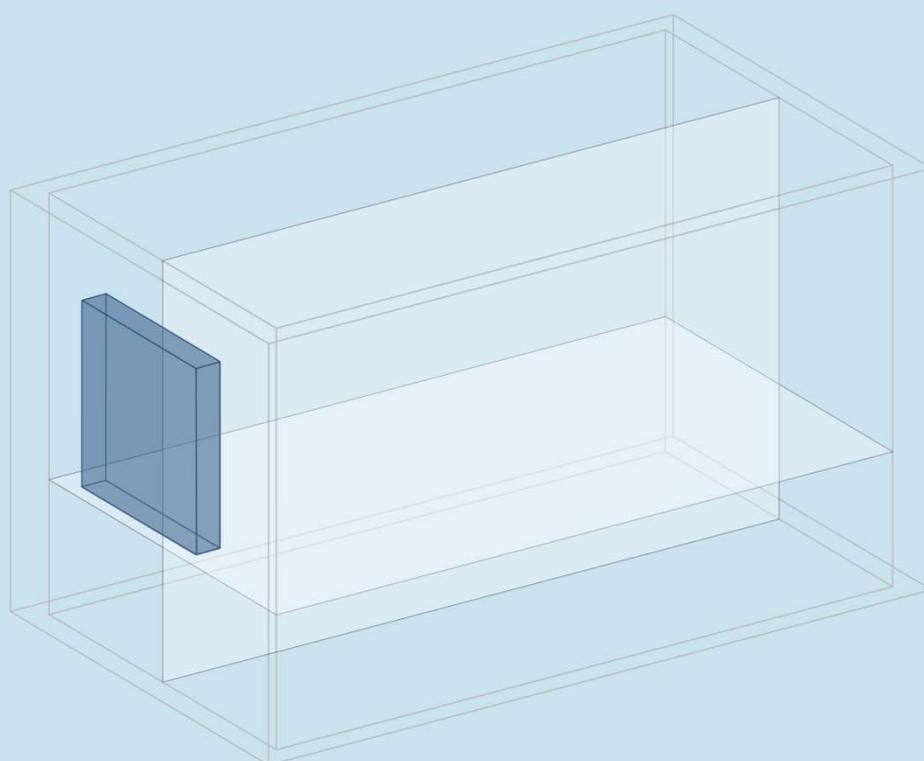


OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE HUECOS EN LA ARQUITECTURA RESIDENCIAL PLURIFAMILAR

BAJO PARÁMETROS ENERGÉTICOS, LUMÍNICOS Y DE SALUD



Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Autora: Paula Rodríguez Rejano

Tutor: Miguel Á. Campano Laborda
Grupo D, Curso 2022 - 2023



AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Construcción Arquitectónicas I, especialmente al grupo de investigación TEP130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad, por los conocimientos y la formación adquirida durante mi tiempo como alumna interna.

A mi tutor, Miguel Ángel Campano, por contagiarme las ganas de aprender y la pasión por esta carrera; por guiarme, darme el apoyo necesario y confiar en mí para la realización de este trabajo.

A mis padres y a mi hermana, por ser mi piedra angular y nunca dejarme tirar la toalla; todo lo que soy es gracias a vosotros.

A mis compañeras y amigas, Fátima y Cristina, por haber sido un apoyo imprescindible en este último año y en el desarrollo de este trabajo, por acompañarme siempre en este viaje.

RESUMEN

El panorama arquitectónico actual se encuentra claramente influenciado por los principios del ahorro energético y del bienestar de los ocupantes. En este contexto, el hueco, como uno de los elementos más importantes en el diseño arquitectónico, tiene una gran relevancia, ya que su diseño puede tener un impacto significativo en estas cuestiones.

En el diseño del hueco existen multitud de variables, siendo el tamaño, la proporción, la posición y la orientación, las que tienen una elevada repercusión en el consumo energético y en el acceso a la luz natural, además de poder afectar a la salud de los ocupantes. Analizar cómo influyen este conjunto de variables permite realizar una cuantificación relativa de beneficios según las condiciones del hueco en el ámbito residencial, siendo este el objetivo principal de este trabajo. Se pretende ofrecer una visión más completa de la realidad, complementando el diseño compositivo con criterios técnicos.

PALABRAS CLAVE

Hueco, arquitectura residencial, eficiencia energética, iluminación natural, bienestar.

ABSTRACT

The current architectural landscape is clearly influenced by the principles of energy efficiency and occupant well-being. In this context, windows, as one of the most important elements in architectural design, holds great relevance, as its design can have a significant impact on these issues.

When it comes to designing windows, there are multiple variables to consider, with size, proportion, position and orientation having a significant impact on energy consumption and access to natural light, as well as potentially affecting the health of occupants. Analysing how this set of variables influences allows for a relative quantification of benefits based on the conditions of the opening in the residential context, which is the main objective of this work. The aim is to provide a more comprehensive view of reality by complementing compositional design with technical criteria.

KEY WORDS

Window, residential architecture, energy efficiency, natural lighting, well-being.

ABREVIATURAS

| | |
|-----|----------------------------------|
| CLA | Luz Circadiana |
| CS | Estímulo Circadiano |
| CSA | Autonomía de Estímulo circadiano |
| CTE | Código Técnico de la Edificación |
| DA | Autonomía de Luz Día |
| E | Iluminancia |
| HE | Ahorro de Energía |
| HS | Salubridad |
| SCI | Severidad Climática en Invierno |
| SCV | Severidad Climática en Verano |
| SPD | Distribución Espectral del lugar |

INDICE

| | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 09 |
| 2. | HIPÓTESIS | 12 |
| 3. | OBJETIVOS | 14 |
| 3.1. | OBJETIVOS GENERALES | 14 |
| 3.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 4. | ESTADO DEL ARTE | 16 |
| 4.1. | EVOLUCIÓN DEL HUECO EN LA ARQUITECTURA RESIDENCIAL DESDE LOS AÑOS 40 HASTA LA ACTUALIDAD | 18 |
| 4.2. | CONTEXTO SOCIAL Y LABORAL EN LA VIVIENDA POST-PANDEMIA | 21 |
| 4.3. | IMPACTO DEL HUECO SOBRE EL CONFORT VISUAL Y EL BIENESTAR DE LOS OCUPANTES | 22 |
| 4.4. | IMPACTO DEL HUECO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO | 24 |
| 5. | METODOLOGÍA | 27 |
| 5.1. | DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y CONDICIONES DE CONTORNO | 29 |
| 5.2. | DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES PRESENTES EN EL ESTUDIO | 32 |
| 5.3. | DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES Y MÉTRICAS | 34 |
| 5.4. | SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y CÁLCULO | 38 |
| 5.5. | VALIDACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN | 40 |
| 5.6. | DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS DE TRABAJO | 42 |
| 5.7. | PROTOCOLO DE MODELACIÓN Y SIMULACIÓN | 44 |
| 6. | RESUMEN DE RESULTADOS | 51 |
| 6.1. | MODELO 0 | 52 |
| 6.2. | MODELO 1 | 54 |
| 6.3. | MODELO 2 | 56 |
| 6.4. | MODELO 3 | 58 |
| 6.5. | MODELO 4 | 60 |
| 6.6. | MODELO 5 | 62 |
| 6.7. | MODELO 6 | 64 |
| 6.8. | MODELO 7 | 66 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------|-----|
| 7. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 68 |
| 7.1. | INDICADOR DE DEMANDA ENERGÉTICA | 69 |
| 7.2. | INDICADOR DE AUTONOMÍA DE LUZ DÍA | 75 |
| 7.3. | INDICADOR DE AUTONOMÍA DE ESTIMULO CIRCADIANO | 79 |
| 8. | LIMITACIONES DEL ESTUDIO | 83 |
| 9. | CONCLUSIONES | 86 |
| 10. | FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | 90 |
| 11. | BIBLIOGRAFÍA | 92 |
| 12. | ANEXOS | 97 |
| 12.1. | GLOSARIO DE TÉRMINOS | 98 |
| 12.2. | LISTADO DE FIGURAS | 100 |
| 12.3. | LISTADO DE TABLAS | 103 |



01 INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El diseño arquitectónico de las últimas décadas se ha visto fuertemente influenciado por los principios sostenibles del ahorro de energía y del bienestar de los ocupantes, incorporándose ambas necesidades como importantes prestaciones a solventar dentro de las necesidades del diseño actual. Dentro de esta cuestión, el diseño de ventanas es uno de los elementos más relevantes, ya que además de ser un elemento compositivo clave en el proyecto arquitectónico, puede llegar a tener un impacto muy significativo en el consumo de energía, tanto a nivel térmico como de iluminación eléctrica, así como afectando al confort y salud de los ocupantes.

El uso adecuado de la iluminación natural es esencial para reducir el consumo de energía de iluminación eléctrica mientras que, al mismo tiempo, se maximiza el confort visual de los ocupantes, evitando asimismo el deslumbramiento [10], [14], [15], [17]. Además, un conveniente acceso a la luz natural mejora la percepción visual, el rendimiento y fomenta la sincronización del estímulo circadiano [26], [34]. Sin embargo, un tamaño reducido en los huecos de un recinto permite reducir la pérdida térmica a través de estos, mejorando el confort térmico y generando notables ahorros energéticos [3], [20].

Por todo esto, el diseño de huecos debe ser capaz de resolver simultáneamente las cuestiones mencionadas sobre exigencias de confort térmico, eficiencia energética y bienestar, a la vez que da respuesta a los condicionantes proyectuales y formales (Fig. 1). Por este motivo, realizar un estudio integrado en el que se analicen conjuntamente todas estas variables al mismo tiempo que se evalúa el impacto relativo del tamaño, la proporción y la posición de un hueco en un recinto dado, cobra un especial protagonismo como herramienta para el diseño proyectual, dado que permite a los arquitectos elaborar propuestas en las que se pueda optimizar el aprovechamiento lumínico con el menor impacto energético posible, combinándolo con la mejora de la salud de los usuarios.



Fig. 1. Esquema introducción

Este trabajo busca, por tanto, evaluar y cuantificar de forma relativa los beneficios del hueco según sus condiciones, proporcionando un criterio para diseñadores y arquitectos. Determinar cómo influyen ciertas variables en el diseño del hueco con el fin de optimizar el mismo combinando eficiencia, diseño y salud, puede tener un gran impacto y utilidad social.



02

HIPÓTESIS

2. HIPÓTESIS

Conociendo la situación actual en la que se encuentra inmerso el ámbito que aborda este trabajo, que combina la estética y la composición proyectual, la búsqueda del ahorro energético, la importancia del acceso a la luz natural y a la percepción del exterior. Todos estos factores son variables de especial relevancia en el diseño de la arquitectura actual; sin embargo, se identifica una problemática a la hora de encontrar cuáles son las relaciones compositivas más propicias en el diseño de huecos para lograr el balance energético, un adecuado acceso a la luz natural y promoción de la salud para cada situación, para así facilitar la toma de decisiones por parte del diseñador.

Así, la posibilidad de permitir a los arquitectos el conocer el grado de eficacia energética y de promoción a la salud por acceso a la luz natural que puedan tener sus soluciones de diseño de huecos, hace que se plantee la siguiente hipótesis:

¿Cómo afectan las variables geométricas y de posición del hueco en la Arquitectura al acceso a la luz natural, el rendimiento energético del edificio y a la salud de sus ocupantes? ¿Es posible optimizar el diseño del hueco para conseguir al mismo tiempo un buen rendimiento y promoverla salud de los ocupantes?



03

OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología que, mediante parámetros energéticos, lumínicos y de salud, permita la evaluación y optimización del diseño de los huecos en la vivienda plurifamiliar en áreas Mediterráneas.

3.1. OBJETIVOS GENERALES

OG_1 Desarrollar un método analítico para cuantificar la efectividad relativa en cuanto a salud, confort y e impacto energético de los huecos diseñados para edificios de vivienda plurifamiliar.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OE_1 Analizar el impacto relativo de un conjunto representativo de variables: Orientación, posición, proporción y tamaño.

OE_2 Diagnósis del caso de un dormitorio estándar en un edificio de vivienda plurifamiliar existente, ubicado en Sevilla.



04

ESTADO DEL ARTE

4. ESTADO DEL ARTE

“El hueco, en cuanto que elemento fundamental en la definición arquitectónica, concentra en su planteamiento y resolución, los aspectos fundamentales de esta disciplina. Concepto, trazado, cálculo, dimensionado, función, construcción... el trayecto entre intención y efecto se resume en su definición. El hueco es el elemento determinante del aspecto exterior de una edificación y sigue configurando, tanto su presencia como los efectos que produce, en una sucesión continua de escalas, la calidad arquitectónica de la obra. Es el punto donde se encuentra lo lejano y lo próximo; lo exterior y lo interior; lo grande y lo pequeño; lo vacío y lo lleno; lo general y lo particular; la idea y la materia. Es el límite en el cual la luz pasa a ser un material aprehensible, moldeable, manejable y, paradójicamente, el lugar a partir del cual la luz también se hace misterio.

Solamente la comprensión de la esencia de un problema permite alcanzar una solución en la que las partes y el todo formen una unidad inseparable que ponga de manifiesto la continuidad del pensamiento desde las ideas básicas hasta su materialización en los detalles más concretos.

La definición de los huecos de un edificio muestra la capacidad reflexiva de su autor así como su sensibilidad y destreza. En la medida en que los arquitectos sean capaces de concebir espacios habitables, inteligentes y bellos, y alcancen a materializarlos consecuentemente hasta los últimos detalles sin hacer dejación de su capacidad técnica y creativa, la arquitectura quedará a salvo de cualquier destino mediocre.”

Víctor López Cotelo [41].

El hueco es el elemento con mayor capacidad compositiva en la definición arquitectónica de un proyecto. Su diseño e integración son esenciales en todos los aspectos, ya que desde su origen se puede dar solución a multitud de cuestiones sin perder su carácter plástico e intención dentro de la composición.

La geometría, el tamaño y la proporción son características principales a la hora de llevar a cabo el diseño del hueco, son las claves que inducen a un resultado u otro.

4.1. EVOLUCIÓN DEL HUECO EN LA ARQUITECTURA RESIDENCIAL DESDE LOS AÑOS 40 HASTA LA ACTUALIDAD

Durante el periodo comprendido entre 1939 y 1979, en la mayoría de las grandes ciudades españolas tuvo lugar un proceso de crecimiento que provocó un impacto significativo en la configuración de la imagen actual de las mismas. Tras la Guerra Civil, la necesidad de reconstruir las ciudades más afectadas, asociado al déficit de vivienda existente, provocó una gran demanda que conllevó la primera gran producción de vivienda plurifamiliar social en España (Fig. 2).



Fig. 2. Obras en Carabanchel en 1957

Esta producción masiva de vivienda social, promovida principalmente por la Obra Sindical del Hogar y Arquitectura (OSHA), dio lugar a que se establecieran unas condiciones higiénicas mínimas donde, entre otros, se recogía la superficie mínima de hueco que debía tener cada estancia. Estas condiciones, junto con los métodos constructivos de la época, favorecieron la aparición de una composición de hueco altamente replicada en esta tipología edificatoria. Se trataba de unos huecos de proporción cuadrada, con una superficie modesta, que permitían tanto la ventilación como la iluminación de las estancias.

- Condiciones higiénicas mínimas que han de reunir las viviendas, de 1944: *“Toda pieza habitable de día o de noche tendrá ventilación directa al exterior por medio de un hueco con superficie no inferior al 1/6 de la superficie de la planta”* [8].

- Ordenanzas Provisionales de Viviendas de Protección Oficial, de 1970: *“La superficie de los huecos de iluminación de todas las habitaciones de las viviendas no será inferior a un décimo de la superficie de su planta. La superficie real de ventilación podrá reducirse hasta un tercio de la de iluminación”* [7].

En este contexto, el barrio de San Pablo, Sevilla, aparece como ejemplo de especial interés, puesto que alberga edificaciones de todas las etapas que engloban este periodo (Fig. 3 a 6). Asimismo, se trata de una de las mayores actuaciones que se han realizado en Sevilla en cuanto a vivienda social. Está compuesta por una barriada con una elevada densidad de vivienda, con una alta replicabilidad de tipologías y una trama urbana muy clara [38].



Fig. 3. C/ Garrotín (1963)



Fig. 4. Av. de Pedro Romero (1965)



Fig. 5. Av. Kansas City (1965)



Fig. 6. C/ Tesalónica (1976)

Desde los años 80 hasta la actualidad han aparecido cuestiones que han modificado las tendencias en el diseño del hueco como, por ejemplo, la búsqueda de una estética concreta, una mayor entrada de luz y una mayor relación con el exterior. Este nuevo panorama, preocupado por la composición y la estética, acompañado además de la aparición de nuevos métodos constructivos, dio lugar a la reinención progresiva del hueco (Fig. 7 y 8). Comienzan a aparecer en ese momento huecos de mayor tamaño, principalmente de proporción horizontal, debido a la calidad de la iluminación y la relación con el exterior.



Fig. 7. C/ Luis Arenas Ladislao (1987)



Fig. 8. Av. de la Buhaira (1998)

Sin embargo, en las últimas dos décadas, la tendencia compositiva del hueco en la arquitectura, particularmente en el ámbito residencial, se inclina hacia los huecos verticales de suelo a techo, retomando los huecos tradicionales asociados a la construcción de muros portantes (Fig. 9 a 11). Este tipo de hueco facilita el proceso constructivo, ya que la ventana se instala directamente en la propia estructura del edificio, reduciendo la duración de la obra y el coste económico. Sin embargo, las dimensiones en este tipo de huecos condicionan mucho la relación con el exterior y las vistas, así como el carácter de la luz y la iluminación dentro de la estancia.



Fig. 9. C/ Periodista Juan Tribuna (2011)



Fig. 10. C/ Enramadilla (2019)



Fig. 11. C/ Prof. Manuel Olivencia Ruiz (2013)

4.2. CONTEXTO SOCIAL Y LABORAL EN LA VIVIENDA POST PANDEMIA

Durante el confinamiento por COVID - 19 se dieron una serie de necesidades en los espacios de la vivienda que reflejaban sus carencias. La necesidad de adaptarse al teletrabajo, junto con que los huecos, balcones y patios fuesen la única interacción posible con el exterior, hizo que las prioridades en cuanto a la vivienda y al carácter de sus espacios cambiaran.

La funcionalidad de la vivienda ha sufrido un gran cambio conceptual, acrecentado a raíz del confinamiento. Inicialmente, esta se consideraba un lugar reservado para las actividades básicas del día a día, mientras que poco a poco ha ido albergando más y más actividades laborales, hasta que la situación de pandemia hizo subir estas de manera exponencial [40]. Para poder acoger estas funciones, los espacios de la vivienda destinados a tal fin (habitualmente, dormitorios y salones/salas de estar) deben cumplir con una serie de exigencias, no solo en términos de salud sino para garantizar la productividad y motivación del trabajador (Fig. 12). Existen estudios que analizan cómo ciertos aspectos espaciales o de calidad ambiental interior afectan en la salud de los ocupantes [42], [33]; sin embargo, una de las cuestiones más relevantes para garantizar el confort visual y un buen rendimiento es la cantidad de luz natural que entra en estos espacios [34]. Y para ello, y aunque estos documentos no se aplican a uso residencial vivienda, tanto el Real Decreto 486/2010 y la norma UNE-EN 12464-1/2022 pueden tabular unos umbrales mínimos recomendables para alcanzar unas buenas condiciones de iluminación laboral en estos entornos reconvertidos.

En cualquier caso, el correcto acceso a la luz natural no solo es una necesidad a nivel laboral, sino que a nivel fisiológico y mental también es muy importante. Durante el confinamiento, las ventanas de la vivienda fueron en muchos casos, el único medio que permitía la relación con el exterior, tanto visualmente como a nivel lumínico, influyendo en el estado anímico y psicológico. En estas circunstancias, se acentuó la necesidad de tener un hueco de ventana suficiente para permitir dicha relación con el exterior, promoviendo con ello la salud y el bienestar de los ocupantes (Fig. 13).



Fig. 12. Puesto de teletrabajo



Fig. 13. Relación con el exterior

4.3. IMPACTO DEL HUECO SOBRE EL CONFORT VISUAL Y EL BIENESTAR DE LOS OCUPANTES

La búsqueda de la relación con el exterior es una cuestión que siempre ha estado presente en la Arquitectura, no solo como aspecto proyectual del diseño sino como un parámetro que afecta anímicamente a los ocupantes del edificio. La relación entre el hombre y el paisaje es una cuestión innegable, y la arquitectura siempre ha sido participe de ella. A través de la Arquitectura se materializa dicha relación, que se potencia, limita y controla, dando la oportunidad al usuario de contemplar el entorno y formar parte de él (Fig. 14) [4].



Fig. 14. Relación hombre-paisaje

Los beneficios que ofrece la luz natural sobre el ser humano han sido ampliamente investigados, demostrando su influencia tanto en cuestiones físicas como psicológicas. El acceso adecuado a la luz natural en espacios interiores mejora no solo la percepción visual y el rendimiento [34], sino también fomenta la sincronización del estímulo circadiano [26]. En este sentido, las ventanas son los principales recursos para permitir que la luz del día entre en los edificios, a fin de promover unas adecuadas condiciones de salud y bienestar para los ocupantes [16], [39].

La exposición a la luz natural tiene un impacto positivo en el estado de ánimo y bienestar de los ocupantes, así como en su salud física. Se estimula la producción de serotonina, y la síntesis de vitamina D, regulando asimismo la secreción de melatonina y cortisol, además de fomentar una respuesta adecuada del sistema inmunológico [6], [34], [39].

- **RITMO CIRCADIANO**

Los ritmos circadianos son oscilaciones de las variables biológicas en un intervalo regular de unas 24 horas (Fig. 15). Están influenciados principalmente por la presencia o ausencia de la luz en el entorno, pero también están modulados por factores genéticos y ambientales. Uno de los componentes clave del ritmo circadiano es la liberación de hormonas, especialmente la melatonina y el cortisol [34]. La luz del día es una fuente de luz ideal para promover la respuesta circadiana, proporcionando la cantidad, el espectro y la duración adecuados para que el organismo se ajuste a la hora solar [21].

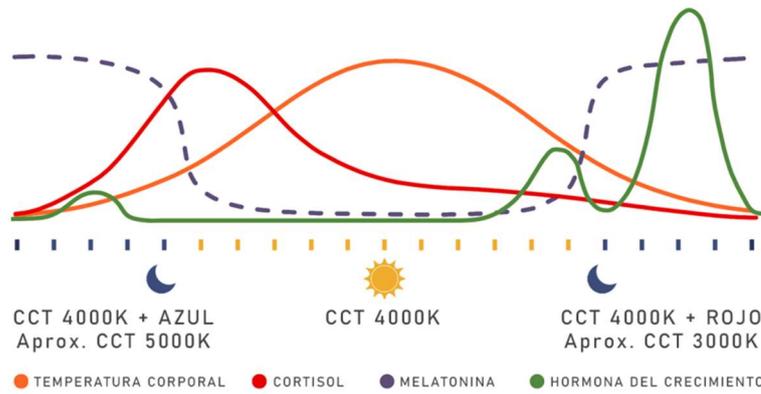


Fig. 15. Ciclo del estímulo circadiano en relación con el CCT

La supresión de melatonina, también conocida como estímulo circadiano (CS), sincroniza el ritmo circadiano y, por lo tanto, afecta el sueño, el estado de alerta y otras funciones biológicas [34], (Fig. 16). El espectro de luz, la duración, la intensidad y el tiempo interactúan con el sistema circadiano de manera diferente a como afectan al sistema visual. De este modo, la respuesta circadiana depende de la duración de la exposición a la luz. Sin acceso a la luz del día, la salud humana puede verse comprometida. El efecto de la interrupción del CS puede promover, entre otros, morbilidad, depresión y trastornos de sueño [25].

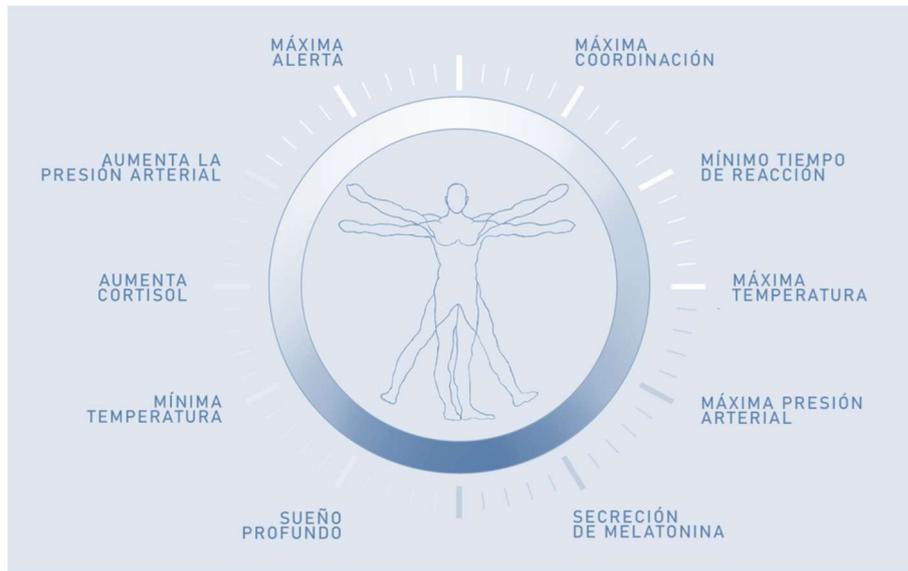


Fig. 16. Respuestas físicas del ritmo circadiano

4.4. IMPACTO DEL HUECO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

Bajo el paradigma de la crisis energética actual, el ahorro energético se ha convertido en una de las variables más importantes en el diseño de edificios. La búsqueda de la reducción de la demanda energética es clave, por lo que debe abordarse a través de un diseño pasivo de la envolvente de los edificios.

Analizar cómo influye el diseño del hueco en el consumo de energía de iluminación eléctrica y en la demanda energética por climatización, permite conocer cuáles son las claves de diseño que lo optimizan y logran un mejor rendimiento energético en el edificio. Hasta el momento no se ha realizado ningún estudio que analice ambas variables conjuntamente, por lo que resulta una cuestión de gran interés.

- **CONSUMO DE ENERGÍA DE ILUMINACIÓN ELÉCTRICA**

La iluminación eléctrica representa entre el 15% y el 30% del consumo energético total en edificios [12], [19], por lo que un uso adecuado de la iluminación natural es esencial para reducir el consumo de energía en iluminación eléctrica. Analizar cómo influye el correcto diseño de las ventanas es una cuestión crucial para conseguir un mayor ahorro energético a través del mayor aprovechamiento lumínico posible [10], [14], [15], [17]. La luz natural es una de las principales formas de ahorro de energía en este aspecto.

Utilizar métricas dinámicas tales como el *Daylight Autonomy* (DA), permite evaluar la reducción del consumo de energía que se consigue, al poder cuantificar la entrada de luz natural en los recintos a lo largo del tiempo. Para ello, el DA se define como el porcentaje de tiempo en que se alcanza un umbral mínimo de iluminancia solo con la luz del día. Por lo tanto, cuanto mayor es el valor de este indicador, menor es la dependencia sobre la iluminación eléctrica y, en consecuencia, menor será el consumo de energía [15], [17], (Fig. 17 y 18).

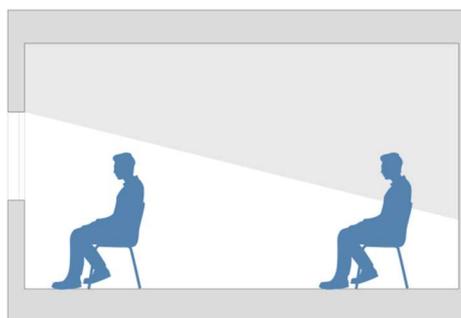


Fig. 17. Esquema nivel de iluminación natural insuficiente

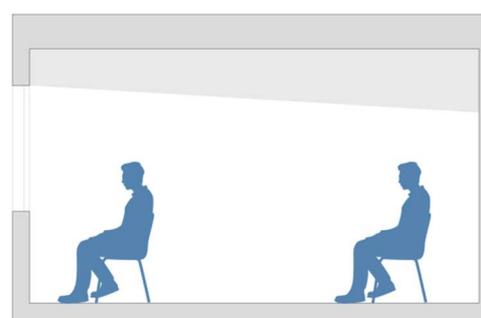


Fig. 18. Esquema nivel de iluminación natural óptimo

- ENVOLVENTE TÉRMICA Y DEMANDA POR CLIMATIZACIÓN

La forma más eficaz de reducir el consumo energético vinculado al confort térmico interior es mediante el control de la demanda energética asociada a las transferencias a través de la envolvente térmica. Es decir, si se actúa sobre los elementos que conforman el sistema de intercambio exterior-interior, se puede conseguir una reducción de la demanda energética [37].

En este aspecto, el parque edificatorio existente en España es ineficiente y con un consumo energético excesivo. Las aproximadamente 25 millones de viviendas existentes, de las cuales el 72% eran residencias principales, representaron el 19% de la energía total consumida en el país en el mismo año (Fig. 19 y 20) [20].

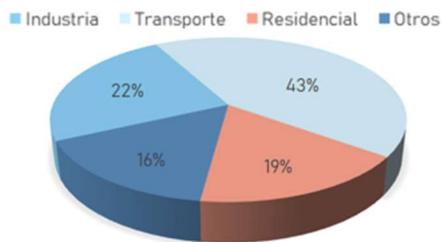


Fig. 19. Distribución energética, España

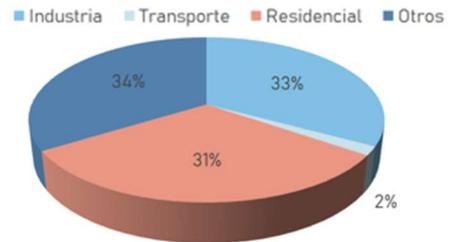


Fig. 20. Distribución energía eléctrica, España

Las ventanas están consideradas como un elemento crucial en el proceso de diseño de la envolvente debido a su relevancia en los procesos de intercambio de calor. Por este motivo, un correcto diseño permite reducir la pérdida energética, mejorando el confort térmico y produciendo importantes ahorros energéticos [3], [11], [20]. Cómo influye la relación entre la superficie acristalada y opaca de la fachada en el consumo energético de los edificios se ha estudiado en otras ocasiones [11]. Sin embargo, no se ha realizado junto con otras métricas de iluminación y salud, ni se han considerado al mismo tiempo otras variables como la proporción o la orientación.

La influencia de la protección solar en la demanda energética también es una cuestión muy relevante, especialmente en climas mediterráneos. En Sevilla, se puede mejorar la demanda energética entre un 10 y un 27% por unas buenas protecciones solares, según la orientación [3], (Fig. 21).

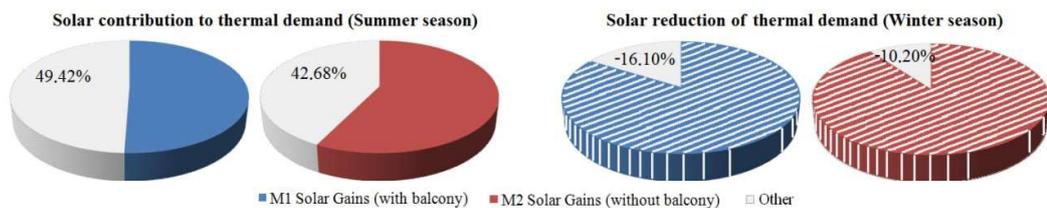


Fig. 21. Contribución de ganancias solares

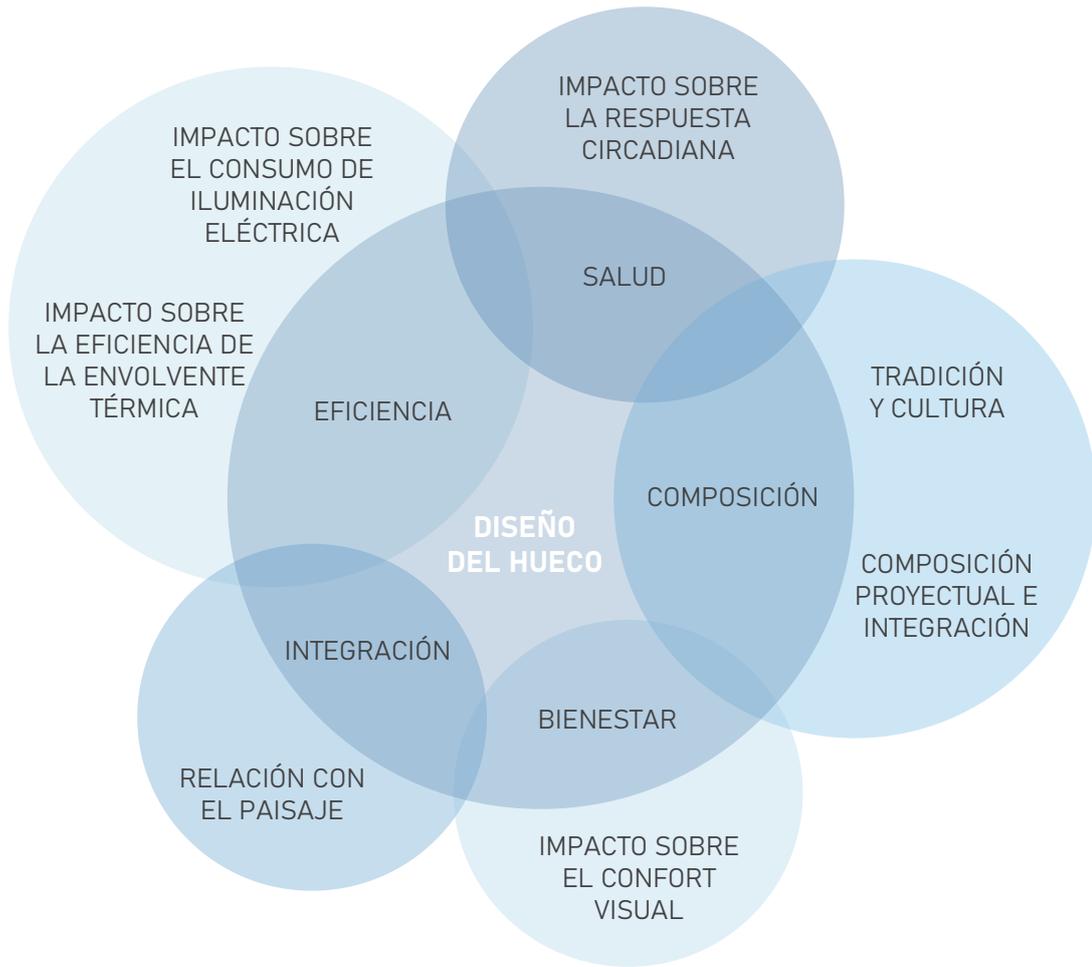


Fig. 22. Esquema Estado del Arte

A photograph of a staircase with a window overlooking a coastal landscape. The staircase is made of grey concrete steps and has a metal handrail on the right side. The window is tall and narrow, showing a view of the sea and distant hills under a hazy sky. The left side of the image is a solid light blue vertical bar.

05

METODOLOGÍA

5. METODOLOGÍA

La metodología empleada para conseguir los objetivos de este trabajo parte de una base multidisciplinar, elaborada por diferentes expertos dentro de la física, la bioquímica, la ingeniería y la arquitectura.

En primer lugar, se definirá el caso de estudio, así como los indicadores y variables seleccionadas para realizar esta investigación. Posteriormente, se plantearán diversas hipótesis de trabajo a partir de las variables elegidas, siendo aplicadas sobre el caso de estudio mediante varios procesos de simulación (Fig. 23).

Como aplicación metodológica, se plantea desarrollar una serie de hipótesis de huecos de ventana de un dormitorio estándar de un edificio residencial plurifamiliar, ubicado en Sevilla, para posteriormente analizarlas mediante el conjunto de métricas dinámicas de iluminación natural, eficiencia energética y bienestar de los ocupantes. De esta forma, se cuantificará tanto su comportamiento lumínico, energético y de respuesta circadiana, para poder clasificarlas según su eficiencia global.

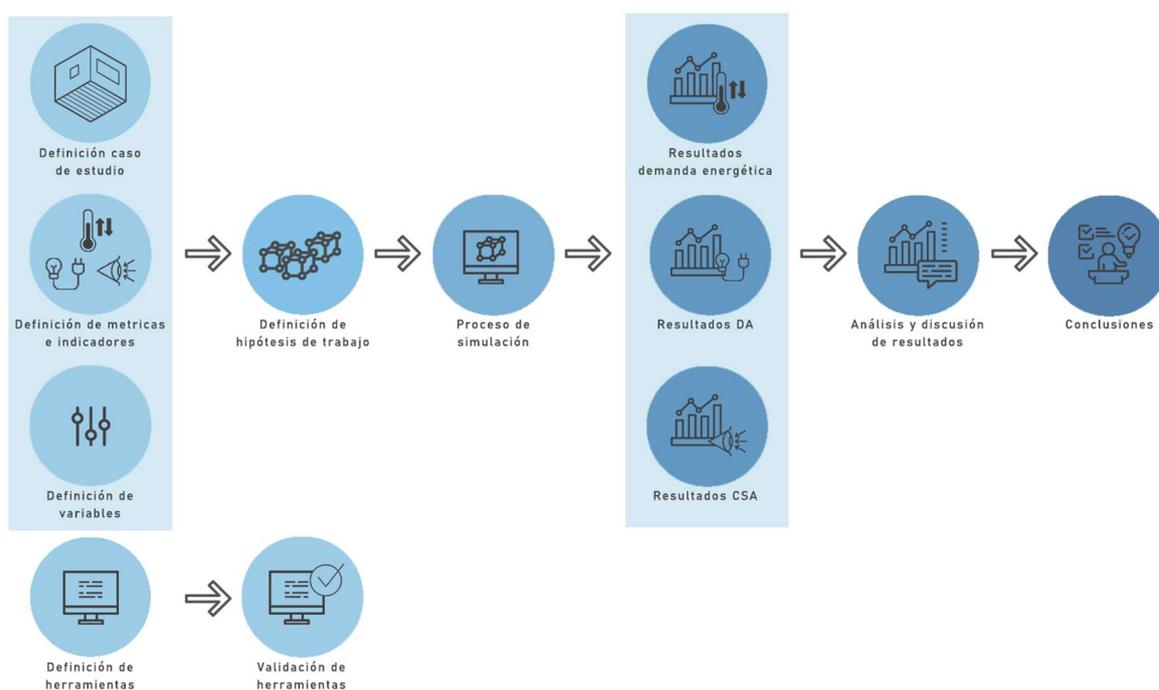


Fig. 23. Esquema Metodología

5.1. DEFINICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y SUS CONDICIONES DE CONTORNO

El caso de estudio seleccionado para este trabajo se encuentra situado en el barrio de San Pablo, Sevilla. Data de los años 60, periodo en el que la Obra Sindical del Hogar y Arquitectura (OSHA) aceleró el crecimiento de la periferia de las ciudades a fin de reconstruir los daños tras la guerra y mitigar el déficit de vivienda [38]. La elección de este entorno se debe a este motivo, ya que gran parte del grueso de las edificaciones residenciales plurifamiliares de Sevilla datan de este periodo, haciendo que los datos de esta investigación sean fácilmente extrapolables a otros casos (Fig. 24 y 25). Se trata de un bloque de pisos de cinco plantas con dos viviendas por planta; cada vivienda consta de salón-comedor, cocina, baño y tres dormitorios (Fig. 26). Se ha tomado una de las viviendas de la segunda planta, ya que de esta forma no influirá en los resultados el contacto con el terreno ni con la cubierta.

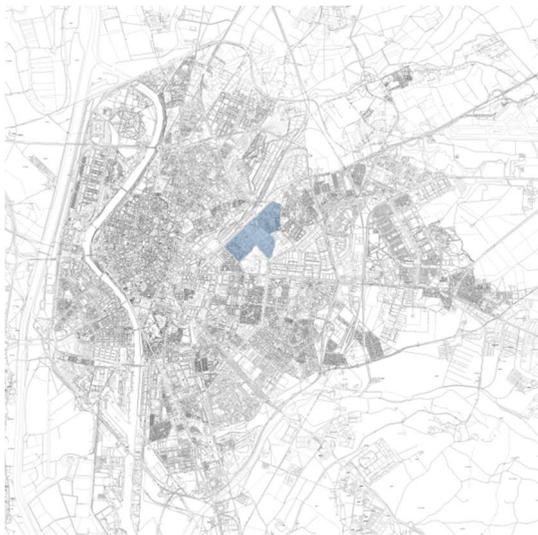


Fig. 24. Ubicación Barrio de San Pablo



Fig. 25. Ubicación caso de estudio

De esta vivienda, se ha seleccionado uno de sus dormitorios estándar, de dimensiones rectangulares, con 1,81 metros de ancho, 3,98 metros de largo, y 2,2 metros de altura libre. Esta estancia puede tener un carácter de dormitorio híbrido, en el cual existen áreas de descanso y áreas de trabajo, o funcionar únicamente como despacho (Fig. 27).



Fig. 26. Planta tipo vivienda escogida para caso de estudio

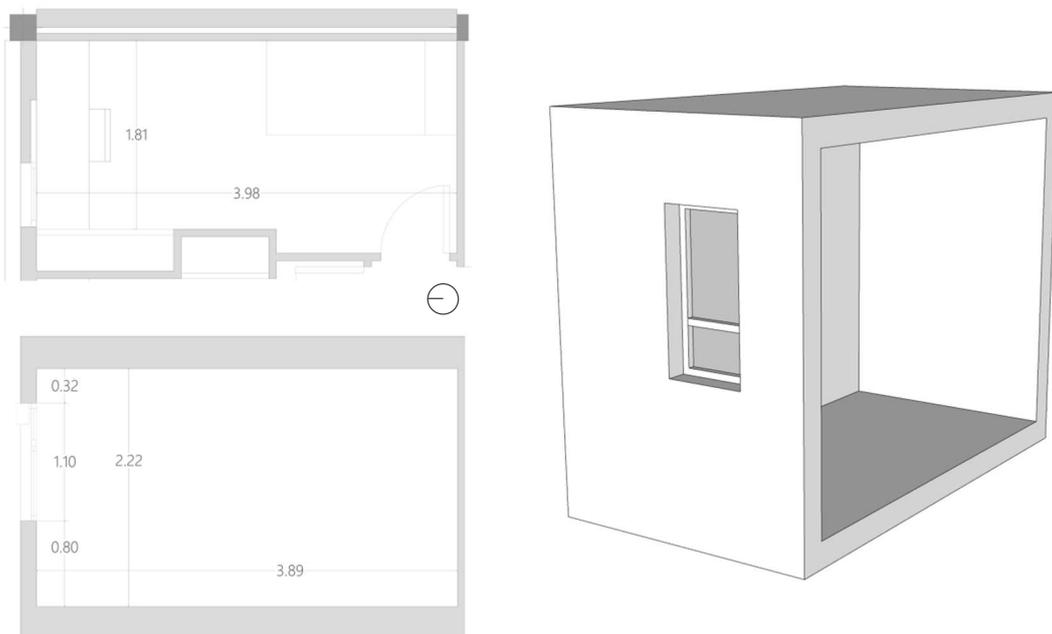


Fig. 27. Planimetría dormitorio caso de estudio

- **CONDICIONES CLIMÁTICAS**

La zona climática correspondiente a la ciudad de Sevilla es B4, que se refiere a un clima suave en invierno y muy cálido en verano [30]. El Código Técnico de la Edificación (CTE) [28] establece diferentes zonas climáticas según la severidad climática en invierno (SCI) y en verano (SCV). En este trabajo, se consideró esta zona climática para los análisis y la plantilla de datos meteorológicos denominada "clima español" para cálculos energéticos [13].

- **CONDICIONES DE USO**

Para este estudio, se han considerado las condiciones de uso y las cargas internas que establece el CTE en su documento de Ahorro de Energía HE [30], como se muestra en la Fig. 28.

Tabla a-Anejo D. Condiciones operacionales de espacios acondicionados en uso residencial privado

| | | Horario (semana tipo) | | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|
| | | 0:00-6:59 | 7:00-14:59 | 15:00-22:59 | 23:00-23:59 |
| Temperatura de Consigna Alta (°C) | Enero a Mayo | – | – | – | – |
| | Junio a Septiembre | 27 | – | 25 | 27 |
| | Octubre a Diciembre | – | – | – | – |
| Temperatura de Consigna Baja (°C) | Enero a Mayo | 17 | 20 | 20 | 17 |
| | Junio a Septiembre | – | – | – | – |
| | Octubre a Diciembre | 17 | 20 | 20 | 17 |

Tabla b-Anejo D. Perfil de uso de espacios en uso residencial privado

| | | Horario (semana tipo) | | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|
| | | 0:00-6:59 | 7:00-14:59 | 15:00-22:59 | 23:00-23:59 |
| Carga interna debida a la ocupación (parte sensible) (W/m²) | Laboral | 2,15 | 0,54 | 1,08 | 2,15 |
| | Sábado y Festivo | 2,15 | 2,15 | 2,15 | 2,15 |
| Carga interna debida a la ocupación (parte latente) (W/m²) | Laboral | 1,36 | 0,34 | 0,68 | 1,36 |
| | Sábado y Festivo | 1,36 | 1,36 | 1,36 | 1,36 |
| Carga interna debida a la iluminación (W/m²) | Laboral, Sábado y Festivo | 0,44 | 1,32 | 1,32 | 2,2 |
| Carga interna debida a los equipos (W/m²) | Laboral, Sábado y Festivo | 0,44 | 1,32 | 1,32 | 2,2 |

Fig. 28. Condiciones operacionales y perfil de uso extraídas del CTE DB HE Anejo D

Se han seleccionado estas condiciones por ser las aplicables en el proceso de verificación normativo del territorio español. No obstante, estas condiciones de uso propuestas desde la normativa pueden divergir notablemente de la realidad andaluza. Existen diversos estudios [35], donde se analizan las condiciones de uso, entre las que destaca la operación de sistemas de tratamiento térmico y la austeridad energética; en ellos, se puede apreciar la gran disparidad en el comportamiento y consumo en viviendas, presentando asimismo modelos predictivos con patrones de uso y consumo para los futuros escenarios energéticos [36].

5.2. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES PRESENTES EN EL ESTUDIO

La elección de las variables para realizar esta investigación se debe a que diversos estudios previos han mostrado su relevancia en la definición de las características del hueco, puesto que son claves para su diseño [14] [15], [22]. La relación visual con el entorno, la cantidad de luz natural que penetra en la estancia, así como la cualidad de la luz y la forma en la que esta ilumina las estancias dependen de estas variables. Finalmente se decide analizar en este estudio el tamaño, la proporción, la posición y la orientación.

Se ha dejado para posteriores trabajos otros igualmente relevantes, como son la distribución y tamaño del recinto, la localización, la evolución de las condiciones climáticas, los obstáculos remotos y el uso de protecciones solares, así como la variación de umbrales de iluminancia y los horarios de ocupación

- **TAMAÑO**

Se entiende como el porcentaje de hueco sobre el total de la fachada. La ventana actual tiene un tamaño de un 12%, por lo que se plantea aumentar el tamaño de la ventana a un 22% y a un 32%, al tratarse de valores en los rangos habituales existentes en la edificación residencial plurifamiliar y permite que las conclusiones sean válidas para una amplia multitud de casos.

| TAMAÑO | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 12% = 0,66 m ² | 22% = 1,21 m ² | 32% = 1,76 m ² |

Tabla 1. Tamaño de huecos

- **PROPORCIÓN**

Se plantean dos proporciones de hueco adicionales, con el fin de comparar resultados y analizar cuál de ellas tiene una mejor respuesta y funcionamiento, a igualdad de superficie total. Para ello, se seleccionan dos de las más habituales en viviendas del sur de España; por un lado, se plantea una proporción más apaisada, que surge a raíz ampliar hacia los laterales el hueco existente. Por otro lado, se opta por seleccionar un hueco de suelo a techo, lo que da lugar a una proporción mucho más esbelta.

| PROPORCIÓN | |
|------------|------------------------|
| Horizontal | Vertical (suelo-techo) |

Tabla 2. Proporción de huecos

- **POSICIÓN**

La ventana original se encuentra desplazada del centro de la estancia, una posición habitual en esta tipología edificatoria. Así, se plantea una opción en la que la ventana se encuentre centrada en la estancia, aplicándose únicamente al hueco de menor tamaño, ya que es en el que mayor diferencia se podrá apreciar en la obtención de resultados.

| POSICIÓN | |
|----------|-------------|
| Centrada | Descentrada |

Tabla 3. Posición de huecos

- **ORIENTACIÓN**

Se eligen dos orientaciones, Norte y Sur, puesto que son las más significativas, al ser las que tienen una mayor diferencia de incidencia solar a lo largo del año.

| ORIENTACIÓN | |
|-------------|-----|
| Norte | Sur |

Tabla XX. Orientación de huecos

5.3. DEFINICIÓN DE INDICADORES Y MÉTRICAS

Con el fin de evaluar cuestiones sobre eficiencia energética e iluminación natural se han escogido los indicadores y métricas que mejor se adaptan a este propósito.

- **DEMANDA ENERGÉTICA POR CLIMATIZACIÓN**

Se trata de un indicador que permite estudiar las cargas térmicas que tienen lugar tanto en el periodo de refrigeración como en el de calefacción. El documento sobre Ahorro de Energía (HE) del CTE define la demanda energética como “energía útil necesaria que tendrían que proporcionar los sistemas técnicos para mantener en el interior del edificio unas condiciones definidas reglamentariamente. Se puede dividir en demanda energética de calefacción, de refrigeración, de agua caliente sanitaria (ACS), de ventilación, de control de la humedad y de iluminación” [30].

De este modo, se puede conocer el impacto del hueco en la envolvente térmica del edificio y cómo influye en la demanda energética anual del mismo.

La demanda térmica anual puede evaluarse en total por espacio, vivienda o edificio (kWh/año), o por unidad de superficie (kWh/m²año), siendo este último el más habitualmente utilizado, por ser más sencilla y directa su comparación entre modelos.

- **ILUMINANCIA**

La iluminancia (E) es una magnitud que se define como “la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área”. Se trata de la cantidad de luz que incide en un plano (Fig. 29), por lo que cuanto mayor sea el valor de la iluminancia, mayor será la visibilidad y la iluminación para desarrollar una actividad concreta dentro de un recinto [17]. Según qué actividad se quiera desarrollar, existen unos niveles de iluminancia mínimos exigidos, recogidos en la UNE-EN 12464-1/2022.

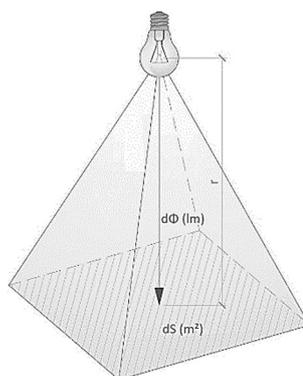


Fig. 29. Iluminancia

- AUTONOMÍA DE LUZ DÍA (DA)

La Autonomía de Luz Día (DA, por sus siglas en inglés, “*Daylight Autonomy*”), es una métrica de iluminación dinámica que se define como “el porcentaje del tiempo ocupado de una estancia en la que la luz natural en su interior alcanza el nivel de iluminancia suficiente para llevar a cabo las tareas necesarias” [9]. Es decir, cuanto más elevado sea el valor de este indicador, menor será el tiempo del que se dependa de la iluminación eléctrica para suplir ese déficit lumínico.

Este indicador permite conocer si la luz natural en un punto concreto del interior de una estancia es suficiente para desarrollar una actividad en concreto (Fig. 30). Un valor cercano al 100% significa que la iluminación eléctrica no es necesaria, mientras que un valor cercano al 0% significa una dependencia total de la iluminación eléctrica. Se considera que un valor del 50% es adecuado para un recinto.

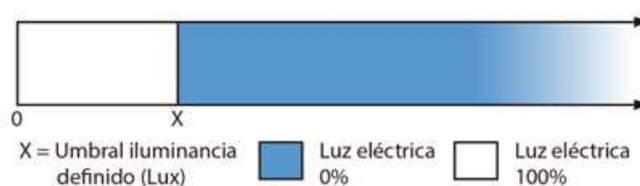


Fig. 30. Autonomía de Luz Día

A fin de evaluar si la incidencia de luz natural es suficiente para desempeñar labores similares a una oficina, donde la normativa UNE-EN 12464-1/2022 y el Real Decreto 486/2010 exigen un nivel de iluminancia mínimo de 500 lux. Asimismo, se define un horario específico en el que evaluar dicha incidencia de luz, de 08:00 a 17:00, que es habitual para el trabajo de oficina [24].

- DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ESPECTRAL (SPD)

La distribución de Potencia Espectral (SPD, por sus siglas en inglés, “*Spectral Power Distribution*”) de una fuente de luz, se define como la potencia por unidad de área por unidad de longitud de onda de dicha fuente de luz. Así, para la luz blanca visible, está referida a un espectro concreto de varios colores de luz, con longitudes de onda que van desde los 380 nm (violeta) a los 760 nm (rojo), como se puede ver en la Fig. 31, en la que se recoge el SPD relativo de algunas de las fuentes de luz más cotidianas.

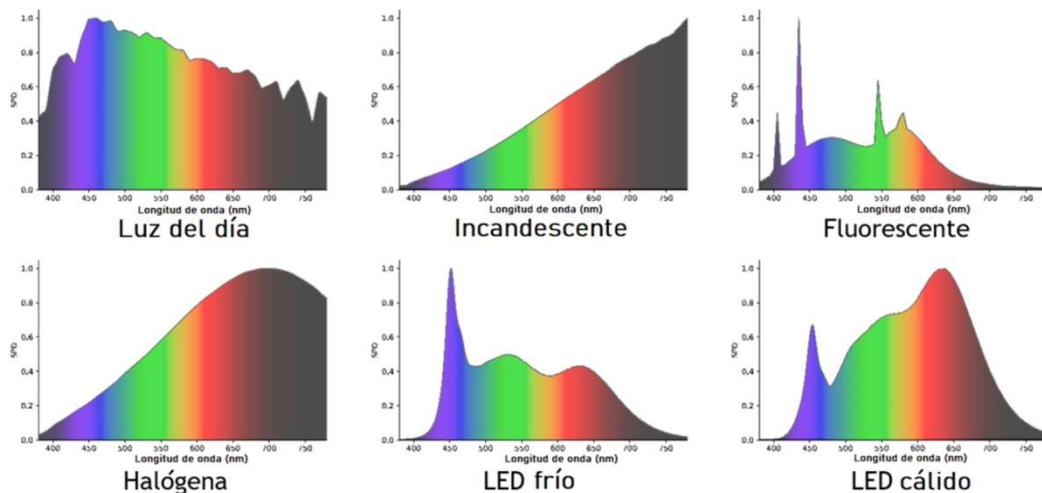


Fig. 31. *SPD relative* de diversas fuentes de luz

- **AUTONOMÍA DE ESTIMULO CIRCADIANO (CSA)**

La Autonomía de Estímulo Circadiano (CSA, por sus siglas en inglés, “*Circadian Stimulus Autonomy*”), se define como “el porcentaje de tiempo a lo largo del año en el que la luz natural cumple con un umbral específico de estímulo circadiano durante la mañana” [18]. Consiste en determinar la cantidad mínima de luz que, al ser captada por el ojo humano, genera una adecuada respuesta al ritmo circadiano. El cálculo de CSA se fundamenta en el enfoque del DA, ya que al conocer la distribución espectral de potencia (SPD) de la luz percibida, se puede definir el umbral de iluminancia correspondiente a un valor específico deseado de CS.

Este indicador permite analizar el impacto de la luz natural en el ser humano. Un valor cercano (aproximadamente) al 50% significa que la cantidad promedio de luz natural a lo largo del año es suficiente para generar una respuesta al estímulo circadiano adecuada, mientras que cualquier valor inferior a este porcentaje significa un déficit lumínico que no favorece a la respuesta circadiana deseada.

El valor del CS está principalmente relacionado a la distribución espectral del lugar (SPD) y a la iluminancia percibida por los ocupantes mediante la luz circadiana (CLA). Este valor es proporcional al nivel de supresión de melatonina provocado por la luz natural, variando de un 0% a un 70%. Según diversos estudios, se ha establecido que un 40% es un valor adecuado para promover una correcta sincronización del ritmo circadiano [25].

Teniendo en cuenta el SPD y el valor mínimo del 40% para el CS, se muestran los valores de iluminancia necesarios para una correcta sincronización del ritmo circadiano. Con un valor de iluminancia de 300 lux, proveniente exclusivamente de la luz natural, es posible obtener un valor de CS entre 35% y 45%, dependiendo de las condiciones climáticas y la ubicación (Fig. 32 y 33) [22]. Por lo tanto, se establece ese valor como umbral de iluminancia de CSA para los casos de estudio.

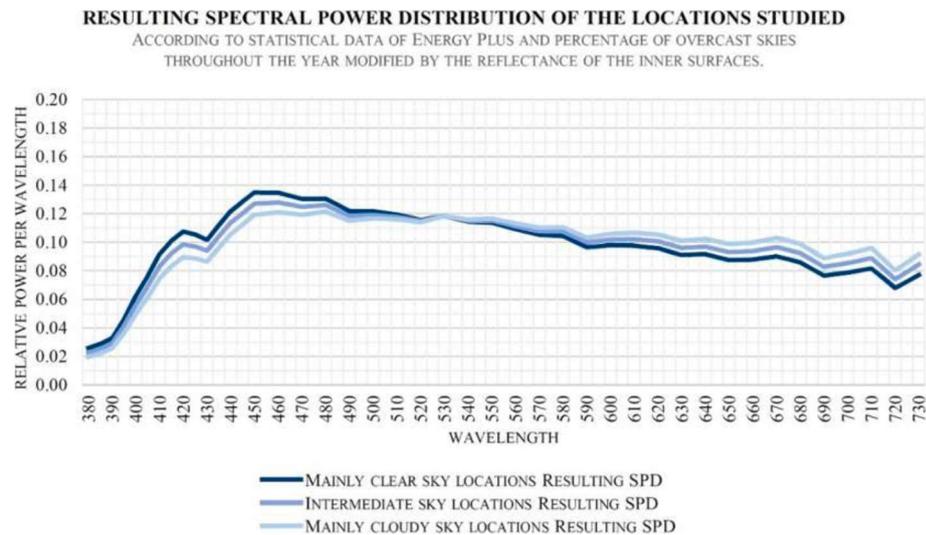


Fig. 32. SPD resultantes

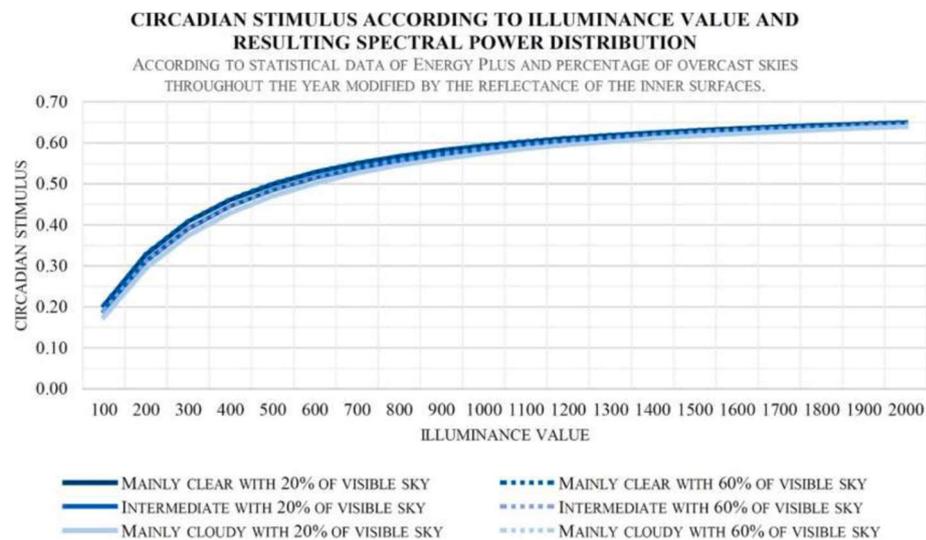


Fig. 33. CS obtenido por valor de iluminancia

Por lo general, el CSA se calcula estableciendo las horas de ocupación preferentemente a primera hora de la mañana, de 08:00 a 09:00, que es el tiempo adecuado para que la luz pueda influir en la regulación de la melatonina.

5.4. SELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y CÁLCULO

- *IFC Builder* y *CYPETHERM HE*

Para el estudio sobre la demanda energética por climatización, se ha optado por dos herramientas informáticas. En primer lugar, se ha recurrido a la herramienta de modelado *IFC Builder* (Fig. 34), a fin de generar el modelo *BIM* de cada hipótesis de trabajo. Posteriormente, se ha utilizado el programa *CYPETHERM HE* (Fig. 35) para el cálculo de la demanda energética por climatización, una herramienta cuyo motor de cálculo *EnergyPlus*, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE) está ampliamente reconocido y validado a nivel mundial.



Fig. 34. *IFC Builder*



Fig. 35. *CYPETHERM HE Plus*

- *Rhinoceros* y *Climate Studio*

Para el estudio sobre la cantidad de luz natural que incide en la estancia se ha trabajado en primer lugar en el programa *Rhinoceros* (Fig. 36), para la construcción del modelo *BIM* de cada hipótesis de trabajo. Posteriormente, se ha utilizado la extensión del programa *Climate Studio* (Fig. 37) para el cálculo del DA, una herramienta cuyo motor de cálculo *Radiance* está ampliamente reconocido y validado a nivel mundial.



Fig. 36. *Rhinoceros*



Fig. 37. *ClimateStudio*

- *Microsoft Excel*

Tanto para tratar los resultados obtenidos en los programas anteriormente mencionados como para el cálculo del CSA se ha utilizado la herramienta de cálculo *Microsoft Excel*. Se han elaborado varias hojas de cálculo que permiten el tratamiento de datos de los indicadores de demanda energética arrojados por *CYPETHERM HE*, así como los valores de cálculo de *Climate Studio*, tanto de DA en plano horizontal como la obtención de los de CSA en base a los datos obtenidos del DA en plano vertical (Fig. 38).

| y (m) | MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 2 | MODELO 3 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 6 | MODELO 7 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,61 | 0,86 | 0,90 | 0,93 | 0,93 | 0,78 | 0,86 | 0,90 | 0,92 |
| 1,12 | 0,82 | 0,83 | 0,90 | 0,92 | 0,75 | 0,77 | 0,86 | 0,90 |
| 1,63 | 0,77 | 0,77 | 0,86 | 0,89 | 0,69 | 0,72 | 0,83 | 0,87 |
| 2,14 | 0,69 | 0,76 | 0,84 | 0,87 | 0,64 | 0,69 | 0,79 | 0,85 |
| 2,65 | 0,67 | 0,65 | 0,81 | 0,85 | 0,52 | 0,57 | 0,77 | 0,84 |
| 3,16 | 0,65 | 0,59 | 0,76 | 0,84 | 0,50 | 0,51 | 0,75 | 0,83 |
| 3,67 | 0,53 | 0,53 | 0,76 | 0,82 | 0,48 | 0,50 | 0,71 | 0,82 |
| | 0,71 | 0,72 | 0,84 | 0,87 | 0,62 | 0,66 | 0,80 | 0,86 |

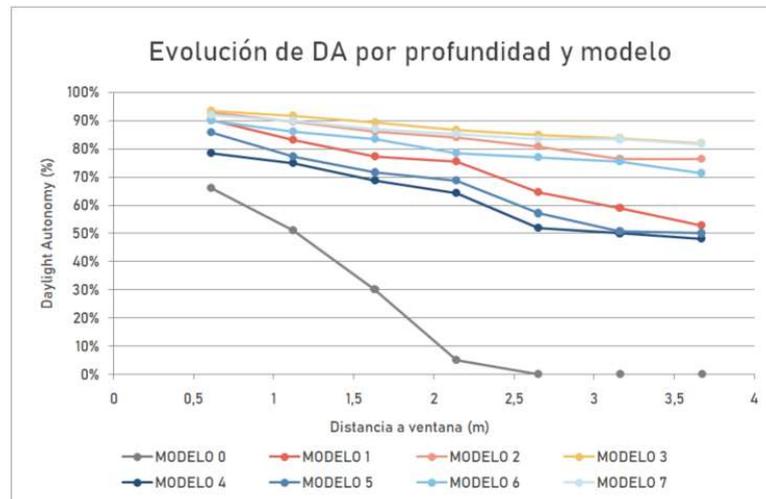


Fig. 38. Hoja *excel* utilizada para el cálculo del CSA

5.5. VALIDACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y CÁLCULO

Debido a que el desarrollo de esta investigación se realiza mediante simulaciones en programas informáticos, es preciso validar los resultados obtenidos mediante una comparativa con mediciones in situ o través de cálculos previamente validados, con el fin de garantizar su veracidad.

- **CYPETHERM HE**

La herramienta utilizada para el cálculo de la demanda energética, *CYPETHERM HE*, se encuentra reconocida y validada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y por el Ministerio de Fomento [27]. Asimismo, su motor de cálculo, *EnergyPlus*, también se ha validado anteriormente una celda de ensayo situada en Sevilla [1] (Fig. 39), así como en estudios energéticos en viviendas plurifamiliares de Sevilla [27], [2], utilizando en todos los casos unas condiciones de contorno similares a las del presente trabajo (Fig. 40 y 41).

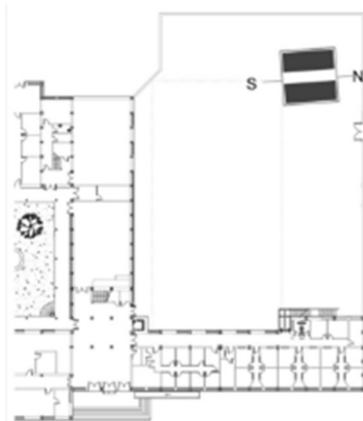


Fig. 39. Celda de ensayo en Sevilla



Fig. 40. Viv. modelizada en Cross-Pirotecnia

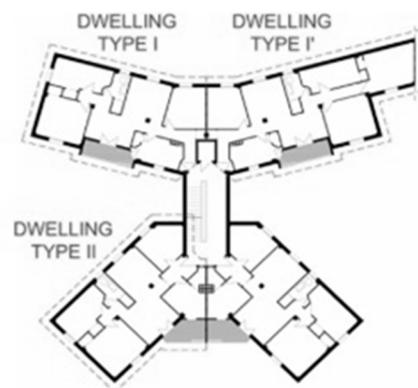


Fig. 41. Viv. modelizada en el Plantinar

- *Climate Studio*

El motor de cálculo de *Climate Studio*, denominado *Radiance*, fue desarrollado el Departamento de Tecnologías de la Construcción del *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Este motor cuenta con diversos estudios de validación para recintos similares en las condiciones climáticas de Sevilla, tanto en oficinas [17], [22] y aulas docentes [16], [5], [24], así como con la anteriormente citada celda de ensayo ubicada en Sevilla [23], mostrada en la Fig. 42, que emula una habitación de vivienda por sus dimensiones y tipo de hueco.

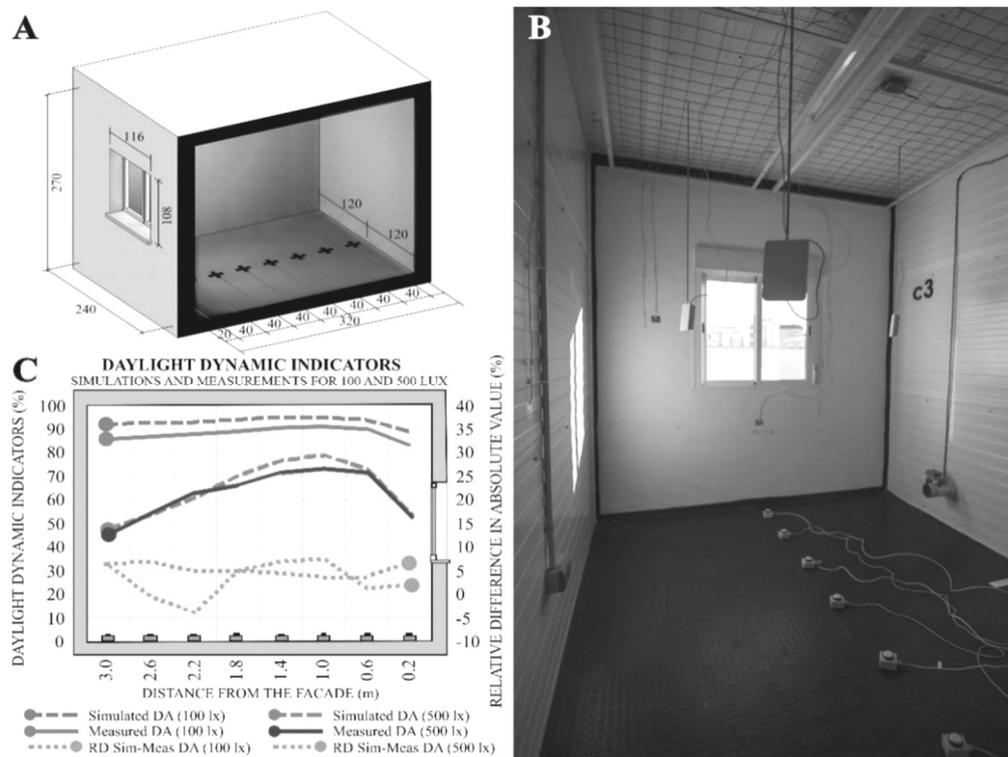


Fig. 42. Estudio de validación del motor *Radiance* por comparación con celda de ensayo en Sevilla

5.6. DEFINICIÓN DE LAS HIPÓTESIS DE TRABAJO

Definidas las variables presentes en el estudio, se plantea una serie de hipótesis de trabajo mediante la combinatoria de las mismas. Las diferentes hipótesis de trabajo se desarrollan como diferentes modelos, los cuales se introducirán en las herramientas de simulación y cálculo.

| TAMAÑO | PROPORCIÓN | POSICIÓN | ORIENTACIÓN | INDICADORES |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------|
| 12% (0,66 m ²) 22% (1,21 m ²) 32% (1,76 m ²) | H = Horizontal V = Vertical | C = Centrada D = Descentrada | N = Norte S = Sur | DE DA CSA |

Tabla. 7. Variables presentes en el estudio

| MODELO | TAMAÑO | PROPORCIÓN | POSICIÓN |
|--------|----------------------------|--------------|-------------|
| 0 | 12% (0,66 m ²) | Horizontal | Descentrada |
| 1 | 12% (0,66 m ²) | Horizontal | Centrada |
| 2 | 22% (1,21 m ²) | Horizontal | Centrada |
| 3 | 32% (1,76 m ²) | Horizontal | Centrada |
| 4 | 12% (0,66 m ²) | V = Vertical | Descentrada |
| 5 | 12% (0,66 m ²) | V = Vertical | Centrada |
| 6 | 22% (1,21 m ²) | V = Vertical | Centrada |
| 7 | 32% (1,76 m ²) | V = Vertical | Centrada |

Tabla. 8. Modelos existentes y sus características

| 48 HIPÓTESIS DE TRABAJO | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 12 HD (M0) N - DE | 12 HD (M0) N - DA | 12 HD (M0) N - CSA |
| 12 HC (M1) N - DE | 12 HC (M1) N - DA | 12 HC (M1) N - CSA |
| 22 HC (M2) N - DE | 22 HC (M2) N - DA | 22 HC (M2) N - CSA |
| 32 HC (M3) N - DE | 32 HC (M3) N - DA | 32 HC (M3) N - CSA |
| 12 VD (M4) N - DE | 12 VD (M4) N - DA | 12 VD (M4) N - CSA |
| 12 VC (M5) N - DE | 12 VC (M5) N - DA | 12 VC (M5) N - CSA |
| 22 VC (M6) N - DE | 22 VC (M6) N - DA | 22 VC (M6) N - CSA |
| 32 VC (M7) N - DE | 32 VC (M7) N - DA | 32 VC (M7) N - CSA |
| 12 HD (M0) S - DE | 12 HD (M0) S - DA | 12 HD (M0) S - CSA |
| 12 HC (M1) S - DE | 12 HC (M1) S - DA | 12 HC (M1) S - CSA |
| 22 HC (M2) S - DE | 22 HC (M2) S - DA | 22 HC (M2) S - CSA |
| 32 HC (M3) S - DE | 32 HC (M3) S - DA | 32 HC (M3) S - CSA |
| 12 VD (M4) S - DE | 12 VD (M4) S - DA | 12 VD (M4) S - CSA |
| 12 VC (M5) S - DE | 12 VC (M5) S - DA | 12 VC (M5) S - CSA |
| 22 VC (M6) S - DE | 22 VC (M6) S - DA | 22 VC (M6) S - CSA |
| 32 VC (M7) S - DE | 32 VC (M7) S - DA | 32 VC (M7) S - CSA |

Tabla. 9. Hipótesis de trabajo

Para facilitar la nominación de los modelos a la hora de obtener los resultados y realizar su posterior análisis, se designan 8 modelos según las variables de tamaño, proporción y posición (Fig. 43). Estos 8 modelos se estudiarán en las dos orientaciones mencionadas y analizando los tres indicadores seleccionados, resultando así las 48 hipótesis de trabajo.

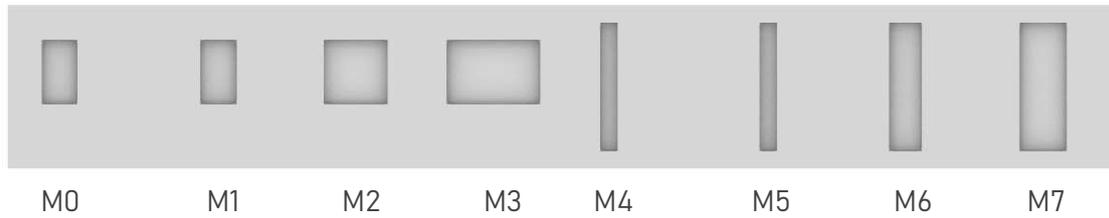


Fig. 43. Alzado modelos simulación

5.7. PROTOCOLO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

A fin de analizar los diferentes indicadores relacionados con la iluminación y con la salud y la eficiencia energética, se plantean dos protocolos diferentes de modelado y cálculo.

5.7.1. Cálculo de la demanda energética

- **Modelado 3D de las diferentes hipótesis de trabajo mediante *IFC Builder***

Mediante la herramienta *IFC Builder*, se elabora un modelo *BIM* de la edificación completa en la que se encuentra el caso de estudio (Fig. 44). Se definen la envolvente, las dimensiones de cada espacio y el volumen resultante.

Para cada hipótesis de trabajo establecida en el apartado 6.6, se elabora un modelo diferente, existiendo 16 modelos según tamaño de hueco, proporción, posición y orientación

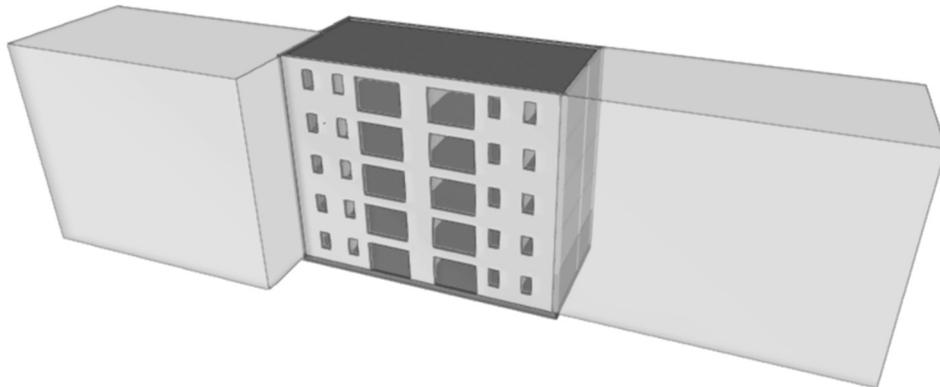


Fig. 44. Imagen 3D modelo original

- **Definición constructiva de la envolvente y del caudal de ventilación necesario**

Una vez se han elaborado los modelos de simulación, se definen la composición constructiva de la envolvente térmica, así como el caudal de ventilación y otros datos necesarios. Las condiciones de funcionamiento se aplican de manera uniforme, modelando la habitación como un único recinto y considerando las estancias contiguas un único espacio no acondicionado, asumiendo una transferencia de calor dentro de sus divisiones internas. Los puentes térmicos se han definido según la definición constructiva existente.

La composición constructiva de la envolvente es la siguiente:

| CERRAMIENTO DE FACHADA | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capas | 1 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 2,00 cm |
| | 2 - 1/2 pie LP o catalán 40 mm < G < 60 mm; espesor = 11,50 cm |
| | 3 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 2,00 cm |
| | 4 - Cámara de aire; espesor = 5,00 cm |
| | 5 - Tabique de LH sencillo; espesor = 4,00 cm |
| | 6 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| Espesor total = 26,00 cm | |
| Transmitancia térmica = 1,45 W/(m ² ·K) | |

Tabla. 10. Composición constructiva cerramiento de fachada

| MEDIANERA | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capas | 1 - 1/2 pie LP o catalán 40 mm < G < 60 mm; espesor = 11,50 cm |
| | 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 2,00 cm |
| | 3 - Cámara de aire; espesor = 5,00 cm |
| | 4 - Tabique de LH sencillo; espesor = 4,00 cm |
| | 5 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| Espesor total = 24,00 cm | |
| Transmitancia térmica = 1,32 W/(m ² ·K) | |

Tabla. 11. Composición constructiva medianera

| TABIQUERÍA | |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Capas | 1 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| | 2 - Tabique de LH doble; espesor = 7,50 cm |
| | 3 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| Espesor total = 10,50 cm | |
| Transmitancia térmica = 1,92 W/(m ² ·K) | |

Tabla. 12. Composición constructiva tabiquería

| FORJADO | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capas | 1 - Azulejo cerámico; espesor = 1,50 cm |
| | 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 2,00 cm |
| | 3 - Forjado unidireccional entrevigado cerámico; canto = 25,00 cm |
| | 4 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| Espesor total = 30,00 cm | |
| Transmitancia térmica = 1,42 W/(m ² ·K) | |

Tabla. 13. Composición constructiva forjado

| CUBIERTA | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capas | 1 - Azulejo cerámico; espesor = 1,50 cm |
| | 2 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 2,50 cm |
| | 3 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 1,50 cm |
| | 4 - Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < 1600; espesor = 1,50 cm |
| | 5 - Hormigón con áridos ligeros 1600 < d < 1800; espesor = 4,00 cm |
| | 6 - Forjado unidireccional entrevigado cerámico; canto = 25,00 cm |
| | 7 - Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900; espesor = 1,50 cm |
| Espesor total = 38,00 cm | |
| Transmitancia térmica = 1,58 W/(m ² ·K) | |

Tabla. 14. Composición constructiva cubierta

| HUECOS ACRISTALADOS | |
|-------------------------------------------------------------------------|--|
| Transmitancia térmica fracción acristalada = 5,70 W/(m ² ·K) | |
| Transmitancia térmica fracción opaca = 3,20 W/(m ² ·K) | |
| Fracción opaca de hueco = 20% | |

Tabla. 15. Características huecos acristalados

Estos datos se han obtenido tras realizar una visita al caso de estudio y consultar el catálogo de elementos constructivos del CTE [29].

- Nivel de estanqueidad de la envolvente

El nivel de estanqueidad de los edificios afecta significativamente el consumo de energía y las temperaturas interiores en las viviendas. Para definir las infiltraciones se ha utilizado un estudio *Blower Door* (Fig. 46) realizado previamente por investigadores del grupo TEP 130. En la Fig. 45 se indican los resultados obtenidos de dicho estudio.

| Results | | V = | 112 m ³ | A _F = | 51 m ² | A _E = | 31 m ² | |
|------------------|-------------------|-------------|--------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|-------------|
| | V ₅₀ | Uncertainty | n ₅₀ | Uncertainty | w ₅₀ | Uncertainty | q ₅₀ | Uncertainty |
| | m ³ /h | % | 1/h | % | m ³ /m ² h | % | m ³ /m ² h | % |
| Depressurisation | 1053 | +/- 10 % | 9,4 | +/- 11 % | 20,8 | +/- 11 % | 34,1 | +/- 11 % |
| Pressurisation | | | | | | | | |
| Average | | | | | | | | |

Fig. 45. Datos infiltraciones

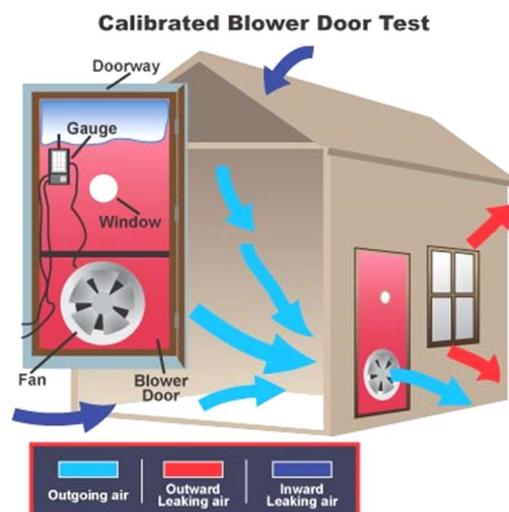


Fig. 46. Ideograma funcionamiento *Blower Door*

- Definición del caudal de ventilación mínimo necesario

El caudal mínimo necesario se obtiene de la Tabla 2.1. *Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables*, del CTE DB HS [31].

| Tipo de vivienda | Caudal mínimo q_v en l/s | | | | |
|---------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| | Locales secos ^{(1) (2)} | | | Locales húmedos ⁽²⁾ | |
| | Dormitorio principal | Resto de dormitorios | Salas de estar y comedores ⁽³⁾ | Mínimo en total | Mínimo por local |
| 0 ó 1 dormitorios | 8 | - | 6 | 12 | 6 |
| 2 dormitorios | 8 | 4 | 8 | 24 | 7 |
| 3 o más dormitorios | 8 | 4 | 10 | 33 | 8 |

Fig. 47. Caudales mínimos de ventilación

- Cálculo de la demanda energética por climatización mediante *CYPETHERM HE*

A continuación, se define la localización (Sevilla), con el archivo climático definido por De la Flor [13] para la base de cálculo del CTE, para así obtener la demanda energética anual de cada hipótesis, en la que se desglosa la demanda energética de calefacción, de refrigeración y la total para cada uno de los distintos meses del año.

5.7.2. Cálculo de DA y CSA

- **Modelado 3D de las diferentes hipótesis de trabajo mediante *Rhinceros***

Mediante la herramienta *Rhinceros*, se elabora un modelo *BIM* del caso de estudio. Para ello, se definen en primer lugar las dimensiones y el volumen resultante. Para cada hipótesis de trabajo establecida en el apartado 6.6, se elabora un modelo diferente. En este caso, se han modelado como celdas contiguas para agilizar el proceso de simulación, ya que no influye en el resultado final de cada modelo, dadas las condiciones lumínicas de contorno (Fig. 48).

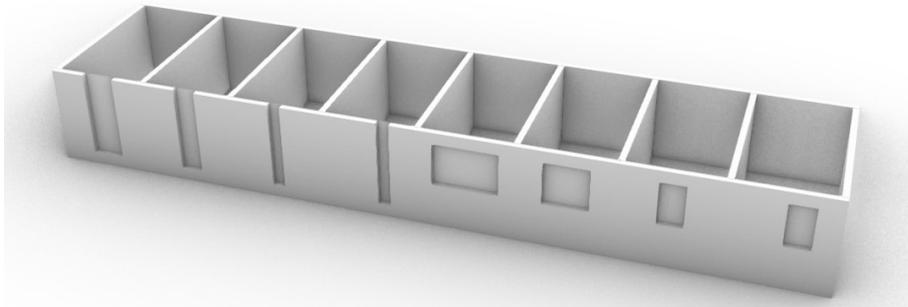


Fig. 48. Imagen 3D de los modelos de simulación

- **Definición de los planos de trabajo**

Para poder realizar el estudio sobre la cantidad de luz que incide en unos puntos concretos dentro de la habitación, deben definirse dos planos de trabajo, uno horizontal (rendimiento en el trabajo) y otro vertical (estímulo circadiano). Para la definición de estos planos se utilizarán las superficies generadas al elaborar el modelo en *Rhinceros*.

- Para el DA, se establece un plano horizontal ubicado a 0,76 m sobre el nivel del suelo, simulando lo que sería el plano de trabajo (Fig. 49 y 51).
- Para el CSA se establece un plano vertical ubicado en el centro de la estancia, tomándose los datos a una altura de 1,20 m sobre el suelo, simulando lo que sería el plano del ojo del ocupante estando sentado (Fig. 50 y 52).

En ambos planos se define una malla de puntos de 0,50 m x 0,50 m (con un total de 28 puntos de medición), que permite una recogida de datos lo suficientemente amplia para poder analizar su variación en la profundidad de la habitación.

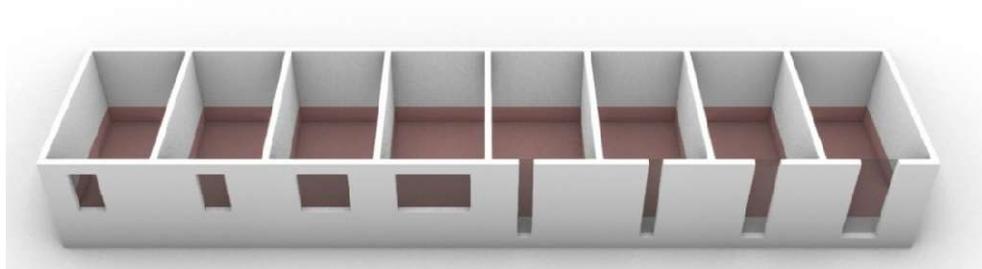


Fig. 49. Planos horizontales establecidos

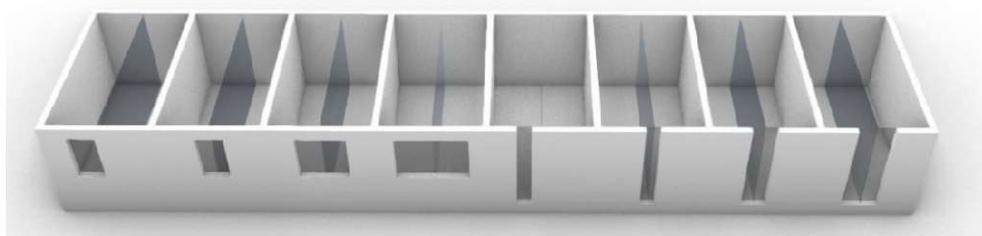


Fig. 50. Planos verticales establecidos

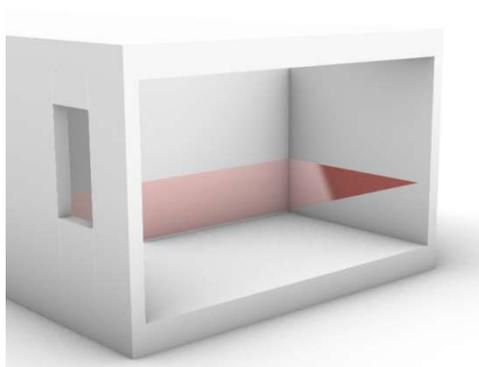


Fig. 51. Plano horizontal en un modelo

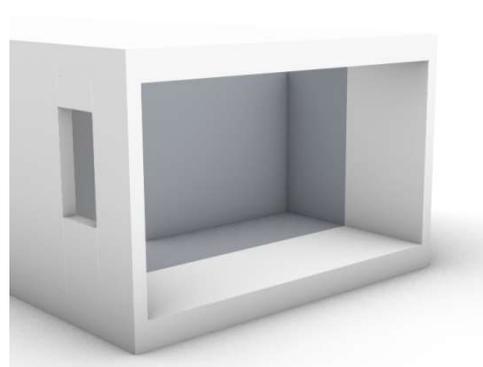


Fig. 52. Plano vertical en un modelo

- Condiciones de cálculo de DA para el motor *Radiance*

| | | | |
|----------------------------|------|-------------------------------------|--------|
| Rebotes ambientales | 7 | Fluctuación especular | 1.0000 |
| Divisiones ambientales | 1500 | Límite de Balanceo | 0.0040 |
| Súper muestras ambientales | 100 | Fluctuación directa | 0.0000 |
| Resolución ambiental | 300 | Muestreo Directo | 0.2000 |
| Precisión ambiental | 0.05 | Retransmisión directa | 2 |
| Reflexión límite | 10 | Densidad previa a la prueba directa | 512 |
| Umbral especular | 0.0 | Fluctuación especular | 1.0000 |

Tabla 16. Condiciones de cálculo del motor *Radiance*

- **Cálculo de DA mediante *Climate Studio***

A continuación, se define la localización y se fijan tanto el horario como el umbral de iluminancia mínimo, indicado en el apartado 5.3. de este documento.

- **Cálculo de CSA mediante *Microsoft Excel*, partiendo de los datos de DA obtenidos**

Por último, se realiza el cálculo de CSA, fijando el horario y el umbral de iluminancia mínimo, ambos indicados en el apartado 5.3. de este documento.



06

**RESUMEN DE
RESULTADOS**

6. RESUMEN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos se realiza una recopilación de los mismos, agrupándolos por modelos según su orientación (norte y sur).

6.1. MODELO 0

Se trata del modelo original del caso de estudio. Tamaño de hueco del 12%, descentrado en la fachada.

- DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q_H | (kWh) | 100,1 | 76,2 | 61,9 | 35,2 | 18,4 | | | | | 6,4 | 51,1 | 92,4 | 441,70 | 52,15 |
| Q_C | (kWh) | | | | | | -14 | -43,4 | -40,6 | -17,3 | | | | -115,30 | -13,61 |
| Q_{HC} | (kWh) | 100,1 | 76,2 | 61,9 | 35,2 | 18,4 | 14 | 43,4 | 40,6 | 17,3 | 6,4 | 51,1 | 92,4 | 557,00 | 65,76 |
| Q_{HC} | (kWh/m ²) | 11,82 | 9,00 | 7,31 | 4,16 | 2,17 | 1,65 | 5,12 | 4,79 | 2,04 | 0,76 | 6,03 | 10,91 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q_H | (kWh) | 66,8 | 50,2 | 43,8 | 25,5 | 14,7 | | | | | 1,3 | 23,4 | 58,9 | 284,49 | 33,60 |
| Q_C | (kWh) | | | | | | -15,2 | -47,8 | -49,2 | -24,7 | | | | -136,91 | -16,17 |
| Q_{HC} | (kWh) | 66,8 | 50,2 | 43,8 | 25,5 | 14,7 | 15,2 | 47,8 | 49,2 | 24,7 | 1,3 | 23,4 | 58,9 | 421,40 | 49,77 |
| Q_{HC} | (kWh/m ²) | 7,89 | 5,93 | 5,17 | 3,01 | 1,74 | 1,79 | 5,64 | 5,81 | 2,92 | 0,15 | 2,76 | 6,95 | | |

Tabla 17. Demanda energética por mes y orientación - M0

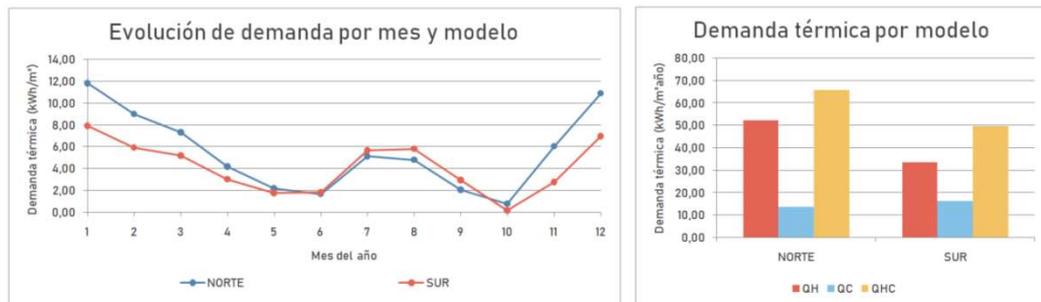


Fig. 53. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual - M0

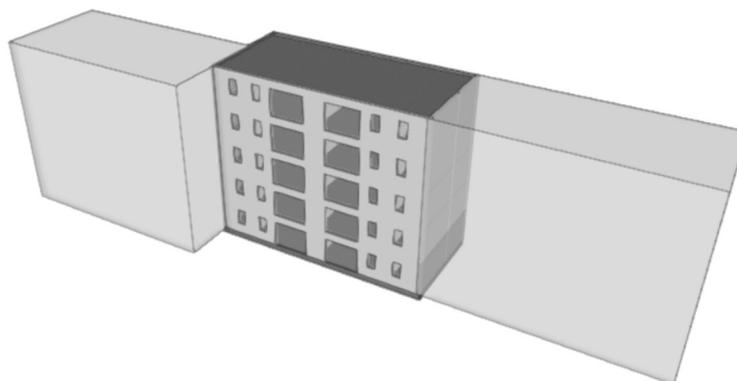


Fig. 54. Modelo 3D - M0

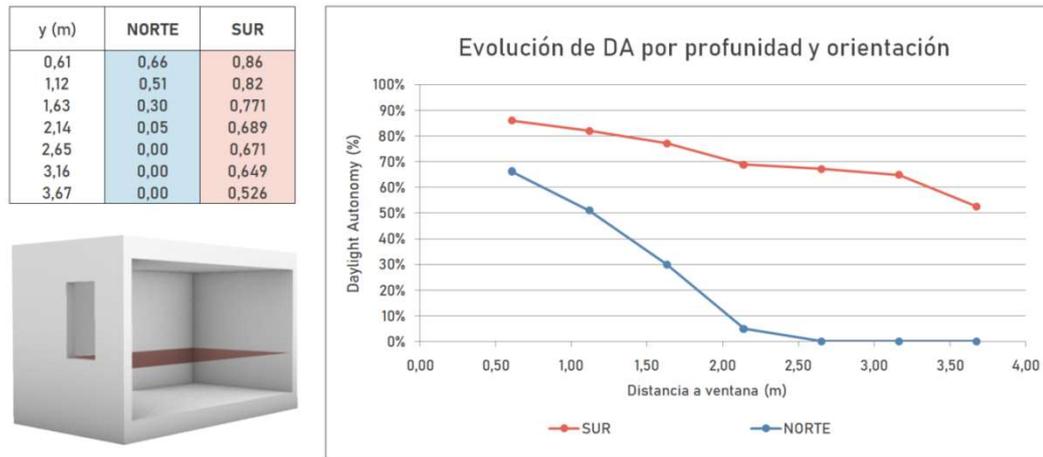


Fig. 55. Evolución DA por profundidad y orientación - M0

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

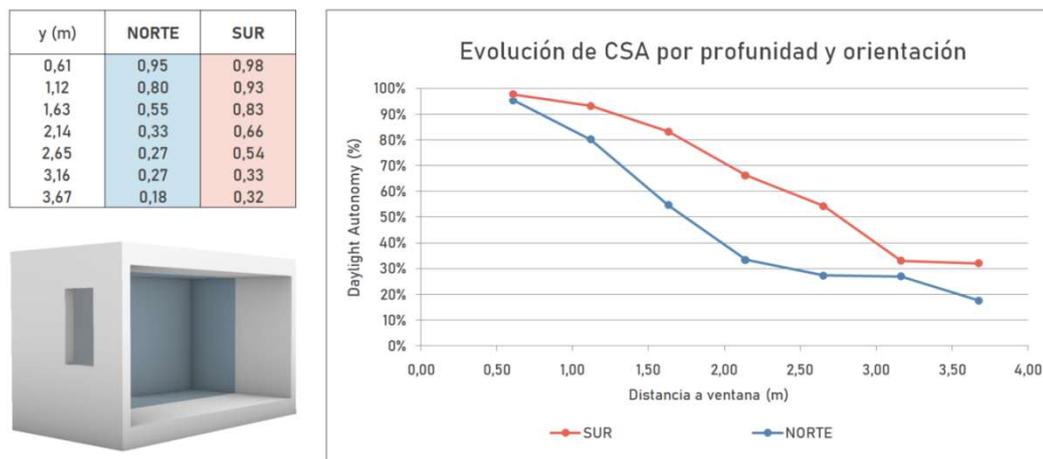


Fig. 56. Evolución CSA por profundidad y orientación - M0

6.2. MODELO 1

Tamaño de hueco del 12%, centrado en la fachada.

• DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 98,3 | 74,6 | 60,2 | 33,8 | 17,5 | | | | | 5,7 | 49,6 | 90,7 | 430,36 | 50,83 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -14,2 | -43,7 | -40,9 | -17,5 | | | | -116,28 | -13,73 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 98,3 | 74,6 | 60,2 | 33,8 | 17,5 | 14,2 | 43,7 | 40,9 | 17,5 | 5,7 | 49,6 | 90,7 | 546,64 | 64,56 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 11,61 | 8,81 | 7,11 | 3,99 | 2,07 | 1,68 | 5,16 | 4,83 | 2,07 | 0,67 | 5,86 | 10,71 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 64,8 | 48,4 | 42 | 24 | 13,9 | | | | | 0,9 | 21,6 | 57,1 | 272,69 | 32,21 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -15,3 | -48 | -49,5 | -24,9 | | | | -137,79 | -16,28 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 64,8 | 48,4 | 42 | 24 | 13,9 | 15,3 | 48 | 49,5 | 24,9 | 0,9 | 21,6 | 57,1 | 410,48 | 48,49 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 7,65 | 5,71 | 4,96 | 2,83 | 1,64 | 1,81 | 5,67 | 5,84 | 2,94 | 0,11 | 2,55 | 6,74 | | |

Tabla 18. Demanda energética por mes y orientación - M1

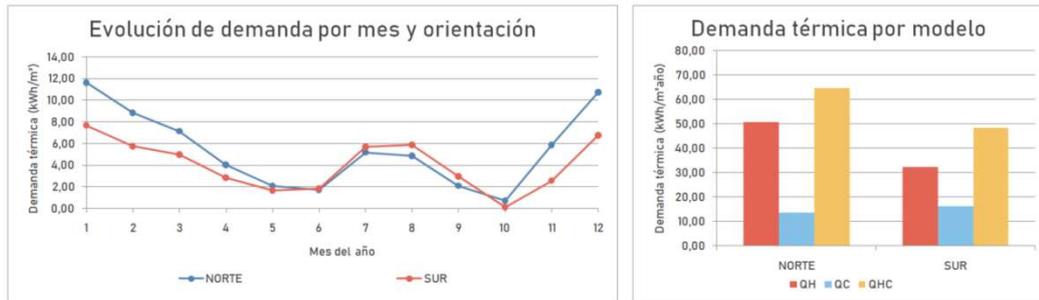


Fig. 57. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual - M1

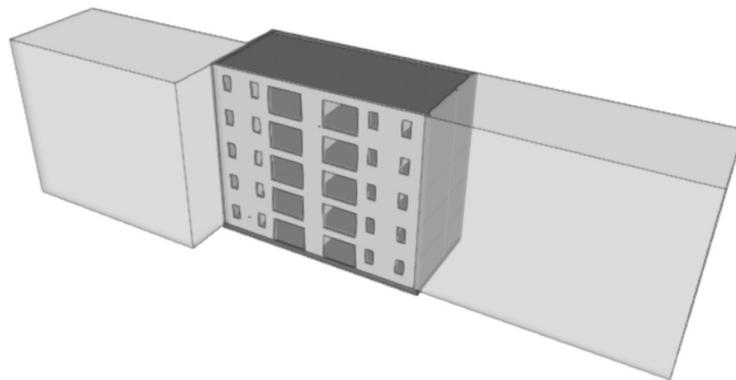


Fig. 58. Modelo 3D - M1

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,88 | 0,90 |
| 1,12 | 0,73 | 0,83 |
| 1,63 | 0,44 | 0,77 |
| 2,14 | 0,11 | 0,76 |
| 2,65 | 0,00 | 0,65 |
| 3,16 | 0,00 | 0,59 |
| 3,67 | 0,00 | 0,53 |

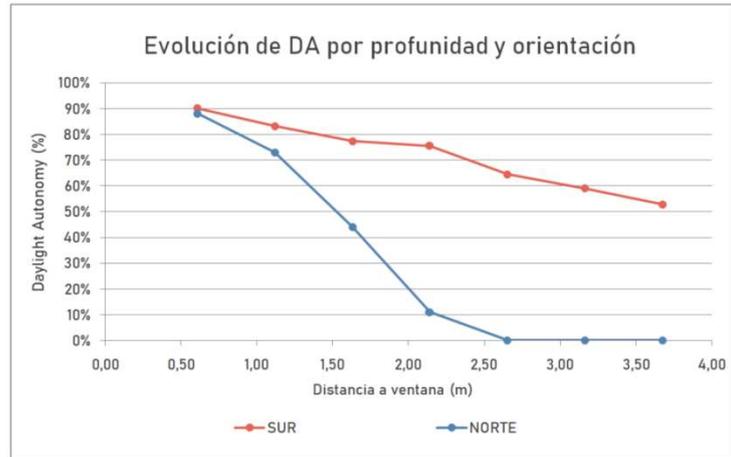
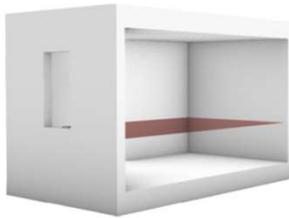


Fig. 59. Evolución DA por profundidad y orientación - M1

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,98 | 0,99 |
| 1,12 | 0,80 | 0,92 |
| 1,63 | 0,51 | 0,85 |
| 2,14 | 0,38 | 0,72 |
| 2,65 | 0,11 | 0,53 |
| 3,16 | 0,06 | 0,39 |
| 3,67 | 0,05 | 0,42 |

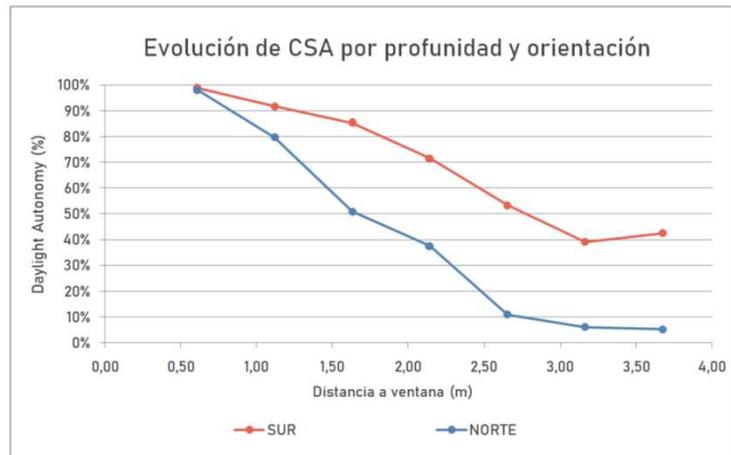
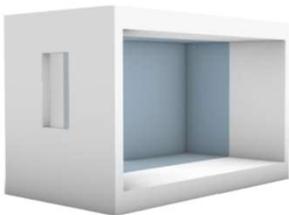


Fig. 60. Evolución CSA por profundidad y orientación - M1

6.3. MODELO 2

Tamaño de hueco del 22%, de proporción horizontal, centrado en la fachada.

- DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² ·año) |
| Q _H | (kWh) | 104,1 | 78,1 | 62,5 | 34,3 | 17,3 | | | | | 5,9 | 52,1 | 95,9 | 449,99 | 53,15 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -16,1 | -48,5 | -45,1 | -19,4 | | | | -129,21 | -15,26 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 104,1 | 78,1 | 62,5 | 34,3 | 17,3 | 16,1 | 48,5 | 45,1 | 19,4 | 5,9 | 52,1 | 95,9 | 579,20 | 68,41 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 12,29 | 9,22 | 7,38 | 4,05 | 2,04 | 1,90 | 5,73 | 5,32 | 2,29 | 0,70 | 6,15 | 11,32 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² ·año) |
| Q _H | (kWh) | 57,7 | 43,7 | 38,8 | 22,3 | 12,9 | | | | | 0,7 | 17,3 | 49,5 | 242,90 | 28,69 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -17,4 | -53,7 | -56,1 | -29,4 | | | | -156,64 | -18,50 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 57,7 | 43,7 | 38,8 | 22,3 | 12,9 | 17,4 | 53,7 | 56,1 | 29,4 | 0,7 | 17,3 | 49,5 | 399,54 | 47,19 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 6,81 | 5,16 | 4,58 | 2,63 | 1,52 | 2,05 | 6,34 | 6,62 | 3,47 | 0,08 | 2,04 | 5,84 | | |

Tabla 19. Demanda energética por mes y orientación – M2

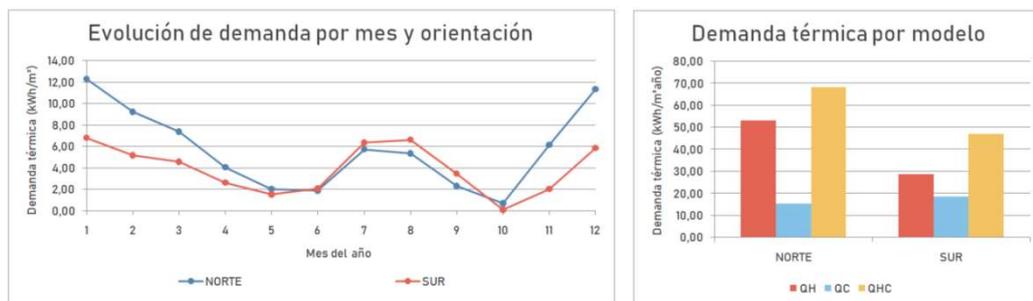


Fig. 61. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M2

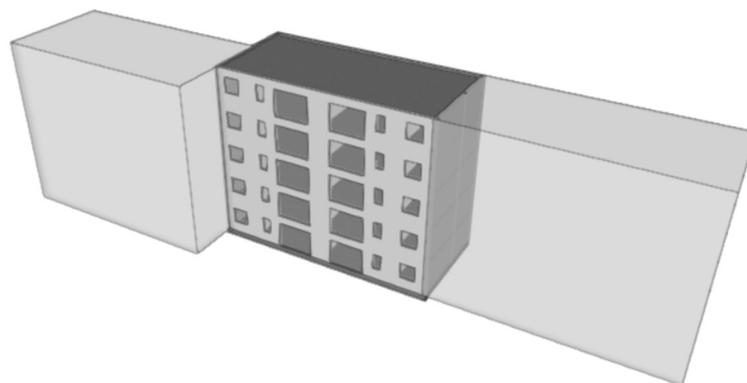


Fig. 62. Modelo 3D – M2

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,92 | 0,93 |
| 1,12 | 0,88 | 0,90 |
| 1,63 | 0,79 | 0,86 |
| 2,14 | 0,73 | 0,84 |
| 2,65 | 0,57 | 0,81 |
| 3,16 | 0,47 | 0,76 |
| 3,67 | 0,45 | 0,76 |

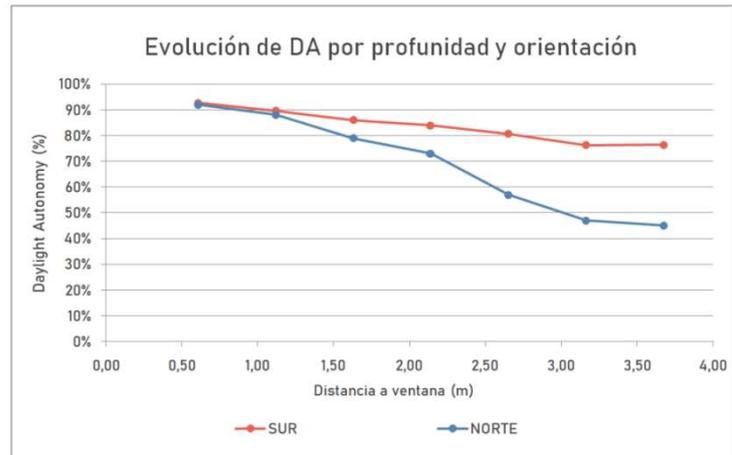
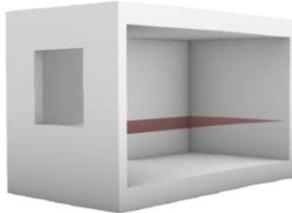


Fig. 63. Evolución DA por profundidad y orientación - M2

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 1,00 | 1,00 |
| 1,12 | 0,95 | 0,97 |
| 1,63 | 0,87 | 0,94 |
| 2,14 | 0,80 | 0,90 |
| 2,65 | 0,65 | 0,87 |
| 3,16 | 0,59 | 0,86 |
| 3,67 | 0,56 | 0,83 |

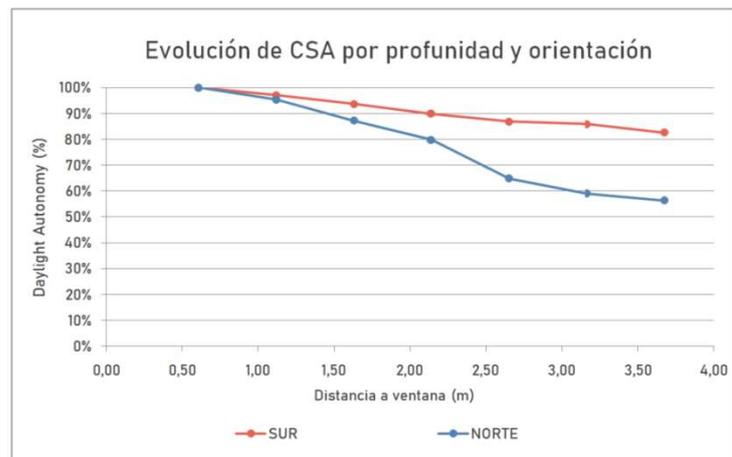


Fig. 64. Evolución CSA por profundidad y orientación - M2

6.4. MODELO 3

Tamaño de hueco del 32%, de proporción horizontal, centrado en la fachada.

• DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 109,8 | 81,7 | 64,9 | 34,8 | 17,1 | | | | | 6,2 | 54,6 | 101,2 | 470,21 | 55,54 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -18,1 | -53,4 | -49,4 | -21,3 | | | | -142,20 | -16,80 |
| Q _{HIC} | (kWh) | 109,8 | 81,7 | 64,9 | 34,8 | 17,1 | 18,1 | 53,4 | 49,4 | 21,3 | 6,2 | 54,6 | 101,2 | 612,41 | 72,34 |
| Q _{HIC} | (kWh/m ²) | 12,96 | 9,65 | 7,66 | 4,11 | 2,02 | 2,14 | 6,30 | 5,83 | 2,51 | 0,73 | 6,45 | 11,95 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 52,5 | 40,3 | 36,5 | 21,1 | 12,1 | | | | | 0,6 | 14,6 | 43,9 | 221,77 | 26,19 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -19,5 | -59,3 | -62,6 | -34,3 | | | | -175,68 | -20,75 |
| Q _{HIC} | (kWh) | 52,5 | 40,3 | 36,5 | 21,1 | 12,1 | 19,5 | 59,3 | 62,6 | 34,3 | 0,6 | 14,6 | 43,9 | 397,45 | 46,94 |
| Q _{HIC} | (kWh/m ²) | 6,20 | 4,76 | 4,31 | 2,49 | 1,43 | 2,30 | 7,00 | 7,39 | 4,05 | 0,07 | 1,72 | 5,18 | | |

Tabla 20. Demanda energética por mes y orientación – M3

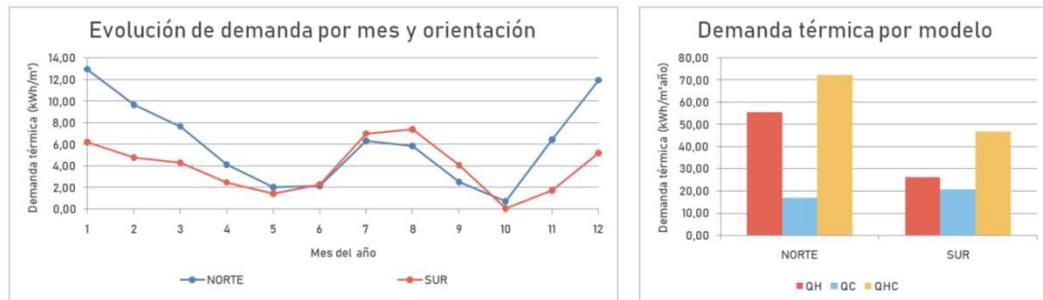


Fig. 65. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M3

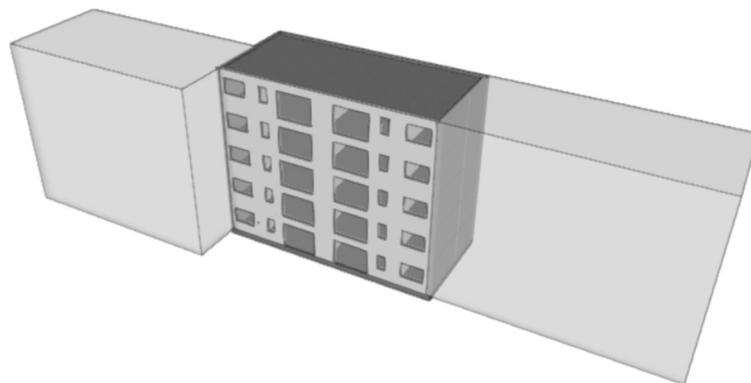


Fig. 66. Modelo 3D – M3

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,93 | 0,93 |
| 1,12 | 0,91 | 0,92 |
| 1,63 | 0,88 | 0,89 |
| 2,14 | 0,83 | 0,87 |
| 2,65 | 0,80 | 0,85 |
| 3,16 | 0,75 | 0,84 |
| 3,67 | 0,73 | 0,82 |

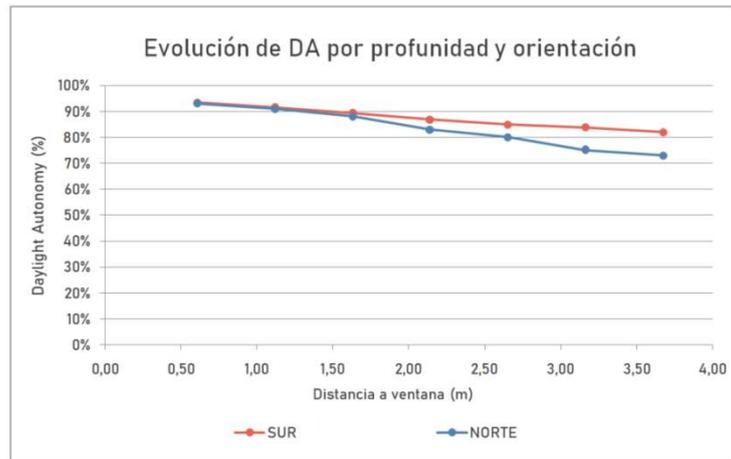
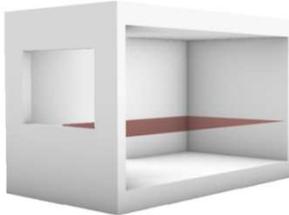


Fig. 67. Evolución DA por profundidad y orientación – M3

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 1,00 | 1,00 |
| 1,12 | 0,98 | 0,99 |
| 1,63 | 0,95 | 0,96 |
| 2,14 | 0,89 | 0,95 |
| 2,65 | 0,83 | 0,93 |
| 3,16 | 0,82 | 0,92 |
| 3,67 | 0,76 | 0,91 |

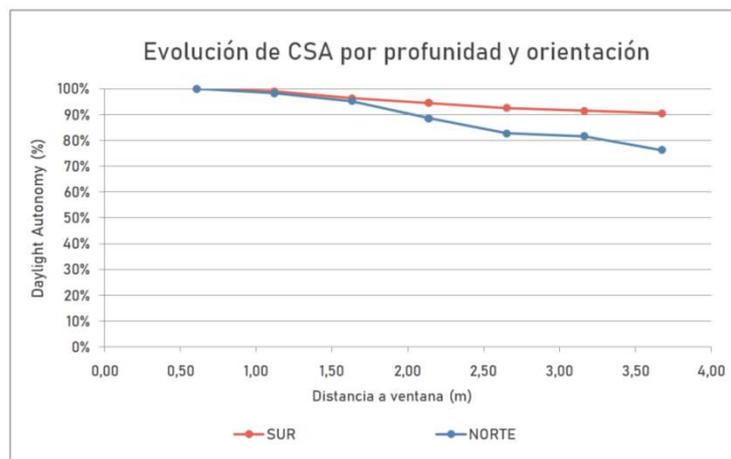
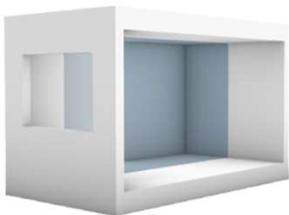


Fig. 68. Evolución CSA por profundidad y orientación – M3

6.5. MODELO 4

Tamaño de hueco del 12%, de proporción suelo-techo, descentrado en la fachada.

- DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 102,1 | 77,6 | 63 | 35,7 | 18,6 | | | | | 6,3 | 51,9 | 94,1 | 449,28 | 53,07 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -14,3 | -44,4 | -41,5 | -17,7 | | | | -117,88 | -13,92 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 102,1 | 77,6 | 63 | 35,7 | 18,6 | 14,3 | 44,4 | 41,5 | 17,7 | 6,3 | 51,9 | 94,1 | 567,16 | 66,99 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 12,05 | 9,16 | 7,44 | 4,21 | 2,20 | 1,69 | 5,24 | 4,90 | 2,09 | 0,74 | 6,13 | 11,11 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 58,4 | 43,5 | 37,2 | 20,3 | 11,6 | | | | | 0,4 | 17,8 | 51 | 240,24 | 28,38 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -15,3 | -47,5 | -49,2 | -25 | | | | -137,00 | -16,18 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 58,4 | 43,5 | 37,2 | 20,3 | 11,6 | 15,3 | 47,5 | 49,2 | 25 | 0,4 | 17,8 | 51 | 377,24 | 44,56 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 6,89 | 5,14 | 4,39 | 2,40 | 1,37 | 1,81 | 5,61 | 5,81 | 2,95 | 0,05 | 2,10 | 6,02 | | |

Tabla 21. Demanda energética por mes y orientación – M4

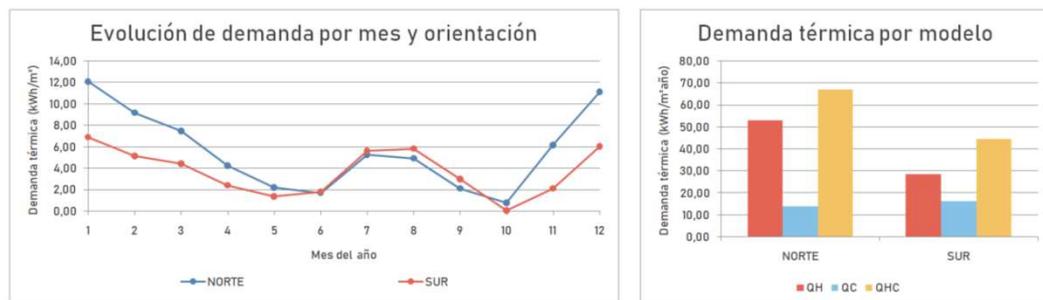


Fig. 69. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M4

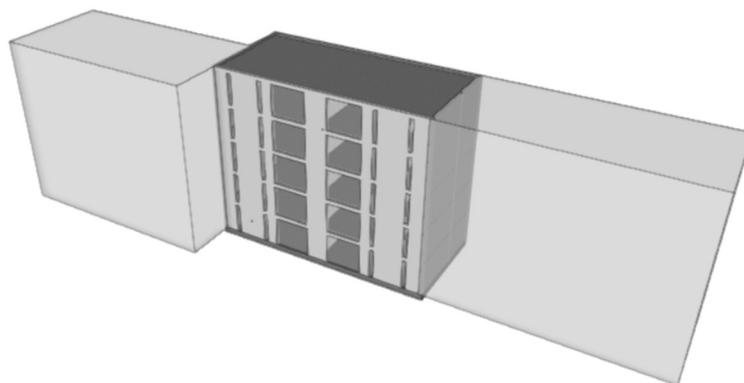


Fig. 70. Modelo 3D – M4

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,28 | 0,78 |
| 1,12 | 0,25 | 0,75 |
| 1,63 | 0,02 | 0,69 |
| 2,14 | 0,00 | 0,64 |
| 2,65 | 0,00 | 0,52 |
| 3,16 | 0,00 | 0,50 |
| 3,67 | 0,00 | 0,48 |

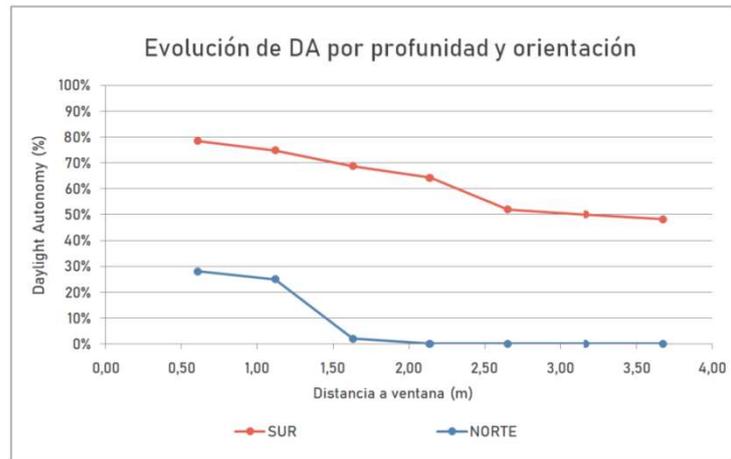
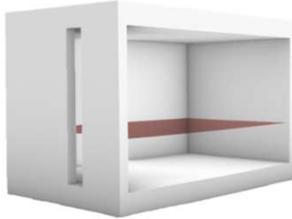


Fig. 71. Evolución DA por profundidad y orientación – M4

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,81 | 0,93 |
| 1,12 | 0,57 | 0,87 |
| 1,63 | 0,37 | 0,63 |
| 2,14 | 0,30 | 0,49 |
| 2,65 | 0,00 | 0,43 |
| 3,16 | 0,00 | 0,27 |
| 3,67 | 0,00 | 0,24 |

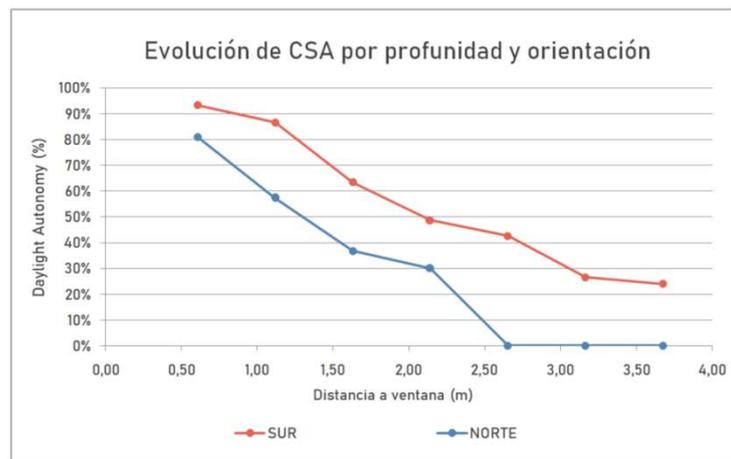


Fig. 72. Evolución CSA por profundidad y orientación – M4

6.6. MODELO 5

Tamaño de hueco del 12%, de proporción suelo-techo, centrado en la fachada.

• DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 91,2 | 68,9 | 54,9 | 30,2 | 15,4 | | | | | 4,5 | 45,2 | 84,1 | 394,30 | 46,57 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -14 | -42,8 | -40,2 | -17,3 | | | | -114,28 | -13,50 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 91,2 | 68,9 | 54,9 | 30,2 | 15,4 | 14 | 42,8 | 40,2 | 17,3 | 4,5 | 45,2 | 84,1 | 508,58 | 60,07 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 10,77 | 8,13 | 6,48 | 3,57 | 1,82 | 1,65 | 5,05 | 4,75 | 2,04 | 0,53 | 5,34 | 9,93 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 58,4 | 43,5 | 37,2 | 20,3 | 11,6 | | | | | 0,4 | 17,8 | 51 | 240,24 | 28,38 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -15,3 | -47,5 | -49,2 | -25 | | | | -137,00 | -16,18 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 58,4 | 43,5 | 37,2 | 20,3 | 11,6 | 15,3 | 47,5 | 49,2 | 25 | 0,4 | 17,8 | 51 | 377,24 | 44,56 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 6,87 | 5,14 | 4,39 | 2,40 | 1,37 | 1,81 | 5,61 | 5,81 | 2,95 | 0,05 | 2,10 | 6,02 | | |

Tabla 22. Demanda energética por mes y orientación – M5

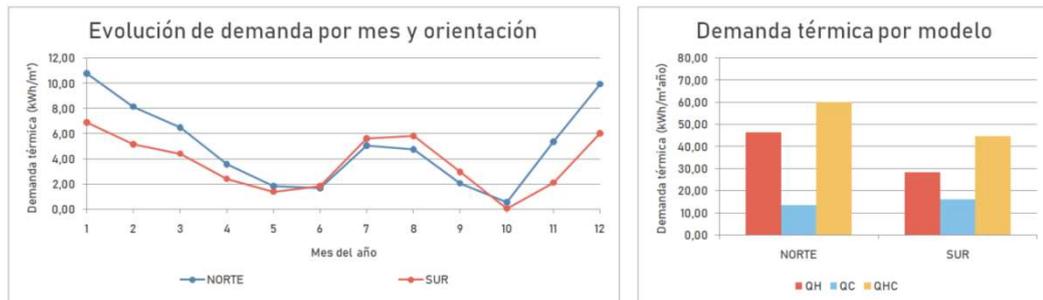


Fig. 73. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M5

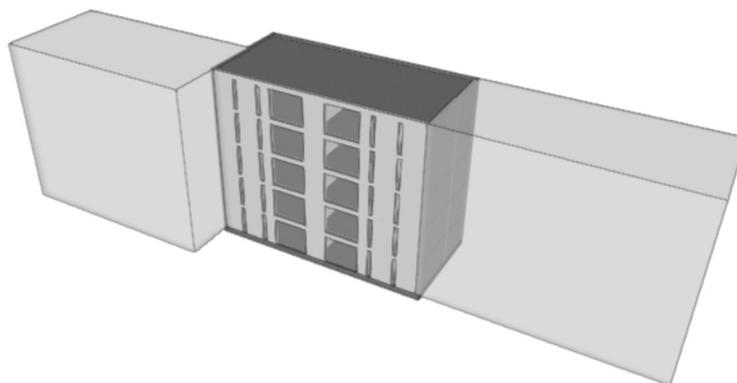


Fig. 74. Modelo 3D – M5

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,76 | 0,86 |
| 1,12 | 0,40 | 0,77 |
| 1,63 | 0,11 | 0,72 |
| 2,14 | 0,00 | 0,69 |
| 2,65 | 0,00 | 0,57 |
| 3,16 | 0,00 | 0,51 |
| 3,67 | 0,00 | 0,50 |

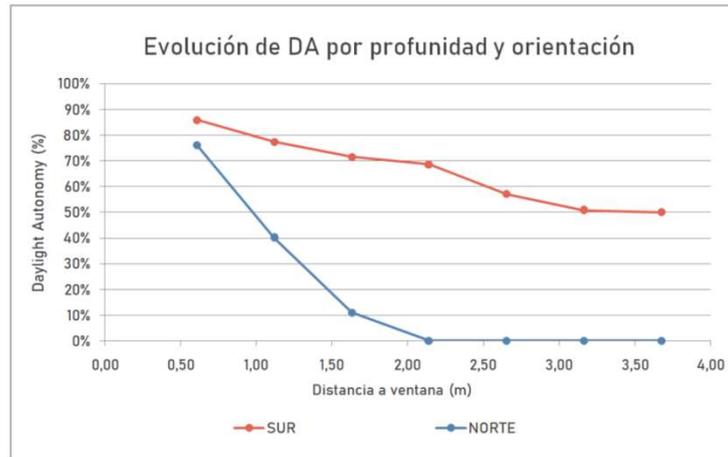
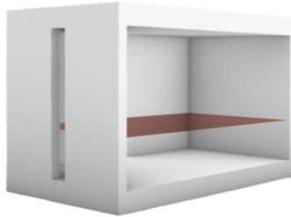


Fig. 75. Evolución DA por profundidad y orientación – M5

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,89 | 0,96 |
| 1,12 | 0,55 | 0,87 |
| 1,63 | 0,42 | 0,72 |
| 2,14 | 0,32 | 0,50 |
| 2,65 | 0,06 | 0,48 |
| 3,16 | 0,00 | 0,33 |
| 3,67 | 0,00 | 0,21 |

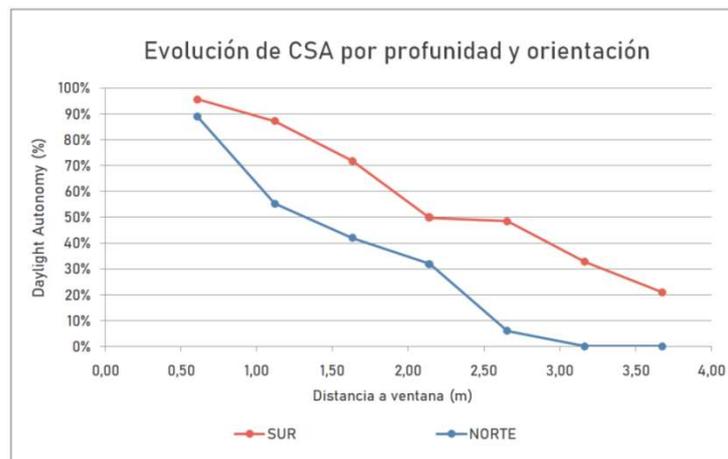
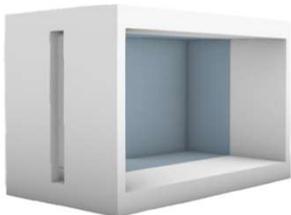


Fig. 76. Evolución CSA por profundidad y orientación – M5

6.7. MODELO 6

Tamaño de hueco del 22%, de proporción suelo-techo, centrado en la fachada.

• DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 107,3 | 80,8 | 64,8 | 35,7 | 18,2 | | | | | 6,4 | 54 | 98,9 | 466,18 | 55,06 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -16,3 | -49,5 | -46,1 | -19,8 | | | | -131,74 | -15,56 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 107,3 | 80,8 | 64,8 | 35,7 | 18,2 | 16,3 | 49,5 | 46,1 | 19,8 | 6,4 | 54 | 98,9 | 597,92 | 70,62 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 12,67 | 9,54 | 7,65 | 4,21 | 2,15 | 1,92 | 5,84 | 5,44 | 2,34 | 0,76 | 6,38 | 11,68 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 60,5 | 45,8 | 40,7 | 23,1 | 13,3 | | | | | 0,9 | 18,2 | 52,1 | 254,51 | 30,06 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -18,1 | -55,6 | -57,9 | -30,3 | | | | -161,89 | -19,12 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 60,5 | 45,8 | 40,7 | 23,1 | 13,3 | 18,1 | 55,6 | 57,9 | 30,3 | 0,9 | 18,2 | 52,1 | 416,40 | 49,18 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 7,14 | 5,41 | 4,81 | 2,73 | 1,57 | 2,14 | 6,56 | 6,84 | 3,58 | 0,11 | 2,15 | 6,15 | | |

Tabla 23. Demanda energética por mes y orientación – M6

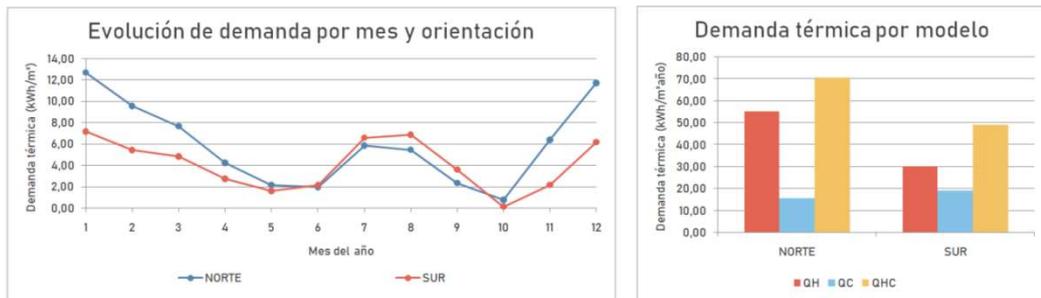


Fig. 77. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M6

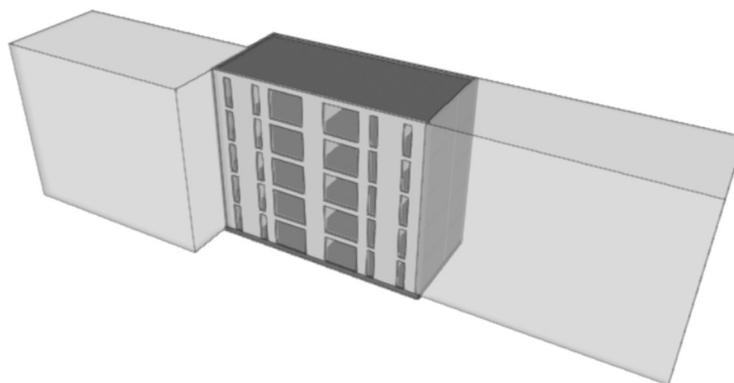


Fig. 78. Modelo 3D – M6

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,89 | 0,90 |
| 1,12 | 0,83 | 0,86 |
| 1,63 | 0,73 | 0,83 |
| 2,14 | 0,61 | 0,79 |
| 2,65 | 0,50 | 0,77 |
| 3,16 | 0,45 | 0,75 |
| 3,67 | 0,34 | 0,71 |

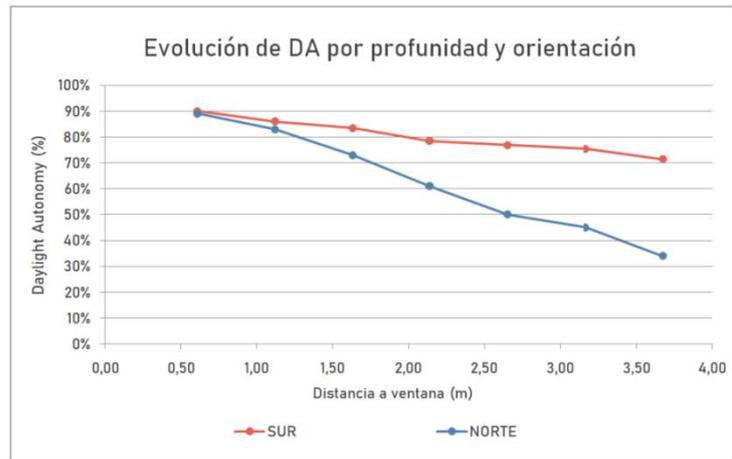
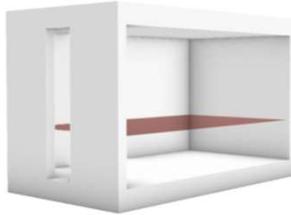


Fig. 79. Evolución DA por profundidad y orientación – M6

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,99 | 1,00 |
| 1,12 | 0,90 | 0,95 |
| 1,63 | 0,80 | 0,91 |
| 2,14 | 0,70 | 0,88 |
| 2,65 | 0,59 | 0,84 |
| 3,16 | 0,46 | 0,83 |
| 3,67 | 0,32 | 0,79 |

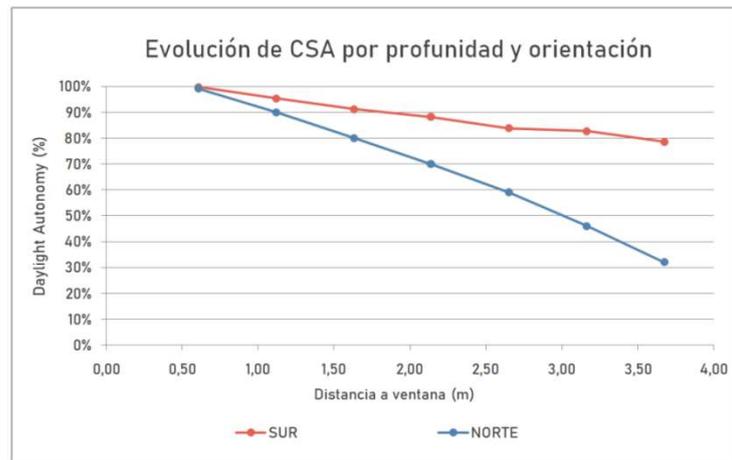
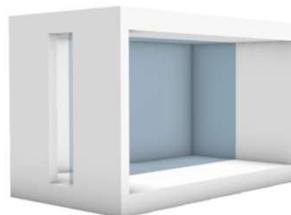


Fig. 80. Evolución CSA por profundidad y orientación – M6

6.8. MODELO 7

Tamaño de hueco del 32%, de proporción suelo-techo, centrado en la fachada.

• DEMANDA ENERGÉTICA

| NORTE | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 112,4 | 83,7 | 66,5 | 35,7 | 17,6 | | | | | 6,4 | 56 | 103,6 | 481,96 | 56,93 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -18,6 | -54,9 | -50,9 | -21,9 | | | | -146,27 | -17,28 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 112,4 | 83,7 | 66,5 | 35,7 | 17,6 | 18,6 | 54,9 | 50,9 | 21,9 | 6,4 | 56 | 103,6 | 628,23 | 74,21 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 13,27 | 9,88 | 7,85 | 4,21 | 2,08 | 2,20 | 6,48 | 6,01 | 2,59 | 0,76 | 6,61 | 12,23 | | |

| SUR | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Año | Año |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------------------|
| | | (kWh) | (kWh/año) | (kWh/m ² -año) |
| Q _H | (kWh) | 77,3 | 58,9 | 53,8 | 31,6 | 17,8 | | | | | 2,1 | 24,1 | 66,2 | 331,72 | 39,18 |
| Q _C | (kWh) | | | | | | -23,3 | -69,7 | -72,6 | -38,9 | | | | -204,54 | -24,16 |
| Q _{H+C} | (kWh) | 77,3 | 58,9 | 53,8 | 31,6 | 17,8 | 23,3 | 69,7 | 72,6 | 38,9 | 2,1 | 24,1 | 66,2 | 536,26 | 63,34 |
| Q _{H+C} | (kWh/m ²) | 9,13 | 6,95 | 6,35 | 3,73 | 2,10 | 2,75 | 8,23 | 8,57 | 4,59 | 0,25 | 2,85 | 7,82 | | |

Tabla 24. Demanda energética por mes y orientación - M7

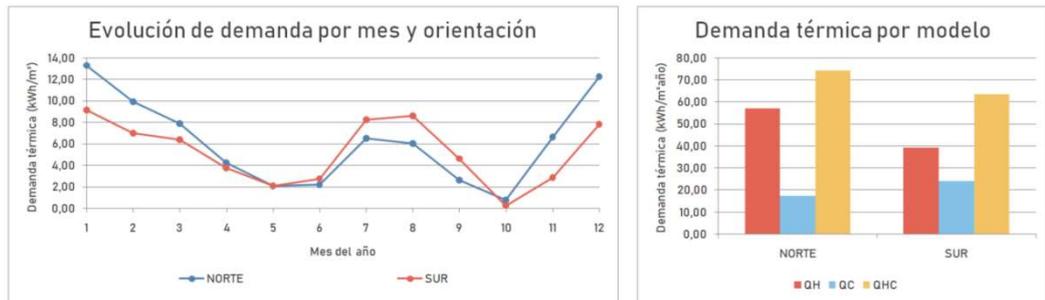


Fig. 81. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual - M7

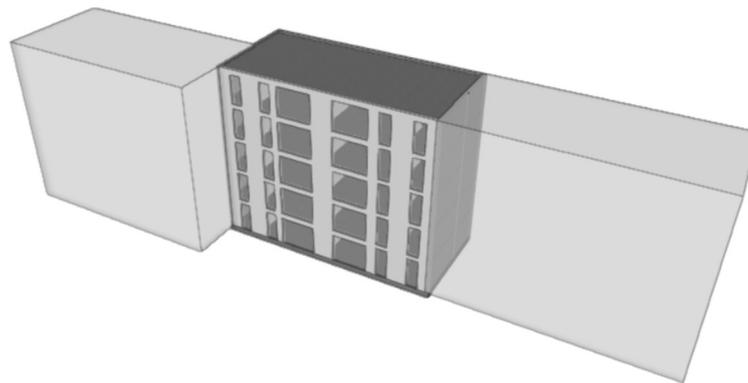


Fig. 82. Modelo 3D - M7

- DAYLIGHT AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 0,92 | 0,92 |
| 1,12 | 0,89 | 0,90 |
| 1,63 | 0,85 | 0,87 |
| 2,14 | 0,78 | 0,85 |
| 2,65 | 0,77 | 0,84 |
| 3,16 | 0,71 | 0,83 |
| 3,67 | 0,69 | 0,82 |

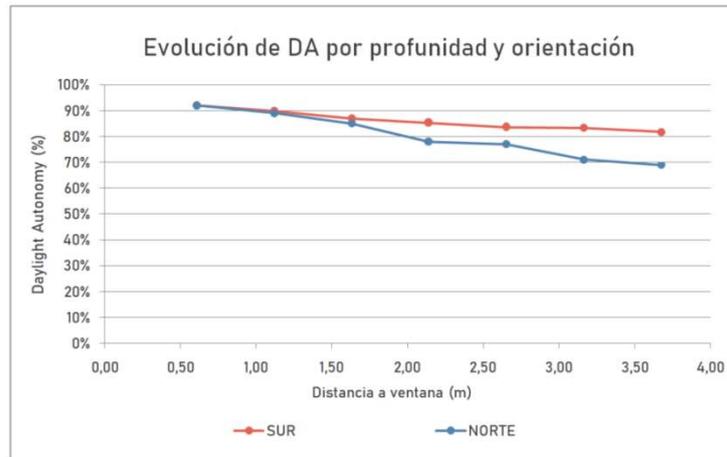


Fig. 83. Evolución DA por profundidad y orientación – M7

- CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

| y (m) | NORTE | SUR |
|-------|-------|------|
| 0,61 | 1,00 | 1,00 |
| 1,12 | 0,97 | 0,98 |
| 1,63 | 0,90 | 0,95 |
| 2,14 | 0,85 | 0,93 |
| 2,65 | 0,82 | 0,91 |
| 3,16 | 0,78 | 0,90 |
| 3,67 | 0,73 | 0,89 |

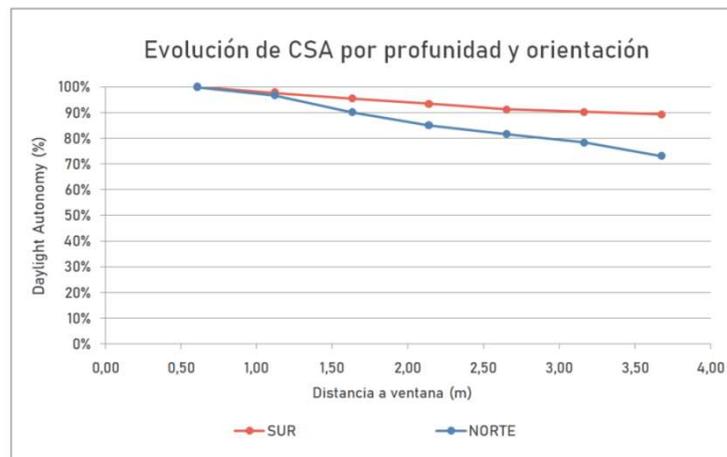
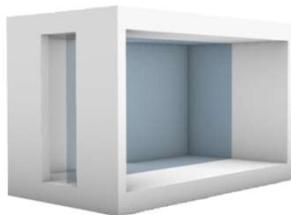


Fig. 84. Evolución CSA por profundidad y orientación – M7



07

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tras la recopilación de los resultados obtenidos, se realiza un análisis y discusión de estos, a fin de concluir qué tipos de huecos tienen una mejor respuesta para cada indicador respecto del resto.

7.1. DEMANDA ENERGÉTICA

Se han agrupado los modelos por orientación con el fin de comparar la demanda térmica anual de cada uno.

- NORTE

En primer lugar, se evalúa cómo evoluciona la demanda a lo largo del año (Fig. 85). Es posible apreciar que todos los modelos, en comparación con el original, experimentan un aumento considerable de la demanda en los meses más fríos.

En los meses de enero, febrero, marzo, julio, agosto y diciembre (meses de temperaturas exteriores más extremas), se observa una mayor variación de la demanda entre los diferentes modelos, que es proporcional al tamaño de hueco en cada caso. Sin embargo, en el resto del año (entretiempo, temperaturas exteriores moderadas) se aprecia una mayor homogeneidad en los resultados, oscilando en un margen de diferencia menor a 1 kWh/m².

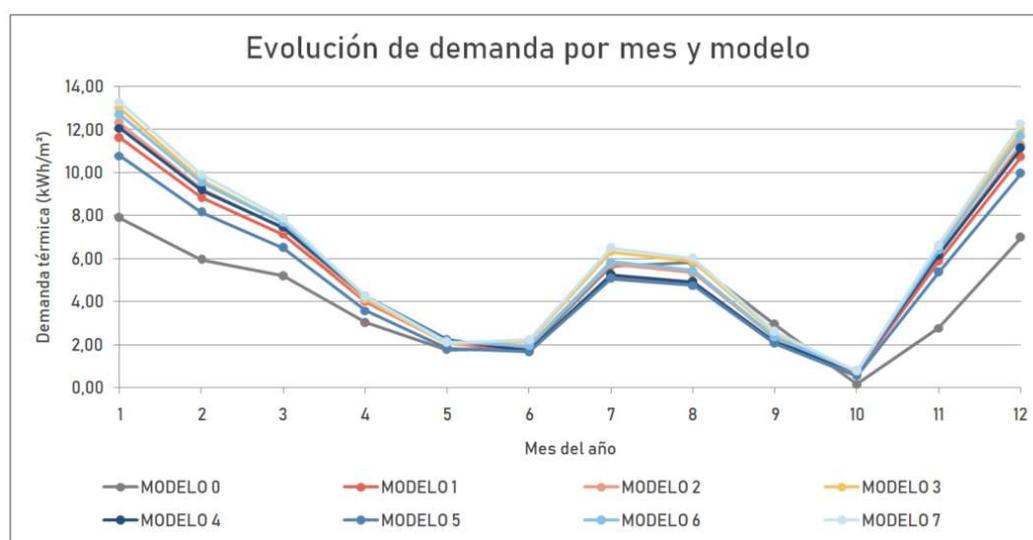


Fig. 85. Evolución de demanda por mes y modelo - Norte

A continuación, se compara la demanda anual total de cada modelo. En el diagrama de barras (Fig. 86) se observa que los modelos con una mayor superficie de hueco tienen una mayor demanda térmica total (modelos 2, 3, 6 y 7). En lo relativo a la proporción del hueco, sin variar su superficie, los modelos cuyo hueco es suelo-techo (modelos 4, 5, 6 y 7) tienen una demanda mínimamente superior, entre un 2 - 7%, que los modelos con huecos de proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3), (Tabla 25). Dado que no hay obstrucciones solares remotas, esta diferencia se debe a la mayor longitud de puente térmico en los modelos con la proporción de hueco más alargada. Esta cuestión evidencia que, para la misma superficie de hueco, una proporción cuadrada o levemente rectangular funciona mejor que un hueco suelo-techo más esbelto.

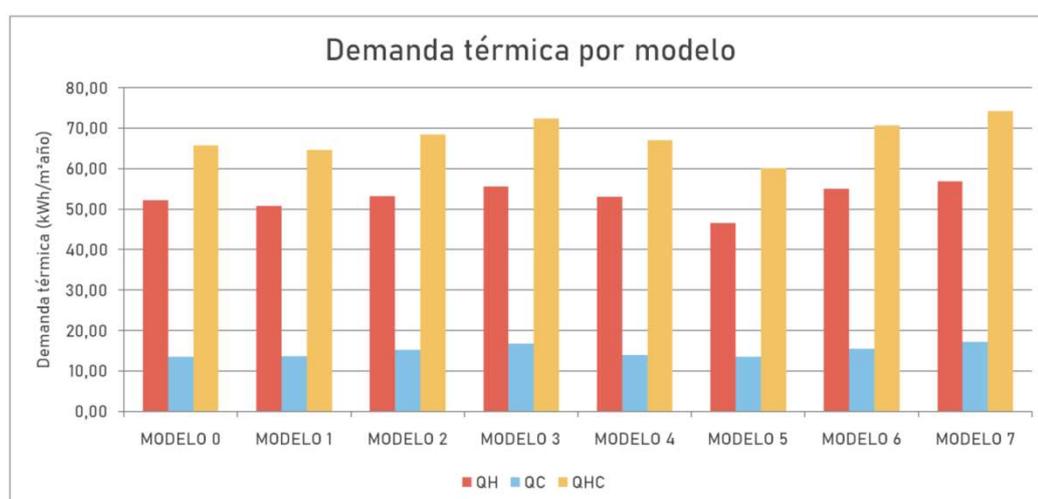


Fig. 86. Evolución de demanda anual por modelo - Norte

| | MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 2 | MODELO 3 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 6 | MODELO 7 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Q_H (kWh/m²-año) | 52,15 | 50,83 | 53,15 | 55,54 | 53,07 | 46,57 | 55,06 | 56,93 |
| Q_C (kWh/m²-año) | 13,61 | 13,73 | 15,26 | 16,80 | 13,92 | 13,50 | 15,56 | 17,28 |
| Q_{HC} (kWh/m²-año) | 65,76 | 64,56 | 68,41 | 72,34 | 66,99 | 60,07 | 70,62 | 74,21 |

Tabla 25. Datos de demanda anual por modelo - Norte

Finalmente se ha realizado una comparativa de cada modelo con el modelo original, donde se observa cómo mejora o empeora cada modelo porcentualmente respecto de dicho modelo 0 (Tabla 26).

| | DEMANDA TÉRMICA TOTAL | | |
|----------|-----------------------|--------|----------|
| | Q_H | Q_C | Q_{HC} |
| MODELO 0 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| MODELO 1 | -2,53% | 0,86% | -1,83% |
| MODELO 2 | 1,92% | 12,10% | 4,03% |
| MODELO 3 | 6,50% | 23,41% | 10,00% |
| MODELO 4 | 1,77% | 2,26% | 1,87% |
| MODELO 5 | -10,70% | -0,83% | -8,65% |
| MODELO 6 | 5,58% | 14,30% | 7,39% |
| MODELO 7 | 9,17% | 26,94% | 12,85% |

Tabla 26. Comparativa porcentual de la demanda entre modelos - Norte

Estos resultados confirman que, en general, a mayor superficie de ventana a norte, será la demanda energética. Esto se debe a que la transmitancia térmica del vidrio de dicha ventana ($5,70 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) es muy superior a la del cerramiento opaco ($1,45 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$).

Asimismo, en los modelos en la que la superficie de hueco se ha aumentado respecto del original, se observa que, a igual superficie de hueco, los modelos suelo-techo (modelos 6 y 7) tienen una demanda térmica superior, entre un 3 – 4% que los modelos con una proporción horizontal de hueco (modelos 2 y 3), por su mayor longitud de perímetro de hueco (mayor puente térmico). A pesar de que no sea una diferencia muy notable, es un aspecto técnico a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco, complementando la parte compositiva del diseño del mismo.

También se ha de destacar que, a igual superficie de hueco (modelos 0, 1, 4 y 5), los modelos que tienen el hueco centrado en la fachada (modelos 1 y 5) tienen una demanda menor, de en torno al 2 – 8%, respecto de los modelos donde el hueco está descentrado (modelos 0 y 4).

- SUR

En primer lugar, se evalúa cómo evoluciona la demanda con orientación sur a lo largo del año (Fig. 87), apreciándose una mayor disparidad de resultados respecto del modelo original que en el análisis con orientación norte. En este caso, se puede observar la variación de la demanda entre los diferentes modelos tanto en los meses de verano como en los meses más fríos, dado la mayor incidencia solar.

En julio y agosto se aprecia una gran variación de la demanda entre los diferentes modelos, proporcional al tamaño de hueco en cada caso. Esto se debe no solo a la diferencia de transmitancias hueco-cerramiento, sino también al mayor impacto de la incidencia solar a través del hueco, que no dispone de protección solar adicional a la persiana. Sin embargo, en el resto del año, la relación entre el tamaño de hueco y la demanda se ve invertida, dado que la radiación solar reduce el impacto del requerimiento de calefacción. En los meses intermedios (abril, mayo, junio y octubre) se aprecia una mayor homogeneidad en los resultados, oscilando en un margen menor a 1 kWh/m².

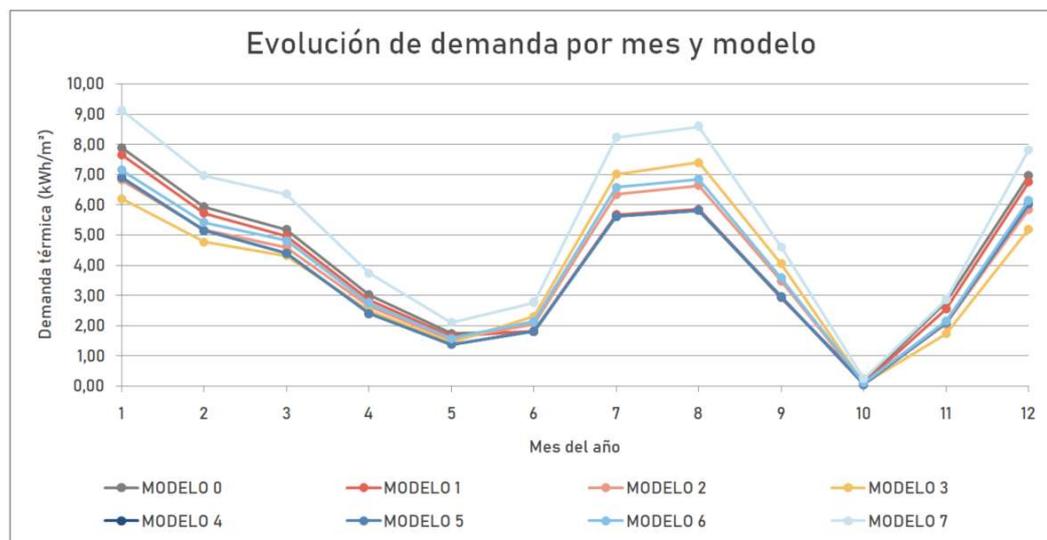


Fig. 87. Evolución de demanda por mes y modelo - Sur

A continuación, se compara la demanda anual total de cada modelo (Fig. 88). En el diagrama de barras se observa que en los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3), la demanda se reduce cuanto mayor es la superficie del hueco, entre un 2 – 5%. Sin embargo, en los modelos cuyo hueco es suelo-techo (modelos 4, 5, 6 y 7), la demanda aumenta cuanto mayor es la superficie del hueco, entre un 2 – 27%). Esta cuestión evidencia, de nuevo, que para el mismo tamaño de hueco y con un puente térmico elevado, una proporción horizontal funciona mejor que un hueco suelo-techo.

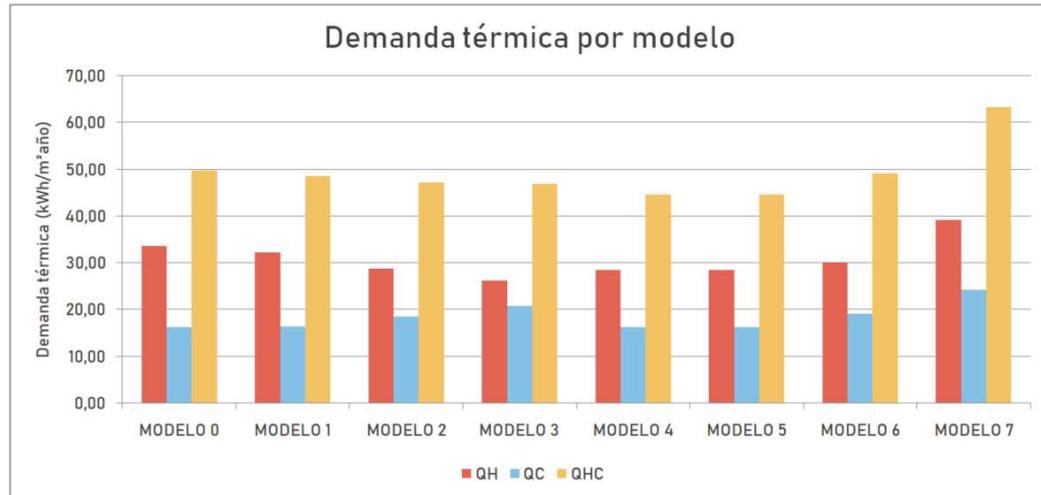


Fig. 88. Evolución de demanda anual por modelo - Sur

| | MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 2 | MODELO 3 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 6 | MODELO 7 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Q_H (kWh/m²-año) | 33,60 | 32,21 | 28,69 | 26,19 | 28,38 | 28,38 | 30,06 | 39,18 |
| Q_C (kWh/m²-año) | 16,17 | 16,28 | 18,5 | 20,75 | 16,18 | 16,18 | 19,12 | 24,16 |
| Q_{HC} (kWh/m²-año) | 49,77 | 48,49 | 47,19 | 46,94 | 44,56 | 44,56 | 49,18 | 63,34 |

Tabla 27. Datos de demanda anual por modelo - Sur

Finalmente se ha realizado una comparativa de cada modelo con el modelo original, donde se observa cómo mejora o empeora cada modelo porcentualmente respecto de este (Tabla 28).

| | DEMANDA TÉRMICA TOTAL | | |
|----------|-----------------------|--------|----------|
| | Q_H | Q_C | Q_{HC} |
| MODELO 0 | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| MODELO 1 | -4,14% | 0,68% | -2,57% |
| MODELO 2 | -14,61% | 14,41% | -5,18% |
| MODELO 3 | -22,05% | 28,32% | -5,69% |
| MODELO 4 | -15,54% | 0,06% | -10,47% |
| MODELO 5 | -15,54% | 0,06% | -10,47% |
| MODELO 6 | -10,54% | 18,24% | -1,19% |
| MODELO 7 | 16,61% | 49,41% | 27,27% |

Tabla 28. Comparativa porcentual de la demanda entre modelos – Sur

En esta tabla se puede observar que, en todos los modelos (menos el de la ventana suelo-techo con mayor superficie), a mayor superficie de hueco, menor será la demanda térmica en invierno, suponiendo una menor demanda térmica total. Esto se debe a que, aunque la transmitancia térmica del vidrio de dicha ventana ($5,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) es muy superior a la del cerramiento opaco ($1,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), es compensada por la ganancia por radiación solar de los meses de invierno.

En los modelos en los que se ha aumentado la superficie del hueco y la proporción de éste es horizontal (modelos 2 y 3), se reduce la demanda térmica total con respecto al modelo original (entre un 5 – 6%). Sin embargo, en los modelos que se ha aumentado la superficie del hueco y la proporción de este es suelo-techo (modelos 6 y 7), no solo hay una reducción muy leve de la demanda (1%), sino que en el modelo de mayor superficie existe un aumento notable (27%). Estas variaciones en la demanda son un aspecto técnico que debe tenerse en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco en viviendas en Sevilla, complementando la parte compositiva del diseño del mismo.

Finalmente, comparando los modelos con igual superficie de hueco (modelos 0, 1, 4 y 5) a Sur, se observa que, en este caso, los modelos cuyo hueco tiene una proporción suelo-techo (modelos 4 y 5) tienen una demanda térmica menor que los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0 y 1), debido a que la demanda térmica en los meses de invierno es menor (entre un 8 – 10%).

7.2. DAYLIGHT AUTONOMY

Se han agrupado los modelos por orientación con el fin de comparar cómo evoluciona el nivel de iluminancia con la profundidad en cada uno.

- NORTE

En el punto más cercano a la ventana, todos los modelos excepto el modelo 4 superan el 50% de DA exigible, lo que entra dentro de lo esperable en el entorno climático de Sevilla sin obstrucciones. En los modelos cuya superficie de hueco no se ha aumentado respecto del original (modelos 0, 1, 4 y 5), se obtiene un valor nulo de DA una vez se supera la mitad de la habitación, evidenciando un déficit lumínico muy importante en la parte posterior de dicho espacio.

En los modelos cuya superficie de hueco sí ha aumentado (modelos 2, 3, 6 y 7), se dan unos mejores resultados de DA, tanto en el punto más cercano a la ventana como cuando se aleja de la misma. En los modelos de tamaño intermedio (modelos 2 y 6), el valor de DA va disminuyendo hasta alcanzar un nivel inferior al 50% en el fondo de la habitación, siendo éste un nivel de iluminación insuficiente. En los modelos de mayor tamaño (modelos 3 y 7) el valor de DA es más homogéneo conforme se aleja de la ventana, obteniendo siempre un valor por encima del 70%, lo que excede el valor recomendado del 50%.

La Fig. 89 muestra que no solo influye el tamaño del hueco a la hora de controlar la cantidad de luz que entra en una estancia, sino que su proporción es igual de importante. Para igual superficie, los modelos cuya proporción de hueco es horizontal consiguen un mayor DA que los modelos cuya proporción es suelo-techo, oscilando entre un 66 y un 88%.

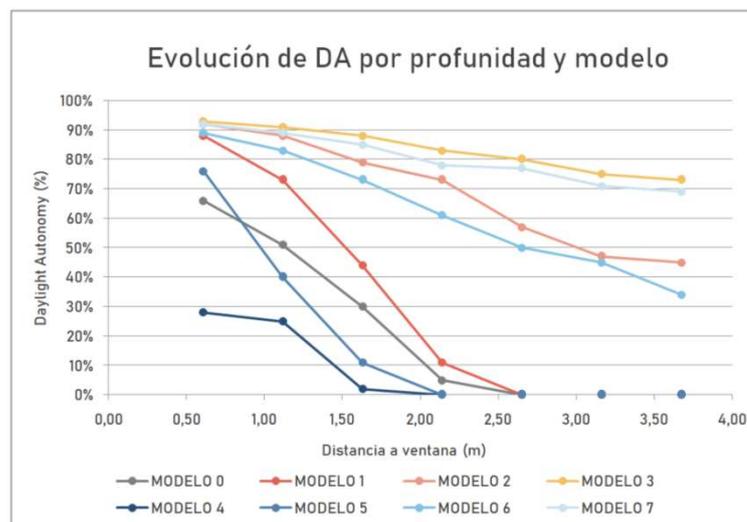


Fig. 89. Evolución de DA por profundidad y modelo - Norte

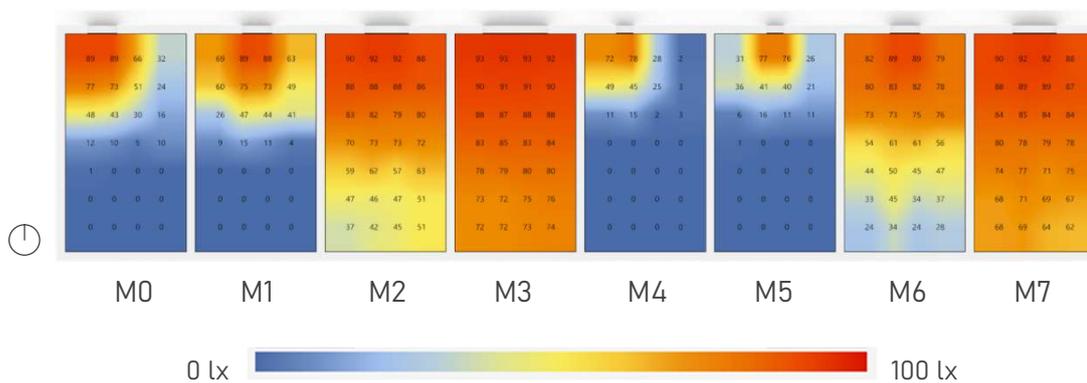


Fig. 90. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo - Norte

Se ha realizado una comparativa entre los modelos con la misma superficie de hueco, donde se observa cómo mejora o empeora la proporción suelo-techo con respecto a la horizontal (Tabla 29).

| 12% (0,66 m ²) | | | | 22% (1,21 m ²) | | 32% (1,76 m ²) | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|
| MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 2 | MODELO 6 | MODELO 3 | MODELO 7 |
| 0,00% | 42,14% | -63,81% | -16,43% | 0,00% | -9,56% | 0,00% | -3,77% |

Tabla 29. Comparativa porcentual del DA entre modelos - Norte

Comparando los modelos con igual superficie de hueco, se observa que los modelos cuyo hueco tiene una proporción suelo-techo (modelos 4, 5, 6 y 7) tienen una peor iluminancia media en la estancia que los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3). En los modelos en los que la superficie ha aumentado, esta diferencia no es tan evidente como en los huecos cuya superficie es menor (entre un 4 - 63%). Sin embargo, es un aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco, complementando la parte compositiva del diseño del mismo.

- SUR

En el punto más cercano a la ventana, todos los modelos superan el 50% de DA exigible, lo que es esperable en cualquier recinto con orientación a sur y sin obstrucciones. En los modelos cuya superficie de hueco no ha aumentado (modelos 0, 1, 4 y 5), el nivel de DA cae una vez se supera la mitad de la habitación, obteniendo un valor nulo de DA en el modelo original. Sin embargo, en el resto de modelos (modelos 1, 2 y 3), se consigue en el fondo de la habitación un DA de entorno a un 50%, siendo este un valor adecuado para el adecuado desempeño laboral.

En los modelos cuya superficie de hueco ha aumentado (modelos 2, 3, 6 y 7), se obtienen unos resultados de DA más elevados, tanto en el punto más cercano a la ventana como cuando se aleja de la misma, obteniendo siempre un valor por encima del 70%, lo que excede el valor del 50% recomendado para este indicador, dado que pueden existir problemas asociados al deslumbramiento o a un exceso de ganancias térmicas.

La Fig. 91 evidencia que no solo influye el tamaño del hueco a la hora de controlar la cantidad de luz que entra en una estancia, sino que su proporción es igualmente relevante. Para igual superficie, los modelos cuya proporción de hueco es horizontal consiguen un mayor DA que los modelos cuya proporción es suelo-techo, como indicaban otros estudios en vivienda en la misma latitud [12]. Comparando estos valores con el caso anterior hacia el norte, es posible afirmar que, en el contexto de este estudio, y en ausencia de obstrucciones remotas, los modelos orientados al sur tienen unos mejores valores de DA.

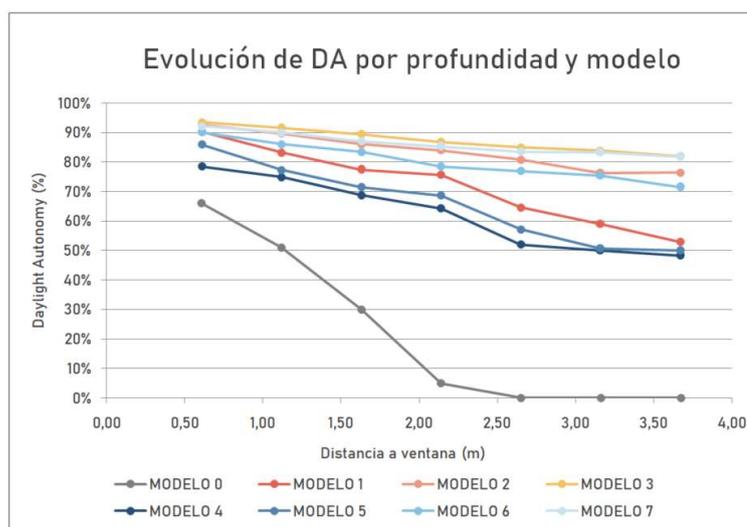


Fig. 91. Evolución de DA por profundidad y modelo - Sur

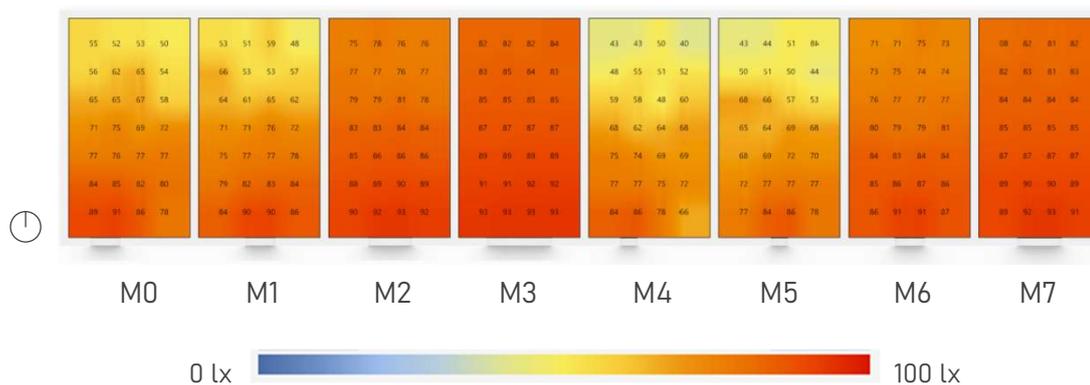


Fig. 92. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo - Sur

Se ha realizado una comparativa entre los modelos con la misma superficie de hueco, donde se observa como mejora o empeora la proporción suelo-techo con respecto a la horizontal (Tabla 30).

| 12% (0,66 m²) | | | | 22% (1,21 m²) | | 32% (1,76 m²) | |
|---------------|----------|----------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 2 | MODELO 6 | MODELO 3 | MODELO 7 |
| 0,00% | 0,80% | -12,48% | -7,52% | 0,00% | -4,11% | 0,00% | -1,51% |

Tabla 30. Comparativa porcentual del DA entre modelos - Sur

Comparando los modelos con igual superficie de hueco, se observa que los modelos cuyo hueco tiene una proporción suelo-techo en su hueco (modelos 4, 5, 6 y 7), obtienen una peor iluminancia media en la estancia que los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3), oscilando entre un 2 - 12%. En los modelos en los que la superficie ha aumentado, esta diferencia no es tan evidente como en los huecos cuya superficie es menor. Sin embargo, es un aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco, complementando siempre la parte compositiva del diseño del mismo.

7.3. CIRCADIAN STIMULUS AUTONOMY

Se han agrupado los modelos por orientación con el fin de comparar cómo evoluciona el nivel de iluminancia con la profundidad en cada uno.

- NORTE

En el punto más cercano a la ventana todos los modelos tienen un alto valor de CSA, por encima del 80%. En los modelos cuya superficie de hueco no se ha aumentado (modelos 0, 1, 4 y 5), existe un déficit lumínico considerable, ya que una vez se supera la mitad de la habitación, el CSA no supera el 40%, quedando por debajo del valor recomendado (50%) (Fig. 93).

En los modelos cuya superficie de hueco sí ha aumentado (modelos 2, 3, 6 y 7), se dan unos mejores resultados de CSA, tanto en el punto más cercano a la ventana como cuando se aleja de la misma. En los modelos de tamaño intermedio (modelos 2 y 6) el valor de DA va disminuyendo hasta alcanzar un nivel inferior al 60% en el fondo de la habitación. Así, estos modelos están por encima del valor recomendado.

El tamaño del hueco es igual de importante que la proporción de este a la hora de controlar la cantidad de luz natural que entra en una estancia. Para igual superficie, los modelos cuya proporción de hueco es horizontal consiguen un mayor CSA que los modelos cuya proporción es suelo-techo.

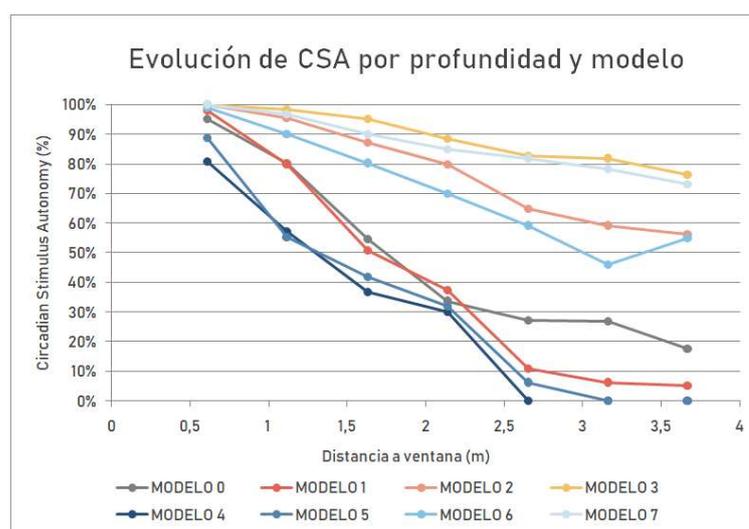


Fig. 93. Evolución de CSA por profundidad y modelo - Norte

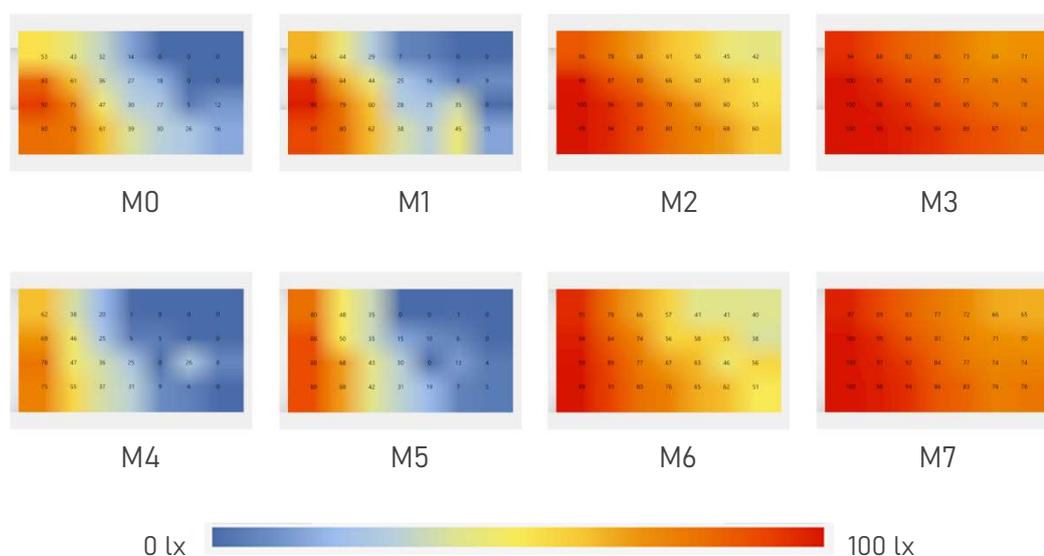


Fig. 94. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo - Sur

Se ha realizado una comparativa entre los modelos con la misma superficie de hueco, a fin de observar cómo evoluciona la proporción suelo-techo con respecto a la horizontal (Tabla 31).

| 12% (0,66 m ²) | | | | 22% (1,21 m ²) | | 32% (1,76 m ²) | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|
| MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 2 | MODELO 6 | MODELO 3 | MODELO 7 |
| 0,00% | -14,05% | -38,86% | -33,19% | 0,00% | -8,02% | 0,00% | -2,91% |

Tabla 31. Comparativa porcentual del CSA entre modelos - Norte

Comparando los modelos con igual superficie de hueco, se observa que los modelos cuyo hueco tiene una proporción suelo-techo (modelos 4, 5, 6 y 7) tienen un CSA promedio menor a lo largo del año en la estancia que los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3), oscilando entre un 2 - 38%. En los modelos en los que la superficie es mayor, esta diferencia no es tan evidente como en los huecos cuya superficie es menor. Sin embargo, es un aspecto para tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco, complementando la parte compositiva del diseño del mismo, puesto que a igual superficie el hueco de proporción horizontal, se obtienen unos mejores valores de CSA en la habitación, lo que repercute en una mayor promoción de la salud de los ocupantes.

- SUR

En los modelos cuya superficie de hueco no se ha aumentado (modelos 0, 1, 4 y 5) existe un déficit lumínico que se evidencia una vez se supera la mitad de la habitación, ya que el CSA cae por debajo del 50% (Fig. 95).

En los modelos cuya superficie de hueco sí ha aumentado (modelos 2, 3, 6 y 7), se dan unos mejores resultados de CSA, en torno al 100% en el punto más cercano a la ventana. Conforme el punto analizado se aleja de la ventana, el porcentaje de CSA que se alcanza va disminuyendo entorno al 80 % en el modelo de tamaño intermedio (modelos 2 y 6), lo que excede en mayor medida el valor deseado que en los estudios orientados hacia el norte.

El tamaño del hueco es igual de importante que la proporción de este a la hora de controlar la cantidad de luz natural que entra en una estancia. Para igual superficie, los modelos cuya proporción de hueco es horizontal consiguen un mayor CSA que los modelos cuya proporción es suelo-techo, oscilando entre un 91 - 95%. Aunque no sea una cuestión tan acusada como en los modelos orientados al norte, es un aspecto que se debe tener en cuenta en el diseño, ya que la superficie necesaria para alcanzar un CSA adecuado puede ser menor.

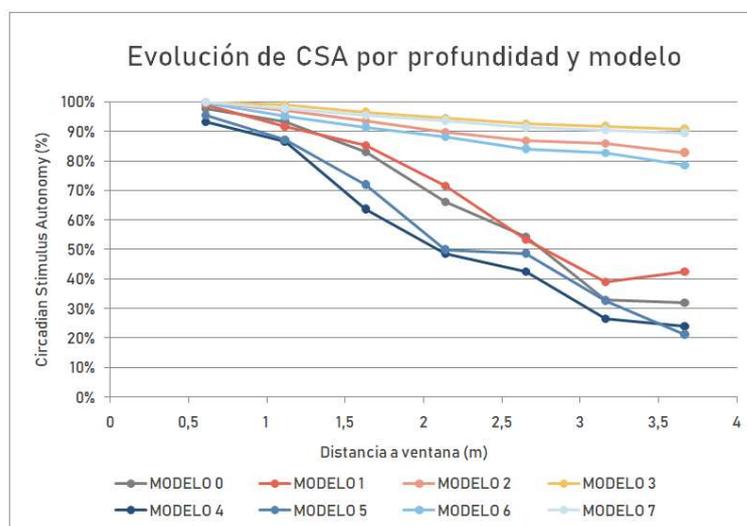


Fig. 95. Evolución de DA por profundidad y modelo - Sur

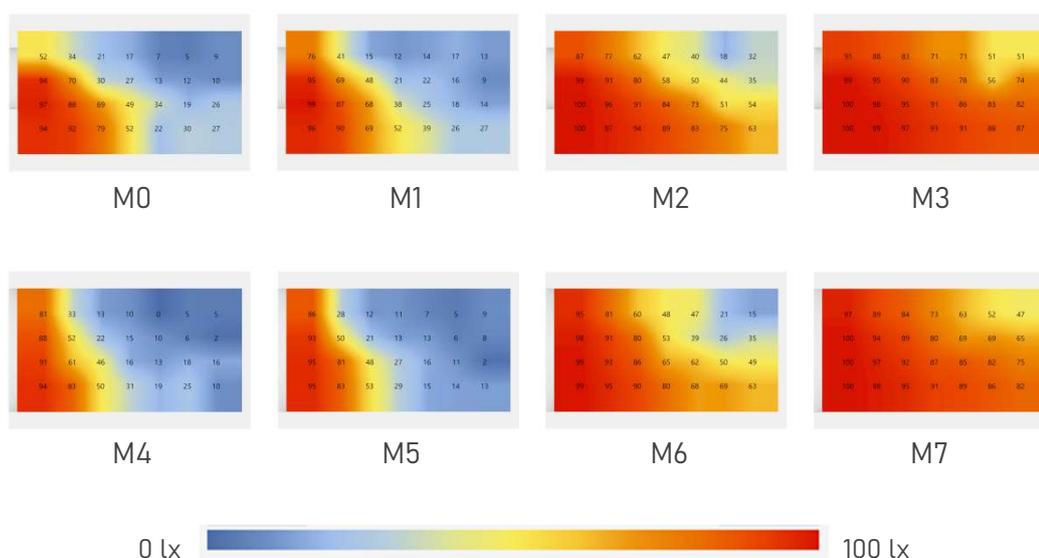


Fig. 96. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo - Sur

Se ha realizado una comparativa entre los modelos con la misma superficie de hueco, donde se observa cómo evolucionan los resultados de la proporción suelo-techo frente a la horizontal.

| | 12% (0,66 m ²) | | | | 22% (1,21 m ²) | | 32% (1,76 m ²) | |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|--|
| MODELO 0 | MODELO 1 | MODELO 4 | MODELO 5 | MODELO 2 | MODELO 6 | MODELO 3 | MODELO 7 | |
| 0,00% | 4,94% | -16,18% | -11,50% | 0,00% | -2,56% | 0,00% | -1,08% | |

Tabla 32. Comparativa porcentual del CSA entre modelos - Sur

Comparando los modelos con igual superficie de hueco, se observa que los modelos cuyo hueco tiene una proporción suelo-techo (modelos 4, 5, 6 y 7) tienen un valor promedio de CSA en la estancia menor que los modelos cuyo hueco tiene una proporción horizontal (modelos 0, 1, 2 y 3), oscilando dicha diferencia en torno al 1 - 16%. En los modelos en los que la superficie ha aumentado, esta diferencia no es tan evidente como en los huecos cuya superficie es menor. Sin embargo, es un aspecto para tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del hueco, complementando la parte compositiva del diseño del mismo, puesto que, a igual superficie, con el hueco de proporción horizontal se obtienen unos mejores valores de CSA en la habitación.

08

LIMITACIONES DE ESTUDIO



8. LIMITACIONES DE ESTUDIO

Debido a la extensión de esta investigación, adaptada en tiempo y forma al volumen exigido a desarrollar en un Trabajo de Fin de Grado, se han asumido un conjunto de limitaciones de estudio. Estas limitaciones se podrán tener en cuenta en futuras líneas de investigación, en las que se podrá profundizar en el trabajo realizado.

- Este trabajo se ha centrado en el análisis de un edificio existente de los años 60 con la envolvente original.
El evaluar edificios existentes con rehabilitación energética de la envolvente, así como edificios de nueva planta, permite tener un mayor conocimiento sobre el impacto de los huecos en la demanda energética frente al confort y la promoción de la salud.
- Se ha utilizado un único valor de reflectancia de paredes, suelos y techos.
Incluir la reflectancia para los paramentos como variable del caso de estudio. El análisis de la influencia de la variación de reflectancia de paredes, suelo y techo en el flujo luminoso que incide tanto en el plano de trabajo como en el plano del ojo, así como en su composición espectral, sería gran interés, puesto que se podría estudiar cómo influyen las condiciones cromáticas del recinto al rendimiento y bienestar de los ocupantes.
- No se ha analizado el deslumbramiento que se produce en el recinto.
Para un correcto confort visual de los ocupantes, no solo se debe tener en cuenta el nivel de iluminancia obtenido en los planos anteriormente mencionados; evaluar el deslumbramiento que puede llegar a producirse contribuye a delimitar los niveles de iluminancia y hallar una solución más completa, actuando como otro límite adicional en el tamaño, posición y forma de huecos, junto con la reducción de la demanda energética.
- No se ha incluido el análisis del impacto de obstrucciones remotas y protecciones solares.
En cualquier espacio arquitectónico, es de gran relevancia evaluar tanto las obstrucciones remotas (según su tamaño y reflectancia media) como las protecciones solares existentes en el hueco. Son variables muy importantes para este análisis, ya que pueden influir notablemente en los resultados, observándose una gran variación en un mismo modelo, según su orientación.
- No se han analizado otros espacios de la vivienda.
Como el salón comedor, una sala de estar o la cocina. La emergencia sanitaria ha mostrado que, en casos de necesidad, los habitantes de una vivienda pueden disponer de los diferentes espacios existentes para desarrollar sus actividades laborales.

- Limitación en el número y tipo de variables de contorno.
Entre otras, destacan las orientaciones este y oeste, ampliar los umbrales de iluminancia (con un valor intermedio de 250 lx, adecuado para otras tareas laborales), utilizar un horario de tiempo parcial de mañana (habitualmente de 8:00 a 15:00), más opciones de huecos y, finalmente, otros tamaños y disposiciones de recintos.
- Se ha analizado únicamente la casuística de una única vivienda en Sevilla.
El estudiar otras localizaciones, tanto a nivel español como europeo, permite establecer conclusiones más amplias incluyendo tanto el efecto de la latitud como de las condiciones climáticas, permitiendo a los Arquitectos tener una mayor información a la hora de afrontar el diseño de huecos según su implantación.



09

CONCLUSIONES

9. CONCLUSIONES

Este trabajo ha desarrollado una metodología de análisis para cuantificar el impacto del hueco arquitectónico en la demanda energética, el nivel de acceso a la luz natural a lo largo del año y la promoción de la salud de los ocupantes a través de una adecuada respuesta circadiana. Asimismo, ha evaluado dicho impacto en un conjunto representativo de variables, realizando la diagnosis de un caso aplicado en un dormitorio de vivienda plurifamiliar existente, ubicada en Sevilla.

- **Iluminación:**

Las conclusiones vinculadas a iluminación para un mejor desempeño laboral (Autonomía de Luz Día, DA) y para una promoción de la salud circadiana (Autonomía de Estímulo Circadiano, CSA) siguen una misma tendencia. Para la misma superficie de hueco, en los modelos orientados al sur se obtienen unos valores más altos de ambos indicadores que en los modelos orientados al norte, en ausencia de obstrucciones remotas, oscilando en torno al 1 - 4%. En los modelos cuya superficie de hueco es mayor, la cantidad de luz que entra en la habitación consigue alcanzar el fondo de la misma, con unos valores de DA y CSA adecuados en toda su profundidad, en el caso del norte (62 - 86%), siendo incluso elevados hacia el sur (80 - 94%). Sin embargo, en los modelos de menor tamaño no se consigue un nivel de iluminancia adecuado si no se está en la mitad de la sala más cercana a la ventana, ya que la luz natural no consigue alcanzar el fondo de la habitación. Este efecto, no obstante, no es deseado en espacios de trabajo, pero puede no ser un problema en espacios destinados exclusivamente al ocio o al descanso (dormitorio convencional), pudiendo acentuarse así el contraste lumínico en el recinto como recurso compositivo.

Por otra parte, cuanto mayor es el hueco, se ha podido comprobar que los valores obtenidos de DA y CSA aumentan, tanto en el punto más próximo a la ventana como en el fondo de la habitación, con una mejora promedio de entre 12 y 35%. La proporción del hueco también influye en los resultados obtenidos, puesto que, para la misma superficie, un hueco de proporción horizontal permite un mayor acceso a la luz natural que un hueco de proporción suelo-techo, mejorando entre un 3 - 38% hacia el norte y un 2 - 16% hacia el sur. Así mismo, un hueco centrado en la fachada consigue unos valores más homogéneos que un hueco desplazado a un lateral, con una mejora de en torno al 5 - 14%.

- **Demanda energética por climatización:**

En lo relativo al estudio de la demanda energética por climatización, se observa que la orientación norte obtiene valores de demanda superiores a los de la orientación sur (entre 17 y 54%), experimentando asimismo una reducción de la demanda térmica cuando se encuentran orientados al sur frente al norte, oscilando entre 14 y 35% dicha diferencia. En los modelos orientados al norte, aumentar el tamaño de ventana eleva la demanda térmica total en torno al 4 - 10%, mientras que, en los modelos orientados al sur, aumentar el tamaño de ventana supone una reducción de en torno al 3 - 5%. Esta condición, derivada de las ganancias por radiación solar frente a las pérdidas energéticas por una envolvente sin rehabilitar, permite maximizar el tamaño de ventana, lo cual favorece en las cuestiones de iluminación, sin que conlleve una alta pérdida energética.

Asimismo, no solo influye el tamaño del hueco en la demanda térmica total, sino que su proporción también lo hace. Para la misma superficie de hueco, se ha comprobado que una proporción horizontal tiene una menor demanda térmica que un hueco suelo-techo, oscilando entre 5 y 30%.

Al valorar en conjunto todas estas variables, unificando cuestiones de eficiencia, iluminación y salud de los ocupantes, se observan las siguientes cuestiones, aplicadas al caso de estudio (dormitorio de vivienda existente en Sevilla, sin rehabilitación energética):

- La orientación sur del hueco ofrece unas mejores condiciones lumínicas y térmicas en cualquier caso, ya que además de lograr una demanda térmica total inferior, permite aumentar la superficie del hueco sin que esto conlleve un acusado aumento de la demanda térmica total. Así, una superficie de hueco mayor consigue un mayor nivel de iluminancia, mejorando el confort visual de los ocupantes, incluso superando los valores requeridos de CSA y DA.
- De igual modo, para la misma superficie de hueco, una ventana horizontal se comporta mejor ante todos estos indicadores térmicos y lumínicos que un hueco suelo-techo, independientemente de la orientación. Además, un hueco horizontal favorece una mejor relación con el exterior y unas mejores vistas, influyendo en el estado anímico del ocupante.

Por lo tanto, ya que un diseño óptimo de hueco debe ser capaz de resolver simultáneamente las cuestiones mencionadas, en el caso de dormitorios híbridos/despachos en viviendas sevillanas con envolvente no rehabilitada, se recomienda optar por huecos:

- Horizontales, frente a diseños de hueco suelo-techo.
- Con una superficie mayor (norte) o igual (sur) a 1,20m².
- Centrados en la fachada antes que descentrados.
- Preferiblemente, orientados al sur antes que a norte.

Con todo ello, cabe mencionar que estos criterios técnicos no contradicen el diseño compositivo, sino que buscan complementarlos en la toma de decisiones proyectuales de los arquitectos. Así, con este estudio se pretende dar una visión más completa de la realidad, aportando una cuantificación relativa de cómo influyen las variables analizadas en el diseño del hueco.

A photograph of a modern, minimalist building with a white facade and large glass windows. The building is set against a light sky. In the foreground, there is a gravel courtyard. A large, dark blue number '10' is overlaid on the lower left side of the image. The text 'FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN' is positioned to the right of the number.

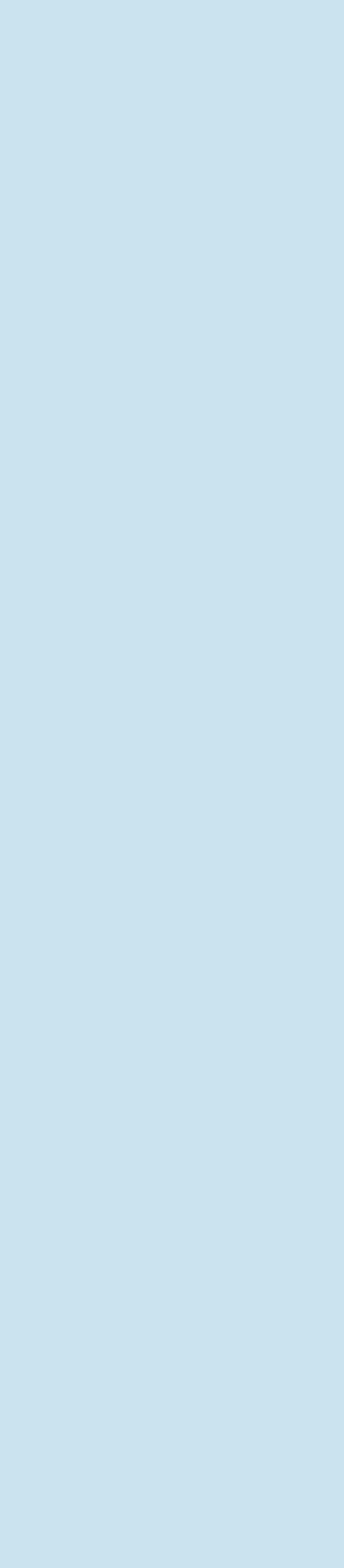
10

**FUTURAS LÍNEAS
DE INVESTIGACIÓN**

10. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Ya que este estudio puede considerarse el inicio de una línea de investigación de gran proyección futura, con impacto beneficioso para la Sociedad y utilidad como herramienta de apoyo en el proceso proyectual, se establecen futuras líneas de investigación que complementen y desarrollen las conclusiones obtenidas en este trabajo. En primer lugar, se deben tener en cuenta las limitaciones del estudio comentadas ya que se obtendría un análisis más completo.

- Evaluar el ahorro energético en iluminación eléctrica.
Conociendo el valor de DA obtenido, podría evaluarse el coste que tendría el consumo de iluminación eléctrica en cada modelo, siendo una cuestión relevante a tener en cuenta a la hora de realizar las conclusiones.
- Analizar el impacto de obstrucciones solares.
- Evaluar diferentes envolventes, tanto existentes como rehabilitadas y/o de nueva construcción.
- Realizar mediciones para el confort de los ocupantes.
Sería de gran interés y relevancia completar el análisis del caso de estudio mediante una serie de mediciones o encuestas que valoren el confort real de los ocupantes en las diversas hipótesis de trabajo. De este modo, en el trabajo no sólo se tendrían en cuenta aspectos técnicos si no que se acompañaría de la percepción y la opinión del usuario.
- Aplicar la metodología planteada en otras estancias de la vivienda de diferentes localizaciones.
De igual modo que se ha escogido un dormitorio estándar como caso de estudio, se podría analizar el salón de una vivienda. La localización también es un punto de interés para ampliar la muestra.



11

BIBLIOGRAFÍA



11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Á. L. León, R. Suárez, P. Bustamante, M. Á. Campano, and D. Moreno-Rangel, "Design and Performance of Test Cells as an Energy Evaluation Model of Facades in a Mediterranean Building Area", *Energies*, no. 10, 1816, 2017.
- [2] Á. L. León, S. Dominguez, M. Á. Campano, and C. Ramirez-Balas, "Reducing the Energy Demand of Multi-Dwelling Units in a Mediterranean Climate Using Solar Protection Elements", *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3398-3424, 2012.
- [3] Á. L. León, S. Domínguez, M. Á. Campano, and C. Ramírez-Balas, "Reducing the energy demand of multi-dwelling units in a mediterranean climate using solar protection elements", *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3398-3424, 2012.
- [4] A. López, "La mirada atenta cometidos visuales en arquitectura" (Tesis Doctoral Inédita), Universidad de Sevilla, Sevilla, 2004.
- [5] A. Ruiz, M. A. Campano, I. Acosta, and O. Luque, "Partial Daylight Autonomy (DAP): A New Lighting Dynamic Metric to Optimize the Design of Windows for Seasonal Use Spaces", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 17, 8228, 2021.
- [6] B. J. Álvarez, "Consecuencias de la discronia circadiana en la salud del trabajador", *Revista CES Salud Pública*, vol. 4, no. 2, pp. 111-115, 2013.
- [7] B.O.E. núm. 111, "Orden de 4 de mayo de 1970 por la que se modifican las Ordenanzas Provisionales de Viviendas de Protección Oficial, aprobadas por la Orden de 20 de mayo de 1969", Mayo 1970 Mayo 1970.
- [8] B.O.E. núm. 61, "Orden de 29 de febrero de 1944, por la que se establecen las condiciones higiénicas mínimas que han de reunir las viviendas", Marzo 1944.
- [9] C. F. Reinhart, J. Mardaljevic and Z. Rogers, "Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design" *LEUKOS J. Illum. Eng. Soc. North Am.* vol. 3, pp. 7-31, 2006.
- [10] C. M. Munoz, P. M. Esquivias, D. Moreno, I. Acosta, and J. Navarro, "Climate-based daylighting analysis for the effects of location, orientation and obstruction", *Light. Res. Technol.*, vol. 46, no. 3, pp. 268-280, Jun. 2014.
- [11] C. Marino, A. Nucara, and M. Pietrafesa, "Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions", *J. Build. Eng.*, vol. 13, pp. 169-183, 2017.
- [12] D. Urge-Vorsatz, K. Petrichenko, M. Staniec, and J. Eom, "Energy use in buildings in a long-term perspective", *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 5, no. 2, pp. 141-151, 2013.
- [13] F. J. S. de la Flor, S. Á. Domínguez, J. L. M. Félix, and R. G. Falcón, "Climatic Zoning and Its Application to Spanish Building Energy Performance Regulations", *Energy Build.* vol. 40, 1984-1990.

- [14] I. Acosta, M. Á. Campano, and J. F. Molina, "Analysis of energy savings and visual comfort produced by the proper use of windows", *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 358–365, 2016.
- [15] I. Acosta, M. Á. Campano, and J. F. Molina, "Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces", *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 493–506, Apr. 2016.
- [16] I. Acosta, M. Á. Campano, R. Leslie, and L. Radetsky, "Daylighting design for healthy environments: analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus", *Solar Energy*, vol. 193, pp. 584–596, Nov. 2019.
- [17] I. Acosta, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, and C. Muñoz, "Dynamic Daylight Metrics for Electricity Savings in Offices: Window Size and Climate Smart Lighting Management", *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3143, Nov. 2018.
- [18] I. Acosta, R.P. Leslie, and M. G. Figueiro, "Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms", *Light. Res. Technol.* Vol. 49, pp. 49–61, 2017.
- [19] International Energy Agency, *Transition to Sustainable Buildings - Strategies and opportunities to 2050*. Paris (France), 2013.
- [20] J. Santamaría, S. Girón, and M. Á. Campano, "Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate", *Energy Build.*, vol. 128, pp. 772–784, 2016.
- [21] J.D. Bullough, M.S. Rea, and M.G. Figueiro, "Of mice and women: Light as a circadian stimulus in breast cancer research", *Cancer Causes and Control*, vol. 17, pp. 375–383, 2006.
- [22] L. Bellia, I. Acosta, M. Á. Campano, and F. Fragliasso, "Impact of daylight saving time on lightning energy consumption and on the biological clock for occupants in office buildings", *Solar Energy*, vol. 211, pp. 1347–1364, Nov. 2020.
- [23] M. A. Campano, I. Acosta, A. L. León, and C. Calama, "Validation Study for Daylight Dynamic Metrics by Using Test Cells in Mediterranean Area", *Int. J. Eng. Tech.*, vol. 10, no. 6, 2018.
- [24] M. Á. Campano, I. Acosta, S. Domínguez, and R. López-Lovillo, "Dynamic analysis of office lighting smart controls management based on user requirements", *Automation in Const.*, vol. 133, 104021, 2022.
- [25] M. G. Figueiro, B. Steverson, J. Heerwagen, K. Kampschroer, C. M. Hunter, K. Gonzales, B. Plitnick, and M. S. Rea, "The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers", *Sleep Heal*, vol. 3, pp. 204–215, 2017.
- [26] M. G. Figueiro, J. A. Brons, B. Plitnick, B. Donlan, R. P. Leslie, and M. S. Rea, "Measuring circadian light and its impact on adolescents", *Light. Res. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 201–215, Jun. 2011.

- [27] M. V. Requena-García-Cruz, J. Díaz-Borrego, E. Romero-Sánchez, A. Morales-Esteban, and M. Á. Campano, "Assessment of Integrated Solutions for the Combined Energy Efficiency Improvement and Seismic Strengthening of Existing URM Buildings", *Buildings*, vol. 12, 1276, 2022.
- [28] Ministerio de Fomento de España, Código Técnico de La Edificación (CTE), Madrid, España, 2006.
- [29] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, Madrid, España, 2010.
- [30] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, Documento Básico HE-Ahorro de Energía, Madrid, España, 2022.
- [31] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, Documento Básico HS-Salubridad, Madrid, España, 2022.
- [32] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Procedimiento para la Certificación de Eficiencia Energética, Madrid, España, 2016.
- [33] N. R. Martins and G. Carrilho da Graça, "A simulation study of decreased life expectancy from exposure to ambient particulate air pollution (PM2.5) in naturally ventilated workspaces", *J. Build. Eng.*, 30, Article 101268, Jul. 2020.
- [34] R. P. Leslie, L. C. Radetsky, and A. M. Smith, "Conceptual design metrics for daylighting", *Light. Res. Technol.*, vol. 44, no. 3, pp. 277–290, Sep. 2012.
- [35] S. Domínguez, J. Fernández-Agüera, A. Peacock, and I. Acosta, "Energy related practices in Mediterranean low-income housing", *Build. Res. & Inf.*, vol. 48, pp 34–52, 2020.
- [36] S. Domínguez, J. Fernández-Agüera, J. J. Sendra, and S. Roaf, "The performance of Mediterranean low-income housing in scenarios involving climate change", *Energy and Build.*, vol. 202, 2019.
- [37] S. Domínguez, J. J. Sendra, A. L. León, and P. M. Esquivias, "Towards energy demand reduction in social housing buildings: Envelope system optimization strategies", *Energies*, vol. 5, no. 7, pp. 2263–2287, 2012.
- [38] S. Domínguez, J. J. Sendra, J. Fernández-Agüera, and R. Escandón, "La construcción de la vivienda social en Sevilla y su catalogación 1939–1979", Sevilla. Editorial Universidad de Sevilla, 2017. ISBN 978-84-472-1829-5.
- [39] S. Treado, G. Gillette, and T. Kusuda, "Daylighting with windows, skylights, and clerestories," *Energy Build.*, vol. 6, no. 4, pp. 319–330, 1984.
- [40] T. Cuerdo-Vilches, M. Á. Navas-Martín, S. March, and I. Oteiza, "Adequacy of telework spaces in homes during the lockdown in Madrid, according to socioeconomic factors and home features", *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, 2021.
- [41] V. López, "El hueco, punto de inflexión", *Tectónica*, vol. 4, pp. 2, Marzo 1997.

- [42] Z. Tan, A. C. Roberts, E. Hee Lee, K-W. Kwok, J. Car, C. Kiong Soh, and G. Christopoulos, "Transitional areas affect perception of workspaces and employee well-being: A study of underground and above-ground workspaces", *Building and Environment*, vol. 179, Article 106840, Jul. 2020.



12 ANEXOS

12. ANEXOS

12.1. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Ahorro energético:** Acción o conjunto de medidas destinadas a reducir la cantidad de energía utilizada para un proceso o actividad específica, sin comprometer la calidad o el rendimiento. El ahorro energético puede lograrse mediante mejoras en la eficiencia energética, cambios en los hábitos de consumo y la adopción de tecnologías más eficientes.
- **Aprovechamiento lumínico:** Uso eficiente de la luz natural o artificial para iluminar adecuadamente un espacio, minimizando la necesidad de fuentes de luz adicionales.
- **Ciclo circadiano:** Ritmo biológico de aproximadamente 24 horas que regula procesos fisiológicos en organismos vivos, como el sueño, la temperatura corporal y la liberación de hormonas.
- **Confort térmico:** Estado de satisfacción térmica en el que una persona se siente cómoda y no experimenta ni demasiado calor ni demasiado frío.
- **Consumo de energía:** Cantidad de energía utilizada en un sistema, dispositivo o proceso en un período de tiempo determinado. Se expresa en unidades como kilovatios-hora (kWh).
- **Cortisol:** Hormona esteroide producida por las glándulas suprarrenales en respuesta al estrés. Regula el metabolismo, la respuesta inmunológica y los niveles de energía.
- **Demanda energética:** Cantidad de energía requerida para satisfacer las necesidades de un sistema o un organismo en particular.
- **Deslumbramiento:** Exceso de luz que causa molestias visuales o dificulta la visión adecuada debido a contrastes extremos o fuentes de luz intensas.
- **Distribución de potencia espectral (SPD):** Descripción de cómo se distribuye la energía de una señal de luz en función de su longitud de onda o frecuencia.
- **Eficiencia energética:** Relación entre la cantidad de energía utilizada en un sistema y la cantidad de energía realmente aprovechada para cumplir con un objetivo específico. Se busca maximizar el rendimiento con el menor consumo de energía posible.

- **Estímulo circadiano:** Se refiere a los factores ambientales, como la luz y la oscuridad, que influyen en la regulación del ritmo circadiano de un organismo.
- **Iluminancia:** Medida de la cantidad de luz que incide sobre una superficie en un área determinada. Se mide en lux (lx).
- **Luz circadiana:** Espectro de luz que afecta al ritmo circadiano de los seres vivos, influyendo en la regulación de sus funciones biológicas.
- **Melatonina:** Hormona producida por la glándula pineal que regula los patrones de sueño y vigilia. Su producción se ve afectada por la luz y está involucrada en la sincronización del ritmo circadiano.
- **Métricas dinámicas:** Parámetros o medidas que se utilizan para evaluar y cuantificar aspectos que varían con el tiempo, como la iluminación, la temperatura o el rendimiento de un sistema.
- **Protecciones solares de huecos:** Dispositivos o elementos instalados en las ventanas de un edificio para controlar la entrada de luz solar y el calor asociado. Estas protecciones incluyen persianas, cortinas, toldos, láminas reflectantes, películas de control solar u otros sistemas que ayudan a regular la iluminación natural y el calor que ingresa al interior de un espacio, mejorando así el confort térmico y reduciendo la carga de enfriamiento o calefacción requerida. Además, las protecciones solares de ventana también pueden contribuir al ahorro energético al disminuir la necesidad de utilizar iluminación artificial y sistemas de climatización.
- **Reflectancia:** Proporción de luz reflejada por una superficie en relación con la luz incidente sobre ella.
- **Rendimiento laboral:** Medida de la eficacia y la productividad en el entorno de trabajo. Se evalúa en función de los resultados alcanzados y la calidad del trabajo realizado.
- **Serotonina:** Neurotransmisor involucrado en la regulación del estado de ánimo, el sueño, el apetito y otras funciones cognitivas. Juega un papel importante en la salud mental y el bienestar.
- **Transmitancia:** Capacidad de un material o medio para permitir el paso de la luz a través de él.

12.2. LISTADO DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1. Esquema introducción. Elaboración propia | 10 |
| Fig. 2. Obras en Carabanchel, 1957. Juan Miguel Pando Barrero, Fototeca Nacional | 18 |
| Fig. 3. C/Garrotín. Google Earth | 19 |
| Fig. 4. Av. De Pedro Romero. Google Earth | 19 |
| Fig. 5. Av. Kansas City. Google Earth | 19 |
| Fig. 6. C/Tesalónica. Google Earth | 19 |
| Fig. 7. C/Luis Arenas Ladislao. Elaboración propia | 20 |
| Fig. 8. Av. de la Buhaira. Google Earth | 20 |
| Fig. 9. C/Periodista Juan Tribuna. Google Earth | 20 |
| Fig. 10. C/Enramadilla. Google Earth | 20 |
| Fig. 11. C/Profesor Manuel Olivenza. Google Earth | 20 |
| Fig. 12. Puesto de teletrabajo. ARAGÓNDIGITAL.ES | 21 |
| Fig. 13. Relación con el exterior. Getty Images | 21 |
| Fig. 14. Relación hombre-paisaje. Andrés López, Tesis Doctoral Inédita | 22 |
| Fig. 15. Ciclo del estímulo circadiano en relación con el CCT. M. Á. Campano | 23 |
| Fig. 16. Respuestas físicas del ritmo circadiano. Elaboración propia | 23 |
| Fig. 17. Esquema nivel de iluminación natural insuficiente. Elaboración propia | 24 |
| Fig. 18. Esquema nivel de iluminación natural óptimo. Elaboración propia | 25 |
| Fig. 19. Distribución energética, España. Elaboración propia | 25 |
| Fig. 20. Distribución energía eléctrica, España. Elaboración propia | 25 |
| Fig. 21. Contribución de ganancias solares. Elaboración propia | 25 |
| Fig. 22. Esquema Estado del Arte. Elaboración propia | 26 |
| Fig. 23. Esquema Metodología. Elaboración propia | 28 |
| Fig. 24. Ubicación Barrio de San Pablo en Sevilla. Elaboración propia | 29 |
| Fig. 25. Ubicación caso de estudio dentro de San Pablo. Elaboración propia | 29 |
| Fig. 26. Planta tipo vivienda escogida para caso de estudio. Elaboración propia | 30 |
| Fig. 27. Planimetría dormitorio caso de estudio. Elaboración propia | 30 |
| Fig. 28. Condiciones operacionales y perfil de uso. CTE DB HE Anejo D | 30 |
| Fig. 29. Iluminancia. I. Acosta | 34 |
| Fig. 30. Autonomía de Luz Día. M. Á. Campano | 35 |
| Fig. 31. SPD <i>relative</i> de diversas fuentes de luz I. Acosta | 36 |
| Fig. 32. SPD resultantes. [22] | 37 |
| Fig. 33. CS obtenido por valor de iluminancia. [22] | 37 |
| Fig. 34. <i>IFC Builder</i> . Google Fotos | 38 |
| Fig. 35. <i>CYPETHERM HE</i> . Google Fotos | 38 |
| Fig. 36. <i>Rhinoceros</i> . Google Fotos | 38 |
| Fig. 37. <i>ClimateStudio</i> . Google Fotos | 38 |
| Fig. 38. Hoja <i>excel</i> para cálculo del CSA. Elaboración propia | 39 |
| Fig. 39. Celda de ensayo en Sevilla. [1] | 40 |
| Fig. 40. Vivienda modelizada en Cross, Pirotecnia. [27] | 40 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 41. Vivienda modelizada en el Platinar. [2] | 40 |
| Fig. 42. Estudio de validación del motor Radiance por comparación con celda de ensayo en Sevilla. [23] | 41 |
| Fig. 43. Alzado modelos simulación. Elaboración propia | 43 |
| Fig. 44. Imagen 3D modelo original. Elaboración propia | 44 |
| Fig. 45. Datos infiltraciones. Estudio previo realizado, J. Fernández-Agüera | 46 |
| Fig. 46. Ideograma funcionamiento Blower Door. Google Fotos | 46 |
| Fig. 47. Caudales mínimos de ventilación. CTE DB HS | 47 |
| Fig. 48. Imagen 3D modelos de simulación. Elaboración propia | 48 |
| Fig. 49. Planos horizontales establecidos. Elaboración propia | 49 |
| Fig. 50. Planos verticales establecidos. Elaboración propia | 49 |
| Fig. 51. Planos vertical en un modelo. Elaboración propia | 49 |
| Fig. 52. Planos horizontal en un modelo. Elaboración propia | 49 |
| Fig. 53. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M0. Elaboración propia | 52 |
| Fig. 54. Modelo 3D – M0. Elaboración propia | 52 |
| Fig. 55. Evolución DA por profundidad y orientación – M0. Elaboración propia | 53 |
| Fig. 56. Evolución CSA por profundidad y orientación – M0. Elaboración propia | 53 |
| Fig. 57. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M1. Elaboración propia | 54 |
| Fig. 58. Modelo 3D – M1. Elaboración propia | 54 |
| Fig. 59. Evolución DA por profundidad y orientación – M1. Elaboración propia | 55 |
| Fig. 60. Evolución CSA por profundidad y orientación – M1. Elaboración propia | 55 |
| Fig. 61. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M2. Elaboración propia | 56 |
| Fig. 62. Modelo 3D – M2. Elaboración propia | 56 |
| Fig. 63. Evolución DA por profundidad y orientación – M2. Elaboración propia | 57 |
| Fig. 64. Evolución CSA por profundidad y orientación – M2. Elaboración propia | 57 |
| Fig. 65. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M3. Elaboración propia | 58 |
| Fig. 66. Modelo 3D – M3. Elaboración propia | 58 |
| Fig. 67. Evolución DA por profundidad y orientación – M3. Elaboración propia | 59 |
| Fig. 68. Evolución CSA por profundidad y orientación – M3. Elaboración propia | 59 |
| Fig. 69. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M4. Elaboración propia | 60 |
| Fig. 70. Modelo 3D – M4. Elaboración propia | 60 |
| Fig. 71. Evolución DA por profundidad y orientación – M4. Elaboración propia | 61 |
| Fig. 72. Evolución CSA por profundidad y orientación – M4. Elaboración propia | 61 |
| Fig. 73. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M5. Elaboración propia | 62 |
| Fig. 74. Modelo 3D – M5. Elaboración propia | 62 |
| Fig. 75. Evolución DA por profundidad y orientación – M5. Elaboración propia | 63 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 76. Evolución CSA por profundidad y orientación – M5. Elaboración propia | 63 |
| Fig. 77. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M6. Elaboración propia | 64 |
| Fig. 78. Modelo 3D – M6. Elaboración propia | 64 |
| Fig. 79. Evolución DA por profundidad y orientación – M6. Elaboración propia | 65 |
| Fig. 80. Evolución CSA por profundidad y orientación – M6. Elaboración propia | 65 |
| Fig. 81. Evolución demanda energética por mes y demanda térmica anual – M7. Elaboración propia | 66 |
| Fig. 82. Modelo 3D – M7. Elaboración propia | 66 |
| Fig. 83. Evolución DA por profundidad y orientación – M7. Elaboración propia | 67 |
| Fig. 84. Evolución CSA por profundidad y orientación – M7. Elaboración propia | 67 |
| Fig. 85. Evolución de demanda por mes y modelo – Norte. Elaboración propia | 49 |
| Fig. 86. Evolución de demanda anual por modelo – Norte. Elaboración propia | 70 |
| Fig. 87. Evolución de demanda por mes y modelo – Sur. Elaboración propia | 72 |
| Fig. 88. Evolución de demanda anual por modelo – Sur. Elaboración propia | 73 |
| Fig. 89. Evolución DA por profundidad y modelo – Norte. Elaboración propia | 75 |
| Fig. 90. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo – Norte. Elaboración propia | 76 |
| Fig. 91. Evolución DA por profundidad y modelo – Sur. Elaboración propia | 77 |
| Fig. 92. Mapa de color evolución de DA por profundidad y modelo – Sur. Elaboración propia | 78 |
| Fig. 93. Evolución CSA por profundidad y modelo – Norte. Elaboración propia | 79 |
| Fig. 94. Mapa de color evolución de CSA por profundidad y modelo – Norte. Elaboración propia | 80 |
| Fig. 95. Evolución CSA por profundidad y modelo – Sur. Elaboración propia | 81 |
| Fig. 96. Mapa de color evolución de DCSA por profundidad y modelo – Sur. Elaboración propia | 82 |

12.3. LISTADO DE TABLAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla. 1. Tamaño de huecos | 32 |
| Tabla. 2. Proporción de huecos | 32 |
| Tabla. 3. Posición de huecos | 33 |
| Tabla. 4. Orientación de huecos | 33 |
| Tabla. 5. Tamaño de huecos | 33 |
| Tabla. 6. Proporción de huecos | 33 |
| Tabla. 7. Variables presentes en el estudio | 42 |
| Tabla. 8. Modelos existentes y sus características | 42 |
| Tabla 9. Hipótesis de trabajo | 42 |
| Tabla 10. Composición constructiva cerramiento fachada | 45 |
| Tabla 11. Composición constructiva medianera | 45 |
| Tabla 12. Composición constructiva tabiquería | 45 |
| Tabla 13. Composición constructiva forjado | 45 |
| Tabla 14. Composición constructiva cubierta | 46 |
| Tabla 15. Características huecos acristalados | 46 |
| Tabla 16. Condiciones de cálculo del motor Radiance | 49 |
| Tabla 17. Demanda energética por mes y orientación – M0 | 52 |
| Tabla 18. Demanda energética por mes y orientación – M1 | 52 |
| Tabla 19. Demanda energética por mes y orientación – M2 | 54 |
| Tabla 20. Demanda energética por mes y orientación – M3 | 56 |
| Tabla 21. Demanda energética por mes y orientación – M4 | 58 |
| Tabla 22. Demanda energética por mes y orientación – M5 | 60 |
| Tabla 23. Demanda energética por mes y orientación – M6 | 62 |
| Tabla 24. Demanda energética por mes y orientación – M7 | 64 |
| Tabla 25. Datos de demanda anual por modelo – Norte | 70 |
| Tabla 26. Comparativa porcentual de la demanda entre modelos – Norte | 71 |
| Tabla 27. Datos de demanda anual por modelo – Sur | 73 |
| Tabla 28. Comparativa porcentual de la demanda entre modelos – Sur | 74 |
| Tabla 29. Comparativa porcentual del DA entre modelos – Norte | 76 |
| Tabla 30. Comparativa porcentual del DA entre modelos – Sur | 78 |
| Tabla 31. Comparativa porcentual del CSA entre modelos – Norte | 80 |
| Tabla 32. Comparativa porcentual del CSA entre modelos – Sur | 82 |

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE HUECOS EN LA ARQUITECTURA RESIDENCIAL PLURIFAMILAR

BAJO PARÁMETROS ENERGÉTICOS, LUMÍNICOS Y DE SALUD

Trabajo Fin de Grado

Grado en Fundamentos de Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

Autora: Paula Rodríguez Rejano

Tutor: Miguel Á. Campano Laborda
Grupo D, Curso 2022 - 2023