.4	5.4	4.5	2.2	52%	52%	43%	32%
V1 (Norte)	5.9	5.5	1.4	26%	24%	532	532	415	288	5.7	5.7	4.5	2.2	89%	89%	66%	27%
PROMEDIO DE TODAS LAS ZONAS						480	539	466	283	3.3	3.3	3.0	1.4	42%	48%	28%	13%

Anotaciones: ^(a) S: Suelo ^(b) M: Muro ^(c) V: Ventana. ^(d) V-M: Ventana -Muro ^(e) V-S: Ventana-Suelo. ^(f) Nub: Cielo nublado

En los días analizados, todas las zonas superan los 300 lx, a excepción del día nublado, en el que O1, O2 y O4 no cumplen con la NOM-025, ya que sus valores promedio por zona son menores; sin embargo, para el resto de las zonas, superar el límite establecido por la norma mexicana, no representa que la iluminación natural es óptima para el área de trabajo, ya que el porcentaje de área de suelo iluminado es menor al 55% que establece el estándar internacional de la USGBC, para el diseño de luz natural en espacios interiores.

Al comparar la relación V-M y V-S de cada zona, se encontró que la mayor afectación está en O3 y O4, ya que el porcentaje de área iluminada es menor al 10%, como se aprecia en la tabla 3. Sin embargo, se encontraron otras dos zonas con valores cercanos en su relación: O1, con V-M de 12% y V-S de 11% que permite iluminación óptima entre el 2% y 41% de suelo en el peor y mejor escenario de cielo; y por último, la zona C1 con un V-M de 9% y V-S de 10% permite el 5%

de área iluminada de suelo en el día crítico y 41% para el mejor caso de cielo, ligeramente más área de suelo iluminada que en O1 a pesar de que los valores de V-M y V-S de C1 son menores. Esto indica que además de la proporción de la ventana en el espacio, otros factores como orientación y elementos de sombreado son importantes para analizar la iluminancia natural en el espacio.

Las zonas mejor iluminadas son O2 y C1, que además de tener mayor V-M, comparten la característica de un vano centrado al muro. V1 con V-M de 26% logra iluminar entre 27% y 89% de área de suelo durante los casos analizados y O2, con una relación V-M de 18% logró iluminar 49% del área de suelo, en el caso del 21 de diciembre y 99% y 100% para los casos de 21 de marzo y 21 de junio.

Para el resto de las zonas con V-S mayor a 10%, la iluminación natural se aprovecha, pero no es suficiente para cumplir con el estándar internacional. Además, la iluminación es peor en



aquellas en que el vano está situado a un extremo del muro, como en el caso de O1, O3 y O4; en la figura 5 se observa las variaciones del porcentaje

de área iluminada de cada zona, según las distintas simulaciones de cielo.

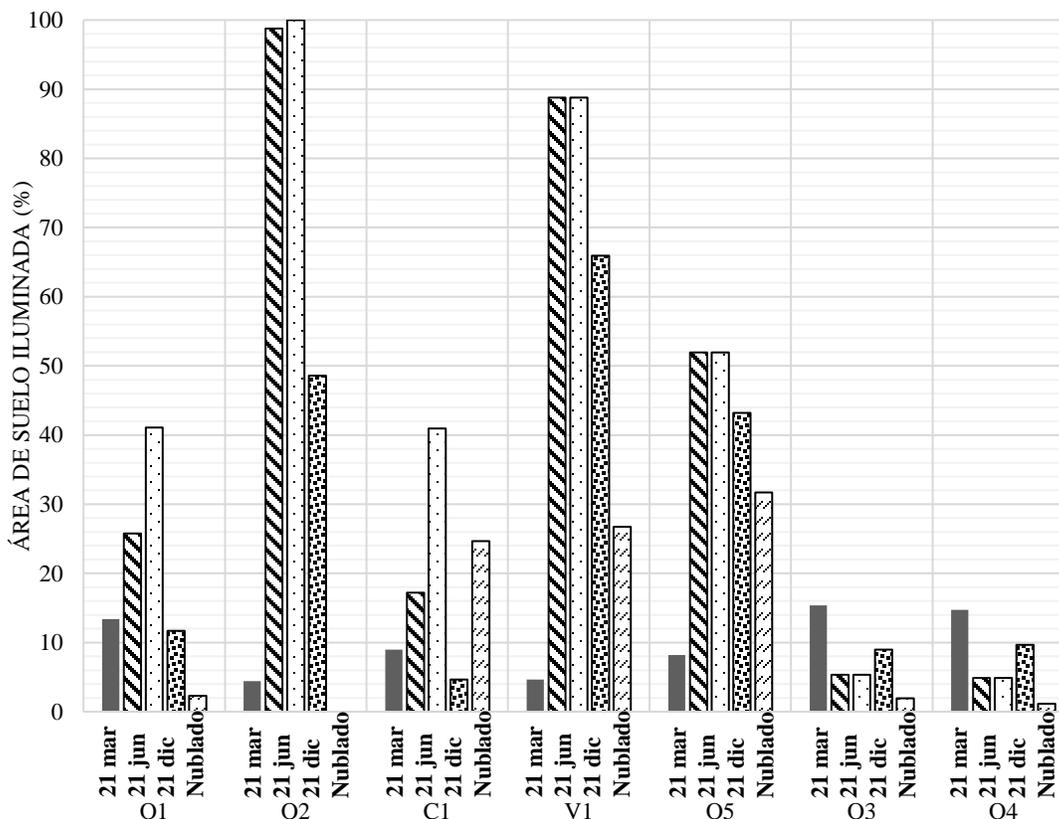


Figura 5. Porcentaje de área por zona, con iluminación natural mayor 300 lux.

La selección del mejor y peor comportamiento corresponde con el promedio de iluminancia global exterior, pues este se reflejó en la iluminación de las zonas analizadas; tal fue el caso del 21 de junio con 539 lx promedio, después el 21 de marzo con 480 lx promedio, que representa 12% menos que el solsticio de verano, posteriormente el 21 de septiembre con 11% menos iluminación, y en el último lugar de análisis de cielo claro, se encontró el 21 de diciembre con un promedio de 465 lx que representa una pérdida de 16% de iluminación conforme al mejor caso.

Finalmente, el peor escenario de diseño fue del cielo nublado, ya que se encontró con 63% menos iluminación contra la simulación del 21 de junio.

Cabe destacar que el caso del 21 de septiembre quedó fuera del análisis específico ya que la diferencia de resultados por zona fue menor a 1% en comparación al cielo del 21 de marzo. Además, aunque el mejor caso de estudio se encontró el 21 de junio, se eligió como caso promedio para comparar los distintos sistemas de acristalamiento, a aquel más cercano al promedio anual de la iluminancia global otorgada por la



estación climática No.747185, que corresponde al 21 de marzo.

A continuación, se discuten los resultados para cada uno de los cielos de diseño para la evaluación del caso de estudio.

3.2 Caso base en cielo nublado

Los resultados de simulación de cielo nublado representan las condiciones críticas de iluminación natural en el edificio analizado, ya que solo en el 8% del área total de las zonas superan la calidad de iluminación establecida en la NOM-025-STPS-2008, pero no logran cumplir con el estándar internacional de la USGBC.

En general, las ventanas con orientación norte permiten mejor iluminación natural, ya que a pesar de tener diferencias en su relación V-M, tienen un V-S igual o mayor al 10% en comparación a aquellas en orientación sur, en donde su relación V-S es de 6%; menor a lo establecido por Shaeri et al. (2019) como suficiente para aprovechar la iluminación natural.

En la fachada principal, las zonas con mejor iluminación son, O5 con 27% de área de suelo iluminada con un V-M de 17%; V1, 27% de área de suelo iluminada con un V-M de 24%; y C1, 25% de iluminación de suelo con un V-M de 10%; cabe recalcar que la iluminación es deficiente para áreas de trabajo pues es menor al 55% del estándar internacional; el porcentaje específico por zona se puede observar en la figura 5.

Las dos últimas zonas ubicadas en fachada principal, O1 y O2 están remetidas en la edificación, lo que resulta en iluminación deficiente debido a elementos que sombrean los vanos de cada zona. La que mayor afectación tiene es la O2 al lograr un promedio de

iluminación 155 lx; cabe destacar que su relación V-M es de 18%, ligeramente por debajo del 20% recomendado por Shaeri et al. (2019), sin embargo, el entepiso es un elemento de sombreado amplio y no permite una mejor condición de iluminación a pesar de tener un vano centrado a muro. En la figura 6, se puede visualizar la distribución de iluminación natural en las zonas analizadas de planta baja.

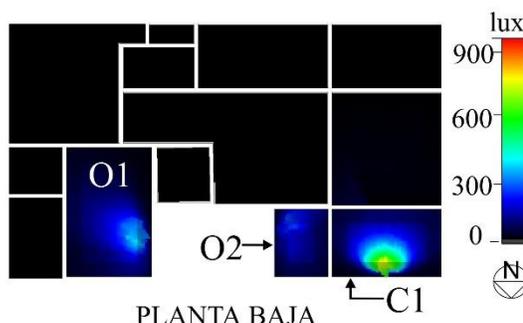


Figura 6. Distribución de iluminación natural para día nublado en planta baja.

Finalmente, para la fachada sur, la zona O3 se podría beneficiar de iluminación natural en un día nublado si el V-M fuera mayor al 9% que tiene actualmente, pues permitiría un mayor porcentaje de suelo iluminado, ya que esta zona generó un promedio de 337 lx, ligeramente por arriba de lo que la norma mexicana establece. En la figura 7 se puede observar la distribución de iluminación natural en las diferentes zonas de caso de estudio en planta alta.

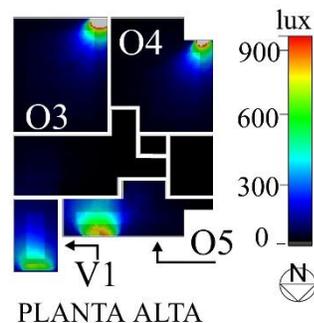


Figura 7. Distribución de iluminación natural para día nublado en planta alta.



3.3 Caso base en cielo claro

A partir del estudio de cielo claro para los solsticios y equinoccios se conocen condiciones de iluminación natural bajo diferentes periodos estacionales. A continuación, se describen los resultados de iluminación natural para cielo claro en los días 21 de marzo, 21 de junio y 21 de diciembre.

3.3.1 Cielo claro 21 marzo

Los resultados de simulación para el 21 de marzo muestran que las zonas con mayor beneficio son aquellas con relación V-M mayor; de las cuales la zona con mejor iluminación fue la O2 con un promedio de 424 lx en 99% de área. Cabe destacar que el espacio no recibe radiación solar directa debido al entrepiso que sombrea la ventana, pero la forma rectangular vertical de vano y un V-M de 24%, permitió aprovechar la altura del espacio para distribuir la iluminación de manera uniforme y alcanza a iluminar a mayores profundidades el espacio.

La zona O1 cuenta un promedio de 373 lx, esto es 13% menos iluminación que el espacio O2 a pesar de compartir características similares respecto a su ubicación en la distribución del edificio; mientras el vano de O2 se sitúa en el muro este y O1 en el muro oeste, su diferencia más importante se encuentra en la relación V-S, así como la ubicación y forma de la ventana, ya que O1 tiene un vano rectangular horizontal situada en un extremo del muro con 13% menos V-S que O2.

La calidad de iluminación en los espacios de la planta alta es mejor debido a que tienen mayor V-S que en planta baja. Así pues, el 89% del área de suelo iluminada en V1 tiene un promedio de 532 lx y el 52% del área del suelo de O5, se ilumina con 607 lx. Cabe destacar que la zona V1 cuenta

con el techo del cubo de escaleras que genera un área de sombreado mayor que evita el deslumbramiento, a diferencia de la ventana en la zona O5, en donde el volado de cubierta es más corto y la iluminación máxima de este espacio sobrepasa el límite de iluminación.

Finalmente, en los casos O3 y O4 se encuentran los promedios de iluminación más altos de todas las zonas, sin embargo, con los porcentajes de área de suelo iluminado más bajos; ya que con 482 lx y 607 lx respectivamente, solo el 5% del área de suelo se ilumina, esto debido a una baja relación V-M.

3.3.2 Cielo claro 21 junio

El mejor escenario para iluminación natural es el 21 de junio al tener mayor iluminancia global. Los siete espacios reciben un total de 3,773 lx, lo que incrementó la iluminación natural en un 63% respecto al cielo nublado (caso crítico).

En el solsticio de verano todas las zonas superan los 300 lx, con los niveles más altos en la O3 con 646 lx y, O5 con 607 lx, sin embargo, a pesar de tener los niveles más altos de iluminación, no genera una condición favorable para la calidad de ambiente lumínico al tener V-M con valores bajos.

En el caso de O4 (fachada sur), la ventana cuenta con un elemento que sombrea al vano y obstruye el paso directo de los rayos del sol, sin embargo, permite una iluminación de 482 lx en el espacio. Los espacios O1 y C1, tienen iluminación natural dentro del rango establecido en el 41% del área de suelo de acuerdo.

3.3.3 Cielo claro 21 diciembre

En el solsticio de invierno se disminuye la iluminación natural en los espacios a 28% del total de área analizado. Se encuentran dos zonas



que no cumplen con la norma mexicana: C1 con calidad de iluminación promedio de 221 lx y la zona O1, con 250 lx promedio.

Las zonas con mejor iluminación se ubican en planta alta con orientación norte. El único espacio que logra cumplir con la especificación nacional e internacional fue V1 con 66% del área iluminada por 415 lx promedio. Después se encuentra el espacio O5 que cumple con la norma nacional al iluminarse con 472 lx, pero no con la recomendación de la USGBC pues solo el 43% del área de suelo tiene iluminación óptima.

Las zonas con peor iluminación se encuentran en O3 y O4 ya que a pesar de tener una iluminancia promedio por zona de 824 lx, esta solo se presenta en 9% para O3 y 10% para O4, lo que validaría el estudio de Shaeri et al. (2019) para el solsticio de invierno.

3.4 Sistemas de acristalamiento y calidad de iluminación.

La calidad y cantidad de luz natural en ambientes interiores está condicionada por las características de la envolvente del edificio, pero principalmente por las propiedades ópticas de la superficie del material de las ventanas. Existen en el mercado una gran cantidad de sistemas de acristalamiento que varían en su espesor y color, e incluso recubren el material por metales con el fin de aumentar el valor U o disminuir el CGCS.

En términos generales, el sistema de acristalamiento S-SC, tiene un total promedio de 481 lx, posicionándolo como el mejor sistema de acristalamiento para iluminación natural en el caso de cielo claro del 21 de marzo.

A partir del análisis por simulación se encontró que al comparar los nueve sistemas de acristalamientos con el caso base, la iluminación natural disminuye; además, solo seis permiten

buena iluminación natural al sobrepasar los 300 lx en las zonas. Esto establece que la calidad de iluminación natural en el espacio no se puede mejorar al cambiar las propiedades físicas del material, sino que es necesario realizar cambios en la envolvente del edificio para mejorar la relación V-M y V-S de cada espacio.

La mejor iluminación en los nueve sistemas de acristalamiento comparados fue con el vidrio ultra claro S-AZ, ya que permitió un promedio total de 373 lx, lo que representa solo 22% menos que caso base.

En segundo lugar, está al vidrio D-AC al permitir 361 lx promedio, que representa una pérdida de 25% de iluminación en las zonas; después, el vidrio S-OB y D-SBSC pues ambos iluminaron en promedio 26% menos que el caso base, al resultar en 357 lx cada uno. Por último, el sistema de acristalamiento con vidrio de 9 mm de espesor, S-SB permitió un promedio de 307 lx en las zonas analizadas (40% menos que caso base).

Una vez comparados los diferentes sistemas de acristalamiento por zona, se encontró que el color de vidrio con menos pérdidas de iluminación fue con tinte azul (S-AZ y S-OB). De esta manera se comprueba que la combinación de propiedades térmicas como transmitancia solar y mayor CGCS brindarán una mejor iluminación natural al espacio.

Además, los sistemas de acristalamiento de vidrio sencillo permiten mejor iluminación contra los dobles tal como se puede observar en la figura 8, así pues, los únicos sistemas de acristalamiento que quedaron con zonas por debajo de los 300 lx establecidos, son D-S7SC que permitió en O5 un promedio de iluminación de 297 lx (61% menos que el caso base), D-AZSC con las zonas V1 y O5 con 275 lx y 296 lx cada espacio (60% menos que S-SC), y por último, S-FS con las zonas V1 en 282 lx (69%



menos que S-SC), O4 con 258 lx promedio (71 % menos) y O5 con 285 lx (74% menos).

En síntesis, el cambio de sistema de acristalamiento de vidrio doble a vidrio sencillo

ayuda a evitar el deslumbramiento en espacios ya que disminuye las ganancias solares, pero es importante seleccionar el vidrio adecuado para permitir mejores condiciones de iluminación en zonas con vanos pequeños.

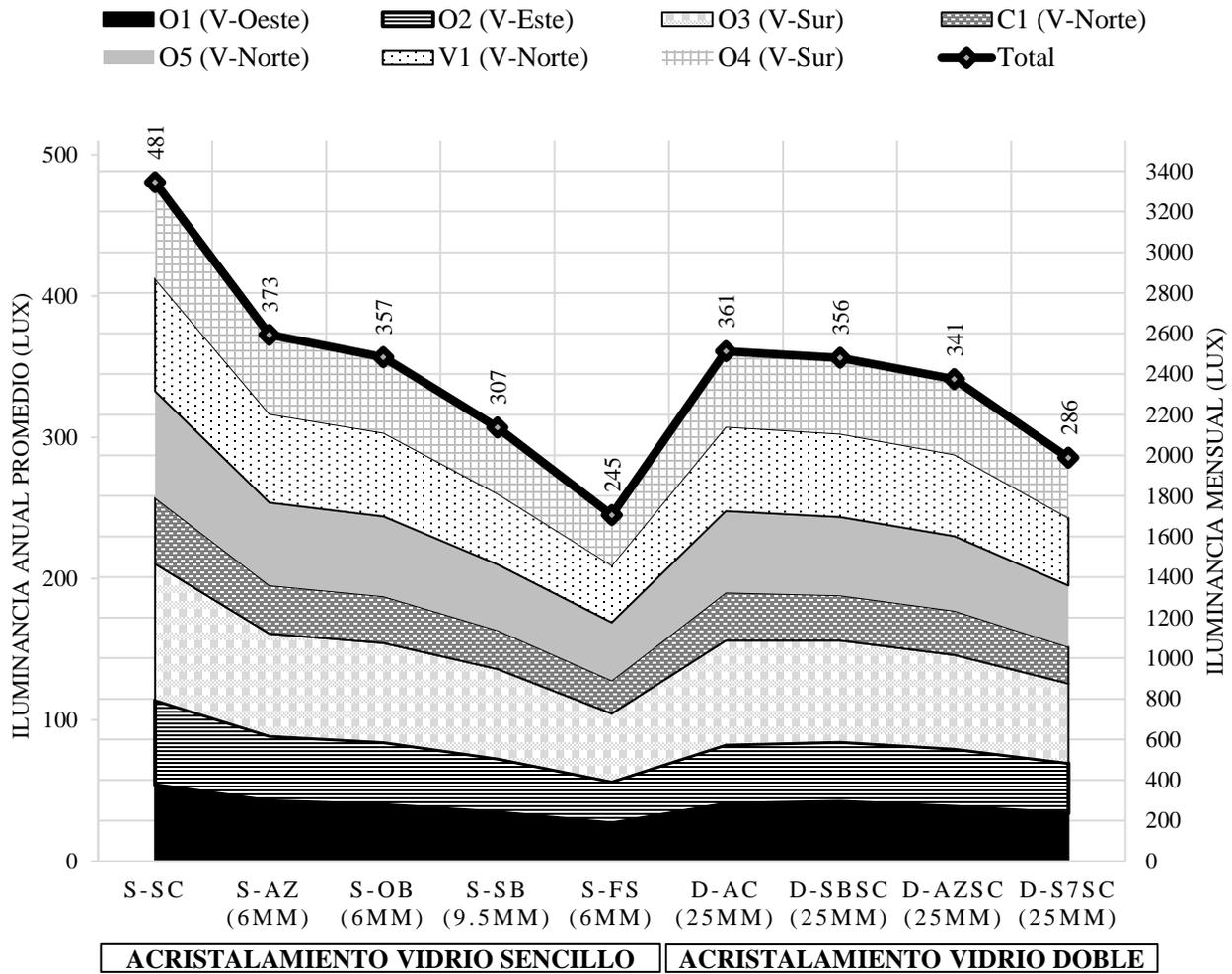


Figura 8. Iluminancia por zona, con diferentes tipos de vidrios.

3.5 Ganancias térmicas por tipo de vidrio

La relación entre elementos traslucidos y opacos de la envolvente es la característica que más afecta en la eficiencia energética de ventanas. Un valor alto de LSG puede maximizar la iluminación en el espacio y reducir las ganancias de calor solar; sin embargo, el mejor rendimiento

se encontrará en aquel sistema de acristalamiento que reduzca las ganancias de calor por acristalamiento, pero no comprometa la iluminación natural del espacio por debajo de lo estipulado en la NOM-025. Una regla general propuesta por la ASHRAE [24] para el diseño de iluminación natural, es seleccionar acristalamientos con menores ganancias por



radiación solar, sin embargo para minimizar las ganancias de calor y aprovechar la luz natural, se recomienda usar aquellos productos con transmitancia al menos 3 veces mayor que el CGCS.

Al analizar las ganancias mensuales por sistemas de acristalamiento para el caso de estudio, se obtiene que el peor comportamiento térmico lo tiene el vidrio base S-SC, ya que anualmente aporta al consumo energético 2,181 kWh.

Tras comparar los resultados por ganancias de los diferentes sistemas de acristalamiento los cuales se pueden observar en la figura 9, se observó que las propiedades del material que tienen el mejor comportamiento térmico son aquellos con menor CGCS y mayor LSG. Dicho así, los vidrios con

mejor comportamiento térmico comparados en el caso base son los vidrios claros Low-E, ya que D-S7SC disminuye ganancias en 84% y D-AC en 79%, después aquellos con tinte azul turquesa, pues D-AZSC disminuye en 64% y S-AZ, 55% menos ganancias de calor. Por último, el tinte azul cielo brillante D-SBSC, reduce a 50% las ganancias térmicas.

Después, aquellos sistemas de acristalamiento sencillo con vidrio tintado, S-FS de tinte gris, reduce 49% de ganancias de calor; S-SB con tinte azul cielo brillante, reducen 40%, D-SP con vidrio ultra claro, reducen a 18% a pesar de ser un vidrio Low-E; y, por último, el vidrio con peor comportamiento, fue el sencillo tinte azul ligero S-OB al reducir solo en 14% la aportación de calor por ventanas.

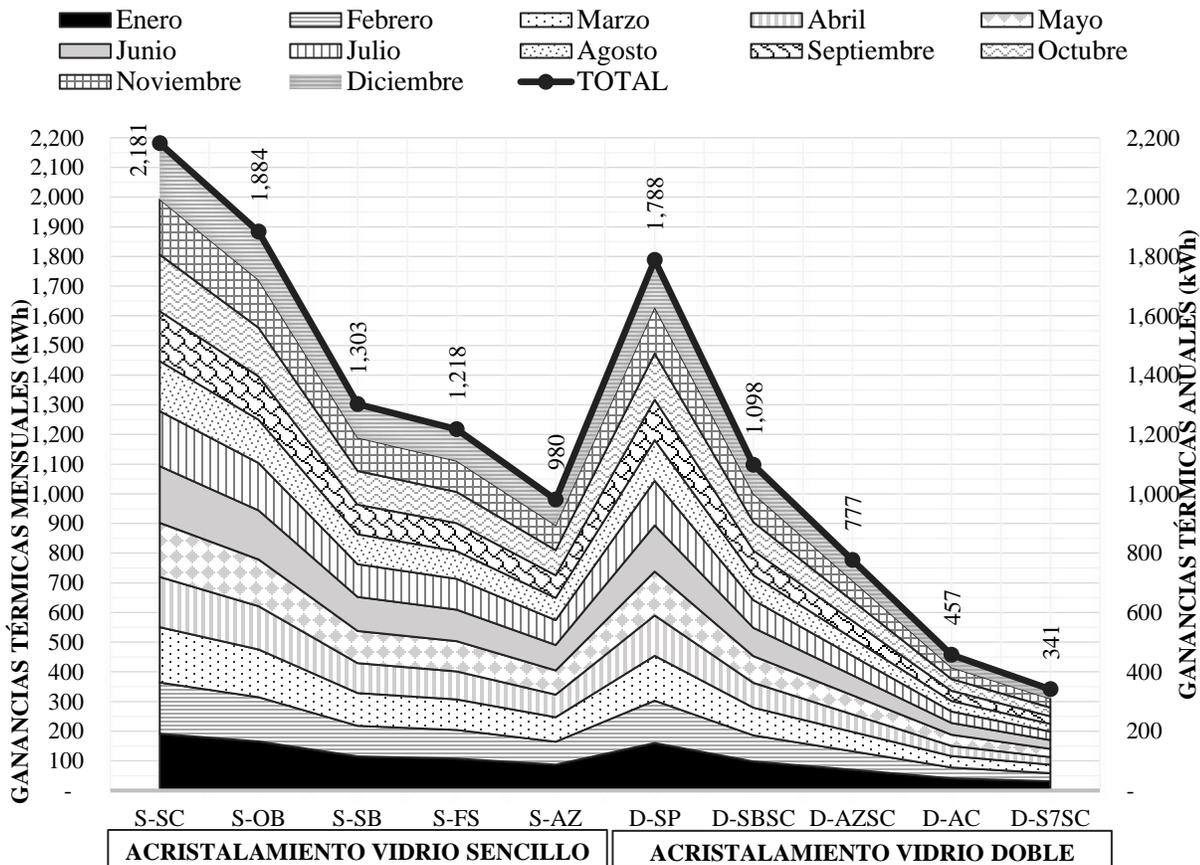


Figura 9. Ganancia térmica mensual, con diferentes tipos de vidrio en la envolvente.



No obstante, la propiedad U del material fue de apoyo para los sistemas de acristalamiento con menor CGCS, pero no suficiente para contrarrestar un alto LSG; tal fue el caso del sistema de acristalamiento D-SBSC que disminuyó en 50% la aportación de calor a pesar de tener el coeficiente U de valor más bajo (0.66), pero con valores de CGCS de 0.49 y LSG con valor de 1.02 que los posicionan a la media de la lista del resto de los valores.

Así pues, los sistemas de acristalamiento con minerales en su composición tienen mayores beneficios térmicos. Los resultados de la simulación arrojan un beneficio de hasta 6.4 veces menos ganancias térmicas con un vidrio recubrimiento triple plata (S7SC), respecto al caso base con vidrio claro. Otro de los vidrios con ventajas térmicas es el vidrio con bajo contenido de hierro (D-AC), el cual disminuye las ganancias térmicas, respecto al caso base en 4.7 veces.

Cabe recalcar, que las propiedades de transmitancia sobre CGCS de D-S7SC, es 2.4 veces mayor y las de D-AC 2.3 veces mayor, lo que representa que la recomendación de ASHRAE sobre propiedades de vidrio que funcionan para este tipo de clima, ya que a mayor transmitancia sobre CGCS, disminuye la ganancia de calor.

Por último, aquellos sistemas de acristalamiento que permitieron buena calidad de iluminación y menor aportación de calor fueron: S-AZ con 1.3 veces mayor transmitancia solar que CGSC, al aportar 373 lx anual y ganancia total anual de 980 kWh (55% menos que el caso base) y D-AC con 2.3 veces mayor transmitancia solar sobre CGCS, aporta 361 lx y disminuye 79% las aportaciones de calor en el espacio (a 457 kWh anual); los resultados específicos de cada sistema de acristalamiento y su correlación de iluminación natural y consumo energético, se puede observar en la figura 10.

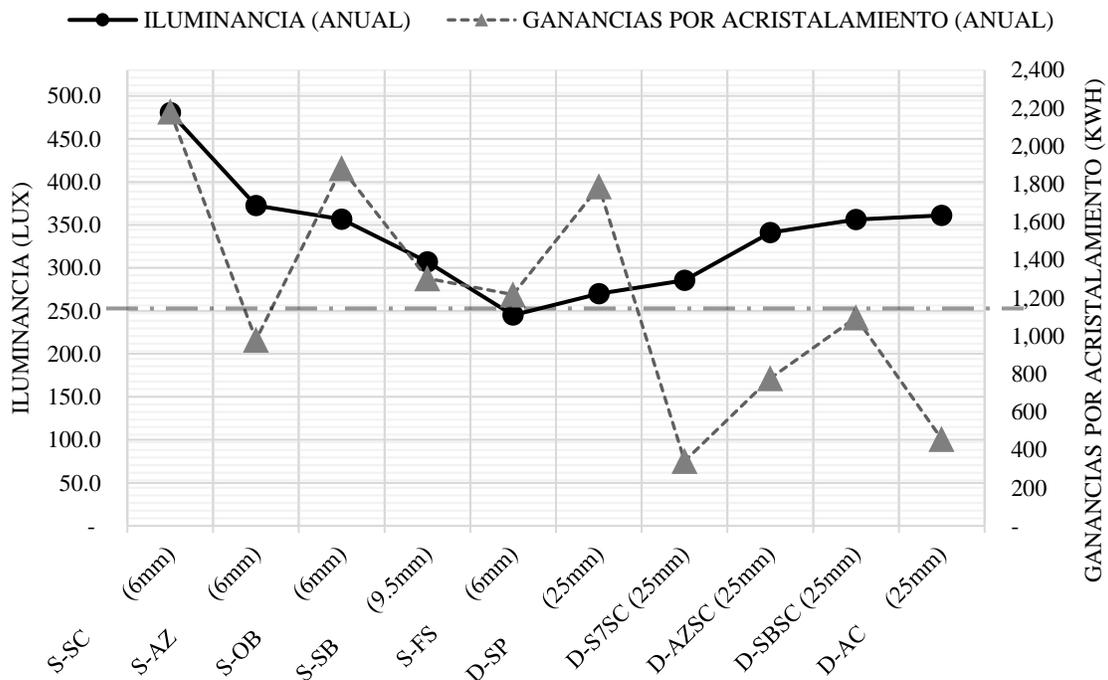


Figura 10. Relación de desempeño lumínico y térmico del edificio.



3.6 Validación empírica de simulación dinámica avanzada

La validación de simulación se realizó mediante la técnica de validación empírica [44]; esta, utiliza el parámetro de ASHRAE, 2017, que establece una diferencia máxima de 10% de Error Absoluto Promedio para métodos de calibración; así pues, al estimar la diferencia entre las 1,017 horas de datos de temperatura medidos en sitio contra los resultados de simulación, se obtuvo 8.6% de diferencia de TBS, con un promedio general de 19.95 °C de simulación contra 19.94 °C del monitor.

Además, se comparó el consumo de una semana de simulación contra los datos reales de cada espacio para determinar el porcentaje de

diferencia entre conjunto de datos, y obtener así, un modelo energético que cumpla con los criterios propuestos por ASHRAE, (2017), mostrados en la Tabla 1.

El resumen de la calibración entre los datos alimentados al simulador de iluminación, equipos y usuarios arrojó una diferencia de 1.8% más de carga por iluminación, es decir 0.30 kW; 0.2% más carga eléctrica por equipamiento (0.21 kW) y 0.6% menos aportación de calor por ocupación (0.1 kW), estos datos se pueden observar en la Tabla 4.

De esta manera se valida el estudio respecto al desempeño termo-energético del edificio, así como los distintos tipos de acristalamiento.

Tabla 4. Calibración cargas internas mediante técnica de validación empírica

ZONA	POTENCIA	Iluminación General			Equipo eléctrico			Ocupación		
		SIM	LEV. FIS.	DIF.	SIM	LEV. FIS.	DIF.	SIM	LEV. FIS.	DIF.
PLANTA BAJA	kW	8.5	8.2	0.3	54.3	54.1	0.2	7.7	7.7	- 0.1
	%	104%	100%	3.8%	100%	100%	0.3%	99%	100%	-0.8%
PLANTA ALTA	kW	2.6	2.6	0.0	34.1	34.1	0.0	3.9	3.9	0.0
	%	100%	100%	-0.1%	100%	100%	0.1%	100%	100%	-0.3%
EDIFICIO COMPLETO	kW	11.11	10.81	0.3	88.41	88.20	0.2	11.51	11.59	- 0.1
	%	102%	100%	1.8%	100%	100%	0.2%	99%	100%	-0.6%

SIM: Datos por simulación, LEV.FIS: Datos por levantamiento físico, DIF: Diferencia entre datos simulados y LEV.FIS

4. Conclusiones

Los cambios de la posición del sol en los días analizados tienen un efecto positivo mayor sobre la fachada norte ya que a mayor altitud y radiación solar, la iluminación de los espacios es mayor, sin embargo, una menor altitud beneficia a las ventanas en la fachada sur.

Las zonas más afectadas se encuentran situadas en la fachada sur, ya que son los espacios con menor relación de V-M y V-S, estos solo iluminan entre el 5% y 10% de área de suelo para las 3 posiciones solares analizadas; lo que concuerda que para esta orientación el estudio de Shaeri et al. (2019) se puede aplicar en esta ubicación geográfica.



Las zonas ubicadas en fachada norte tienen mayores beneficios principalmente por la radiación solar indirecta, sin embargo, la relación de V-M de las zonas mejor iluminada es complementada por la relación V-S de dichos espacios, esto representa que el 20% de V-M establecido por Shaeri et al. (2019), es solo un factor que proporciona iluminación óptima, y que la forma y posición de la ventana tiene un efecto directo para que la relación V-S, sea otro factor que influye al analizar el espacio.

La zona V1 es la mejor iluminada al cumplir con la norma mexicana y los estándares internacionales durante los días de cielo claro, su relación V-M y V-S es mayor al 20%, lo que establece una relación con el estudio de Shaeri, et al. (2019), sin embargo, hay otras zonas con iluminación óptima que tienen su vano posicionado al centro del muro sin importar la relación V-M.

Las zonas O2, O3, O4, O5 cumplen con la norma mexicana, al tener un promedio entre el rango de 300 lx a 900 lx, sin embargo, su relación V-M y V-S no permiten que cumpla con los estándares internacionales en todos los casos.

La forma rectangular vertical es mejor para aquellas zonas en las que el área de suelo tiene más profundidad, aquellas con rectangular horizontal son mejores para espacios más anchos que profundos, sin embargo, para vanos con dimensiones pequeñas (con relación V-M menor) la posición centrada a muro permite una iluminación del espacio más uniforme, independientemente de la forma del vano.

Los elementos de sombreado juegan un papel importante para el deslumbramiento en los espacios, ya que, si la proporción es adecuada al tamaño de la ventana, evita que la zona evaluada tenga un exceso de ganancias de calor.

El vidrio con mayor iluminación es el S-SC con transmitancia de 85%, ya que se obtienen 550 lx en el mejor escenario analizado del 21 de junio y de 498 lx en el caso promedio de 21 de marzo.

El vidrio con transmitancia de 41% S-FS (tinte gris), proporciona menor iluminación natural, ya que solo permite 255 lx para el caso del 21 de marzo.

El vidrio S-SB de espesor de vidrio sencillo de 9.5 mm y transmitancia de 41%, tiene un tinte azul cielo brillante y comparado con el mejor y peor escenario de iluminación, disminuye la iluminación natural a 318 lx 80% más que el peor caso.

El vidrio base S-SC con CGCS 0.82, tiene las mayores ganancias de calor y se requiere de un consumo energético anual de 2,181 kWh, mientras que el vidrio D-AC con CGCS de 0.23, disminuye las ganancias de calor por acristalamiento en 79%, ya que el consumo de energía por climatización se reduce a 457 kWh anuales.

El mejor sistema de acristalamiento para iluminación natural es el vidrio S-AC (vidrio sencillo tinte azul turquesa), ya que mantiene la iluminación 22% debajo del caso base y disminuye en 55% las ganancias de calor por acristalamiento.

El mejor sistema de acristalamiento para disminuir ganancias de calor es el vidrio D-S7SC (vidrio Low-E ultra claro), ya que disminuye estas ganancias en 84%, pero disminuye la iluminación natural en 41%, esto es un promedio de 286 lx, ligeramente por debajo de la norma mexicana.

Aquel sistema de acristalamiento sencillo que permite una mejor condición termo-energética es el S-AZ (tinte azul turquesa) ya que disminuye



las ganancias de calor en 55% y permite cumplir con la norma mexicana con un promedio de 373 lx.

El sistema de acristalamiento doble con mejor condición termo-energética es el D-AC (vidrio con bajo contenido en hierro), ya que mantiene una iluminación promedio de 361 lx y disminuye en 79% las ganancias de calor.

Se requiere continuar el estudio para modificar la relación V-S, V-M y forma del vano para establecer si realmente el vidrio tintado azul turquesa permite mejor iluminación que los sistemas de acristalamiento doble. Asimismo, si el espesor del vidrio tiene un efecto significativo para reducir las ganancias de calor en vidrios sencillos.

Además, un análisis de iluminación artificial en el que se establezca que, cuando la iluminación natural llegue a 300 lx, el sistema de iluminación artificial se apague, permitirá estimar el ahorro energético por iluminación artificial.

Finalmente, analizar el tamaño óptimo de los elementos de sombreado permitirá evitar deslumbramiento en los espacios.

Para concluir, este estudio permitió entender que es posible lograr iluminación natural óptima para climas cálido seco extremosos, y reducir las ganancias de calor en el espacio si se usa el sistema de acristalamiento ideal al espacio.

5. Agradecimientos

Agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo financiero para la realización del programa de posgrado en investigación; al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño por la formación, por último, más no menos

importante, a la empresa IBRS Consultores por permitir el acceso a sus instalaciones como caso de estudio.

Referencias

- [1] Instituto Well del Bienestar [IWB], "WELL Building Standard v2". Well Building Institute, 2019. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- [2] M. Canazei, W. Pohl, H. R. Bliem, M. Martini, y E. M. Weiss, "Artificial skylight effects in a windowless office environment", *Building and Environment*, vol. 124, pp. 69-77, nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.045>
- [3] X. Chen, X. Zhang, y J. Du, "Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing", *Building and Environment*, vol. 153, pp. 168-185, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.034>
- [4] M. Vieira Dias, A. Motamed, P. Sergio Scarazzato, y J.-L. Scartezzini, "Toward proper evaluation of light dose in indoor office environment by frontal lux meter", *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 835-840, sep. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.418>
- [5] A. Jamrozik et al., "Access to daylight and view in an office improves cognitive performance and satisfaction and reduces eyestrain: A controlled crossover study", *Building and Environment*, vol. 165, p. 106379, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106379>
- [6] C. Baglivo, M. Bonomolo, M. Beccali, y P. [Maria Congedo, "Sizing analysis of interior lighting using tubular daylighting devices", *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 179-186, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.138>
- [7] A. Al-Hemoud, L. Al-Awadi, A. Al-Khayat, y W. Behbehani, "Streamlining IAQ guidelines and investigating the effect of door opening/closing on concentrations of VOCs, formaldehyde, and NO2 in office buildings", *Building and Environment*, vol. 137, pp. 127-137, jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.029>
- [8] I. Turan, A. Chegut, D. Fink, y C. Reinhart, "The value of daylight in office spaces", *Building and Environment*, vol. 168, p. 106503, ene. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106503>



- [9] C. Navarro, "Sistematización y análisis de metodologías cualitativas para evaluar percepción social sobre adaptación al cambio climático: Informe final", INECC-CONACYT, Ciudad de México, 2017. [En línea]. Disponible en: http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/50/736_2017_Sistematizacion_analisis_metodologias_adaptacion_CC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] M. A. Fasi y I. M. Budaiwi, "Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates", *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 307-316, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.024>
- [11] A. Abdul, M. Abdul, y M. Ismail, "Relationship between Indoor Environmental Quality (IEQ), Occupant's Satisfaction and Productivity in GBI Rated Office Building using SEM-PLS", *Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities*, vol. 25 S, p. 319, ene. 2017.
- [12] H. J. Han et al., "An advanced lighting system combining solar and an artificial light source for constant illumination and energy saving in buildings", *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109404, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109404>
- [13] Y. Fang y S. Cho, "Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance", *Solar Energy*, vol. 191, pp. 7-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>
- [14] J. Potočnik y K. Mitja, "Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office", *Building and Environment*, vol. 171, p. 106627, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627>
- [15] S. Vaisi y F. Kharvari, "Evaluation of Daylight regulations in buildings using daylight factor analysis method by radiance", *Energy for Sustainable Development*, vol. 49, pp. 100-108, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.002>
- [16] P. Pilechiha, M. Mahdavejad, F. Pour Rahimian, P. Carnemolla, y S. Seyedzadeh, "Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency", *Applied Energy*, vol. 261, p. 114356, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
- [17] J. Ávila-Delgado, M. D. Robador, y J. A. Barrera-Vera, "Glazing selection procedure for office building retrofitting in the Mediterranean climate in Spain", *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101448, ene. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101448>
- [18] F. F. Hernández, J. M. López, J. M. Suárez, M. C. Muriano, y S. C. Rueda, "Effects of louvers shading devices on visual comfort and energy demand of an office building. A case of study", *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 207-216, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.136>
- [19] E. F. Triantafyllidou y A. G. Michael, "The impact of installing a concave curved profile blind to a glass window for visual comfort in office buildings", *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp. 269-276, ene. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.231>
- [20] D. Uribe, S. Vera, W. Bustamante, A. McNeil, y G. Flamant, "Impact of different control strategies of perforated curved louvers on the visual comfort and energy consumption of office buildings in different climates", *Solar Energy*, vol. 190, pp. 495-510, sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.027>
- [21] R. Azari, S. Garshasbi, P. Amini, H. Rashed-Ali, y Y. Mohammadi, "Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance", *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 524-534, ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.054>
- [22] L. Troup, R. Phillips, M. J. Eckelman, y D. Fannon, "Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings", *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109434, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- [23] J. Shaeri, A. Habibi, M. Yaghoubi, y A. Chokhachian, "The Optimum Window-to-Wall Ratio in Office Buildings for Hot-Humid, Hot-Dry, and Cold Climates in Iran", *Environments*, vol. 6, núm. 4, p. 45, abr. 2019. <https://doi.org/10.3390/environments6040045>
- [24] Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE], *ASHRAE Handbook*. 2013. Consultado: ene. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/2013-ashrae-handbook>



- [25] "Determination of optimal energy-efficient integrated daylighting systems into building windows", *Solar Energy*, vol. 209, pp. 258-277, oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.086>
- [26] R. Phillips, L. Troup, D. Fannon, y M. J. Eckelman, "Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings", *Building and Environment*, vol. 182, p. 107057, sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107057>
- [27] G. Feng, D. Chi, X. Xu, B. Dou, Y. Sun, y Y. Fu, "Study on the Influence of Window-wall Ratio on the Energy Consumption of Nearly Zero Energy Buildings", *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 730-737, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.003>
- [28] Ramírez, "Análisis comparativo de la calidad de la iluminación Interior de espacios escolares en función de la proporción vano muro: 2 casos de estudio en la UAM Azcapotzalco", Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información., 2017. Consultado: ene. 08, 2021. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5992>
- [29] Instituto Mexicano para la Competitividad A.C, "Índices del IMCO", 2016. <https://imco.org.mx/indices/el-estado-los-estados-y-la-gente/capitulos/el-estado-los-estados-y-la-gente/eficiencia-energetica> (consultado may 26, 2020).
- [30] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-024-ENER-2012", 2012. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5273553 (consultado nov. 25, 2019).
- [31] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-030-ENER-2016", 2016. http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6353/sener11_C/sener11_C.html (consultado nov. 25, 2019).
- [32] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-035-STPS-2018", 2018. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018 (consultado nov. 25, 2019).
- [33] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-025-STPS-2008", 2015. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404572&fecha=20/08/2015 (consultado nov. 25, 2019).
- [34] Organización Internacional de Normalización [ISO], "ISO 5725-1:1994(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions". <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en> (consultado oct. 13, 2020).
- [35] T. Lawrence, A. Darwich, y J. Means, ASHRAE GreenGuide: Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings, vol. 5. 2018. Consultado: jun. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: http://eds.a.ebscohost.com/eds/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzE4MjEzMzZfX0FO0?nobk=y&sid=cb86cdd8-95d3-49d1-99b1-8482d06c5f94@sessionmgr4007&vid=8&format=EB&lp_id=lp_vii&rid=0
- [36] Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], "LEED v4 for interior design and construction", US Green Building Council, Estados Unidos, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED_v4_IDC_07.25.19_current.pdf
- [37] S. Arias y D. Ávila, La iluminación natural en la arquitectura: en climas semitemplados. Guadalajara, Jalisco: Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño: Centro de Investigaciones en Ergonomía, 2004.
- [38] G. Rodríguez y Á. Francisco, "Proceso de estudio de iluminación natural para garantizar el confort lumínico en espacios interiores en la ciudad de Quito.", 2018, Consultado: nov. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/15359>
- [39] C. Resende, H. Artur, y A. Pinto, "Analysis of the influence of soil in the thermal performance of subterranean rooms in a ground-level building in São Paulo, Brazil, via EnergyPlus", *INGENIARE - Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 28, núm. 1, pp. 164-177, mar. 2020. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000100164>
- [40] A. García, "Manual de ayuda DesignBuilder en español". DesignBuilder, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.designbuilder-lat.com/soporte/manual-de-ayuda>
- [41] M. N. Assimakopoulos, N. Barmpareos, A. Pantazaras, T. Karlessi, y S. E. Lee, "On the comparison of occupancy in relation to energy consumption and indoor environmental quality: a case study", *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 875-884, oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.548>



[42] I. E. Bennet y W. O'Brien, "Office building plug and light loads: Comparison of a multi-tenant office tower to conventional assumptions", *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 461-475, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.050>

[43] Nadji, Mokhtari, y Slimani, "The natural lighting for energy saving and visual comfort in collective housing: A case study in the Algerian building context", *Journal of Building Engineering*, vol. 24, p. 100760, jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100760>

[44] Vitro Vidrio Arquitectónico, "Fichas Técnicas", 2020. <https://www.vitroglazings.com/es/informacion-tecnica/fichas-tecnicas/> (consultado ene. 06, 2021).



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)