**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN**

**OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
ENERGÉTICO Y LUMÍNICO EN EDIFICIOS
SINGULARES DE VIDRIO A TRAVÉS DE
MODELOS A ESCALA.**

TESIS DOCTORAL

Autora

Patricia Aguilera Benito

Directores

Carmen Viñas Arrebola – Doctora en Ciencias Físicas

Antonio Rodríguez Sánchez - Doctor Arquitecto

Programa de Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación
Madrid, 2020

TESIS DOCTORAL

TÍTULO: “Optimización del comportamiento energético y lumínico en edificios singulares de vidrio a través de modelos a escala.”

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. De la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 2020.

Presidente

D/D^a.....

Vocales

D/D^a.....

D/D^a.....

D/D^a.....

Secretario

D/D^a.....

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis el día.....de.....de.....en la Escuela Técnica Superior de Edificación, acuerda otorgarla la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Un haz de luz que ilumine dos objetos puede producir diferentes efectos dependiendo de cuanta luz absorba o refleje cada uno. De igual modo, una misma experiencia puede afectar de forma muy distinta a dos personas.

A mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en el desarrollo de este trabajo, tanto en el ámbito científico-técnico, como en el personal.

A mis directores de tesis Carmen Viñas y Antonio Rodríguez por su seguimiento, consejos y apoyo durante todos estos años.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación por la beca concedida para la realización de la estancia predoctoral.

Al Departamento de Tecnología de la Edificación por su cooperación siempre que la he necesitado.

Al grupo de investigación de Tecnología Edificatoria y Medio Ambiente (TEMA), por su ayuda desinteresada y por sus amables consejos.

A Carolina, Sheila y Alejandra por ser las mejores amigas en este viaje, por estar siempre a mi lado en los ratos buenos y en los malos y por ser la válvula de escape que libera todo lo que a veces nos supera.

A Isabel, por su apoyo, su entusiasmo y por confiar en mí sin apenas conocerme, a Juan S. y Juan L. por sus palabras de aliento, a Santiago y a Gabriel que siempre me han ayudado desinteresadamente, faltándoles el tiempo para colaborar en lo que fuese necesario. Los mejores compañeros con los que uno puede contar.

A Antonio por su inestimable apoyo, siempre enseñándome, guiándome, motivándome, siempre con palabras llenas de amor y energía, siendo el espejo donde me quiero mirar. Sin ti nada de esto hubiera sido posible, gracias por estar en mi vida.

A Felipe por impulsarme a poner en práctica todo aquello que sabía, por hacer fácil el trabajo y trasladarme su optimismo, su actitud y su capacidad de centrarse en lo que suma.

Gracias a mis personas refugio, aquellas que te dan cobijo en la tempestad, aquellos que te abrigan, te cuidan y te quieren incondicionalmente. Aquellos

que celebran cada éxito como propio y recogen uno a uno tus trocitos cuando te rompes.

A Iván por quererme así con todo, con lo que tengo, con lo que me falta y lo que jamás tendré. Gracias por ser mi equilibrio, mi contrapunto, mi calma, mi silencio, mi voz más realista y crítica, mi fuerza infinita.

A mis padres, no solamente por dárme todo, si no también porque sin su ayuda, apoyo y confianza nada de esto sería realidad.

Y por último a mi hija Alba, que me ha dado luz al final de este largo camino. Gracias por llenar mi vida de vida.

RESUMEN

La principal motivación para la investigación que justifica esta tesis es la realidad energética y ambiental que estamos viviendo y específicamente, la necesidad urgente de dar una respuesta a este problema desde el sector de la edificación.

Dado el gran potencial de ahorro energético del sector de la edificación, la Unión Europea en sus directivas resalta la necesidad de mejorar la eficiencia energética de los edificios y por ende la contaminación que produce. Añadiendo la obligatoriedad de construir edificios de “energía casi nula”, cuya exigencia es tener un muy alto rendimiento energético.

En España los edificios son responsables del 30% aproximadamente, del consumo de energía primaria. La mayor parte de esta energía se relaciona con la utilización de los sistemas de climatización y acondicionamiento. Una medida efectiva para reducir la demanda energética es mejorar la envolvente y disponer de elementos pasivos que consigan la mejora de la eficiencia energética de los edificios.

Por ello la investigación tiene como objetivo principal la búsqueda de soluciones pasivas que ayuden a la reducción del consumo energético y por consiguiente minimizar las emisiones de CO₂ de los edificios. En este caso edificios que tienen todas sus fachadas resueltas con vidrio, pues se confirma en la bibliografía, que los huecos son elementos importantes para el análisis de la demanda energética. Otro objetivo de la tesis es comprobar la viabilidad de los modelos a escala como metodología de estudio del comportamiento térmico y lumínico de los edificios.

La metodología seguida para el alcance de los objetivos ha sido: por una parte, una búsqueda bibliográfica para estudiar los distintos ejemplos de edificios acristalados y finalmente seleccionar la casa Farnsworth, que servirá como edificio de referencia. Después, a través de simulaciones previas y de la bibliografía consultada, se han seleccionado los sistemas pasivos a instalar para de este modo poder realizar el estudio de la eficiencia energética de los sistemas pasivos a través de dos métodos. Por un lado, a través de un análisis

experimental, se han estudiado los resultados térmicos y lumínicos obtenidos en la etapa de monitorización. Y por otro lado, el estudio computacional a través de un software de simulación, que previamente se valida con los datos recabados en la parte experimental, para poder recrear diferentes escenarios y analizar con detalle las demandas y consumos del edificio. Una vez obtenidos los parámetros energéticos, se analiza el ahorro de energía, de costes de inversión y de emisiones de CO₂ emitidas a la atmosfera, en cada uno de los escenarios que se plantean.

La conclusión de esta tesis es que estos elementos pasivos deben ser tenidos en cuenta en el diseño inicial del edificio y deben ser analizados inicialmente e instalados según los parámetros energéticos, demostrando ser estrategias adecuadas para lograr el alto desempeño energético requerido para los edificios de energía casi nula. En el análisis térmico se demuestra que la lámina de control solar aporta grandes beneficios a lo largo de todo el año, sin embargo, la incorporación de voladizo obtiene buenos resultados en verano pero es perjudicial para las estaciones frías. En cuanto al análisis lumínico se manifiesta que la lámina de control solar, es aconsejable en este tipo de edificaciones de vidrio, debido a que minora en gran medida la iluminancia en el interior de los espacios. Además, la utilización de modelos a escala conlleva tener una visión más exacta en los parámetros relativos a la transferencia de calor. El poder combinar estos resultados con las simulaciones computacionales, nos aportan datos detallados sobre la capacidad de los sistemas de climatización, consumos energéticos, así como emisiones de CO₂.

ABSTRACT

The main motivation for the research that justifies this thesis is the energy and environmental reality that we are experiencing and specifically, the urgent need to give an answer to this problem from the building sector.

Given the great potential for energy saving in the building sector, the European Union in its directives highlights the need to improve the energy efficiency of buildings and therefore the pollution it produces. Adding the obligation to build buildings with "almost zero energy", whose requirement is to have a very high energy performance.

In Spain, buildings are responsible for approximately 30% of primary energy consumption. Most of this energy is related to the use of air conditioning and conditioning systems. An effective measure to reduce energy demand is to improve the envelope and have passive elements that improve the energy efficiency of buildings.

For this reason the main objective of the research is to search for passive solutions that help reduce energy consumption and therefore minimize CO₂ emissions from buildings. In this case buildings that have all their facades resolved with glass, as it is confirmed in the bibliography that the gaps are important elements for the analysis of energy demand. Another objective of the thesis is to verify the viability of scale models as a methodology for studying the thermal and light behavior of buildings.

The methodology followed to achieve the objectives has been: on the one hand, a bibliographic search to study the different examples of glass buildings and finally select the Farnsworth house, which will serve as a reference building. Then, through previous simulations and the consulted bibliography, the passive systems to be installed have been selected in order to carry out the study of the energy efficiency of passive systems through two methods. On the one hand, through an experimental analysis, the thermal and light results obtained in the monitoring stage have been studied. And on the other hand, the computational study through simulation software, which is previously validated with the data

collected in the experimental part, in order to recreate different scenarios and analyze in detail the demands and consumption of the building. Once the energy parameters have been obtained, energy savings, investment costs and CO₂ emissions emitted into the atmosphere are analyzed in each of the scenarios that are proposed.

The conclusion of this thesis is that these passive elements must be taken into account in the initial design of the building and must be initially analyzed and installed according to the energy parameters, proving to be adequate strategies to achieve the high energy performance required for almost energy buildings. null. In the thermal analysis it is shown that the solar control sheet provides great benefits throughout the year, however, the incorporation of the cantilever obtains good results in summer but is detrimental for the cold seasons. Regarding the light analysis, it is stated that the solar control sheet is advisable in this type of glass buildings, because it greatly reduces the illuminance inside the spaces. In addition, the use of scale models leads to a more accurate view of the parameters related to heat transfer. Being able to combine these results with computer simulations provides us with detailed data on the capacity of the air conditioning systems, energy consumption, as well as CO₂ emissions.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUCCIÓN	16
1.1 REALIDAD ENERGÉTICA Y DE BIENESTAR EN LOS EDIFICIOS	16
1.1.1 El sector energético y el impacto ambiental.	16
1.1.2 Políticas ambientales relacionadas con el sector de la construcción.....	20
1.1.3 Sostenibilidad en la demanda y el consumo de los edificios.....	24
1.2 EL VIDRIO EN CERRAMIENTO DE FACHADAS	27
1.2.1 Los comienzos de un nuevo material. El vidrio.	27
1.2.2 El vidrio en la arquitectura.....	32
1.3 LA NECESIDAD DE LA LUZ NATURAL	46
1.4 CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO DE INTRODUCCIÓN	50
2 ESTADO DEL ARTE	53
2.1 PROPIEDADES DE LOS VIDRIOS.....	53
2.2 ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO.	59
2.3 ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO LUMINICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO.	62
2.4 ESTUDIOS SOBRE MODELOS A ESCALA PARA EL CÁLCULO DE PARAMETROS ENERGÉTICOS Y LUMÍNICOS.....	65
2.5 CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO ESTADO DEL ARTE	67
3. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN.....	71
4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	75
4.1. OBJETIVO PRINCIPAL	75
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	75

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	78
5.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.	78
5.1.1. Mecanismos de transmisión de calor: Conducción.	79
5.1.2. Mecanismos de transmisión de calor: Convección.....	81
5.1.3. Mecanismos de transmisión de calor: Radiación.	82
5.2. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS VIDRIOS.....	85
5.3. CRITERIOS DE DISEÑO CON LUZ NATURAL.....	92
5.3.1. Aplicaciones y efectos de la luz natural.	94
5.3.2. Características que influyen en el diseño con luz natural.....	97
5.4. PARÁMETROS DE CONFORT LUMÍNICO.....	103
5.4.1. Parámetros de confort visual.	105
 6. METODOLOGÍA.....	 110
6.1. FASE 1. SELECCIÓN DEL PROTOTIPO.	112
6.2. FASE 2. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PASIVOS.....	112
6.2.1. Programa de simulación energética.	113
6.2.2. Diseño, alternativas y elección de estrategias pasivas a incorporar en los modelos.....	114
6.3. FASE 3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA	118
6.4. FASE 4. MONITORIZACION DE LOS MODELOS A ESCALA	119
6.4.1. Procesos experimentales de ensayos y evaluación de los equipos empleados.	120
6.4.2. Procedimiento de la elección del intervalo de tiempo para el registro de datos.....	125
6.4.3. Localización de los sensores y metodología de datos recabados.	127
6.5. FASE 5. VERIFICACIÓN ESTACIONAL DE LOS DATOS REGISTRADOS DURANTE LA MONITORIZACIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA.....	134
6.6. FASE 6. ELECCIÓN DE REGISTRO DE DATOS REPRESENTATIVOS Y ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.....	135
6.7. FASE 7. VALIDACIÓN DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL.	136
6.8. FASE 8. ESTUDIO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE SIMULACIONES.....	137
6.9. FASE 9. RENTABILIDAD DEL EDIFICIO DESDE LA PERSPECTIVA COSTE- EFICACIA.....	140
 7. RESULTADOS Y DISCUSION.	 143
7.1. ANÁLISIS PREVIOS.....	145
7.1.1. Selección del prototipo. (Fase 1)	145
7.1.1.1.Elección y caracterización del edificio de referencia.	145
7.1.1.2.Situación del edificio de referencia y características climáticas de la zona.....	156
7.1.2. Elección de los sistemas pasivos. (Fase 2).....	159

7.2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	168
7.2.1. Construcción y monitorización de los modelos a escala. (Fase 3 y 4)	168
7.2.1.1.Ejecución y caracterización del edificio de referencia.	168
7.2.1.2.Situación de los modelos a escala y características climáticas de la zona.	172
7.2.2. Verificación estacional de los datos registrados durante la monitorización de los modelos a escala. (Fase 5).....	178
7.2.3. Elección de registro de datos representativos y análisis de datos experimentales. (Fase 6).....	182
7.2.3.1.Periodo representativo.	182
7.2.3.2.Análisis térmico en los periodos representativos de cada estación.	186
7.2.3.3.Análisis lumínico en los periodos representativos de cada estación.	202
7.3. ANÁLISIS COMPUTACIONAL.....	217
7.3.1. Validación del análisis computacional (Fase 7).	217
7.3.1.1.Validación del modelo numérico.	217
7.3.1.2.Análisis comparativo entre el modelo a escala y el edificio real a través de simulaciones.....	221
7.3.2. Estudio energético a través de simulaciones y rentabilidad del edificio. (Fase 8 y 9). ..	223
7.3.2.1.Ganancias solares y pérdidas por acristalamientos.	223
7.3.2.2.Demanda energética.....	225
7.3.2.3.Consumos energéticos en los diferentes sistemas.....	229
7.3.2.4.Emisiones de CO ₂	233
7.3.2.5.Rentabilidad del edificio desde la perspectiva coste-eficacia.	233
8. CONCLUSIONES.....	238
8.1. CONCLUSIONES GENERALES	238
8.2. CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS PREVIOS	239
8.3. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	240
8.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL	244
8. CONCLUSIONS.....	248
9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGAVIÓN.....	257
10. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.....	259
11. BIBLIOGRAFIA	261

SIGLAS Y ACRÓNIMOS	275
LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS.....	277
LISTADO DE TABLAS:.....	281
ANEXO 1: NORMATIVA.....	288
ANEXO 2: ANÁLISIS DE LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS	301
ANEXO 3: REPORTAJE FOTOGRÁFICO	320
ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES	325
ANEXO 5: GRÁFICOS DE DATOS EXPERIMENTALES	243
LISTADO DE FIGURAS (ANEXOS).....	349
BIBLIOGRAFIA (ANEXOS).....	351

INTRODUCCIÓN

1.1. REALIDAD ENERGÉTICA Y DE BIENESTAR EN LOS EDIFICIOS.

- 1.1.1. El sector energético y el impacto ambiental.
- 1.1.2. Políticas ambientales relacionadas con el sector de la construcción.
- 1.1.3. Sostenibilidad en la demanda y el consumo de los edificios.

1.2. EL VIDRIO EN CERRAMIENTO DE FACHADAS.

- 1.2.1. Los comienzos de un nuevo material. El vidrio.
- 1.2.2. El vidrio en la arquitectura.

1.3. LA NECESIDAD DE LA LUZ NATURAL.

1.4. CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO DE INTRODUCCIÓN.

1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo de introducción se va a describir la realidad energética y de bienestar en los edificios, el vidrio como cerramiento de fachada y la necesidad de la luz natural.

1.1 REALIDAD ENERGÉTICA Y DE BIENESTAR EN LOS EDIFICIOS

La presente tesis está enmarcada en la necesidad de dar respuesta a la presente realidad ambiental y energética en el sector de la edificación.

1.1.1 El sector energético y el impacto ambiental

Su enfoque se encuentra en línea con las iniciativas internacionales, directivas europeas y el Código Técnico de la Edificación (CTE) de España, basadas en el aumento de la eficiencia energética y en la reducción de las emisiones de CO₂ que provienen del sector de la construcción. Todo ello sin olvidar que según indica la Organización Mundial de la Salud (OMS), pasamos aproximadamente el 90% del tiempo en el interior de los edificios, en viviendas, lugares de trabajo, colegios y espacios públicos, lo que se estima que aproximadamente 2/3 partes de ese tiempo se pasa en el hogar (Sarigiannis, 2013). Se trata de un amplio período por el que resulta indispensable resaltar la importancia del impacto que causan los edificios, sobre todo los residenciales, sobre nuestra salud y la repercusión en el bienestar como componente de la calidad humana.

Una gran parte del problema del cambio climático es debido al estilo de vida de los seres humanos. Sobre todo, en países desarrollados, las personas son responsables del consumo energético mundial, de la emisión de gases nocivos a la atmósfera, de la generación de residuos y de la degradación, en general, del medio ambiente.

Los problemas energéticos han tendido a complicarse por el crecimiento poblacional y el aumento de la economía en los mercados, que nos llevan a un

incremento de la demanda mundial de energía, donde además las personas disponen de mayor poder adquisitivo y cada vez son más exigentes con los criterios relativos al bienestar y al confort.

La energía ha sido un elemento imprescindible para la subsistencia y el desarrollo de la civilización. El modelo energético predominante se basó principalmente en la utilización de combustibles de origen fósil, ocasionando graves problemas para la humanidad.

Estos combustibles son en gran parte responsables del deterioro ambiental que sufre el planeta, debido a las emisiones de CO₂ que vienen asociadas al uso excesivo de combustibles fósiles. En la Figura 1 se muestran las emisiones de CO₂ (MtCO₂) en cada uno de los países del mundo.

Figura 1. Emisiones de CO₂. Fuente: Global Carbón Atlas 2016.

Las energías renovables están sustituyendo parcialmente a los combustibles fósiles siendo, hoy en día, escaso su uso. Según la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, 2018), tan solo el 13% de la oferta total de energía primaria en el mundo fue producida a partir de fuentes de energía renovables en el año 2018.

En lo relativo a la demanda energética y a las grandes cantidades de emisiones de CO₂ a la atmósfera, países tan importantes como Rusia, EEUU o India, tan solo disponen de entre un 10% y un 20% de energía procedente de fuentes renovables, como se puede observar en Figura 2 (Enerdata, 2018).

Figura 2. Porcentaje de Energías Renovables. Fuente: Enerdata 2018.

El cambio climático, supone una modificación significativa y perdurable de la distribución estadística de los patrones climáticos. Por ello muchos estudios investigan sobre su aparición (Cantos, 2009) y nos advierten de la necesidad de eliminar las causas que nos llevan a ello.

Se considera que el comienzo de los problemas ambientales está fuertemente relacionado con el inicio de la Revolución Industrial, que nace en Gran Bretaña, en el siglo XVIII. Esta época ocasionó cambios radicales debido al uso y a la transformación de los recursos naturales mediante diferentes procesos industriales.

No obstante, el aprovechamiento de energía solar para la obtención de agua caliente se inició en Estados Unidos de forma casual a principios del siglo XX. Fue a partir de 1938 cuando se puso en marcha en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) una de las primeras investigaciones con reconocido

prestigio, realizándose una serie de casas-laboratorios solares que dieron pie a un interés común por la implantación de energías renovables. Pero a medida que el precio de la energía fue bajando, por el descubrimiento de nuevos yacimientos de petróleo y gas en Estados Unidos, el interés por la energía solar fue decayendo. (Parareda, 2008)

Años después (1973) llegó la primera crisis del petróleo, disparando el precio del oro negro, materia prima de vital importancia en la época. Siendo desencadenante para que muchos países, impulsados por organismos como la Agencia Internacional de la Energía, vieran la necesidad de buscar alternativas al petróleo, al carbón y al gas natural. De esta manera comenzaba un proceso de búsqueda de alternativas basadas en el aprovechamiento de recursos naturales como medios de aporte de energía en los procesos edificatorios.

Pero si analizamos con profundidad, no es suficiente construir edificios de energía casi nula, si no construir edificios que generen energía, que sean respetuosos con el medio ambiente y que mejoren la salud y la calidad de vida de las personas. (Figura 3)

Figura 3. De sistemas convencionales a regenerativos. Fuente: Regenesis 2000-2016. Bill Reed.

El concepto de desarrollo regenerativo va más allá de la sostenibilidad, al implicar una “ingeniería reconstructiva” y una predisposición de “sistemas vivos”, que crean un híbrido de valores, sinergias y bienestar ante la vida. Todo ello nos lleva a adquirir conciencia y alcanzar un modo de construir que tiene en cuenta no solo el medio ambiente sino también la salud de las personas, siendo tan importante en la actualidad y pudiendo como se ha constatado, influenciar de forma positiva o negativa en la salud física o mental de los usuarios.

Es necesario conectar las edificaciones con la naturaleza, crear economías circulares propicias para la vida, y cuidar la salud y la vitalidad de los ecosistemas. Por ello la arquitectura, se enfrenta a una nueva forma de diseñar y de construir, con el objetivo de contribuir a un mundo más sostenible y saludable.

1.1.2 Políticas ambientales relacionadas con el sector de la construcción

Las políticas y los planes de los diferentes gobiernos, en relación con la energía mundial, encaminan sus estrategias a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, pero no son suficientes las actuaciones propuestas para cubrir los objetivos marcados en las cumbres internacionales.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) en su informe anual de 2019, proyecta tres escenarios para el año 2040. El primero de los escenarios, de políticas vigentes, indica un fuerte crecimiento de las emisiones procedentes del sector energético. El segundo, de políticas propuestas por los gobiernos, no presentan un cariz mucho mejor al escenario anterior. Y el tercer escenario, de desarrollo sostenible, plantea una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, pero para ello se requiere de cambios rápidos y amplios en todo el mundo. (Figura 4)

Figura 4. Escenarios de demanda global de energía y emisiones de CO₂ para el año 2040.
Fuente: *iea.org*, 2019

El sector energético en el mundo ha evolucionado en el último siglo promovido por la innovación y el desarrollo industrial, pero deben proponerse nuevas medidas para llegar a los objetivos establecidos. El camino para la mejora energética no conlleva una única solución, si no diversas soluciones que deben estar basadas en medidas que promuevan los siguientes ítems: impulsar las tecnologías digitales, promover la conciencia ambiental y obtener el máximo bienestar en la sociedad.

La Unión Europea ha sido uno de los principales impulsores del uso de energías renovables. Además, según datos de Eurostat, en los últimos años se ha aumentado su uso, desde el 9,6% en el año 2004 al 18,9% en el año 2018. En este camino hacia la reducción de la dependencia energética externa, se crea el Acuerdo Verde Europeo y la directiva UE 2018 que marcan objetivos para establecer un sistema energético sostenible, competitivo y descarbonizado de aquí a 2050. (Consejo de la Unión Europea, 2018)

La implicación de España en la mejora de la eficiencia energética hace que a lo largo del tiempo los diferentes poderes públicos hayan tomado iniciativas de carácter legislativo. Un hito importante lo marcó la publicación del Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Ahorro de Energía, así como los diferentes Reales Decretos relativos a la certificación energética de los edificios. En el Anexo 1, se analiza cronológicamente la legislación relativa a eficiencia energética en España.

Además, se espera en los próximos meses, la entrada en vigor de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (PLCCTE), que será el marco normativo e institucional que desarrolle de forma progresiva la adecuación de las exigencias que regulan las acciones climáticas para alcanzar la neutralidad de emisiones para el año 2050.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la evolución de la normativa española en base a las Directivas Europeas que se han ido aprobando:

Figura 5. Evolución normativa de Eficiencia Energética en Edificación.

No obstante, España se caracteriza por tener una estructura de consumo dominada por productos petrolíferos importados prácticamente en su totalidad, lo que junto a una reducida aportación de recursos autóctonos, ha contribuido a una elevada dependencia energética, próxima al 80%, superior a la media europea (54%), como se muestra en la Figura 6. (IDAE, 2011)

Figura 6. Dependencia energética en España y UE27.
Fuente: (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía- IDAE, 2011)

El sector residencial, es una parte clave en el contexto energético nacional, debido a la importancia que tienen su demanda y su consumo tan elevado. Existen diversos factores como es el incremento del número de viviendas y una mejora del equipamiento de los hogares, que hace prever un aumento en el consumo energético como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Tendencias del consumo energético (kept) del sector residencial en España.
Fuente: IDAE, 2016

Siendo los productos petrolíferos los más utilizados para la producción de energía en el sector residencial en España, es de señalar que a partir del año

2013 las energías renovables adquieren mayor relevancia. Esta evolución en el uso de energías renovables se debe principalmente a la concienciación, las medidas de mejora y los planes de actuación que se están llevando a cabo para reducir los gases de efecto invernadero.

A este reto debemos unir una apuesta segura por la salud, vinculada a la calidad del entorno, pasando directamente por mejorar las condiciones ambientales urbanas y de los edificios. La calidad de nuestro entorno habitable no es sólo la eficacia, la seguridad, la accesibilidad, la tecnología, etc. Las ciudades constituyen un entorno de calidad que impulsa la cohesión social, fomentan el sentimiento de permanencia y nos identifica culturalmente.

Por todo ello, el compromiso no es solo una mejora en la eficiencia energética de los edificios, incluso, como se destacaba anteriormente, construir edificios que generen energía, si no además trabajar para conseguir una sociedad descarbonizada, que reduzca drásticamente el uso de combustibles fósiles, mejorando y manteniendo la calidad de vida de las personas en entornos saludables y seguros para la salud.

1.1.3 Sostenibilidad en la demanda y el consumo de los edificios

Los edificios representan el 40% del consumo de energía final de la Unión Europea, según lo establecido en el Plan de Eficiencia Energética 2011 (IDAE, 2011). Los planes estratégicos a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España, tanto el publicado en el año 2014 (Ministerio de Fomento, 2014), como la posterior actualización en 2017, buscan constantemente mejoras para lograr una construcción sostenible, debido a la demanda y al interés prioritario de reducir el consumo energético en este sector y minimizar la huella de carbono. (Ministerio de Fomento, 2017)

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE, 2014) apunta que en España el consumo de energía final, en el sector de la edificación representaba el 30,8% del consumo energético total de 2012, correspondiendo un 20% de éste consumo al uso doméstico. En el parque edificatorio español encontramos que, de unos 10 millones de edificios, 9,7 son de uso residencial.

España es uno de los países de la Unión Europea con mayor potencial para el uso de las energías renovables en la edificación, en particular de la energía solar, debido a las horas de sol y al creciente desarrollo de este sector empresarial. (Ministerio de Fomento, 2017).

El uso en los edificios de la energía solar para agua caliente sanitaria (ACS), para la producción de calefacción o también para proporcionar energía eléctrica a través de placas fotovoltaicas, ha sido muy positiva ya que permite cubrir los aspectos de mayor demanda en el sector residencial con energías renovables.

Para poder acometer medidas orientadas a optimizar los ítems de mayor consumo en el sector residencial, es preciso el estudio pormenorizado de los distintos servicios y equipamientos. Las instalaciones de climatización (calefacción y refrigeración) son las que demandan más energía, tanto en España, como en el cómputo global de la Unión Europea. Este consumo en climatización es variable dependiendo de la climatología de la zona, siendo países más cálidos los que hacen un menor uso de la calefacción y países nórdicos los que incrementan la intensidad de consumo energético en este concepto, cuya demanda varía desde el 43% en España, hasta el 65% en el conjunto de la Unión Europea (Ministerio de Fomento, 2017). Se observa, también que el consumo energético por refrigeración, en España en relación con el promedio de la Unión Europea es un 60% mayor.

Por otro lado, el consumo en iluminación en España supone un 20% del consumo energético total. (Ministerio de Fomento, 2017). Dicho porcentaje se considera elevado debido a que aún existen instaladas muchas bombillas tradicionales, lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio. En los años 70 comenzó el desarrollo de los light-emitting diode (LED) una luz tenue con pequeño flujo luminoso que solo se usó como luz indicadora, hasta que en los años 80 se crearon los primeros LED's rojos de alta brillantez, por lo que su uso se fue extendiendo. Fue en 1993 cuando se desarrolló el primer LED azul súper luminiscente, por primera vez se podía generar luz blanca. A partir de aquí la tecnología LED experimentó un avance exponencial llegando a obtener

la máxima eficiencia luminosa y siendo hoy día la lámpara recomendada para instalar en todos los hogares, por su ahorro y su larga duración.

No obstante, el ahorro en iluminación se basa en realizar un buen aprovechamiento de la iluminación natural, a través de sensores o fotocélulas que no permitan el encendido de la luz artificial hasta que los niveles de luminancia sean bajos para la actividad a desarrollar. Es beneficioso poder utilizar la energía lumínica de la radiación solar y poder ahorrar consumo en iluminación artificial durante las horas diurnas del día, de esta manera se mejora al máximo el ahorro de energía.

El aprovechamiento de la luz natural no solo conlleva una mejora en la eficiencia energética, sino también una mejora en la calidad de vida de las personas. Esto es debido a que la luz natural tiene múltiples beneficios como son: ayuda a la memoria y al sistema cognitivo, mejora el estado de ánimo, la productividad y el rendimiento, reduce los niveles de estrés, elimina problemas relacionados con el sueño, ayuda a prevenir enfermedades, etc.

Figura 8. Factores influyentes analizados.

Se trata, por tanto, dentro de los objetivos de disminución de la demanda de energía en el sector de la edificación, de reducir en el sector residencial las cargas de calefacción, refrigeración e iluminación, y con ello minimizar las emisiones a la atmosfera de gases de efecto invernadero. Manteniendo los parámetros de bienestar y confort de los usuarios y teniendo en cuenta la repercusión económica (Figura 8).

1.2 EL VIDRIO EN CERRAMIENTO DE FACHADAS

En este apartado se describirá brevemente la evolución del vidrio como material de construcción y su aplicación en la arquitectura. Además, se detallan los edificios más relevantes con envolventes de vidrio, seleccionados tras un estudio minucioso de los mismos.

1.2.1 Los comienzos de un nuevo material. El vidrio

El origen del vidrio no está claro, algunos autores clásicos atribuyen su descubrimiento a los fenicios, concretamente a unos comerciantes que atravesaban un país arenoso transportando bloques de potasio entre sus mercancías. Debido al frío hicieron fuego para calentar sus alimentos e idearon apoyar sus utensilios sobre estos bloques, descubriendo así que se formaba una masa incolora, la cual una vez fría dio origen al vidrio (Plinio Segundo, 1499).

Por otra parte, los estudios arqueológicos consideran que el vidrio fue un invento de los egipcios, siendo los primeros maestros en esta industria con la fabricación de piezas largas y puntiagudas primeramente y en años posteriores en elementos decorativos, joyas y espejos. Los artesanos de este país introducían un molde sólido en una masa de vidrio en fusión y cuando el molde estaba recubierto lo retiraban.

Los romanos emplearon durante mucho tiempo el vidrio egipcio, pero en el reinado de Augusto se potenció la fabricación, creando industrias en Venecia y en Murano. Lugares que hoy día mantienen cierta notoriedad en este campo.

Durante el siglo primero d.C. tiene lugar el primer progreso de gran relevancia en la industria del vidrio, cuando se utiliza por casualidad un tubo hueco para soplar el vidrio. Esta técnica del soplado lleva a que la industria se desarrolle muy rápidamente, siendo un factor primordial para la estabilidad comercial del imperio romano, consiguiendo una avanzada perfección en la técnica del vidrio.

Más tarde, en los comienzos de la Era Cristiana aparece el vidrio denominado cristal, material generalmente con gran cantidad de óxido de plomo que le proporciona un elevado índice de refracción y un gran poder dispersivo con

centelleo y brillo. El cristal es un material absolutamente incoloro y transparente capaz de alcanzar finuras no conseguidas hasta entonces y con la posibilidad de ser trabajado hasta adoptar cualquier forma. En esta época aparecieron los cristales para las ventanas.

El Renacimiento fue una época de gran capacidad creadora, los venecianos monopolizaron durante largo tiempo el comercio del vidrio y exportaron por todo el mundo sus productos. En el siglo XV Barcelona imitaba los vidrios venecianos, compitiendo con la isla de Murano, desde su principal fábrica en Mataró. La decadencia del vidrio catalán se dio a mediados del siglo XVII debido al abandono cada vez más acusado de las formas y decoraciones lujosas.

En el siglo XVII se empezaron a sentar las bases para el tratamiento científico de la tecnología del vidrio. Durante este siglo se perfeccionaron las técnicas del tallado por Lehman y Schwanhardt. Se desarrollaron los hornos de carbón, aparecieron los vidrios de plomo (Flint-Glass) y se inventó un método de colada del vidrio. El horno de carbón apareció como consecuencia de la prohibición de los vidrieros ingleses de utilizar madera, necesaria para la armada de su país y tuvo como consecuencia fundamental la transformación de la industria, hasta entonces rural, en urbana (José María de la Poza Lleida, 1992).

En Francia deseosos de reemplazar la producción veneciana de espejos, que invadía en Europa, Jean Baptiste Colbert, ministro principal de Luis XIV, funda junto a cinco socios, en 1665 la empresa “la Manufacture des Glaces”, instalada en el Faubourg Saint-Antoine den Paris. (Archivo Saint Gobain, 1665).

Durante la edad moderna no se producen verdaderas innovaciones en el vidrio, tan solo los diferentes estilos decorativos se van adaptando a las modas. Además de las figuras, utensilios de cristal, vidrios en puertas y ventanas, se ejecutan bloques huecos de vidrio para emplearlos en la realización de paredes que dejan paso a la luz diurna.

España no fue uno de los países punteros con la industria del vidrio, pero en el siglo XVIII comienza a expandirse y generalizarse la fabricación de este

material, construyéndose bajo el reinado de Felipe V, diversas fábricas que abastecían a todo el país. Es de destacar a la familia Gordiola la cual crea en 1719 un horno de vidrio en Mallorca, desde donde se crean y se desarrollan diversidad de productos que son exportados a todo el mundo.

Posteriormente en 1727 se funda la fábrica de cristales de La Granja, que se enmarca dentro del reformismo borbónico cuyo principal objetivo era reducir la masiva importación de objetos suntuarios extranjeros, mediante el fomento y la protección de la industria nacional (Pastor Rey de Viñas, 1998). Por este motivo se establecieron una serie de manufacturas protegidas y financiadas por la Corona: Real Fábrica de Cristales de La Granja, de Tapices de Santa Bárbara, de Porcelana del Buen Retiro, etc., en las que se invirtieron cuantiosas sumas de dinero asignadas a su costoso mantenimiento y a la adquisición de tecnología y personal especializado que procedía del extranjero. El principal objetivo de estas manufacturas era abastecer de objetos suntuarios a los palacios y residencias reales de forma que pudiera emularse el lujo de los palacios de la Corte europea sin necesidad de recurrir a costosas importaciones. (...) (F.S.P. Centro Nacional del Vidrio, 2017).

En el norte de España también tuvo su protagonismo la industria del vidrio. Al puerto de Barcelona llegan de importación piezas de vidrio del Próximo Oriente, peculiares por el color verde del vidrio y por la ornamentación de arabescos o motivos naturales realizados con puntos y líneas dorados a fuego. (Oliva Prat, 1951). Asturias se asomaba a la industrialización, entre los siglos XVIII y XIX se crean numerosas fábricas que favorecen la economía en la zona.

En la industria del vidrio destaca la fábrica de vidrios de Cifuentes, Pola y Cia fundada en 1844 (Cifuentes, 1991) situada en Gijón, ciudad donde los intereses materiales y el crecimiento económico lograron un desarrollo extraordinario, sin dejar de lado su otra vía como población balnearía.

En el sur de España, se encuentra la fábrica de vidrios La Trinidad, situada en Sevilla y fundada en el año 1900. Siendo en la época la única industria artesanal de producción de vidrio soplado en Andalucía (Hernández Ramírez, 2006). En el centro de la península, en Madrid, es de destacar la fábrica de vidrios de Artigas y Cia, de la que aún queda en pie su chimenea de ladrillo

cocido y de altura y forma característica, que deja entrever un Madrid industrial, el cual hoy esta prácticamente desaparecido. En la Figura 9 se pueden observar algunas de las fábricas mencionadas anteriormente.

Fábrica de vidrios Gordiola - Mallorca - 1719

Real fábrica de cristales de La Granja - Segovia - 1727

Fábrica de vidrio La Trinidad - Sevilla - 1900

Fabica de vidrios de Artigas y Cia - Madrid - 1915

Figura 9. Industrias del vidrio en España. Fuente: Google maps.

Fuera de España, según establece Jose María de la Poza Lleida, en su colección de libros de maestros industriales, los mejores vidrios del mundo son los de las fábricas de Lobmeyer (Viena) y Orrefors (Suecia), famosos ambos por sus grabados. También la de Steuben Glass, de Corning (Nueva York), que obtiene vidriería artística de gran calidad. (José María de la Poza Lleida, 1992)

A finales del siglo XIX es cuando comienza una verdadera industria moderna del vidrio, con la necesidad de producir vidrio a gran escala dado que cada vez su uso era más extendido para más aplicaciones, se crean los grandes hornos balsa C.W Siemens. En concreto en 1857 se creo el horno Martin-Siemens, que debido a su sistema de recuperación térmica en hornos de balsa de grandes dimensiones, lanzó al mercado la posibilidad de producir

simultáneamente más de dos mil toneladas de vidrio fundido. Estos hornos permitieron, por primera vez en la historia, el desarrollo de un sistema que no era ni el soplado ni el colado (Fernández Navarro, 2003).

A partir de esta nueva forma de producir, la industria del vidrio ha tenido un crecimiento exponencial, siendo la empresa internacional Saint Gobain la que experimenta mayor expansión, renovando las técnicas y la organización comercial. Entorno a 1991 Saint Gobain comienza la fabricación de vidrios de capas para el control solar y para reforzar el aislamiento térmico de un doble acristalamiento aislante.

En 2007 Saint Gobain reorienta su estrategia de negocio hacia un concepto más amplio, el hábitat, que matiza en 2010: hábitat sostenible. Hoy día se posiciona como un proveedor de soluciones innovadoras, energéticamente eficientes y de altas prestaciones que aumentan nuestro confort en el hábitat, contribuyendo a la protección medioambiental y mejoran nuestra vida diaria. Es referencia mundial del hábitat sostenible (Saint-Gobaint, 2017).

Otros de los grandes fabricantes a nivel mundial son, la empresa Guardian Glass (desde 1932), siendo los mayores productores de vidrio float y líderes en vidrios de capa y el fabricante AGC Glass Europe que invierte en la producción de acristalamiento al vacío.

Además, existen otras empresas como Pilkington Group Limited (con sede en Sagunto, Valencia, España) que se fundó en el año 1826 bajo el nombre St. Helens Glass Company. En esta compañía fue donde se desarrollaron los procesos de elaboración del vidrio flotado por primera vez.

Por tanto, el vidrio es hoy día un material en constante progreso tecnológico, ya que las fachadas acristaladas significan un estímulo a la investigación con el desarrollo de multitud de materiales de alta resistencia térmica, láminas de control solar, cámaras con diferentes tipos de gases o con agua, materiales de cambio de fase, vidrios electrocrómicos, termocrómicos o incluso acristalamientos con integración de componentes fotovoltaicos, que convierten la radiación incidente en energía eléctrica útil.

En conclusión, el vidrio actualmente es un material con un gran potencial en el sector de la construcción y a esto hay que sumarle las posibilidades que tiene de reciclado y reutilización, evitando el uso de grandes toneladas de materias primas. El reciclado de estos productos reduce entre un 20% y un 30% el consumo de energía porque la temperatura de fusión del material reciclado es menor que en el material virgen. Por ello se trata de un material que se valoriza, dándole una segunda vida aplicando criterios de sostenibilidad y economía circular.

1.2.2 El vidrio en la arquitectura

Según establece F. Javier Neila González en su libro de Arquitectura bioclimática, *“en el origen, la ausencia de fuentes artificiales de alumbrado exigió el necesario empleo de la iluminación natural, a pesar de las dificultades estructurales y constructivas con las que se contaba. Pero no fue una necesidad considerada como tal durante todos los tiempos ya que, por ejemplo, griegos o egipcios se preocupaban más de los efectos de la luz sobre el exterior de sus construcciones que porque penetraran en ellas, quizá por los riesgos de sobrecalentamiento. Tal vez fue la cultura cretense la que incorporó un diseño de huecos con proporciones similares a las actuales con fines luminosos. Sin embargo, sería el pragmatismo de los romanos el que finalmente daría al hueco una función claramente de iluminación. A partir de ellos la ventana cumplió siempre funciones luminosas, únicamente puestas en entredicho por algún comentario mecanicista de los periodos de desarrollismo industrial en los que se quiso reducir su función a la visual y reservar la iluminación para el alumbrado artificial”*. (Neila González, 2000)

El vidrio, en los más de dos mil años que lleva aplicándose, es posiblemente, el material más polémico a la hora de su utilización ya sea por acercarse con desmesura a él en sus diversas formas y aplicaciones o, por el contrario, haciendo un uso limitado y escaso en su empleo.

La idea de muro invisible es algo recurrente en la arquitectura. Se trata de algo que sin tener materialidad ni presencia produce los efectos de una barrera

física: impide el paso y da confianza con tanta rotundidad como las alambradas de un campo de concentración (Espuelas, 2010).

Las propiedades ópticas del vidrio, transmisión, reflexión, refracción y absorción de la luz, combinadas en una gama de variantes casi infinita y percibidas por la visión subjetiva del observador, han hecho posible que el mismo material haya servido para encarnar fronteras dispares y en ocasiones con planteamientos opuestos, realizando determinados arquetipos arquitectónicos durante los últimos dos mil años, con una alternancia que no es ajena al pensamiento dual y contradictorio, propio del ser humano (Rubio Hernández, 2015).

Como escribió Mies Van Der Rohe en un artículo para un prospecto de la Asociación Alemana de Fabricantes de Vidrio Plano, fechado el 13 de marzo de 1933, sin publicar y que Neumeyer comenta en una publicación de 1995: *“¿Qué sería del hormigón y del acero sin la lámina de vidrio? La habilidad de ambos para transformar el espacio sería limitada, incluso pérdida del todo, quedaría sólo una vaga promesa. Sólo la piel de vidrio, sólo las paredes vidriadas permiten revelar la forma simple estructural del sistema en pórticos y asegurar posibilidades arquitectónicas. (...) Los verdaderos elementos constructivos son aquellos a partir de los que se desarrollará una nueva arquitectura más rica. Nos permiten un grado de libertad en la configuración del espacio, del que ya no queremos prescindir. Sólo ahora podemos dar forma al espacio, abrirlo al paisaje y ponerlo en relación con él, con ello se satisface las necesidades de los hombres actuales. Ahora también queda claro lo que en verdad son las paredes, los suelos y los techos. La simplicidad en la construcción, la claridad de los medios tectónicos y la pureza de los materiales portan el resplandor de la belleza originaria”* (Neumeyer, 1995).

Las construcciones arquitectónicas donde la luz juega un papel sin connotaciones energéticas, han desarrollado un paradigma importante a lo largo de la historia. Pero a día de hoy, se pretende que la radiación solar sea fuente de ahorro energético, tanto por la reducción del consumo eléctrico en iluminación artificial como por el ahorro económico de las instalaciones de generación de calor, además de por una mejora en el bienestar humano.

Existen infinidad de edificios destinados a uso terciario (oficinas, instituciones públicas, comercios, etc), donde desde hace años, ha primado la envolvente de vidrio sobre otros materiales a la hora de diseñar el cerramiento exterior, aunque las características de sus acristalamientos son menos eficientes que los vidrios que se instalan actualmente. Algunos de estos edificios son los que a continuación se citan:

- Edificio recreativo y de oficinas “The Shard” con sus 310 metros de altura es el sexto edificio más alto de Europa hoy día, en el año de su construcción llegó a ser el más alto. Fue obra del arquitecto Renzo Piano y sus fachadas están compuestas por paneles de vidrio que pretenden reflejar la luz del sol y el cielo, de manera que la apariencia del edificio cambiará según el tiempo y las estaciones. Año de construcción: 2012. Arquitecto: Renzo Piano
- La torre financiera de Bitexco situada en Ho Chi Minh (Vietnam), con 262 metros de altura y 68 pisos. Año de construcción: 2010- Arquitecto: Carlos Zapata.
- El edificio destinado al Departamento de Salud Pública del Gobierno Vasco, en Bilbao. Las estancias del inmueble disfrutan del volumen que crea la fachada, a través de la cual el edificio produce el intercambio espacial entre el interior y el exterior. Año de construcción: 2008. Arquitecto: Coll-Barreu Arquitectos.
- El centro de justicia civil de Manchester tiene como marca característica la transparencia. Fue diseñado por el equipo australiano Denton Corker Marshall. Año de construcción: 2006- Arquitecto: Denton Corker Marshall.
- El rascacielos propiedad de Gas Natural en Barcelona (España) Mare Nostrum. Año de construcción: 2005. Arquitecto: Enric Miralles.
- El Sage Gateshead (Inglaterra), es uno de los auditorios de mayor prestigio a nivel internacional. Su diseño de cristal curvado y acero inoxidable tuvo un costo de 70 millones de libras. Año de construcción: 2004. Arquitecto: Norman Foster.

- El Ayuntamiento de Londres (Inglaterra) diseñado por Norman Foster. Año de construcción: 2002. Arquitecto: Norman Foster.
- El palacio de congresos de Montreal (Canadá) es un centro de convenciones y exposiciones. El elemento más importante de este diseño es la luz, la cual habita de manera omnipresente en el interior del edificio. Su extraordinaria fachada esta forrada por 332 paneles de vidrio y 58 paneles de vidrio de colores. La construcción originaria estuvo a cargo del arquitecto Victor Prus (1983), aunque la fachada que hoy conocemos fue diseñada por Mario Saia (2002).
- La biblioteca nacional de Minsk (Bielorrusia) posee un forma fuera de lo común, ya que se trata de un cubo romboidal octaédrico. Con una altura de 76,67 metros y una superficie de 55.000 m². Año de construcción: 2002. Arquitecto: Mihail Vinogradov y Victor Kramarenko.
- La cúpula del Reichstag situada en lo alto del edificio en Berlín (Alemania) sirve como tragaluz. Año de construcción: 1993. Arquitecto: Norman Foster.
- Museo de arte Nelson en Atkins, Kansas City (Estados Unidos), es una ampliación del museo existente donde los materiales principales de su fachada son el acero y el vidrio. Año de construcción: 1933. Arquitecto: Steven Holl, Thomas Wight, William Wight.

Cabria describir un largo etcétera de edificios no residenciales con envolventes de vidrio, pues este material aumenta considerablemente la belleza de la edificación. Las fachadas de vidrio son un concepto relacionado con la visibilidad y la apertura de luces hacia el exterior, que unido a una buena ventilación y luminosidad puede incrementar el confort del edificio considerablemente.

Desde hace unos años las fachadas de vidrio se han ido convirtiendo en el estándar de las grandes construcciones, este tipo de arquitectura contemporánea ha pasado a ser uno de los sellos de identidad de las ciudades. El cerramiento de vidrio tiene sus orígenes como solución a unas necesidades concretas y presentes en edificios singulares, esas necesidades van asociadas a un aspecto más tecnológico, de luminosidad y de transparencia. Diferentes

empresas o marcas buscan exclusividad en el diseño de sus edificios corporativos (*flagship*), por ello buscan envolventes con una arquitectura significativa para la imagen de la firma.

Aunque son muchos los edificios de servicios, que en los últimos diez años han sido contruidos con fachadas acristaladas, a continuación se muestran los más representativos, que además han sido diseñados con los principios del sistema de certificación LEED de Estados Unidos, Green Building Couincil, lo que confirma que un edificio de vidrio puede ser respetuoso con el medio ambiente (de la Figura 10 a la 19):

Sede de Microsoft	
<ul style="list-style-type: none"> • Emplazamiento: Milán (Italia) • Año de construcción: 2017 • Arquitectos: Herzog & De Meuron 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso principal: administrativo y comercial • Materiales: vidrio y acero • Certificación: LEED Gold
Características: Espacios innovadores y flexibles que facilitan la cooperación, el bienestar y la conciliación.

Figura 10. Sede de Microsoft en Milán (Italia). Fuente: (Jacques Herzog, Pierre de Meuron y Andreas Frieszrog, 2017)

Apple Park	
<ul style="list-style-type: none"> • Emplazamiento: California (EEUU) • Año de construcción: 2017 • Arquitectos: Norman Foster 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso principal: administrativo • Materiales: las piezas de vidrio curvo más grandes del mundo • Certificación: LEED Platinum
Características: Debido al diseño de aprovechamiento de energía calorífica y a un sistema de ventilación único, el edificio no necesita climatización artificial durante nueve meses al año.

Figura 11. Edificio Apple Park en Cupertino - California (Estados Unidos). Fuente: (Norman Foster, 2017)

Torre Anseli

- Emplazamiento: Ciudad de Mexico
- Año de construcción: 2017
- Arquitectos: Colonnier Arquitectos

- Uso principal: administrativo y comercial
- Materiales: vidrio
- Certificación: LEED Gold

Características:

Un sistema de control de HVAC, el monitoreo de energía eléctrica, el control de acceso y de agua y una experiencia de usuario unificada para control, utilizando tecnologías de navegador web.

Figura 12. Torre Anseli en Ciudad de Mexico (Mexico). Fuente: (Agustín Garza, Luis Gordo, 2017)

Ciudad BBVA

- Emplazamiento: Madrid (España)
- Año de construcción: 2016
- Arquitectos: Herzog & De Meuron

- Uso principal: administrativo
- Materiales: vidrio, hormigón y aluminio
- Certificación: LEED Gold

Características:

Fachada acristalada protegida del sol por 2.800 lamas y grandes elementos de vidrio transparente con cámara de aire y baja reflectividad que potencian la luz natural y las vistas.

Figura 13. Ciudad BBVA en Madrid (España). Fuente: (Ortiz León Arquitectos, 2016)

City Hall de San José

- Emplazamiento: California (EEUU)
- Año de construcción: 2015
- Arquitectos: Richard Meier

- Uso principal: administrativo, sala exposiciones, comercial, etc
- Materiales: vidrio, hormigón, metal y piedra
- Certificación: LEED Platinum

Características:

El edificio exalta el uso de la luz natural con sus grandes muros de cristal. La sala de exposiciones dispone de una gran cúpula central realizada en vidrio.

Figura 14. City Hall de San José, California (Estados Unidos). Fuente: (Richard Meier & Partners Architects LLP, 2015)

Sede principal FBI en Florida

• Emplazamiento: Florida (EEUU)

• Año de construcción: 2015

• Arquitectos: Krueck + Sexton Architects

• Uso principal: administrativo

• Materiales: vidrio

• Certificación: LEED Platinum

Características:

Diseñado en función al clima local, el medio ambiente natural, y las necesidades de la agencia. El edificio de oficinas maximiza la luz del día y las vistas mientras minimiza el consumo de energía, y proporciona un lugar de trabajo de gran calidad.

Figura 15. Sede principal del FBI en Florida (Estados Unidos). Fuente: (Nick Merrick-Hedrich Blessing, 2015)

Centro Krisha P.Singh de nanotecnología de la Universidad de Pensilvania

• Emplazamiento: Pensilvania (EEUU)

• Año de construcción: 2013

• Arquitectos: Weiss / Manfredi

• Uso principal: docente-investigación

• Materiales: muro continua de vidrio y paneles metálicos

• Certificación: LEED Gold

Características:

Organiza los laboratorios alrededor de un patio central, permitiendo las vistas al exterior y haciendo altamente visibles las actividades científicas.

Figura 16. Centro de nanotecnología de la Universidad de Pensilvania (Estados Unidos). Fuente: (Michael Harshman, Kimberly Nun, Ina Ko y Michael Steiner, 2013)

The Crystal

• Emplazamiento: Londres (UK)

• Año de construcción: 2012

• Arquitectos: Wilkinson Eyre Architects

• Uso principal: administrativo

• Materiales: vidrio y acero

• Certificación: LEED Platinum

Características:

El edificio consume un 46% menos de energía y emite un 65% menos de CO₂ que otros edificios de oficinas similares. Además, recoge el agua de la lluvia y dispone de calefacción solar.

Figura 17. The Crystal, sede de Siemens en Londres (Reino Unido). Fuente: (Siemens, 2011)

Aldar Headquarters

- Emplazamiento: Abu Dhabi (EAU)
- Año de construcción: 2010
- Arquitectos: MZ & Partners Architects

- Uso principal: comercial y administrativo
- Materiales: acero y vidrio
- Certificación: LEED Silver

Características:

Estructura exterior de acero en forma de diamante llamada "diagrid" para sustentar las piezas de vidrio triangulares. Orientación de fachadas este y oeste.

Figura 18. Edificio Aldar Headquarters – Abu Dhabi (Emiratos Árabes). Fuente: (MZ & Partners Architects, 2010)

Campus Repsol

- Emplazamiento: Madrid (España)
- Año de construcción: 2013
- Arquitectos: Rafael de La-Hoz

- Uso principal: administrativo
- Materiales: vidrio
- Certificación: LEED Platinum

Características:

Superficie construida de 123.000 m². Incluye cuatro edificios en torno a un gran jardín central con 100 árboles que se adaptan al clima de Madrid.

Figura 19. Campus Repsol en Madrid (España). Fuente: (Filippo Poli, 2014)

Todas estas condiciones cuesta verlas trasladadas a edificios de uso residencial, debido a que el vidrio en las viviendas tan sólo se utiliza principalmente, para resolver huecos de escaleras o cerramientos de terrazas.

En España, dentro de los edificios de uso residencial, la distribución de viviendas a nivel general es de un 68,6% para viviendas plurifamiliares y un 31,4% para viviendas unifamiliares (Ministerio de Fomento, 2014). Pero según se analiza en Figura 20 se puede diferenciar entre primeras residencias (en azul), viviendas secundarias (en rojo) y vacías (en verde), observándose que una importante parte de la población dispone de una segunda vivienda con tipología unifamiliar.

Figura 20. Ocupación y tipología edificatoria en España. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2014)

Por otro lado, en Europa tras el análisis de datos realizado por la Comisión Europea de Estadística (Statistics Explained, 2017) referente a la distribución de población por el tipo de vivienda (teniendo en cuenta el parque edificatorio en general y sin desglosar si se trata de primera o segunda residencia), se concluye que 6 de cada 10 habitantes (59,3%) de la Unión Europea vive en viviendas unifamiliares y un 40,7 % viven en viviendas plurifamiliares, como se refleja en la Figura 21.

Figura 21. Tipología edificatoria en la Unión Europea. Fuente: (Statistics Explained, 2017)

En España, en las viviendas unifamiliares, la superficie de huecos en las fachadas ha sido siempre menor que en otros países. Debido sobre todo a la

tradición popular, muy enraizada a la cultura árabe, que se basa en vivir para dentro de la casa y tener lo bonito en el interior, como los patios, y mirar hacia fuera a través de pequeños ventanucos o celosías. También se debe a que en España hay un elevado número de horas de radiación solar al día en comparación con otras regiones de Europa.

En la actualidad, los huecos de ventanas han aumentado su tamaño, por la mejora de las carpinterías y de la calidad de los vidrios, sin embargo, siguen sin ser comparables con los de otros países vecinos, que disponen de grandes acristalamiento que dejan visibilidad hacia el exterior y producen la integración con el entorno.

En los países del norte de Europa existen numerosas edificaciones de uso residencial que disponen de mayor superficie de vidrio en sus fachadas, esto es debido a que los edificios se abren al exterior para intentar captar el mayor número de horas de luz natural al día. Países nórdicos como Suiza, Alemania o Países Bajos son ejemplo de atrevimiento al dejar al descubierto el interior de sus inmuebles quedando en armonía con el entorno. (Figura 22)

Figura 22. Viviendas acristaladas en Europa. Fuente: (Homify.es)

Un diseño previo de la construcción y un análisis minucioso en las estrategias pasivas a utilizar, puede hacer viable este tipo de edificaciones en climas cálidos influenciados por un número de horas elevado de radiación solar, como es el caso de España.

A continuación se muestra una selección de viviendas unifamiliares, de diferentes lugares del mundo, que disponen de fachadas acristaladas:

La Casa del Desierto

- Emplazamiento: Granada (España)
- Año de construcción: 2018
- Arquitectos: Estudio OFIS Architects

Características:

La Casa del Desierto, situado en la parte septentrional de la comarca de Guadix, en el desierto de los Colorados de Górfase que es uno de los espacios más adversos y duros de Europa, donde las temperaturas varían hasta 50 °C según la época del año.

Se trata de una superficie de 20 m², que se distribuyen en dormitorio, baño y zona de estar. La Casa del Desierto se levanta sobre una estructura de madera y está completamente acristalada con vidrios de altas prestaciones. Dispone de un filtrado de agua, otro de producción de energía formado por paneles solares fotovoltaicos. El diseño responde a nuevos desafíos energéticos y bioclimáticos. (Glass, 2018)

Figura 23. La Casa del Desierto, situada en Granada (España). Fuente: www.lacasadeldesierto.es. (Bianco, Cascone, Goia, Perino, & Serra, 2017)

La Casa de Cristal

- Emplazamiento: Bornholm (Dinamarca)
- Año de construcción: 2016
- Arquitectos: Universidad de Oxford.

Características:

La Casa de Cristal se ha construido con el fin de que científicos de la Universidad de Oxford investiguen como la luz afecta a los ritmos circadianos, a la calidad del sueño e incluso al sentido del gusto. También analizarán los efectos de la luz solar en enfermedades como la obesidad, la diabetes, la depresión o la esquizofrenia, entre otras. (Euronews, 2016)

Figura 24. Casa de Cristal, situada en Bornholm (Dinamarca). Fuente: Euronews 2016.

Brandywine house

- Emplazamiento: Washington (EEUU)
- Año de construcción: 2014
- Arquitectos: Robert M. Gurney Arquitecto

Características:

A pesar del tamaño relativamente grande de esta casa y el uso extensivo de vidrio, la casa sigue siendo increíblemente eficiente en energía. Mientras que la gran cantidad de ventanas y tragaluces proporcionan una generosa iluminación diurna, los dispositivos de sombra programados por computadora modulan la ganancia solar. Un sistema de climatización geotérmica, se combina con tubos solares de agua caliente y paneles fotovoltaicos con el objetivo de proporcionar una casa de energía casi nula.

Figura 25. Brandy House, situada en Washington (EEUU). Fuente: Anice Hoachlander y Allen Russ.

Vivienda Rietveld Huis

- Emplazamiento: IJburg (Ámsterdam)
- Año de construcción: 2011
- Arquitectos: Hans van Heeswijk

Características:

Se trata de un bloque rectangular de vidrio que conforman tres plantas y un sótano, disponiendo de espacios abiertos que dejan vislumbrar paisajes únicos. Mientras que el frente de esta casa está revestida con paneles de aluminio perforado, la parte trasera está completamente acristalada, para que los residentes puedan ver la puesta de sol.

Figura 26. Vivienda Rietveld Huis, e IJburg (Ámsterdam). Fuente: (Arantza Álvarez, 2012)

Farnsworth 33

- Emplazamiento: Maello - Ávila (España)
- Año de construcción: 2010
- Arquitectos: ---

Características:

Farnsworth 33, es una réplica de la Casa Farnsworth. Su construcción se basa en una perfilera de aluminio lacado en blanco, y un cerramiento vertical mediante doble acristalamiento de seguridad con lámina intermedia y ligeramente tintado en verde su cara exterior.

Los materiales empleados en el pavimento y los paramentos de ese bloque central están pensados en unos colores y texturas determinados, con el fin de que no haya una excesiva reflexión de la luz, siendo de hormigón oscuro semipulido el pavimento y utilizando una tabiquería oscura de ébano en el bloque central.

Figura 27. Farnsworth, 33. Maello, Ávila (España). Fuente: (Interés, 2010)

El Pabellón Escondido

- Emplazamiento: Las Rozas de Madrid (España)
- Año de construcción: 2006
- Arquitectos: Jose Luis Esteban Penelas

Características:

El Pabellón Escondido es una vivienda unifamiliar de cristal que consigue la integración con el entorno. Se ha utilizado la arquitectura metaorgánica que promueve la armonía entre el habitat humano y el mundo natural. Las chimeneas que asoman por la cubierta son sistemas de captación de luz solar para minimizar la pérdida de luz causado por el arbolado exterior.

Figura 28. El Pabellón Escondido, en Las Rozas de Madrid (España). Fuente: (arq.com.mx, 2016)

House R128

- Emplazamiento: Stuttgart (Alemania)
- Año de construcción: 2000
- Arquitectos: Werner Sobek

Características:

Vivienda unifamiliar de cristal con grandes ventanales que cuentan con triple acristalamiento, dejando paso a la luz natural en todas sus habitaciones. Los forjados están ejecutados en madera, por lo que es totalmente reutilizable y reciclable.

Figura 29. House R128, situada en Stuttgart (Alemania). Fuente: <http://www.arquitour.com/house-r128>.

Casa de Cristal Church Point

- Emplazamiento: Australia
- Año de construcción: ---
- Arquitectos: Estudio Utz Sanby

Características:

Casa de Cristal Church Point está realizada de vidrio y en perfiles metálicos, se encuentra abierta a la luz y a la vegetación que la rodea. No se dispone de más información al respecto.

Figura 30. Casa de Cristal Church Point (Australia). (Tikinti, 2009)

Casa de Miami

- Emplazamiento: Tokio (Japón)
- Año de construcción: ---
- Arquitectos: ---

Características:

Casa en Miami, en la península de Boso, al este de Tokio, se encuentra rodeada por un hermoso paisaje natural, buscando aprovechar las vistas se definió un diseño con grandes aberturas vidriadas. Arquitecto: desconocido. Se desconoce mucha información de esta vivienda, como por ejemplo el año de construcción. (Peruarki, 2008)

Figura 31. GlassHouse en Miami, en la península de Boso (Tokio). Fuente: (Peruarki, 2008)

Glass House

- Emplazamiento: Connecticut (EEUU)
- Año de construcción: 1949
- Arquitectos: Philip Johnson

Características:

Glass House, situada en New Canaan, en Connecticut, evoca un momento en el que vivir en Manhattan, no era tan deseado como hacerlo en las afueras. Su arquitecto Philip Johnson se basó como idea originaria en la Casa Farnsworth de Mies van de Rohe. (Munuera, 2014)

Figura 32. Glass House, situada en New Canaan, en Conetica (EEUU). Fuente: (Munuera, 2014)

La Casa del Bosque y la Casa del Mar

- Emplazamiento: Milán (Italia)
- Año de construcción: ---
- Arquitectos: Carlo Santambrogio

Características:

El estudio de arquitectura SantambrogioMilano, desarrolla proyectos de vidrio, con piezas únicas y exclusivas. En la colección "La Simplicidad" se diseñaron por un lado La Casa en el Mar, que se sitúa a orillas de la costa italiana en un paisaje horizontal, sensible a los contrastes y al horizonte. Y por otro lado La Casa del Bosque, situada a las afueras de Milán, al norte de Italia, se erige entre árboles centenarios. Toda ella formada a través de vidrios templados con tinte azulado, el cual ha sido implementado también en los muebles. El material utilizado es muy diferente en las dos casas, por sus dispares ubicaciones. (SantambrogioMilano, s. f.)

Figura 33. La Casa del Bosque y la Casa del Mar (Italia). Fuente: (SantambrogioMilano, s. f.)

La Casa Farnsworth

- Emplazamiento: Illinois (EEUU)
- Año de construcción: 1950
- Arquitectos: Mies Van Der Rohe

Características:

La Casa Farnsworth situada en Plano (Illinois) con fachadas de vidrio que apoyan sobre perfiles metálicos que se elevan del terreno. Permite su integración con el entorno y la entrada de la luz natural.

Delicadeza en los detalles y sencillez constructiva. Marcó un antes y un después en la historia de la arquitectura.

Figura 34. Casa Farnsworth en Illinois (EEUU)

1.3 LA NECESIDAD DE LA LUZ NATURAL

Desde la antigüedad el hombre ha tratado de iluminar de forma natural los espacios donde vive, les servía para poder medir el tiempo (el día y la noche), las estaciones, los años.

Ello los llevo, a que además de los huecos de ventanas, se desarrollaron técnicas arquitectónicas que posibilitaban el paso de la luz al interior. Estas técnicas se asocian con una arquitectura que hoy día conocemos como bioclimática. La arquitectura bioclimática considera el diseño de los edificios en secciones escalonadas que permiten la entrada de luz, así como integrar en el interior de los edificios galerías, patios, atrios, lucernarios, claraboyas, etc y todo tipo de estrategias que permiten el aprovechamiento máximo de la luz (Figura 35).

Figura 35. Técnicas de aprovechamiento de luz natural.

Asimismo, las crisis económico-energéticas de los años 70 y 80, el aumento de los costes de los combustibles, el calentamiento global y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, generan un cambio de conciencia en la sociedad que vuelve a implementar el aprovechamiento de luz natural como fuente de energía, teniendo en cuenta también sus posibilidades estéticas y su capacidad de satisfacer necesidades biológicas.

Es sabido que un diseño previo que considera como criterio la iluminación natural, puede llegar a alcanzar una reducción del 50% del consumo total de energía. En la actualidad, no se considera suficiente diseñar edificios con impacto cero, la tendencia es proyectar considerando que los edificios deben generar un impacto positivo en los aspectos sociales, medioambientales y económicos. A esta nueva forma de entender la sostenibilidad, se le ha denominado sostenibilidad regenerativa. (Villoria Sáez & del Río Merino, 2019).

En esta línea se sitúan las viviendas con grandes superficies acristaladas que aportan beneficios en tres direcciones. La primera dirección se encamina hacia la eficiencia energética y la sostenibilidad, basada en el aprovechamiento de recursos naturales (Figura 36). La segunda se centra en un enfoque restaurativo, acercando la vivienda con el entorno natural (Figura 37). Y el tercero se orienta hacia un diseño regenerativo donde la salud y el bienestar de las personas tienen un papel fundamental (Figura 38).

A continuación, se muestran los beneficios energéticos y medioambientales que nos aporta la luz natural en viviendas de vidrio:

1. BENEFICIOS ENERGÉTICOS Y MEDIO AMBIENTALES.
Un correcto diseño de iluminación natural es capaz de cumplir con los requisitos de altos niveles de iluminación (>500 lux) en una estancia interior durante el día sin necesidad de aporte de luz artificial.
Reduce al máximo el consumo de iluminación. Por la reducción de la factura eléctrica y por la reducción del número de ciclos de encendido y apagado de las luminarias, con el fin de alargar la vida útil de las lámparas que proporcionan la iluminación artificial.
Aprovechamiento de la energía de la luz solar, para utilizarla como energía calorífica (cargas térmicas), reduciendo los consumos de calefacción.
Un sistema de iluminación natural también puede ayudar a reducir las aportaciones caloríficas de la edificación, debido a la favorable relación de lm/W de luz natural. Disminuyendo las cargas procedentes de la iluminación artificial se produce un ahorro de energía en refrigeración.
La iluminación natural es una energía renovable proveniente directamente de las radiaciones del sol, sin necesidad de sistema o medio de captación, por lo que no precisa de una instalación previa, favoreciendo el ahorro energético y económico.
Mejora la calificación energética de la edificación.
Contribuye a reducir las emisiones de efecto invernadero.
Fuente de energía renovable que no necesita de ningún equipo o sistema para ser transformado de energía primaria a energía final.
Se trata de un recurso limpio e inagotable que nos proporciona la naturaleza
España por su situación geográfica dispone de muchas horas de sol. El uso de esta energía solar contribuye a disminuir la dependencia energética de suministros importados de otros países.

Figura 36. Beneficios energéticos y medio ambientales de la luz natural.

La radiación solar, como recurso natural, nos aporta numerosos beneficios energéticos y medioambientales en edificios con acristalamientos de vidrio, pero no es suficiente para conseguir mejorar los ecosistemas y parar el cambio climático, para esto es preciso una construcción restaurativa, donde nos acerquemos a la naturaleza modificando el entorno que nos rodea. Las nuevas edificaciones tienden a diseñarse incorporando espacios verdes, como pueden ser las áreas de descanso en los edificios de oficinas o los jardines con zonas comunes recreativas en los edificios residenciales. La solución de fachadas de vidrio, nos acerca a una arquitectura biofílica, los acristalamientos dejan pasar la luz natural y nos aproximan al entorno, obteniendo una mayor bienestar y en consecuencia una mejor salud. A continuación se indican los beneficios de la luz natural relacionados con el entorno natural:

2. BENEFICIOS RELACIONADOS CON EL ENTORNO NATURAL.

Valorizar al máximo la relación de la vivienda con el entorno natural. Armonía e integración con el paisaje exterior (biofilia).

Higienizar los espacios interiores, creando ambientes limpios y confortables.

Mantener la vivienda limpia y libre de moho y bacterias. Estos suelen proliferar en lugares húmedos y oscuros.

Establecer relaciones visuales entre la luz y la sombra.

Mejorar la vida de los usuarios en situaciones como la vivida en estos últimos meses por la pandemia provocada por la COVID 19, que conlleva la realización de un gran número de actividades en el interior de la vivienda.

Crear ambientes más amplios y adaptables a un uso social.

La integración de la iluminación natural con el diseño arquitectónico puede dar lugar a una obra de gran belleza, buscando el equilibrio entre las luces y las sombras.

La luz solar al tener la particularidad de ofrecer un espectro completo de longitud de onda que aporta una gran calidad de luz y permite disfrutar de una mayor amplitud de tonalidades de colores y reproducciones cromáticas, cambiantes a lo largo del día y de los meses del año.

Figura 37. Beneficios de la luz natural, relacionados con el ambiente natural.

Además de los beneficios anteriormente indicados, hoy día se va más allá, se persigue una arquitectura regenerativa, con edificios que generen impactos positivos sobre el medio ambiente y también sobre los seres humanos. Se indican los beneficios de la luz natural sobre el bienestar social y la salud de las personas:

3. BENEFICIOS SOBRE EL BIENESTAR SOCIAL Y LA SALUD.
Fundamental para el bienestar humano influyendo directamente en el estado de ánimo, tanto psicológica como fisiológicamente.
Aumenta la productividad y la capacidad del aprendizaje, así como otros parámetros relacionados con el rendimiento.
Disminuye la fatiga visual que causa la iluminación artificial.
Mejorar el reloj biológico, que ayudará a conciliar el sueño, descansar mejor durante la noche y estar más productivos durante el día.
Ayudar a reforzar el sistema inmunológico, lo que significa tener mejor salud. Diferentes estudios indican que pacientes hospitalizados en habitaciones con mayor luz natural recuperan antes.
Aumenta la producción de serotonina, que contribuye al bienestar y a la felicidad. También desempeña un papel importante en el apetito, las emociones, así como las funciones motoras.
Al permitir la entrada de la luz natural, fuente de vitamina D, posibilita la absorción del calcio y el fósforo en el intestino. Fortalece los huesos previniendo enfermedades musculoesqueléticas.
Mejorar la salud visual, reduciendo la fatiga ocular y apreciando mejor la tridimensionalidad de los objetos y la definición de las gamas de colores.
Aportar sensación de bienestar y confort, que ayuda a combatir el estrés y el cansancio.
Proporcionar vitalidad y alegría, combatiendo la depresión y la apatía.

Figura 38. Beneficios de la luz natural sobre el bienestar social y la salud.

1.4 CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO DE INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha confirmado, que el sector de la construcción genera un grave impacto medioambiental debido al consumo de energía y a la gran cantidad de emisiones que emite a la atmósfera, a lo largo de todo el ciclo de vida de los edificios. Por ello, desde la Unión Europea se marcan directrices encaminadas a mejorar la eficiencia energética, añadiendo la obligatoriedad de construir edificios de “energía casi nula”. Uno de los objetivos principales que se establecen es incrementar el uso de energías alternativas, como es la energía solar, fuente gratuita e inagotable en la tierra.

En España los edificios son responsables del 30% aproximadamente del consumo de energía primaria y del 28% de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera. Por todo ello, la arquitectura ha ido evolucionando para reducir este impacto y se han incorporado criterios de diseño que consiguen generar edificios de consumo casi nulo, acercándonos a lo que se ha denominado arquitectura sostenible, es decir el diseño de edificios que generan impacto cero sobre el medioambiente.

Sin embargo, se ha confirmado que estos criterios de diseño no son suficientes si queremos parar el cambio climático y por ello, la arquitectura, el diseño de nuestros edificios debe avanzar hacia la construcción de edificios que generen impactos positivos, tanto en el medioambiente como en los otros aspectos de la sostenibilidad. A esta nueva manera de entender la sostenibilidad se le denomina sostenibilidad regenerativa.

Los edificios diseñados con criterios de sostenibilidad regenerativa consideran además de la eficiencia energética y la utilización de energías renovables y/o alternativas, la mejora de la salud y el bienestar de los usuarios.

En este sentido, la arquitectura bioclimática supone un referente sobre el que afianzar este nuevo concepto, pues considera el aprovechamiento no sólo del sol como energía alternativa si no también la luz solar como fuente de salud y otros beneficios para el ser humano.

Las fachadas de vidrio se benefician tanto de la energía calorífica como de la energía lumínica, que nos aporta el sol, siendo fuente de energía renovable que no necesita ningún equipo o sistema para ser transformado de energía primaria a energía final.

En España, el diseño con este tipo de criterios no ha tenido mucha influencia debido a nuestra cultura y a que muchas de nuestras regiones tienen una media de radiación solar muy elevada. Sin embargo, son muchos los países del norte de Europa que construyen sus edificios con cerramientos completamente acristalados aprovechando los beneficios de la luz solar, tanto como alternativa energética como fuente de salud. Sin embargo, la evolución del vidrio y de las soluciones pasivas, pueden hacer viable en España la construcción de este tipo de edificios. Por ello es necesario investigar sobre las estrategias pasivas que minimicen este impacto negativo sobre el incremento de la demanda energética del edificio, evitando el detrimento de la sostenibilidad, de la salud de los ocupantes y del medio ambiente.

ESTADO DEL ARTE

2.1. PROPIEDADES DE LOS VIDRIOS.

2.2. ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO.

2.3. ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO LUMINICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO.

2.4. ESTUDIOS SOBRE MODELOS A ESCALA PARA EL CÁLCULO DE PARAMETROS ENERGÉTICOS Y LUMÍNICOS.

2.5. CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO ESTADO DEL ARTE.

2 ESTADO DEL ARTE

Se ha realizado un estudio minucioso de los artículos publicados sobre características de los vidrios, análisis térmicos y lumínicos en envoltentes acristaladas e investigaciones sobre análisis realizados con modelos a escala.

A continuación, se realiza una síntesis de toda la información recabada y se destacan los estudios más relevantes que nos marcan la situación de la problemática a analizar.

En el Anexo 2, se describen de forma pormenorizada cada una de las investigaciones consultadas, relacionadas con parámetros sobre el comportamiento térmico y lumínico en vidrios.

2.1 PROPIEDADES DE LOS VIDRIOS

El vidrio *“es el nombre dado a todos los cuerpos amorfos que se obtienen mediante la reducción de la temperatura de una masa fundida independientemente de su composición química y del rango de temperatura de solidificación, que como resultado del aumento gradual de la viscosidad adopta las propiedades mecánicas de un cuerpo sólido”*. (Saint-Gobaint, 2017) (José María de la Poza Lleida, 1992). José María Fernández Navarro añade además *“que pertenece al grupo de los materiales cerámicos y en concreto al de las piedras artificiales obtenidas en caliente”* (Fernández Navarro, 2003).

Este material se forma con un silicato múltiple, fusible al pasar de los 1.200°C y que a la temperatura ambiente constituye una masa amorfa y transparente, dura, frágil y sonora.

Se entiende por vidrio, en el sentido químico-industrial, fusiones sencillas o complejas de silicatos, en parte también boratos, que se encuentran después de enfriarse en estado amorfo. El vidrio no tiene un punto de fusión fijo, es muy fluido al rojo blanco y, al descender la temperatura, pasa al estado sólido con los estados intermedios de fluido espeso y viscoso (a unos 400°C). En estado

fluido viscoso pueden darse al vidrio, por distintos procedimientos, las formas más diversas (José María de la Poza Lleida, 1992).

La composición del vidrio puede tener muchas variantes que se manifiestan en productos comerciales. Además, en función del desarrollo y la innovación de los fabricantes, el vidrio va cambiando su composición. Por ello, hoy día se investiga la incorporación de diferentes aditivos que otorguen al acristalamiento mejores propiedades mecánicas, ópticas, térmicas, acústicas, etc.

La composición genérica del vidrio consta de aproximadamente un 14% de soda (que es el material alcalino fundente), entre un 70%-73% de sílice (que es el material vitrificante), entre un 9%-10% de cal en estado calcáreo (que es el material estabilizante), un 6% restante está compuesto por impurezas como son fundentes (vidrio reciclado entre otros), agentes de refinamiento de la mezcla, preventivos de la cristalización, estabilizantes, modificadores de la transmisión espectral y opalizantes, de cuyas proporciones depende la facilidad de fabricación, la calidad del vidrio, las propiedades mecánicas, físicas y ópticas (Rubio Hernández, 2015).

En la Tabla 1 se muestra la composición básica del vidrio, indicando sus principales materias primas y el porcentaje aproximado de su composición.

Sílice (70-73%)	Sustancia “vitrificante” que se usa en forma de anhídrido silícico. Es muy abundante en la naturaleza. De forma pura y cristalizado constituye lo que se denomina cristal de roca. Otras sustancias vitrificantes son el anhídrido bórico y el anhídrido sulfúrico.
Soda (14%)	Sustancia “fundente”. Facilita la fusión de la masa silíceo bajando la temperatura a la que esta funde. Esta sustancia es el carbonato de sodio o llamado también soda Solvay. Otras sustancias fundentes son el carbonato potásico, el ácido arsenioso y trozos de vidrio.
Cal (9-10%)	Sustancia “estabilizante”, sin ella el vidrio compuesto sólo por sílice y sodio o potasio, sería soluble en agua hirviendo y no podría utilizarse como tal.
Otras sustancias (6%)	Sustancias diversas que varían en función de las características que se quieran obtener del vidrio.

Tabla 1. Composición básica del vidrio.

A continuación, se muestran las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y técnicas de los vidrios, que han sido extraídas y sintetizadas del manual del vidrio de Saint-Gobain:

- **Las propiedades mecánicas**, se pueden ver reflejadas en la Tabla 2:

Densidad	2.500 Kg/m ³ (un panel de 4 mm de espesor de vidrio pesa 10 Kg/m ²).	No se puede decir que la densidad figure entre las principales propiedades del vidrio, ya que para la mayoría de sus aplicaciones su importancia es pequeña. No obstante, la densidad puede ser un método muy útil de control de la homogeneidad del vidrio, pues detecta pequeñas variaciones de composición.
Dureza	470 HK La dureza del vidrio se establece conforme a Knoop. La base es el método de ensayo dado en la norma DIN 52333 (ISO 9385).	Esta característica tiene especial interés práctico en los procesos de corte, tallado y pulido del vidrio y de ella depende la vulnerabilidad y, por lo tanto, el estado de conservación de la superficie.
Resistencia a la compresión	800 – 1.000 MPa La resistencia a la compresión define la capacidad de un material para soportar una carga aplicada verticalmente a su superficie.	La resistencia del vidrio a compresión es muy elevada, por lo que en sus aplicaciones normales es prácticamente imposible la rotura del vidrio por compresión.
Módulo de elasticidad	70.000 MPa El módulo de elasticidad se determina a partir del alargamiento elástico de una barra fina, o bien doblando una barra de sección rectangular.	Bajo determinadas condiciones los vidrios presentan una variación de su comportamiento elástico en función del tiempo de actuación de la carga.
Resistencia a la flexión	45 MPa La resistencia a la flexión de un material, es una medida que valora su resistencia durante la deformación. Se determina por ensayo de flexión en la placa de vidrio, utilizando el método del anillo doble. Norma EN 1288-5.	Los valores estimados para un vidrio recocido son del orden de 40 MPa y para un vidrio templado de 100 MPa.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los vidrios.

- **Las propiedades térmicas** de los vidrios se pueden ver en la Tabla 3 y varían en función de la composición.

Rango de transformación	520 -550 °C	El rango de transición se denomina rango de transformación y de acuerdo con DIN 52324 (ISO 7884), se encuentra entre 520 °C y 550 °C. El templado y el curvado, requieren una temperatura suplementaria de más de 100 °C.
Temperatura de reblandecimiento	600 °C aproximadamente	Contrariamente a los cuerpos sólidos de estructura cristalina, el vidrio no tiene punto de fusión definido. Se transforma continuamente desde el estado sólido al estado plástico viscoso.
Calor específico	0,8 J/g/K	El calor específico (en Julios) define la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de vidrio flotado en 1K. El calor específico del vidrio aumenta ligeramente la temperatura, que va aumentando hasta el intervalo de transformación.
Conductividad térmica	0,8 W/mK	Es la cantidad de calor requerida para fluir a través del área de sección transversal de la muestra de vidrio flotado en el tiempo en que disminuye la temperatura.
Expansión lineal	$9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Encontramos un comportamiento diferente en la expansión lineal y expansión del cuerpo bajo efecto de calor, en caso de expansión lineal y expansión volumétrica. Con los cuerpos sólidos, la expansión volumétrica es tres veces la de la expansión lineal. El coeficiente de temperatura de expansión del vidrio flotado se administra de acuerdo a DIN 52328 e ISO 7991.

Tabla 3. Propiedades térmicas de los vidrios.

- Las propiedades ópticas, se muestran en la Tabla 4 y cabe destacar:

Índice de refracción	$n = 1,50-1,70$	<p>Si la luz de un medio ópticamente menos denso (aire) se encuentra con un medio ópticamente más denso (vidrio), entonces el rayo de luz se divide en las interfaces de superficie. La medida de la desviación determina el índice de refracción.</p> $n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r}$ <p>Siendo “i” el ángulo de incidencia y “r” el ángulo de refracción.</p> <p>Para el vidrio flotado, este índice de refracción es $n = 1,52$.</p>
Reflexión	<p>4%</p> <p>sobre un vidrio tipo con índice de refracción $n=1,5$</p> $\frac{(1.5-1)^2}{(1.5+1)^2} = 0.04$	<p>La reflexión se produce siempre que existe un cambio de medio, la cantidad de luz reflejada depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción de los medios.</p> $R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$
Absorción		<p>La absorción es la parte de la luz incidente que se convierte en energía térmica dentro del material. La absorción del vidrio se produce como resultado de la interacción de sus componentes con la radiación que incide sobre él.</p>

Tabla 4. Propiedades ópticas de los vidrios.

- **Las propiedades técnicas**, reflejadas en la Tabla 5 y siendo estas:

Resistencia frente al:	<p>Agua = clase 3 (DIN 52296)</p> <p>Ácido = clase 1 (DIN 12116)</p> <p>Alcalino = clase 2 (DIN 52322 e ISO 695)</p>	La superficie de vidrio se ve afectada si se expone durante mucho tiempo a los álcalis (y a los gases de amoníaco) en combinación con altas temperaturas. El vidrio flotado también reacciona a los compuestos que contienen ácido fluorhídrico en condiciones normales. Estos se utilizan para el tratamiento de superficies de vidrio.
Abrasión	Es unas 16 veces más resistente que el granito	Ensayos de abrasión (DIN 52347 e ISO 3537)
Aumento de la dispersión de la luz	1%	El aumento de la dispersión de la luz en el vidrio flotado es de aproximadamente 1 % (después de 1.000 ciclos de abrasión).
Resistencia al goteo de arena		Proceso de goteo de arena (DIN 52348 e ISO 7991). Para esta prueba la abrasión por impacto diagonal, se hicieron gotear 3Kg de arena con un tamaño de partícula 0,5/0,71mm sobre la superficie a ensayar, con una inclinación de 45º y, desde una altura de 1600mm. La medición del desgaste es la densidad luminosa reducida (DIN 4646 parte 2).
Densidad luminosa	4 cd/m ² lux.	La densidad luminosa para el vidrio flotado es de aprox. 4 cd/m ² lux.
Dureza al rayado	0,12 N	La dureza al rayado de vidrio flotado es de aproximadamente 0,12N. El ensayo se diseñó originalmente para determinar la dureza al rayado de los plásticos. Una punta de diamante con ángulo 50 y 15mm de radio, se dibuja sobre la superficie del vidrio mediante la aplicación de diferentes cargas. La carga a la cual se produce un rasguño en la superficie es una medida de la dureza al rayado.

Tabla 5. Propiedades técnicas de los vidrios.

El vidrio en función de sus propiedades cuenta con una gran diversidad de gama comercial en función de las prestaciones que queramos cubrir. Ya que no es lo mismo un vidrio en fachada exterior, con el que se intenta conseguir una disminución en el consumo energético del edificio, que un vidrio utilizado para separar despachos cuya función principal es lograr un aislamiento acústico.

Además de todo lo anteriormente expuesto, las propiedades de los vidrios a bajas temperaturas persisten durante millones de años, según una investigación llevada a cabo por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad Autónoma de Madrid. El trabajo publicado en la *Physical Review Letters*, indica que ciertas propiedades del vidrio se mantienen sin ser modificadas con el paso del tiempo y que a pesar de ser un material conocido desde hace muchísimos años, su naturaleza es una de las cuestiones más controvertidas en el campo de la física.

2.2 ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO

La composición de la envolvente térmica es muy importante a la hora de cuantificar la demanda energética del edificio. Por ello existen numerosos estudios que analizan el comportamiento térmico de distintas configuraciones de fachadas (Esteban Sáiz, 1991).

Por ejemplo, los autores Friess y Raksan analizan en diferentes edificios como afecta la radiación, la convección y la conducción de calor a través de las paredes, techos y ventanas, así como las técnicas de ventilación natural más eficientes, obteniendo en todos los casos configuraciones energéticas optimizadas con reducciones de hasta un 30% en edificios residenciales y un 79% en edificios de oficinas. (Friess & Rakhshan, 2017)

Otra investigación de los mismos autores indica que aprovechar la energía calorífica para cubrir la demanda de calefacción presenta mejores resultados en edificios de oficinas y de otros usos, ya que a menudo se encuentran en su totalidad vidriados, y en el entorno residencial el acristalamiento solo ocupa un pequeño porcentaje de la fachada. (Friess, Rakhshan, Hendawi, & Tajerzadeh, 2012)

Chen, Yang y Wang analizan parametros que afectan en la ganancia de energía solar, pero en este caso para edificios de gran altura, siendo los parametros más decisivos, el coeficiente de ganancia de calor solar, la relación de hueco/macizo, el ángulo de obstrucción externo y la fracción de proyección saliente (X. Chen, Yang, & Wang, 2017).

En la investigación realizada por Kumar y Babu se analiza un edificio, también, de oficinas en la India teniendo en cuenta las propiedades espectrales de diferentes materiales de vidrio. Los resultados obtenidos indican que en cuanto al factor de luz diurna, el vidrio reflectante verde situado en la orientación sur obtiene mejores resultados en la temporada de verano y el vidrio de color bronce colocado en orientación norte es el mejor durante el invierno.

En otro orden de cosas, también es preciso tener en cuenta que la importancia de un análisis pormenorizado por orientaciones, para la elección del vidrio más conveniente en cada caso es fundamental, tal y como se concluye en las investigaciones de Cuce y Banihashemi. (Cuce & Cuce, 2016), (Banihashemi, Golizadeh, Reza Hosseini, & Shakouri, 2015).

Por otra parte, los trabajos de Aste, Buzzetti, Del Pero y Leonforte, indican que los balances energéticos en un edificio de oficinas en diferentes zonas climáticas, demuestran que existe un impacto negativo de las ganancias solares siendo la solución más razonable para disminuir el consumo anual de energía, utilizar dispositivos de protección solar externos o usar acristalamientos con control solar. (Aste, Buzzetti, Del Pero, & Leonforte, 2018).

En todo caso, el vidrio es un material que en los últimos años se ha desarrollado exponencialmente y ha evolucionado con nuevas tecnologías. Por ejemplo la investigación de Giménez analiza térmicamente un vidrio con cámara de agua circulante, el cual disminuye el consumo en refrigeración, atenuando las ganancias solares en el acristalamiento con un consumo mínimo en la bomba de recirculación. (Giménez, 2011a). Similar resulta el estudio Pérez-Pujazón que en esta misma tipología de vidrios, incluye un sistema de climatización y/o calefacción de energía renovable, para justificar una alternativa viable para los edificios de energía casi nula. (Pérez-Pujazón Millán, 2015).

En línea con las investigaciones anteriores, el artículo de Bangarner presenta la evaluación de un nuevo sistema de fachada de vidrio, llamado “Fluidglass”, que combina cuatro funciones en un elemento: un colector solar térmico, un dispositivo de calefacción-refrigeración, una envoltura térmica transparente y un sistema de sombreado adaptativo. Los resultados que se obtuvieron indican que la energía de calefacción del sistema es suficiente para alcanzar temperaturas de confort sin ser necesario cualquier sistema de aporte de calor adicional (Baumgärtner, Krasovsky, Stopper, & Von Grabe, 2017).

También se han encontrado investigaciones donde se han estudiado acristalamientos con materiales de cambio de fase en las cámaras entre los vidrios, dando lugar a mejores resultados que en un vidrio tradicional, ya que en parte evita la transmisión de las ganancias solares al interior. (Fabrizio Ascionea, Nicola Biancoa, Claudio De Stasioa, Gerardo Maria Mauroa, 2017).

Por otra parte, se han encontrado estudios que consideran las cuestiones económicas de los nuevos materiales de vidrio, por ejemplo los estudios de Fazel sobre los costes de instalación y de mantenimiento de envolventes de vidrio. Fazel indica que las nuevas ventanas inteligentes, con alta tecnología tienen un gran impacto en la reducción de los costes de calefacción y refrigeración en los edificios, sin embargo, los costes iniciales de estas ventanas son excesivamente elevados. Por esta razón propone dos nuevos métodos para construir ventanas inteligentes de bajo costo. El primer método se basa en las variaciones de presión de un gas que en función de la temperatura puede moverse de forma ascendente y descendente, y el segundo es un fluido líquido de dos fases con diferente coeficientes de expansión térmica (Fazel, Izadi, & Azizi, 2016).

También un estudio realizado en edificios residenciales en Cataluña, demuestra que las medidas más costosas no siempre dan los mejores resultados en cuanto al ahorro de energía. Por ello no siempre los mejores materiales o los sistemas más novedosos y por ello más costosos, nos llevan a las soluciones más óptimas (Ortiz, Fonseca i Casas, Salom, Garrido Soriano, & Fonseca i Casas, 2016).

Un artículo a destacar, sobre temas económicos, es el publicado por Santamaría y su equipo. El artículo se titula “Evaluación económica de rehabilitaciones térmicas pasivas de viviendas en climas mediterráneos” presenta un análisis energético y económico para evaluar la rentabilidad de las operaciones de rehabilitación energética en la envolvente de un bloque de viviendas. Este trabajo concluye que el escenario más rentable es aquel que combina, una fachada con aislamiento superior al límite reglamentario, ventanas de doble acristalamiento con baja emisividad y marcos de aluminio con rotura de puente térmico y protección solar con elementos móviles de sombreado. (Santamaría, Girón, & Campano, 2016)

Por último, cabe destacar la investigación «Estudio Precost&e» que se basa en la evaluación de los costes constructivos y consumos energéticos derivados de la calificación energética en un edificio de viviendas situado en Madrid, se deduce que una calificación más alta no siempre se corresponde con un mayor presupuesto. De forma general, inversiones en torno al 6% permiten alcanzar los resultados desde una calificación “E” hasta una calificación “B” (Valdivieso, 2014).

2.3 ESTUDIOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO LUMINICO EN EDIFICIOS DE VIDRIO

Con respecto a los estudios encontrados sobre el comportamiento lumínico en edificios de vidrio, hay que destacar que son numerosas las investigaciones que muestran el beneficio que tiene la luz natural para el bienestar y el confort de los ocupantes. El poder trabajar con luz natural mejora el rendimiento de las personas, así como el estado de ánimo y contribuye a una calidad de vida mejor. (Amirkhani, Garcia-Hansen, Isoardi, & Allan, 2017).

En relación con lo anteriormente indicado, uno de los últimos estudios que se están llevando a cabo en la ciudad danesa de Bornholm, por un grupo de científicos de la Universidad de Oxford, se basa en los beneficios de la luz solar en el cuerpo humano. En concreto, analizan cómo grandes cantidades de luz afectan a los ritmos circadianos, a la calidad del sueño e incluso al sentido del gusto. Joachim Stormly Hasen responsable del proyecto explica: “Hay muchas

pruebas que demuestran que la luz solar y, sobre todo, los ciclos de luz y oscuridad juegan un papel muy importante en la vida de la gente”. Este grupo de científicos también están analizando los efectos de la luz solar en enfermedades como la obesidad, la diabetes, la depresión o la esquizofrenia entre otras (Eurowes, 2016).

También se han encontrado estudios que analizan los inconvenientes de la iluminación natural, como el deslumbramiento por incomodidad, siendo esto un fenómeno que provoca un efecto irritante o de distracción, pero ninguna investigación ha podido comprobar hasta ahora que factores son exactamente los que influyen para poder acometerlos con profundidad (Hamedani et al., 2020). Esto se debe a que no solo entran en juego las características físicas de la iluminación y la radiación, sino que también se baraja la opción de tener en cuenta otros parámetros como el iris del ojo, factores psicológicos, sensibilidad óptica de la persona, etc. (Michael & Heracleous, 2017), (Pierson, Wienold, & Bodart, 2017).

En algunos estudios se concretan estos inconvenientes atendiendo al uso del edificio, por ejemplo, en edificios dedicados a la docencia, en Chipre, se analizó que el alto contraste de luz crea problemas de deslumbramientos especialmente en las aulas orientadas este y oeste (Michael & Heracleous, 2017), o en edificios de oficinas, donde las investigaciones recabadas son cuantiosas, cabe destacar el artículo “Una estrategia de diseño de iluminación eficiente de energía para mejorar la comodidad visual en oficinas con ventanas”, muestra que un alto contraste de luminancia entre las ventanas y las superficies circundantes puede aumentar el riesgo de deslumbramiento, y para ello diseñan un sistema basado en una iluminación supletoria de tiras de LED. De esta forma consiguen un contraste menor, reduciendo el resplandor que incomoda a los usuarios de las oficinas (Amirkhani et al., 2017).

Por otro lado atendiendo al diseño del edificio, la latitud y el clima son dos factores importantes y altamente influyentes para los sistema de iluminación natural y para la instalación de las protecciones. Latitudes menores (alrededor de 25° a 40° norte y sur) tienen los valores más altos de horas de sol, de manera contraria las latitudes más altas (por encima de los 50° norte y sur)

además de tener valores bajos de duración de luz solar anualmente, les afectan vientos tormentosos y poseen un clima mucho más nuboso, lluvioso e inestable. (Mardaljevic & Christoffersen, 2017), Lopez-Besora, Serra-Coch, Coch, & Isalgue, 2016), (Gentile, Laike, & Dubois, 2016).

Otro punto importante son las estrategias pasivas que se diseñan para conseguir optimizar al máximo los niveles de iluminación y mitigar los altos niveles de iluminación. Algunas de estas estrategias son los sistemas de lamas que pueden controlar la incidencia de los rayos solares en el interior de los espacios, o el uso de cortinas de diferentes tejidos o de tipo veneciana. (Wagdy, Sherif, Sabry, Arafa, & Mashaly, 2017), (Karlsen, Heiselberg, Bryn, & Johra, 2016), (Maurer, Cappel, & Kuhn, 2017) y (Lim & Heng, 2016). El estudio de Jamrozik analiza dos sistemas de sombreado: uno formado por persianas de malla y el otro que consta de un tintado dinámico. Parámetros del rendimiento de la función cognitiva, como es la memoria de trabajo, inhibición y satisfacción mejoraron en ambas soluciones. Los síntomas de fatiga visual se redujeron y no hubo diferencias significativas entre ambos sistemas. (Jamrozik et al., 2019)

En línea con lo anterior, cabe indicar que el diseño previo teniendo en cuenta factores como la orientación, la latitud, el clima o las estrategias pasivas a instalar pueden conllevar un gran ahorro económico. Un punto importante en los edificios con grandes acristalamientos de vidrio es la posibilidad de captar toda la luz natural necesaria para poder minimizar al máximo los costes en iluminación artificial. La investigación “Uso de persianas automatizadas en edificios inteligentes para el ahorro de energía: un caso mexicano”, tiene como objetivo demostrar el ahorro de energía eléctrica a través de un sistema automatizado de persianas que permiten la entrada de luz natural a una habitación de un edificio. La automatización de este sistema busca mantener un nivel de confort y una iluminación adecuada basada en la normativa mexicana (Gutiérrez, Álvarez, Velázquez, & Lay-Ekuakille, 2018).

Por último es de destacar el estudio de Motamed y otros, se basa en el ahorro de energía de iluminación artificial y por consiguiente del ahorro económico. Esta investigación desarrolla un sistema de control que tiene por objetivo

ordenar al sistema de sombra e iluminación eléctrica que mantenga el deslumbramiento y la iluminación horizontal en una zona de confort visual predefinida. El sistema consiguió dicho confort visual durante el 96% de las horas de trabajo mientras se activaba el sistema de sombreado de manera eficiente. (Motamed, Deschamps, & Scartezzini, 2017)

2.4 ESTUDIOS SOBRE MODELOS A ESCALA PARA EL CÁLCULO DE PARAMETROS ENERGÉTICOS Y LUMÍNICOS

La utilización de modelos a escala para el análisis de ciertas variables energéticas es algo que se viene utilizando desde hace muchos años, sobre todo para medir parámetros de iluminación donde las variables son totalmente comparables con los resultados obtenidos en un modelo real. (Monteoliva, 2013).

Por ello la fabricación de maquetas es muy utilizada para el análisis de iluminación natural, como en la investigación de Ferron y otros donde se analizan sistemas encargados del redireccionamiento de la componente solar, capaces de optimizar los niveles de iluminación hasta en un 40%. (Ferrón, Pattini, & Lara, 2010).

También Ledesma y su equipo demostraron que se puede llegar a conseguir los parámetros mínimos de iluminación natural para aulas, con un diseño previo y un estudio minucioso de las superficies vidriadas. Esta investigación se realizó a través de monitorizaciones de modelos a escala que disponían diferentes tipos de hueco y distinta condiciones de parasoles (S.L. Ledesma, G.E. Gonzalo, M.S. Cisterna, S.G. Márquez Vega, 2004).

También Evans han llevado a cabo con modelos a escala, un análisis de reflexión de la iluminación natural en función de los materiales a instalar. (Evans J.M., Bogatto M., Eguia S., 1993).

Por otro lado, a diferencia de lo que sucedía con los análisis lumínicos, para los parámetros térmicos existen pocas investigaciones con modelos a escala. No es una práctica muy utilizada debido a que para esto se recurre con mayor frecuencia a la monitorización de edificios a escala real o para edificios aún por

construir, se utilizan programas de simulación computacional, pero estas dos alternativas nos conducen a dos problemas que podemos encontrar y que con el análisis de modelos a escala quedarían resueltos:

- Por un lado, el coste económico de la construcción de edificios a gran escala con estándares altos de eficiencia energética donde se puedan llevar a cabo diferentes investigaciones.
- Por otro lado, los programas de software de simulación que si bien es verdad, ayudan a estimar las estrategias para mantener el confort y aumentar la eficiencia energética dentro de las edificaciones, no pueden reproducir con total exactitud la complejidad de los fenómenos de transferencia de calor.

En este apartado, destacan los estudios de Chen que concluyen en la definición de tres métodos básicos de experimentación, por un lado los modelos a escala real, los módulos experimentales y la construcción de modelos a escala. (Q. Chen, 2009)

También la tesis de Lee S. Kenneth titulada “Development of a Passive Solar Simulation Technique using Small Scale Models”, analiza aspectos energéticos relacionados con el cambio de escala de diferentes modelos a los cuales se les aplica diferentes condiciones como son el clima, ventilación, modificación de los materiales de techo, suelo o paramentos, etc (U.S. Energy Research and Development Administration, Office of Public Affairs, 1985).

Además en el libro *Building Ventilation Theory and Measurement*, se hace mención a la teoría de las semejanzas, utilizada en modelos a escala con el objetivo de que el comportamiento de los mismos sea lo más cercano posible a como se comportaría en una situación real, manifiesta que los criterios fundamentales para establecer la semejanza de un modelo a escala con el objeto real son que exista una semejanza geométrica, cinética y dinámica. (Etheridge David, 1996)

Esta misma teoría se aplicó en el artículo desarrollado por Walker, cogiendo de referencia un edificio de oficinas comerciales ya construido del que se realizó un modelo a escala 1/12 y se monitorizó durante 16 meses. Los resultados

promedios obtenidos durante la monitorización sirvieron como datos de entrada en el cálculo computacional de dinámica de fluidos (CFD) para comparar patrones del flujo del aire, temperaturas y distribuciones de velocidad en el modelo a escala. (Walker, Tan, & Glicksman, 2011).

Por último, una publicación más reciente es la investigación de Juan Miguel Lirola Perez, estudia la aproximación de los fenómenos de la transferencia de calor a través de modelos a escala. La idea central se basa en la comparación del comportamiento térmico del modelo a escala y del prototipo real, teniendo en cuenta únicamente la variable temperatura. En sus resultados indica que comparado a un prototipo genérico, los modelos a escala no distorsionados tienden a responder con temperaturas interiores más altas durante el día y más bajas durante la noche. (Juan & Lirola, 2016)

2.5 CONSIDERACIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO ESTADO DEL ARTE

De la revisión bibliográfica consultada, se concluye que en los edificios el hueco acristalado y su propiedad de transmisión de energía, es un elemento de gran potencial tanto para el ahorro como para el control de gasto de energía. Se confirma, además, que los condicionantes locales, de orientación, de porcentaje de fachada ciega y acristalada, así como las características del acristalamiento, son propiedades determinantes tanto en los aspectos constructivos como en los energéticos.

Por otra parte, se confirma que existen numerosas publicaciones que tratan sobre la importancia de la iluminación natural, no solo por su ahorro energético, sino por los beneficios que tiene para la salud y el bienestar humano. Está claro que el aprovechamiento de la luz natural es un punto importante a la hora del ahorro energético en los edificios. Muchos de estos estudios concluyen que las latitudes bajas y los climas cálidos cuentan con buena disposición para aprovechar el mayor número de horas posibles sin necesidad de consumo en energía eléctrica para iluminación artificial.

Otras investigaciones se centran en el estudio de diferentes parámetros de rendimiento, productividad, satisfacción, etc. vinculados a usuarios de edificios de diferentes usos (administrativo, docente, hospitalario, recreativo, etc.). Sin

embargo, no se han encontrado estudios que profundicen en analizar dichos factores en un uso residencial, donde pasamos más de la mitad de nuestra vida.

También se ha constatado, a través de la bibliografía consultada que en el diseño del aprovechamiento de la iluminación natural no solo entran en juego las características físicas de la iluminación y la radiación, sino que también se baraja la opción de tener en cuenta otros parámetros como el iris del ojo, factores psicológicos, sensibilidad óptica de la persona.

Se concluye que en el ámbito de la calidad ambiental interior y su relación con el elemento acristalado, existen menos esfuerzos y recursos invertidos, que en el ámbito de la eficiencia energética.

Por otro lado, la simulación de las condiciones atmosféricas en laboratorio es considerablemente difícil, por ello el análisis a través de modelos a escala de edificios en condiciones exteriores reales es significativo y muy interesante para mejorar la precisión lograda con las simulaciones a través de diferentes softwares informáticos.

Además, se ha confirmado que los parámetros lumínicos se pueden analizar perfectamente en modelos a escala, con valores aptos y sin necesidad de relacionar con el modelo real.

Por otro lado, los costos de usar modelos a escala en los análisis son relativamente bajos, por lo general, si lo comparamos con la construcción de prototipos a escala real. Por lo que permite la realización de más estudios, optimizando los medios económicos. Además, el avance en la tecnología de sensores, que cada vez son más pequeños y de menor coste, hace que se puedan utilizar en la monitorización de modelos a escala y mejora también la cantidad y la calidad de las medidas obtenidas.

Hoy día, la experimentación con modelos a escala es esencial y coexiste simultáneamente con el uso de simulaciones computacionales con distintos softwares informáticos, que sirven para la validación de los datos recabados.

Por lo que la utilización de modelos a escala en arquitectura es de gran importancia, debido a que permite el estudio de diferentes variables con

condiciones reales de climatología, proporcionando datos de gran utilidad para el diseño final del edificio.

En este punto se detectan cuatro ítems clave para motivar el desarrollo de esta investigación:

- Ningún estudio tiene como objetivo el análisis de una edificación completamente acristalada en todas sus orientaciones y en la totalidad de su fachada. No existiendo apenas investigaciones en edificios de uso residencial.
- Tampoco se han encontrado estudios que analicen la influencia que tienen los vidrios con lámina de control solar y los voladizos, como estrategias pasivas a la hora de estudiar parámetros térmicos y de eficiencia energética, en este tipo de edificios que se abren al exterior, al contar con un clima cálido donde la radiación solar juega un papel fundamental en el sobrecalentamiento de los espacios.
- No se han encontrado estudios que analicen las estrategias pasivas afectan sobre la iluminación natural en la mejora de la salud y el bienestar, consiguiendo por tanto, beneficios sociales, económicos y medio ambientales.
- Por último, se concluye el interés por realizar los análisis térmicos y lumínicos con modelos a escala. Se han encontrado muy pocos estudios sobre la utilización de modelos a escala para analizar los resultados experimentales obtenidos y ser contrastados posteriormente con los datos conseguidos de las simulaciones numéricas.

Capítulo 3:

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN

El mundo entero, en mayor o menor medida, avanza hacia un desarrollo sostenible. El modelo de crecimiento actual, que se desarrolla entre un sistema que genera residuos, consume materia y derrocha energía, está obsoleto y es por tanto necesario cambiar de paradigma.

En la actualidad, el agotamiento de las fuentes fósiles de combustibles, los problemas del precio, la contaminación y la dependencia de otros países, hace que el presente y el futuro se encamine hacia el uso de las energías renovables.

Por otra parte, el sector residencial representa un 30% del consumo de energía final y es responsable de más de un 60% de emisiones de gases de efecto invernadero. En España el Plan Estratégico de 2014 establece la distribución de vivienda residencial entorno al 68,6% para viviendas plurifamiliares y del 31,4% para viviendas unifamiliares. En Europa, sin embargo, la población que vive en viviendas unifamiliares es mayor, suponiendo un 59,3% del total de las viviendas.

Además, desde finales del siglo XX la arquitectura ha ido incorporando a las edificaciones, nuevos materiales, soluciones constructivas y tecnología procedentes, en muchas ocasiones de la investigación aeroespacial, como es el caso del vidrio, un material usado desde la antigüedad pero que ha ido evolucionando hasta conseguir prestaciones térmicas próximas a las de un muro de ladrillo, con la ventaja de tener un espesor mucho más reducido.

También, el modelo edificatorio ha ido evolucionando con la conciencia social y los compromisos que van adquiriendo poco a poco los distintos organismos implicados en el problema energético del sector residencial.

En consecuencia, teniendo en cuenta que el comportamiento energético de viviendas unifamiliares con grandes superficies acristaladas no se encuentra completamente desarrollado, tal y como se ha confirmado tras el estudio

bibliográfico y documental, surge la necesidad de realizar esta tesis con el objetivo de resolver los siguientes aspectos:

A) Problema energético del sector de la edificación.

- En España, según establece el Plan del Ministerio de Fomento “Estrategias a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España”, este sector tiene un peso del 30% en el consumo de energía final, repartido en un 18,5% en el sector de la edificación residencial y un 12,5% en edificaciones no residenciales. Además, este sector residencial está conformado especialmente por viviendas unifamiliares, de las cuales no existen muchos estudios ya que generalmente se consideran de mayor poder adquisitivo y no se prioriza el ahorro energético ni la baja emisión de gases de efecto invernadero.

B) Problema en el diseño de viviendas singulares de vidrio.

- Las viviendas de vidrio nos acercan a la arquitectura regenerativa que integran aspectos de salud y confort, situarlas en un clima cálido como es Madrid puede tener diversos inconvenientes. Por ello, la resolución de este problema se lleva a cabo con la incorporación de criterios de diseño de estrategias pasivas y de aprovechamiento de la radiación solar.
- Como se ha comentado en la introducción el vidrio es un material sostenible por su posibilidad de reciclado y reutilización, esto evita mayor cantidad de residuos y en consecuencia la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Además, la utilización de vidrio reciclado reduce el consumo de energía en los hornos y reduce también la erosión y degradación de tierra por su extracción.
- El comportamiento social, el desarrollo profesional y las actividades formativas, en estos momentos, se encuentran inmersas en un gran cambio provocado por la aparición de nuevas enfermedades como la

pandemia provocada por la COVID 19, planteando nuevos retos al sector de la construcción. Las viviendas, en general, y las viviendas unifamiliares con grandes superficies acristaladas es una, muy buena, alternativa ante situaciones sanitarias que conlleva la realización de un gran número de actividades, en el interior de la vivienda, por parte de los usuarios.

C) Disminuir el consumo energético en viviendas con grandes superficies acristaladas.

Una vez decididos a trabajar sobre viviendas con fachadas acristaladas, se hace necesario abordar cuestiones como:

- Aprovechamiento de la energía solar, fuente de energía en la tierra que proporciona energía en forma de calor y luz natural de manera gratuita e inagotable.
- La energía solar, mediante los sistemas pasivos podría contribuir al ahorro de un tercio de la energía en calefacción, en territorios con latitudes inferiores a 50° como es el caso de Madrid (latitud 40, 45°).
- El aprovechamiento de la luz natural durante los periodos diurnos conllevaría una reducción considerable en el consumo de energía en iluminación artificial.

En base a estos hechos, la presente tesis se encuentra justificada en la necesidad de predecir y valorar el comportamiento energético y de confort en viviendas unifamiliares con grandes superficies acristaladas.

OBETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. OBJETIVO PRINCIPAL.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de esta tesis es analizar y valorar el comportamiento energético, las emisiones de CO₂ y el coste económico en climatización de viviendas unifamiliares con características singulares, por disponer en toda su envolvente de fachada, grandes superficies acristaladas. Además, el estudio posibilitará confirmar la viabilidad de la utilización de modelos a escala para validar la eficacia de algunas estrategias pasivas en Madrid.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el cumplimiento del objetivo principal se plantean los objetivos específicos que a continuación se desarrollan:

1. Seleccionar un edificio de referencia para el estudio y diseñar un modelo de dicho edificio a escala.
2. Diseñar y seleccionar estrategias pasivas a aplicar en los modelos a escala, adecuadas a la climatología de Madrid.
3. Construir dos modelos a escala, uno con características constructivas semejantes al prototipo y otro con características constructivas mejoradas, en función de las estrategias pasivas elegidas.
4. Seleccionar sensores de medida de temperatura y de iluminación, así como un procedimiento de monitorización para los modelos a escala.
5. Valorar la base de datos obtenida en la fase de monitorización de forma estacional y anual, para detectar posibles anomalías.
6. Analizar los resultados obtenidos en la fase experimental: temperaturas superficiales exteriores e interiores de las fachadas, temperatura ambiente exterior e interior, orientación de las fachadas y radiación solar e iluminación natural recibida en los modelos.

7. Validar el procedimiento computacional elegido a partir de los resultados obtenidos en los modelos a escala durante el periodo de monitorización.
8. Cuantificar el edificio energéticamente y calcular las emisiones de CO₂, antes y después de la incorporación de estrategias pasivas.
9. Evaluar la rentabilidad de un edificio con grandes superficies acristaladas en sus fachadas desde la perspectiva coste-eficacia.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

- 5.1.1. Mecanismos de transmisión de calor: Conducción.
- 5.1.2. Mecanismos de transmisión de calor: Convección.
- 5.1.3. Mecanismos de transmisión de calor: Radiación.

5.2. CARACTERISTICAS TÉRMICAS DE LOS VIDRIOS.

5.3. CRITERIOS DE DISEÑO CON LUZ NATURAL.

- 5.3.1. Aplicaciones y efectos de la luz natural.
- 5.3.2. Características que influyen en el diseño con luz natural.

5.4. PARÁMETROS DE CONFORT LUMÍNICO.

- 5.4.1. Parámetros de confort visual.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La energía solar es el motor que mueve el medio ambiente y en nuestra sociedad es fundamental el aprovechamiento de esta energía. El vidrio por sus características nos permite incorporar, conducir y aprovechar la energía solar en la edificación, diferenciando dos campos, el ámbito térmico (energía térmica) y el visual (energía lumínica).

En este capítulo se resumirán los siguientes conceptos:

- Energía térmica:
 - 5.1. Principios fundamentales de la transferencia de calor.
 - 5.2. Características térmicas de los vidrios
- Energía lumínica:
 - 5.3. Criterios de diseño con iluminación natural.
 - 5.4. Parámetros de confort lumínico.

5.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Se transfiere energía siempre que en un sistema exista un gradiente de temperatura, o cuando se ponen en contacto dos sistemas con temperaturas diferentes. El proceso mediante el cual tiene lugar este transporte de energía se conoce como transferencia de calor. Este calor que es transportado no se puede medir de manera directa, pero sí que se pueden identificar y cuantificar los efectos producidos cuando se cambia la energía interna de un sistema. La rama de la ciencia que estudia la relación entre el calor y otras formas de energía se denomina termodinámica. (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)

La Figura 39 muestra los tres principales modos de transferencia de calor, radiación, convección y conducción; y también hace referencia a las temperaturas involucradas en un caso básico relacionado con un material genérico.

Figura 39. Procesos de la transferencia de calor.

La T_e es la temperatura del aire exterior, T_{se} la temperatura superficial exterior (o final), la T_i , la temperatura ambiental interior y la T_{si} , la temperatura superficial interior (o temperatura inicial).

5.1.1. Mecanismos de transmisión de calor: Conducción

La conducción de calor es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia. Siempre que exista un gradiente de temperatura en un medio sólido, el calor fluirá de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La velocidad a la que el calor (q_k) es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx) por el área (A) a través de la que se transfiere el calor. Siendo T , la temperatura local y x , la dirección del flujo de calor. La velocidad real del flujo de calor depende de la conductividad térmica (k), que es una propiedad física del medio.

Por ello la transferencia de calor (q_k) a través de un medio homogéneo se calcula según la siguiente ecuación, determinada por la ley de conducción de Fourier (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012):

$$q_k = -k \cdot A \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (1)$$

El signo negativo es consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, que requiere que el flujo de calor debe fluir en dirección de una temperatura mayor a una menor. El gradiente será negativo si la temperatura disminuye al aumentar los valores de x , como se muestra en la Figura 40:

Figura 40. Criterio de signos para el flujo de calor. Fuente: (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)

En el caso de una pared plana, el flujo de calor unidireccional en régimen permanente (q_{wall}) se define por el espesor (L), la conductividad térmica media (k) y la temperatura de las dos superficies de la pared (T_1 y T_2).

$$q_{wall} = -k \cdot A (T_2 - T_1 / L) = - (T_2 - T_1) / Rt \quad (2)$$

Siendo:

q_{wall} , el flujo de calor a través de la pared. (W)

k , la conductividad del material. ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

L , el espesor del material. (m)

A , el área de la pared. (m^2)

Si asumimos que las diferencias de temperaturas superficiales interiores y exteriores (en un modelo a escala) son las mismas, las variaciones en la conductancia serían lineales.

Rt , es la resistencia térmica, propiedad que mide la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material impide el paso del flujo de calor. La resistencia térmica para el flujo de calor de una pared se define con la siguiente ecuación:

$$Rt = L / (k \cdot A) \quad (3)$$

Siendo:

Rt , resistencia térmica. (K/W)

k , la conductividad del material. ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

L , el espesor del material. (m)

A , el área de la pared. (m^2)

5.1.2. Mecanismos de transmisión de calor: Convección

“El modo de transferencia de calor por convección consiste en dos mecanismos que operan de manera simultánea. El primero es la transferencia de energía generada por el movimiento molecular, es decir, el modo conductivo. Superpuesta a este modo se encuentra la transferencia de energía por el movimiento macroscópico de fracciones de fluido. El movimiento de fluido es un resultado de fracciones de fluido, donde cada una consiste en una gran cantidad de moléculas, que se mueven por la acción de una fuerza externa. Esta fuerza extraña puede ser el resultado de un gradiente de densidad, como en la convección natural, o por una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador, o posiblemente por una combinación de las dos.” (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)

La ley de enfriamiento de Newton para la determinación de la transferencia de calor por convección se define con la siguiente ecuación para el entorno exterior:

$$q_{ve} = A \cdot h_{ve} \cdot (T_{se} - T_e) \quad (4)$$

Y para el ambiente interior se desarrolla de la siguiente manera:

$$q_{va} = A \cdot h_{vi} \cdot (T_{si} - T_i) \quad (5)$$

Siendo:

q_{ve} , la transferencia de calor por convección al aire libre en el exterior y q_{va} , en el interior (W).

A, área de la transferencia de calor (m^2)

h_v , coeficiente de transferencia de calor por convección promedio sobre el área (también llamado coeficiente superficial de transferencia de calor). (W/m^2K)

$T_s - T$, la diferencia de temperaturas entre la superficie (T_s) y el ambiente (T) (exterior o interior dependiendo del caso).

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor por convección es difícil debido a que la convección es un fenómeno muy complejo. El valor del coeficiente de transferencia de calor en un sistema depende de la geometría de la superficie, de la velocidad del fluido y de sus propiedades físicas, además en algunas ocasiones también depende de la diferencia de temperaturas. También

puede variar en función del punto analizado, por ello se debe distinguir entre coeficiente de convección de calor local y promedio. (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)

En un modelo a escala “e” veces con diferencias de temperatura y coeficientes de convección iguales al de su prototipo correspondiente, la transferencia de calor por convección en dicho modelo se reducirá al cuadrado de la escala “e²”. No obstante, esto depende del movimiento del fluido que rodea las superficies involucradas y por tanto es un parámetro muy difícil de controlar en modelos a escala. (Juan & Lirola, 2016)

5.1.3. Mecanismos de transmisión de calor: Radiación

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo. Esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas.

Sobre la superficie de un cuerpo incide constantemente energía radiante, tanto desde el interior como desde el exterior. Cuando la energía radiante incide sobre la superficie una parte se refleja y otra parte es transmitida.

La superficie de un cuerpo negro es un caso límite, en el que toda la energía incidente desde el exterior es absorbida y toda la energía incidente desde el interior es emitida. Esa cantidad de energía radiante se define con la siguiente ecuación:

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 \cdot \quad (6)$$

Siendo:

q_r , tasa de transferencia de calor por radiación (W).

σ , es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

A, área de la transferencia de calor (m²)

T_1 , temperatura superficial (K)

Según la ecuación anterior, cualquier superficie de un cuerpo negro con una temperatura mayor que el cero absoluto, irradia calor a una tasa proporcional a la

cuarta potencia de la temperatura absoluta. Pero una transferencia neta de calor radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial entre dos cuerpos, en los que tiene lugar el intercambio. Si el cuerpo negro irradia en un recinto que también es negro, la tasa neta de transferencia de calor radiante esta dada por la siguiente ecuación:

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

Los cuerpos reales no cumplen con las especificaciones de un cuerpo negro (caso límite), sino que emiten radiación a una tasa menor. Por ello la ecuación de Stefan-Boltzmann de transferencia de calor por radiación entre dos superficies para el ambiente exterior es:

$$q_{re} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{se}^4 - T_e^4) \quad (8)$$

Y para el ambiente interior es:

$$q_{ra} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{si}^4 - T_i^4) \quad (9)$$

Siendo:

q_{re} , el intercambio de radiación de calor entre el aire y las superficies exteriores (W).

q_{ra} , el intercambio de radiación entre el aire interior y las superficies internas (W).

ϵ , es la emisividad, que permanece invariante si no hay cambio de materiales.

σ , es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

$T_s - T$, la diferencia de temperaturas entre la superficie (T_s) y el ambiente (T) (exterior o interior dependiendo del caso).

Observando que las temperaturas se elevan a la cuarta, pequeños cambios en las temperaturas de las superficies pueden causar grandes cambios de valor en la transferencia por radiación para modelos a escala.

Tras esto se ha reflejado el comportamiento de la energía térmica en un sistema, según tres métodos de elementos finitos de la transferencia de calor, cada uno descrito por una ecuación que lo define. En el caso de la transferencia de calor por conducción, se caracterizan los flujos térmicos a través de la materia (Ley de Fourier), por convección se asocia con el movimiento de fluidos debido a los efectos gravitacionales (Ley de enfriamiento de Newton) y por radiación con

transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas (Ley de Stefan-Boltzmann).

En la Figura 41 se muestra un resumen de los tres métodos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación.

Transferencia de calor por conducción unidimensional a través de un medio estacionario

$$q_k = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{R_k}$$

$$R_k = \frac{L}{kA}$$

Transferencia de calor por convección de una superficie a un fluido en movimiento

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_\infty) = \frac{T_s - T_\infty}{R_c}$$

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c A}$$

Transferencia neta de calor por radiación de la superficie 1 a la superficie 2

$$q_r = A_1 \mathcal{F}_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \frac{T_1^4 - T_2^4}{R_r}$$

$$R_r = \frac{T_1^4 - T_2^4}{A_1 \mathcal{F}_{1-2} \sigma}$$

Figura 41. Modos de transferencia de calor. Fuente: (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)

5.2. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS VIDRIOS

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, atraviesan el espacio y llegan a la Tierra desde el Sol.

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas son dos parámetros importantes para determinar su energía, su velocidad y su poder de penetración.

La radiación solar que llega a la tierra está constituida aproximadamente por un 3% de rayos ultravioletas (UV), un 55% de rayos infrarrojos (RI) y un 42% de luz visible. Cada uno de estos tres tipos de radiación corresponde a una gama de longitud de onda. La radiación ultravioleta tiene una longitud de onda que oscila entre 0,28 y 0,38 μm , la radiación visible varía de 0,38 a 0,78 μm y la radiación infrarroja se extiende de 0,78 a 2,5 μm .

La distribución energética de la radiación solar global, en el espectro que va desde la longitud de onda de 0,3 a 2,5 μm , para una superficie perpendicular a dicha radiación se representa en la Figura 42 (Saint Gobain, 2001).

Figura 42. Espectro de la radiación solar global según EN-410. Fuente: (AENOR, 2011a)

Cuando una radiación incide en un acristalamiento, parte de la onda de la radiación es reflejada, parte es absorbida por el vidrio y una tercera parte es transmitida, como se puede ver reflejado en la Figura 43.

Donde:

- R: Radiación externa recibida.
- RF: Radiación reflejada hacia el exterior.
- AB: Radiación absorbida por el cuerpo, que produce una elevación de su temperatura.
- T: Radiación transmitida al interior.
- AB.ext y AB.int: Radiación del cuerpo hacia el exterior y hacia el interior, inducidas por su calentamiento y por la emisividad de sus caras.

Figura 43. Esquema genérico de los factores físicos de radiación.

Del flujo de radiación incidente (R) en un vidrio se obtienen los factores de reflexión (RF), absorción (AB) y transmisión (T). Este desglose de radiaciones que se produce respeta la siguiente relación:

$$R = RF + AB + T \quad (10)$$

El factor solar (g) es la proporción entre la radiación total (R) y el sumatorio de la radiación total directa y transmitida, más la absorbida reenviada al interior (AB.int).

$$g = (T + AB_{int}) / R \quad (11)$$

El valor “g” del vidrio es la fracción de radiación solar que pasa a través del vidrio con incidencia normal, como se muestra en la Figura 44.

Figura 44. Esquema factor solar (g).

Por ello existen distintos tipos de vidrios que disponen de una película o lámina bajo emisiva que disminuye el factor solar del acristalamiento. Estos son denominados bajo emisivos o vidrios low-e y el factor solar (g) puede variar de 0 a 1, cuanto menor sea dicho valor menor energía solar atraviesa y mayor protección solar ofrece el acristalamiento.

Esta característica puede combinarse con diferentes prestaciones según la configuración de los vidrios. En función del sistema constructivo que constituya el conjunto del acristalamiento, se adquieren unas propiedades u otras, que irán enfocadas a cubrir diversos aspectos energéticos en la edificación.

La radiación absorbida reenviada al interior depende en gran manera de la emisividad (ϵ) que es una característica propia de la superficie de los cuerpos. Cuanto más baja es la emisividad, menor es la transferencia de calor por radiación. La emisividad normal de un vidrio (ϵ_n) es de 0,89, pero algunos vidrios pueden estar recubiertos de una capa de baja emisividad, en cuyo caso la emisividad puede llegar hasta el valor de $\epsilon_n = 0,10$.

También este tipo de láminas en los acristalamientos producen un ahorro en la climatización de la vivienda, debido a que no dejan pasar el calor del exterior en verano y en invierno ayudan a no perder energía procedente de la climatización. Este sistema se puede ver reflejado en la Figura 45.

Figura 45. Esquema de un vidrio con lámina bajo emisiva.

Además de la transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, existe también la transferencia de calor a través de una pared plana y opaca que, respondiendo a los principios de la termodinámica, se ve expuesta por el exterior a la radiación y a la convección externa, que pasan en forma de conducción a través de una pared y se emiten en forma de radiación térmica y convección superficial por la cara interior del edificio.

Hay que tener en cuenta que la transmisión de calor siempre se da desde la zona más caliente a la zona energéticamente más fría, por lo que en periodos de invierno o en noches frías la transferencia de calor va siempre hacia el exterior y en las épocas calurosas la cesión de calor se realiza hacia el interior (Felices Puértolas, 2017).

La capacidad de dejar pasar el calor en un cerramiento depende de los distintos materiales que conforma cada una de las capas y de su espesor, esto determina la mayor o menor velocidad del flujo para moverse de un extremo a otro. Por lo tanto, esta propiedad denominada transmitancia térmica (U), determina la capacidad de aislamiento entre ambos espacios (exterior e interior) y se puede ver expresada en la siguiente ecuación:

$$U = 1 / [(1/h_e) + (e/\lambda) + (1/h_i)] \quad (12)$$

Para el vidrio, la definición de cada parámetro, su dependencia y unidades en el sistema internacional se representa en la Tabla 6:

Definición:	Parámetro:	Depende de:
Coeficiente de intercambio superficial exterior, o coeficiente de convección. (W/ (m ² K))	h_e	Velocidad del viento en el exterior.
Temperatura exterior (K)	T_{ext}	Condiciones meteorológicas.
Coeficiente de conductividad térmica del vidrio (W/ (m K))	λ	Propiedad física del vidrio
Emisividad	ε	Propiedad física del vidrio
Temperatura interior (K)	T_{int}	Temperatura de acondicionamiento interior
Coeficiente de intercambio superficial interior, o coeficiente de convección. (W/ (m ² K))	h_i	Convección interior dependiendo del sistema de climatización y del tipo de ventilación.
Espesor de la lámina (m)	e	Dimensión

Tabla 6. Parámetros térmicos del vidrio.

Los parámetros físicos, propios del material, como la emisividad (ε) o el coeficiente de conductividad térmica (λ), son calculados a partir de los valores térmicos declarados según la norma UNE-EN ISO 10456:2012 (AENOR, 2012b).

Otros parámetros varían en función del sistema constructivo diseñado, como es el espesor, o del sistema de climatización proyectado que influyen en el coeficiente de intercambio superficial interior y en la temperatura de consigna interior fijada en el recinto.

Parámetros como el coeficiente de intercambio superficial exterior y la temperatura exterior son variables y dependen del momento del año incluso del día, la intensidad de radiación solar y la velocidad del viento, en periodos muy cortos pueden oscilar en intervalos muy abiertos.

Si ahora se incorpora al conjunto del flujo por radiación solar, el resto de los parámetros físicos mencionados, obtenemos la Figura 46:

Figura 46. Flujo total de energía a través de un vidrio.

La suma de todas las ganancias y pérdidas a través del vidrio es el balance energético, el cual nos proporciona la cantidad de energía a aportar con el sistema de calefacción o a eliminar con el sistema de refrigeración, en el interior de la estancia para mantener un nivel de confort adecuado.

El balance energético se basa en los parámetros físicos variables que dependen de datos climatológicos aleatorios y accidentales, temperaturas exteriores, radiación solar, nubosidad y velocidad del viento que varían a lo largo del día en un rango con mayor o menor apertura en función de la zona climática donde nos encontremos. Las variables sobre las que se tiene control son:

- Características físicas de los vidrios que determinan los valores de factor solar (g), emisividad (ϵ) y transmitancia térmica (U). Sobre esta última puede haber ligeras variaciones al depender del coeficiente de transmisión de calor por convección exterior (h_e) y por tanto de la velocidad del viento. No obstante, existen unos valores de referencia que son para $h_e = 23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ y para $h_i = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.
- Tipo de sistema de climatización (calefacción y refrigeración) que se desea instalar, lo que determinará el coeficiente de convección interior (h_i) que determinará la velocidad y la cantidad de calor que llegará al vidrio.

Otro factor importante para tener en cuenta es la inercia térmica que implica que el material tenga capacidad de almacenar el calor, conservarlo y liberarlo de una manera paulatina. El vidrio es un material que no cuenta con esta propiedad, ya que a lo largo del día experimenta cambios importantes de temperatura en su superficie.

En condiciones de radiación solar alta, en día despejado y sin apenas viento el vidrio a pesar de tener una absorción energética bastante baja, puede alcanzar altas temperaturas que lo convierten en un radiador hacia el interior de la estancia. Y por el contrario en condiciones de temperaturas bajas en el exterior y en ausencia absoluta de radiación solar y viento, el vidrio no cogerá apenas temperatura y aparecerá una zona de ambiente frío en contacto con el interior.

La energía procedente de la radiación solar, además de ser variable dependiendo del tiempo que tengamos en cada momento, llega a extinguirse en periodo nocturno durante unas horas, por lo que es primordial aprovechar al máximo la franja horaria de mayor transmisión de energía solar, con una estudiada y ensayada construcción que acumule y aproveche dicha energía durante los periodos diurnos donde se produce el mayor aporte energético.

5.3. CRITERIOS DE DISEÑO CON LUZ NATURAL

La luz visible que es capaz de ser percibida por nuestros ojos abarca una pequeña parte del espectro electromagnético, en las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm. Esta región se conoce como el espectro visible y corresponde a la energía que nos permite ver los objetos.

Es la zona donde aparece el arcoíris de los colores: del violeta al rojo, como se muestra en la Figura 47, con la zona visible ampliada en la parte inferior.

Figura 47. Espectro electromagnético. Fuente: (José Ignacio García Laureiro, 2015)

Como se muestra en la Figura 48, la luz natural se puede dividir en tres componentes:

- El haz directo precedente del sol que incide sobre una superficie (luz directa).
- La radiación difusa es aquella recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma. Esta radiación puede suponer un 15% aproximadamente de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es menor, la radiación difusa supone un porcentaje mucho mayor (luz difusa).
- El haz reflejada, aquella luz que ha sido reflejada por otras superficies del entorno (luz reflejada). El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella.

Figura 48. Componentes de la luz natural.

La energía que llega al exterior de la atmósfera es una cantidad fija llamada constante solar. Su valor es de 1.361 W/m^2 o 2 cal/min.cm^2 , lo que significa que a 1 cm^2 en la parte externa, perpendicular a la línea que une la tierra y el sol, le llegan 2 calorías cada minuto.

La constante solar, en realidad no es una constante como tal, se trata de un parámetro que a corto y medio plazo varía dentro de pequeños márgenes. Para calcular este parámetro basta con dividir el flujo energético que emite el Sol por la relación de áreas entre la superficie del Sol (r_s se refiere al radio solar) y el área de una esfera situado a una distancia a_0 (unidad astronómica) del mismo. Para calcular este valor, que realmente en la práctica está medido por satélites, se debe usar un valor de temperatura superficial del Sol (T_{eff}) de 5.772 K . La ecuación que define esta constante solar es:

$$K = \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4 \cdot (r_s / a_0)^2 = 1.361 \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

La energía que llega a la superficie en condiciones óptimas con un día perfectamente claro y con los rayos del sol cayendo casi perpendiculares, es como máximo las tres cuartas partes de la energía que llega del exterior y alcanza la superficie de la tierra. Casi toda la radiación ultravioleta y gran parte de la infrarroja son absorbidas por la atmosfera.

La óptica se ocupa del estudio de trayectorias de rayos de luz y fenómenos relacionados con la propagación. En un medio homogéneo los rayos de luz se propagan en línea recta y cuando se encuentran con una materia, pueden ser:

- totalmente absorbidos por la superficie,
- totalmente reflejados en una dirección distinta de la que vinieron,
- totalmente transmitidos a través de un material,
- o alguna combinación de las tres posibilidades anteriores, como se muestra en la Figura 49.

Figura 49. Posibilidades de propagación de un haz incidente al pasar por un medio.

5.3.1. Aplicaciones y efectos de la luz natural

Estas posibilidades de propagación de la luz al interactuar con los materiales dan lugar a múltiples aplicaciones y efectos, como puede ser la reflexión, absorción, transmisión, refracción y polarización.

5.3.1.1. Reflexión

La reflexión puede clasificarse en función de la irregularidad de la superficie sobre la que incide. Un rayo de luz al colisionar sobre una superficie opaca irregular es reflejada en forma difusa, es decir en todas direcciones. Esto sin embargo no ocurre cuando la superficie es lisa como la de un espejo, cuyas irregularidades al ser de un tamaño menor se produce una reflexión especular.

Hay tres tipos de reflexión de la luz natural cuando choca contra una superficie, especular, difusa y mixta, como se puede ver reflejado en la Figura 50.

Figura 50. Diagramas de reflexión especular, difusa y mixta.

El factor de reflexión (ρ) de una superficie es el cociente entre la cantidad de energía luminosa que refleja (ϕ_r) y la cantidad de energía luminosa que recibe (ϕ_i), en tanto por ciento.

$$\rho = \phi_r / \phi_i (\%) \quad (14)$$

Cada material tiene un índice de reflectancia distinto en función de sus propiedades, a continuación se puede observar en la Tabla 7 las reflectancias típicas de materiales de edificación.

Material	Reflectancia (%)
Pintura blanca	65-75
Ladrillo claro	45-50
Ladrillo oscuro	30-40
Mármol blanco	45-50
Hormigón	25-30
Mortero	15-20
Vidrio reflectante	20-30
Vidrio transparente	7-8
Vidrio tintado	5-8

Tabla 7. Reflectancias típicas de materiales de edificación. Fuente: (Comité Español de Iluminación, 2005)

5.3.1.2. Refracción

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie que separa dos medios, parte de la energía luminosa se refleja y parte entra en el segundo medio. El rayo que pasa se denomina rayo refractado, como se muestra en la Figura 51.

Figura 51. Diagrama de refracción de la luz.

En el plano límite de separación de dos medios como, por ejemplo, el aire y el vidrio, un rayo de luz en parte es reflejado y en parte es refractado. En el caso de la refracción se cumple que el ángulo de incidencia y el refractado están en un mismo plano y que la razón del seno del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es constante.

5.3.1.3. Absorción

Se denomina absorción (α) a la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente de calor. La relación entre la luz absorbida (ϕ_a) y la luz incidente (ϕ) se denomina absortancia del material.

$$\alpha = \phi_a / \phi (\%) \quad (15)$$

5.3.1.4. Transmisión

Hay materiales que permiten el paso de la luz, para ellos se define la transmisión luminosa (T) como el cociente entre la cantidad de energía luminosa que transmite (ϕ_t) y la cantidad de energía luminosa que recibe (ϕ) en tanto por ciento.

$$T = \phi_t / \phi (\%) \quad (16)$$

Cada vidrio dispone de un índice de transmisión luminosa en función de la energía luminosa que transmite y de la que recibe. Como ejemplo en la Tabla 8, se muestran los valores de transmisión luminosa en distintos tipos de acristalamientos:

COMPOSICION	TRANSMISION LUMINOSA %
FLOAT INCOLORO 4MM	90,7
CLIMARANDA 4/16/4	82,8
CLIMARANDA 4/16/4 CLIMAGUARD PREMIUM (CAPA 3)	77
CLIMARANDA 4/16/4 GUARDIAN SUN (CAPA 2)	66

Tabla 8. Valores de transmisión luminosa en diferentes acristalamientos. Fuente: Guardian Glass.

Tras detallar los efectos que se producen con la propagación de la luz al interactuar con los materiales, en este caso el vidrio, se continúa con el desarrollo de los criterios para la proyección efectiva y eficiente de un sistema de iluminación natural en edificación.

El diseño en edificios donde se desea aprovechar, de forma eficiente, la iluminación natural, no solo conlleva el hecho de analizar sus magnitudes fundamentales, sino que es preciso también entender su complejidad debido a la variabilidad que tienen las propiedades de la radiación lumínica.

Por el contrario, estos factores sí se pueden controlar en un diseño de iluminación artificial. Por ello es preciso establecer estrategias de mejora de los análisis y proyectos ya realizados hasta día de hoy, y así poder atajar los problemas que encontramos con el diseño de la iluminación natural.

5.3.2. Características que influyen en el diseño con luz natural

Según se establece en la guía técnica de aprovechamiento de luz natural en la iluminación de edificios del IDAE (Comité Español de Iluminación, 2005), la disponibilidad y características de la luz natural dependen de diversos factores como son, latitud, clima, zona geográfica, orientación, etc.:

5.3.2.1. Latitud

La latitud, meteorología y época del año, son factores que afectan en el número de horas de sol registradas a lo largo del año. Latitudes menores (alrededor de 25° a 40° norte y sur) tienen los valores más altos de horas de sol, como se puede ver reflejado en la Figura 52. De manera contraria las latitudes más altas (por encima de los 50° norte y sur) además de tener valores bajos de duración de luz solar anualmente, les afectan vientos tormentosos y poseen un clima mucho más nuboso, lluvioso e inestable.

Figura 52. Gráfica de Dresler. Niveles de iluminancia según latitud. Fuente: (C.E.de Iluminación, 2005)

5.3.2.2. Clima

El clima o la calidad del aire también afectan a la intensidad y duración de la luz natural. De ahí que, según los climas, la luz natural pueda ser predecible o muy impredecible (Dirección General de Industria & Centro de Ahorro y Eficiencia Energética de Madrid, 2006).

5.3.2.3. Horas de luz solar

En la Figura 53, se muestra el mapa mundial que refleja la media de horas de luz en cada uno de los puntos geográficos. El rojo corresponde con las zonas en las que hay más horas de luz solar a lo largo de un año y el azul representa las zonas donde se dispone de menor horas de luz.

*Figura 53. Cantidad de horas de sol al año en el mundo en función de la posición geográfica.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).*

En el mapa del continente europeo que se muestra en la Figura 54, también se hace referencia al número medio de horas anuales de sol a lo largo de todo un año. Se puede observar que la latitud juega un papel fundamental, debido a que gran parte de Reino Unido cuenta con rangos comprendidos entre 1.200 y 1.600 horas de sol al año, lo que viene siendo entre 3,3 y 4,3 horas de luz al día. Y por

el contrario la mayor parte de España y Portugal, así como el sur de Grecia dispone de más de 2.500 horas de luz solar al año, lo que viene siendo 8,2 horas diarias.

*Figura 54. Cantidad de horas de sol al año en el Europa en función de la posición geográfica.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).*

La Figura 55 muestra el mapa de España donde se refleja la insolación anual según establece el Instituto Geográfico Nacional (IGN), observándose el aumento paulatino y regular de horas de sol según descendemos hacia el sur. Toda el área bañada por el mar Cantábrico dispone de un rango de valores comprendido entre 1.600 y 2000 horas de sol al año, mientras que los valores más altos de insolación se dan en Badajoz, Sevilla, Almería y Alicante.

Figura 55. Cantidad de horas de sol al año en España en función de la posición geográfica.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La cantidad de luz natural recibida en la tierra varía con la situación y la proximidad a las costas. La energía que llega al nivel del mar suele ser radiación infrarroja (49%), luz visible (42%) y radiación ultravioleta (9%) (Comité Español de Iluminación, 2005).

5.3.2.4. Orientación

La orientación de la edificación también juega un papel fundamental debido a que tiene una gran influencia sobre la iluminación natural. Cada orientación recibe una cantidad y unos niveles de iluminación en función de las horas del día, por lo que es necesario diseñar en función de este parámetro, para conseguir que determinadas estancias tengan más luz por la mañana y otras por el contrario tengan más luz por la tarde.

El estudio de la orientación tiene que ir asociado no solo al aprovechamiento de la iluminación natural, sino también al aprovechamiento de la energía calorífica proveniente de la radiación solar. A continuación se muestra en la Tabla 9 un breve resumen de las ventajas y los inconvenientes de cada orientación:

	Sur	Este/Oeste	Norte
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ○ Es la orientación más adecuada. ○ Recibe luz solar con bastante regularidad a lo largo del día y del año. ○ Esta orientación en invierno es bien recibida por el aporte de energía calorífica. ○ Proporciona niveles luminosos elevados y prácticamente constantes. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Proporciona niveles de iluminación medios, pero variables a lo largo del día. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Es la segunda orientación más adecuada. ○ La calidez de la luz natural es muy constante. ○ Luz blanca y fría (aceptable para ciertas estancias) ○ No origina muchos problemas de deslumbramiento por luz solar directa. ○ En climas muy calidos, es preferible esa orientación en lugar de la sur.
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> ○ En climas muy cálidos puede ocasionar un sobrecalentamiento excesivo. ○ Necesita elementos de protección. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Son las peores orientaciones. ○ Recibe luz solar solo durante la mitad del día. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Las estancias orientadas al norte no se benefician prácticamente del sol. ○ Niveles de iluminación bajos, pero constantes a lo largo del día. ○ Escasa ganancias de energía.

Tabla 9. Virtudes e inconvenientes en función de la orientación. Fuente: (Pérez González, 2015)

5.3.2.5. Otros factores

La interacción del edificio objeto de estudio, dedicado a un uso específico y con un requerimiento de lux determinado, su forma y dimensiones, con relación al entorno que lo rodea (obstrucciones externas).

5.4. PARÁMETROS DE CONFORT LUMÍNICO

En los cálculos de iluminación natural se utiliza generalmente la componente difusa, siendo por tanto la bóveda celeste la fuente principal de luz natural. Un cielo cubierto estándar uniforme fue el propuesto, antes de 1955, por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), al que se le asigna una iluminancia media horizontal de 5.000 lux, correspondiente a un cielo nublado a las 9 h 45 min del mes de diciembre, en las latitudes medias de Europa (Parareda, 2008).

En primer lugar, cabe destacar las magnitudes luminosas fundamentales, que se definen en la Tabla 10, para poder evaluar posteriormente los parámetros para tener en cuenta a la hora de diseñar un edificio con el aprovechamiento de la iluminación natural.

Magnitud	Definición	Unidad
Flujo luminoso Φ	Las fuentes de luz se comportan como emisores de radiación electromagnética, emitiendo un flujo energético. El flujo luminoso es la cantidad de flujo energético en las longitudes de onda para las que el ojo humano es sensible. Expresa la cantidad de luz emitida por la fuente en un segundo.	Lumen (lm)
Intensidad lumínica I	Flujo emitido por una fuente de luz en una determinada dirección del espacio. La dirección se indica mediante el ángulo sólido o ángulo estéreo que corresponde a un cono cuyo eje es la dirección en que se considera la intensidad, medido en estereorradianes.	Candela (cd)
Iluminancia E	La iluminancia o nivel de iluminación indica el flujo luminoso que recibe una superficie por unidad de área. Se define iluminancia mantenida (E_m) como el valor por debajo del cual no se permite que caiga la iluminancia media en una superficie determinada para la adecuada realización de una tarea.	Lux (lum/m ²)

<p>Luminancia</p> <p>L</p>	<p>Relación entre la intensidad luminosa de un objeto y su superficie aparente vista por el ojo. Es equivalente al “brillo de una superficie”. Esta magnitud se aplica cuando se mira a una fuente de luz (luminancia directa) o a luz reflejada por una superficie (luminancia reflejada).</p>	<p>cd/m²</p>
<p>Deslumbramiento</p>	<p>El deslumbramiento, en términos fisiológicos de visión, se define como una pérdida de sensibilidad más o menos larga (falta de adaptación). Proviene o de un exceso de luminancia de una fuente luminosa o bien de un contraste demasiado violento.</p> <p>El cálculo del deslumbramiento, para iluminación artificial está claramente reglamentado por la normativa de aplicación. Pero si consideramos el deslumbramiento en iluminación natural, este no queda regulado específicamente por ninguna normativa, ni si quiera su cálculo es definido con detalle quedando a la disposición de hipótesis de diferentes autores en función de la variabilidad de diversos factores como la adaptabilidad del ojo humano, los cambios del cielo a lo largo del día, el sol es una fuente no uniforme, el clima de la zona, etc. (Bellia, Cesarano, Iuliano, & Spada, 2008), (Garretón, Vilalba, Monteoliva, & Pattini, 2015), (Konstantzos & Tzempelikos, 2014), (Public works and Government Services Canada, 2002).</p>	
<p>Color</p>	<p>Se percibe la cantidad de color en los objetos debido a la luz que, directamente desde una fuente, o por reflexión en los objetos, incide en nuestra retina.</p> <p>Dentro del espectro electromagnético de “luz visible” existen subzonas que se distinguen precisamente por la sensación visual de color que ocasionan en el ojo humano. El color de los objetos esta influenciado en gran medida por las propiedades cromáticas de las fuentes de luz utilizadas.</p>	

Tabla 10. Magnitudes fundamentales en el diseño de iluminación natural.

Es importante a la hora de realizar un análisis de iluminación natural tener en cuenta no solo las magnitudes fundamentales en el diseño de iluminación, sino también los parámetros de confort visual que debemos estudiar para un mejor aprovechamiento de la energía lumínica.

5.4.1. Parámetros de confort visual

Es imprescindible cumplir con el bienestar que recibe el hombre cuando observa objetos o realiza tareas visuales sin molestias ni fatiga, gracias a la adecuada combinación de calidad y cantidad de iluminación.

Además, el aprovechamiento de la luz natural conlleva un ahorro energético en la demanda de iluminación artificial del edificio, produciendo así una disminución en el consumo de energía.

Por todo ello, es fundamental el análisis de parámetros como la uniformidad, la diversidad de la luz, el factor de luz de día, las iluminancias máximas y mínimas para el desarrollo de las tareas, etc.

5.4.1.1. Uniformidad y diversidad

Para conseguir un buen diseño lumínico es necesario que las estancias estén iluminadas de la forma más uniforme posible. Para el cálculo de la uniformidad (U), es preciso saber la iluminancia mínima de la estancia (E_{min}) y la iluminancia media (E_m) del recinto objeto de análisis, obteniendo el resultado en tanto por ciento.

$$U = E_{min} / E_m (\%) \quad (17)$$

Los valores de uniformidad están recogidos en la UNE EN-12464-1 para los lugares de trabajo (AENOR, 2012a), pero en uso residencial no se prescribe ninguna restricción en el interior de las viviendas, tan solo en el DB-SUA-4 se indica que en zonas comunes de circulación en edificios el factor de uniformidad media será de 40% como mínimo. (Ministerio de Fomento, 2008)

No obstante, según las bibliografías consultadas, para un uso residencia los valores que se aconsejan para el factor de uniformidad, están comprendidos entre

un 40% y un 70%, debiendo ser esta variable mayor, cuanto más grande sea el porcentaje del factor de luz de día, que será analizado posteriormente.

Otro parámetro a tener en cuenta es el factor de diversidad (D), donde se relaciona la iluminancia máxima de la estancia (E_{max}) con la mínima (E_{min}), obteniendo el resultado en tanto por ciento.

$$D = E_{max} / E_{min} (\%) \quad (18)$$

El factor de diversidad no deberá exceder de 5 en ningún punto del área principal del ambiente interior.

5.4.1.2. Flujo total y flujo efectivo

Se considera un local con una ventana por donde entra la luz. La iluminancia en el plano de la ventana (E_v) se supone conocida. Si este valor se multiplica por el área de la ventana (A_v), obtendremos el flujo total de lúmenes (F) que penetra en dicho local.

$$E_v (lm/m^2) \times A_v (m^2) = F (lm) \quad (19)$$

Hay que tener en cuenta tres factores que reducen dicho flujo, siendo estos:

- Transmitancia lumínica del vidrio (T).
- Factor de reducción debido a la obstrucción por la carpintería (m).
- Factor que mide el grado de limpieza del vidrio (f_s)

Multiplicando el flujo por dichos factores de reducción se obtiene el flujo efectivo total:

$$F_e (lm) = F \times T \times m \times f_s \quad (20)$$

Si el flujo efectivo se distribuyera uniformemente sobre la superficie de la habitación, su iluminación media sería la que se indica a continuación, siendo A el área de la habitación objeto de estudio.

$$E_m (lm/m^2) = F_e \times A \quad (21)$$

5.4.1.3. Factor de luz de día

La iluminancia y su distribución en el área de tarea y en el área circundante tienen un gran impacto en como una persona percibe y realiza la tarea visual de un modo rápido, seguro y confortable. Por ello, este factor nos indica el porcentaje de iluminancia interior con relación a la iluminancia en un plano horizontal exterior sin obstáculos bajo las mismas condiciones de cielo. Al considerar condiciones de cielo nublado se excluye del DF la radiación directa en los niveles de iluminancia interior y exterior.

El día de diseño para los cálculos del factor de luz diurna (Daylight Factor) se basa en el cielo nublado estándar de CIE (Commission Internationale de l'Eclairage o Comisión Internacional de Iluminación) para el 21 de septiembre a las 12:00 h y donde el nivel de luz ambiental terrestre es 11.921 lux.

El factor luz de día o también llamado “Daylight Factor” en un punto del interior de una habitación es el cociente entre la iluminancia en dicho punto (E_I) y la iluminancia horizontal difusa (E_H), en tanto por ciento.

$$FLD(\%) = E_I / E_H \times 100 \quad (22)$$

El factor de día medio, además de lo anteriormente indicado, tiene en cuenta otros parámetros como son la transmitancia de luz difusa, la superficie de la ventana, el ángulo, la reflectancia media ponderada y el área total de los paramentos de la estancia a calcular.

$$FLD_M(\%) = E_{Im} / E_H \times 100 = T \times A_v \times \theta / [A_T \times (1 - \rho^2)] \quad (23)$$

Siendo:

T , transmitancia a la luz difusa.

A_v , Superficie de la ventana.

θ , ángulo subtendido, en el plano vertical normal a la ventana, desde su centro hacia el cielo en grados.

A_T , Área total de las superficies de la estancia, techo, suelo, paredes y ventanas (m^2).

ρ , reflectancia media ponderada. Normalmente oscila entre 0,6 -0,4.

El FLDM de una habitación permanece constante, aunque varíe la luminancia del cielo cubierto, si no varían sus parámetros geométricos y las reflectancias de sus superficies internas. Su valor debe ser como mínimo de 2%.

5.4.1.4. Iluminancia mínima y máxima

La iluminancia corresponde al flujo lumínico recibido por unidad de superficie, expresándose en lm/m^2 . Es importante analizar los valores que llegan al mínimo flujo lumínico en el plano de trabajo, así como al máximo.

Estos valores están legislados para los lugares de trabajo en función del tipo y la duración de la actividad, según establece la UNE EN 12464-1 y 2 (AENOR, 2012a). Esta norma europea especifica los requisitos de iluminación para humanos en lugares de trabajo en interiores, que satisfacen las necesidades de confort y rendimiento visual de personas con una capacidad oftalmológica normal. Para el uso residencial no existen requisitos de obligado cumplimiento en este aspecto, no obstante, según las publicaciones consultadas, la iluminancia mínima aconsejada en el interior de una vivienda se encuentra por encima de los 200 lux, para poder desarrollar una actividad con normalidad en el interior de las diferentes estancias y la máxima para no causar molestias, por debajo de los 2.000 lux.

Además, estos valores máximos y mínimos nos indican la cantidad de horas del día con radiación solar, que estamos por debajo y por encima de la iluminancia aconsejada, para poder analizar así las horas en las que serán necesario un aporte extra de iluminación artificial, o la instalación de algún elemento de protección solar en horas específicas del día. Cuantas más horas precisemos de iluminación artificial, más consumo energético tendremos en el edificio.

METODOLOGÍA

6.1. FASE 1. SELECCIÓN DEL PROTOTIPO.

6.2. FASE 2. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PASIVOS.

6.2.1. Programa de simulación energética.

6.2.2. Diseño, alternativas y elección de estrategias pasivas a incorporar en los modelos.

6.3. FASE 3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA.

6.4. FASE 4. MONITORIZACION DE LOS MODELOS A ESCALA.

6.4.1. Procesos experimentales de ensayos y evaluación de los equipos empleados

6.4.2. Procedimiento de la elección del intervalo de tiempo para el registro de datos.

6.4.3. Localización de los sensores y metodología de datos recabados.

6.5. FASE 5. VERIFICACIÓN ESTACIONAL DE LOS DATOS REGISTRADOS DURANTE LA MONITORIZACIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA.

6.6. FASE 6. ELECCIÓN DE REGISTRO DE DATOS REPRESENTATIVOS Y ANALISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.

6.7. FASE 7. VALIDACIÓN DEL ANALISIS COMPUTACIONAL.

6.8. FASE 8. ESTUDIO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE SIMULACIONES.

6.9. FASE 9. RENTABILIDAD DEL EDIFICIO DESDE LA PERSPECTIVA COSTE-EFICACIA.

6. METODOLOGÍA

En base a los objetivos específicos planteados se describe la metodología llevada a cabo, que corresponde con el desarrollo de la investigación (Figura 56):

Figura 56. Fases de la investigación.

Metodología seguida en cada una de las fases especificadas en la figura anterior:

- **Fase 1.** Búsqueda bibliográfica y documental para resolver el objetivo 1 de seleccionar la vivienda unifamiliar objeto del estudio.
- **Fase 2.** Simulación a través de software Design Builder, de las estrategias pasivas para implementar en las viviendas. Esta simulación inicial se realiza con los modelados a escala 1/6 y con la base climática tipo.

- **Fase 3.** Diseño de planos de los prototipos de la vivienda seleccionada en la fase 1 indicando sus características constructivas, también se busca la ubicación más adecuada para su posterior construcción.
- **Fase 4.** Elección y localización de los sensores de medida, valoración del intervalo del registro de datos y procedimiento de monitorización de los modelos a escala.
- **Fase 5.** Valoración estacional y anual de los datos registrados durante la monitorización, para comprobar si existe algún dato atípico.
- **Fase 6.** Selección entre los resultados experimentales obtenidos durante la monitorización de todo un año, aquellos periodos más representativos en cada una de las estaciones, para alcanzar el objetivo principal.
- **Fase 7.** Validación del procedimiento computacional a partir de los resultados experimentales obtenidos en la etapa de monitorización.
- **Fase 8.** Análisis a través del programa de simulación energética, las demandas y los consumos de los equipos de climatización e iluminación de forma mensual y anual, así como cuantificar las emisiones de CO₂ en los diversos escenarios planteados, antes y después de la incorporación de las estrategias pasivas.
- **Fase 9.** Evaluación de la rentabilidad de la vivienda acristalada desde la perspectiva coste-eficacia, calculando el valor de cada uno de los escenarios planteados y analizando el coste de la energía consumida en los sistemas de climatización e iluminación durante un año completo.

6.1. FASE 1. SELECCIÓN DEL PROTOTIPO

Los criterios que se han establecido para realizar la selección del prototipo han sido los que a continuación se indican:

- que se trate de una vivienda unifamiliar aislada, por la aportación al conocimiento en esta tipología edificatoria,
- que disponga en la totalidad de sus fachadas el cien por cien de la superficie cubierta por vidrio, para poder analizar parámetros de eficiencia energética y de bienestar,
- su ubicación debe tener una latitud muy similar a la que tenemos en Madrid, para poder ser analizada en un clima de similares características,
- que disponga de sencillez arquitectónica para poder ser reproducida en los modelos a escala,
- vivienda con inconvenientes energéticos, que nos enfrenta a un problema que resolver con las estrategias pasivas disponibles en el mercado actual,
- que sea un edificio de referencia en la historia de la arquitectura, por haber marcado un cambio importante en la forma de construir.

Después de realizar, en el capítulo de introducción, una búsqueda minuciosa de edificios, por todo el mundo, con una superficie elevada de vidrio en su envolvente, se realizaron fichas resumen con los datos más relevantes de cada una de las edificaciones, para poder detectar si cumplen con los criterios establecidos y de esta forma ser seleccionada la más adecuada como prototipo o caso de estudio de la investigación.

6.2. FASE 2. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PASIVOS

En el desarrollo de esta fase se analizan y seleccionan las distintas estrategias pasivas que se van a incorporar en los modelos a escala, a través de simulaciones con la base climática tipo, que incorpora el programa Design Builder® por defecto y se marcan los criterios técnicos (situación, cargas, temperaturas de consigna, horarios, etc). para todos los escenarios por igual.

6.2.1. Programa de simulación energética

Se utiliza como herramienta de simulación el programa informático Design Builder® versión 5.0.1.020, basado en el motor de cálculo de Energy Plus®. Design Builder® es un programa validado por el “IEA BESTEST Building load and HVAC test”, el cual permite, entre otros, el cálculo de las cargas de calefacción y refrigeración mediante el método de balance térmico, aprobado por ASHRAE e implementado en Energy Plus®.

Cabe destacar, que el motor de cálculo Energy Plus®, es un programa diseñado por el Department of Energy of USA (DOE) (Energy.gov, 2018), y sucesor del DOE-2 y BLAST, siendo el programa que ha obtenido más certificados y validaciones (Giménez, 2011b).

Todas las simulaciones, tanto las iniciales como las finales, han sido realizadas estableciendo los siguientes parámetros:

La zona climática donde se sitúa la vivienda para su estudio es D3 que corresponde al municipio de Madrid. Se han marcado condiciones para los sistemas de calefacción y refrigeración, en relación a la temperatura de consigna primaria y secundaria. Dichos valores se muestran en la Tabla 11.

Sistema de Calefacción			
Temperatura de consigna primaria y secundaria por horas			
<i>Meses</i>	<i>00:00 – 8:00 h</i>	<i>8:00 – 16:00 h</i>	<i>16:00 – 24:00 h</i>
Enero - Mayo	17°C	22°C	22°C
Junio - Septiembre	--	--	--
Octubre - Diciembre	17°C	22°C	22°C
Sistema de Refrigeración			
Temperatura de consigna primaria y secundaria por horas			
<i>Meses</i>	<i>00:00 – 8:00 h</i>	<i>8:00 – 16:00 h</i>	<i>16:00 – 24:00 h</i>
Enero - Mayo	--	--	--
Junio - Septiembre	27°C	25°C	25°C
Octubre - Diciembre	--	--	--

Tabla 11. Temperaturas de consigna primaria y secundaria asignadas a los sistemas de calefacción y refrigeración.

Así mismo en todas las simulaciones se asignan los mismos valores en cuanto a cargas energéticas por ocupación, iluminación, equipos y renovaciones de aire, como se muestran en la Tabla 12.

Cargas	00:00 - 8:00 h	8:00 - 16:00 h	6:00 - 8:00 h	18:00 - 20:00 h	20:00 - 23:00 h	23:00 - 24:00 h
Calor Sensible (W/m²)						
Laborables	2,15	0,54	1,08	1,08	1,08	2,15
Sábados/Festivos	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Calor latente (W/m²)						
Laborables	1,36	0,34	0,68	0,68	0,68	1,36
Sábados/Festivos	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación (W/m²)						
Laborables/ Sábados/Festivos	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Equipos (W/m²)						
Laborables/ Sábados/Festivos	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Renov. aire (ren/h)						
Laborables/ Sábados/Festivos	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63

Tabla 12. Distribución de cargas internas y renovación de aire.

Estos valores se han definido en función de lo establecido en el apéndice C del DB-HE 1, del año 2013 modificado conforme a la Orden FOM/588/2017, de 15 de junio (BOE 23-06-2017) (Ministerio de Vivienda, 2007), para uso residencial, salvo lo que se refiere a la temperatura de consigna para calefacción que se ha asignado 22°C, que es lo que establece Norma ISO 7730/2006 (AENOR, 2006).

6.2.2. Diseño, alternativas y elección de estrategias pasivas a incorporar en los modelos

La elección de las estrategias pasivas se decidió en el estudio inicial de simulaciones energéticas, que se realizaron llevando a cabo distintos escenarios centrados en la implantación de diferentes estrategias constructivas.

Se han realizado en este trabajo previo a la simulación final un total de treinta simulaciones con la vivienda modelada a escala 1/6, resultado de sustituir todas las fachadas o algunas de ellas por vidrios de altas prestaciones y voladizos con diferente configuración geométrica.

En base a esto se definen las estrategias pasivas que se han ido incorporando a los diferentes escenarios, combinándolas en las distintas orientaciones de la vivienda:

A.- Características de los vidrios (Guardian Glass):

- Vidrio sencillo de 6 mm, denominado “Clear Float Glass” (instalado en el modelo base);
- Vidrio sencillo de 6 mm y lámina de control solar situada en la parte interior (LCS), denominado “HD Neutral 67 neutro”;
- Vidrio de doble acristalamiento (6+16+6) mm, denominado “DA convencional”;
- Vidrio de doble acristalamiento (6+16+6) mm y lámina de control solar (LCS) situada en la cara interior del vidrio exterior (cara dos del acristalamiento), siendo su denominación “SunGuard Solar Neutral 67”.

Las características técnicas de los cuatro acristalamientos se muestran en la siguiente Tabla 13:

Propiedades	Vidrio sencillo de 6 mm (Clear Float Glass)	Vidrio sencillo de 6 mm +LCS (HD Neutral 67 neutro)	Doble acristalamiento de (6+16+6) mm (DA Convencional)	Doble acristalamiento de (6+16+6) mm + LCS (SunGuard Solar Neutral 67)
Transmisión solar Total SHGC “g” (%)	86,0	68,0	77,1	58,8
Transmisión solar Directa (%)	78,0	63,0	72,2	53,1
Transmisión de luz (%)	89,0	66,0	81,9	61,0
Valor U (ISO 10292) (W/m ² K)	5,7	5,6	2,7	2,6

Tabla 13. Especificaciones técnicas de los vidrios.

B.- Características de los voladizos:

En relación con el diseño de voladizo, como segunda estrategia pasiva elegida, se pretende proteger el interior de la vivienda del soleamiento en los cuatro meses de mayor ángulo de elevación. De los cálculos realizados se han seleccionado dos, siendo estos los que minimizan la máxima radiación solar, en el interior de la edificación, en el máximo periodo posible (Figura 57).

Los dos voladizos seleccionados, se calcularon para el día 21 de abril y 21 de agosto a las 14:00 horas, para las fachadas Sur y Este correspondiendo, a cada caso, un ángulo de incidencia de la radiación solar con la horizontal de 61° y 27° respectivamente.

Figura 57. Voladizos diseñados en función del ángulo solar y la orientación.

De esta manera se analiza, de una forma previa a la obtención de los resultados experimentales, la repercusión energética de los elementos de protección pasiva descritos sobre las instalaciones de refrigeración y de calefacción.

Se han realizado treinta simulaciones (Figura 58), combinando las cuatro tipologías de vidrios y los dos voladizos planteados para las orientaciones sur y este.

Nº	Orientación	Estrategia Pasiva - A - VIDRIOS-												Estrategia Pasiva - B - VOLADIZOS-			
		Vidrio sencillo de 6 mm (Clear Float Glass)				Vidrio sencillo de 6 mm +LC S (HD Neutral 67 neutro)				Doble acristalamiento de (6+16+6) mm (DA Convencional)				Voladizo de 1,80 m de longitud		Voladizo de 6,60 m de longitud	
		Norte	Sur	Este	Oeste	Norte	Sur	Este	Oeste	Norte	Sur	Este	Oeste	Norte	Sur	Este	Oeste
1	Modelo -base-	X	X	X	X												
2	Modelo -base1-	X	X	X	X									X	X		
3	Modelo -base2-	X	X	X	X											X	X
4	Modelo -base3-	X	X	X	X									X			X
5	Modelo -base4-	X	X	X	X										X	X	
6	Modelo -A-					X	X	X	X								
7	Modelo -A.1-					X	X	X	X					X	X		
8	Modelo -A.2-					X	X	X	X							X	X
9	Modelo -A.3-					X	X	X	X					X			X
10	Modelo -A.4-					X	X	X	X						X	X	
11	Modelo -B-									X	X	X	X				
12	Modelo -B.1-									X	X	X	X				
13	Modelo -B.2-									X	X	X	X			X	X
14	Modelo -B.3-									X	X	X	X	X			X
15	Modelo -B.4-									X	X	X	X		X	X	
16	Modelo -C-													X	X	X	X
17	Modelo -C.1-									X	X	X	X	X	X		
18	Modelo -C.2-									X	X	X	X			X	X
19	Modelo -C.3-									X	X	X	X	X			X
20	Modelo -C.4-									X	X	X	X		X	X	
21	Modelo -D-	X			X		X	X									
22	Modelo -D.1-	X			X		X	X						X	X		
23	Modelo -D.2-	X			X		X	X								X	X
24	Modelo -D.3-	X			X		X	X						X			X
25	Modelo -D.4-	X			X		X	X							X	X	
26	Modelo -E-									X			X				
27	Modelo -E.1-									X			X			X	X
28	Modelo -E.2-									X			X			X	X
29	Modelo -E.3-									X			X	X			X
30	Modelo -E.4-									X			X		X	X	

Figura 58. Simulaciones realizadas para la elección de las estrategias pasivas.

De estos escenarios se eligieron seis para ser analizados energéticamente por considerarlos los más representativos tras la obtención de los datos previos.

En la siguiente Figura 59 se muestra un esquema de los escenarios que se analizan en el capítulo de resultados para la selección final de las estrategias pasivas que se instalaron.

Figura 59. Caracterización de los modelos simulados

6.3. FASE 3. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA

Para esta investigación se construyen dos modelos a escala del prototipo seleccionado (Casa Farnsworth), en uno de ellos se mantienen las mismas características constructivas que la vivienda originaria, y le nombraremos modelo de referencia y en el otro se modifican las características de los acristalamientos de la envolvente de la fachada y se designa como modelo mejorado.

La construcción de los modelos a escala se realiza en el interior de las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Edificación y se financia gracias al apoyo del Grupo de Investigación de Tecnología Edificatoria y Medio Ambiente y al Aula Taller de Instalaciones de dicha escuela.

Para la ejecución de los dos modelos a escala se ha tenido en cuenta las dimensiones y la geometría originaria de la casa Farnsworth. Tras el análisis exhaustivo de la edificación, se decidió elaborar los modelos que sirven de base para la investigación a escala 1/6, siendo sus dimensiones las que aparecen reflejadas en la Figura 60.

Figura 60. Planta y sección de los modelos a escala.

Para el desarrollo de la fase experimental, se decidió diseñar y construir dos modelos a escala con el fin de poder comparar en igualdad de condiciones climáticas el comportamiento energético de diferentes cerramientos de vidrio.

En el centro de los modelos, ligeramente desplazado hacia la cara norte se dispone de un volumen hueco simulando el espacio donde se alojan los aseos y un pequeño cuarto de instalaciones.

Los modelos a escala han sido contruidos con una estructura perimetral de acero a modo de bastidor superior e inferior, sustentado a través de ocho perfiles metálicos que conforman los pilares de la edificación. El forjado inferior (suelo) y el superior (techo) se resuelven con piezas de panel sándwich seleccionadas para que cumplan con la misma transmitancia térmica que los cerramientos originales de la edificación.

Los cerramientos de suelos y techo originarios de la Casa Farnsworth se han calculado en función de la composición constructiva originaria y se ha realizado una estimación del material existente en la época de construcción, para poder seleccionar el coeficiente de conductividad térmica más próximo a cada material. El valor obtenido de transmitancia térmica es de $0,521 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para el suelo y $0,528 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para el techo. Para el cálculo se ha tenido en cuenta el catálogo de elementos constructivos del CTE para los diferentes materiales. (Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2010).

Las cuatro fachadas de los dos modelos a escala están resueltas con vidrios suministrados por el fabricante Guardian Glass.

6.4. FASE 4. MONITORIZACION DE LOS MODELOS A ESCALA

En la siguiente fase de la investigación se realiza la adaptación de los modelos a escala a la monitorización que se desea llevar a cabo, con la elección de los equipos e instrumentos de precisión, teniendo presente los objetivos que se desean alcanzar, todo ello de acuerdo con la normativa, guías de fabricantes e investigaciones publicadas. Además, también se dispone de la experiencia recogida en la colaboración con otras monitorizaciones realizadas, como en la rehabilitación de edificios con SATE en la colonia de San Cristóbal de los Ángeles

(Madrid) junto a Sheila Varela Lujan (Varela Luján, Viñas Arrebola, Rodríguez Sánchez, Aguilera Benito, & González Cortina, 2019), en el edificio bioclimático de Pozuelo de Alarcón (Madrid) realizado con Rubén Felices Puértolas (Felices Puértolas, 2017) y también el edificio dedicado a las oficinas del club deportivo de la universidad de Lecco (Italia) durante la estancia internacional en Milán (Salvalai, Malighetti, Luchini, & Girola, 2017).

No obstante, se llevó a cabo una fase previa de experimentación para la determinación de su precisión, el intervalo de tiempo de recogida de datos y el posicionamiento de cada uno de los sensores en el interior y en el exterior de los modelos a escala.

6.4.1. Procesos experimentales de ensayos y evaluación de los equipos empleados

Previa a la fase de monitorización de los modelos a escala, se realizó un análisis del comportamiento, tiempo de respuesta y errores de los instrumentos a utilizar.

Según se indica en la norma UNE-EN ISO 7726 de “Ergonomía en los entornos térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas”, existen ciertos límites y recomendaciones en cuanto a los errores que pueden hacer considerar no válidos los valores experimentales obtenidos. Dichos límites se puede observar en las tablas anexas de la citada norma. (AENOR, 2003)

La cuantificación de los errores determina el tratamiento de datos que se debe realizar de forma previa al experimento que se quiera llevar a cabo. Dicha normativa indica que los instrumentos empleados deben cumplir con una exactitud determinada para un intervalo de medidas preestablecido y ser capaces de dar un tiempo de respuesta lo más breve posible. (Felices Puértolas, 2017). En base a estas cuestiones, se han analizado los valores obtenidos para cada uno de los instrumentos de medición de los que se disponían y se ha escogido el mejor método de monitorización de las variables para cada caso. Los instrumentos de medición utilizados en la monitorización de los modelos a escala se indican en la siguiente Tabla 14.

	UD	ELEMENTOS DE INSTRUMENTACION.
Equipos de recogida de datos	2	OPUS 20
	11	OPUS 200
	2	OPUS 208
Instrumentos de medición	20	Termopar k
	16	Luxómetro DeltaOhm HD2021T
	2	Termohigrómetro OPUS 20 + CO2
	2	Piranómetro CMP3

Tabla 14. Relación de equipamiento e instrumentación utilizada durante la monitorización.

De los equipos e instrumentos empleados, se van a exponer las características analizadas con sus ventajas e inconvenientes.

- OPUS 200 y OPUS 208. Equipos de recogida de datos de la marca Lufft, con 2 y 8 entradas de sensores, respectivamente. Funcionan con una fuente de alimentación externa de 12 V conectados a la corriente. Permiten el almacenamiento de datos de cualquier tipo en función del sensor, ya que disponen de 8 pines por cada señal y el sensor puede requerir la conexión en dos o tres puntos y la colocación de una fuente de alimentación externa que dé servicios a l sensor. Con una memoria limitada en función del intervalo de toma y recogida de datos seleccionado (entre 0,1 seg. y 30 min.) y una conexión RS-232 a un ordenador con software específico de la casa comercial del dataloguer. A estos equipos se han conectado en el trabajo los instrumentos termopar k, luxómetros, piranómetros, y estación meteorológica. Para la monitorización han sido necesarios 11 OPUS 200 y 2 OPUS 208. (Figura 61 y 62).

Figura 61. OPUS 208.

Figura 62. OPUS 200.

- OPUS 20. Equipo de recogida de datos de la marca Lufft (Tabla 15 y Figura 63). El modelo utilizado incorpora el sensor en su interior. Permite el almacenamiento de datos (entre 10 seg. y 30 min.) y su posterior conexión a un software específico mediante protocolo Ethernet o USB. El modelo empleado en este estudio recoge datos de temperatura, humedad y CO₂ en el interior de los modelos. Ha sido preciso para la monitorización disponer de dos unidades, para poder instalar uno dentro de cada modelo. Se adjuntas las características técnicas del equipo, facilitadas por el fabricante.

Rango de temperatura	De – 20°C a +50°C
Precisión	± 0,3°C
Resolución	0,1°C
Exactitud	± 0,1°C
Rango de humedad relativa (RH)	de 0% RH a 100% RH
Precisión	± 2% RH
Resolución	0,1 RH
Exactitud	± 1% RH
Rango operativo de CO ₂	de 0 ppm a 5.000 ppm
Precisión	± 50 ppm
Resolución	1 ppm
Exactitud	± 1 ppm

Tabla 15. Características técnicas facilitadas por el fabricante del OPUS 20.

Figura 63. OPUS 20.

- Termopar k. Instrumentación de bajo coste y con amplio rango de medición de temperatura. Formado por dos cables de níquel y aluminio (Ni-Al) soldados en su extremo libre, no encapsulados y con extensión de hasta 50 metros. Si bien son los instrumentos con menor precisión de todos los empleados, su exactitud, rango operativo y facilidad de colocación les confiere ventajas en su uso respecto al resto de los empleados. Las características se indican en la siguiente Tabla 16, siendo la precisión y la exactitud contrastadas en ensayos de laboratorio para todos los sensores empleados en la monitorización de los modelos a escala. El número de unidades utilizado en la monitorización es de 20.

Rango de temperatura	De – 200°C a +1.260°C
Precisión	$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$
Resolución	0,1°C
Exactitud	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Tabla 16. Características técnicas facilitadas por el fabricante del termopar k.

Figura 64. Termopar k y protección a la radiación solar directa.

Como se muestra en la Figura 64, aquellos sensores que eran susceptibles de mostrar error en los datos debido a la radiación solar directa (es el caso de los termopares tipo k), fueron protegidos, acoplando un cuarto de esfera de material plástico con perforaciones en su perímetro de acción, de esta manera se permitió la convección del aire alrededor del termopar.

- Piranómetro Kypp&Zonen CMP3. Instrumentación de medición que conectado a cualquiera de los OPUS empleados permiten almacenar datos sobre la densidad de flujo de la radiación. Inicialmente se instaló solo un piranómetro cerca de la estación meteorológica exterior y posteriormente se

decidió instalar otro, situando a cada uno en el punto central del acristalamiento de la fachada sur de los modelos a escala, con un soporte anclado a la parte alta del pilar central. (Tabla 17 y Figura 65)

Rango de espectro de radiación	De 0 a 2.000 W/m ²
Precisión	< 20 W/m ²
Resolución	1 W/m ²

Tabla 17. Características técnicas facilitadas por el fabricante del piranómetro Kyyp & Zonen.

Figura 65. Piranómetro Kyyp&Zonen.

- Luxómetro DeltaOhm HD2021T. Instrumentación de medición (Tabla 18 y Figura 66) que permite convertir en una señal de tensión de 0 a 10 V la magnitud fotométrica de la iluminación (lux). Para la monitorización se han instalado un total de 16 luxómetros, 8 en cada modelo con la posición exacta en uno y en otro. Los datos aportados por el fabricante son los que se muestran a continuación:

Rango de iluminancia	De 0 a 20.000 lux
Temperatura de trabajo	De -20°C a 60°C

Tabla 18. Características técnicas facilitadas por el fabricante de los luxómetros..

Figura 66. Luxómetros Delta Ohm HD2021T.

Durante la ejecución de los modelos a escala, se realizaron trabajos para calibrar los equipos empleados para la toma de medidas. En el desarrollo de la investigación se han contemplado los tiempos de calibración, contando con todos los equipos de medición y sensores calibrados adecuadamente y comprobados de manera manual in situ con contraste de las medidas.

Los termopares tipo k, se calibraron en el laboratorio de física de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, al igual que los OPUS 20.

Los piranómetros Kypp & Zonen CMP3 y los Luxómetro DeltaOhm HD2021T, disponían del certificado de calibración de fábrica, por lo que no tuvieron que ser calibrados de forma previa a la experimentación.

6.4.2. Procedimiento de la elección del intervalo de tiempo para el registro de datos

Una vez realizado en el laboratorio la caracterización y calibración de los instrumentos empleados, se analizó el tiempo en que se prolongaría la monitorización, y el intervalo de minutos a fijar para que los datalogger recojan medidas.

Para poder validar la investigación y obtener datos en todas las estaciones del año, se decidió monitorizar los modelos a escala durante 1 año completo, que comprendió desde Julio de 2017 a agosto de 2018.

Las mediciones de temperatura, según lo establecido en otras investigaciones se realizaban con una frecuencia corta de minutos (del orden de 1 a 6 minutos), dependiendo del caso. (Porrás-Amores, Viñas-Arrebola, Rodríguez-Sánchez, & Villoria-Sáez, 2014), (Ramírez, Arrebola, Merino, & Del, 2017), (Bianco et al., 2017), (Psomas, Heiselberg, Lyme, & Duer, 2017), (Salvalai, Imperadori, Scaccabarozzi, & Pusceddu, 2015), (Salvalai, Sesana, & Iannaccone, 2017).

De las conclusiones de la bibliografía se decidió que las lecturas fueran recogidas en los data-logger cada 2 minutos y posteriormente analizadas para el estudio cada 10 minutos en valor promedio. Es cierto que en el análisis de datos se refleja que la modificación en el valor de la constante no es tan rápida en el tiempo, por

lo que se ha detectado que ha sido un intervalo de tiempo demasiado corto en recogida de datos.

Debido a este intervalo tan corto de tiempo en la recogida de datos, y al dilatado tiempo de monitorización, los datos obtenidos para el análisis de resultados han sido excesivamente numerosos. Es cierto que el no hacer campañas puntuales de monitorización ha conllevado la generación de una base de datos considerable. Cada instrumento de medida recogió a lo largo del año en torno a 270.000 datos, multiplicados por 42 sensores, por lo que obtuvimos una big data de unos 11.340.000 datos.

En la Figura 67 se muestra el calendario de monitorización, que abarca del día 1 de agosto de 2017 al día 31 de julio de 2018. Se puede observar que en la estación de verano (en color azul), los últimos 41 días (del 21 de junio al 31 de julio de 2018) se obtuvieron los datos de los modelos a escala con la incorporación de voladizos en las orientaciones sur y este.

Figura 67. Calendario de monitorización de los modelos a escala.

Como la monitorización se llevó a cabo en todas las estaciones del año, se experimentó todas las condiciones climatológicas que se dieron, como se puede ver reflejado en la Figura 68.

Figura 68. Diferentes estaciones del año durante la monitorización.

Además, normativa americana ASHRAE Guideline 14-2015 establece que para validar la calibración de un modelo numérico se ha de realizar durante al menos 8760 horas en un año completo. Esta razón explica la motivación de realizar una campaña anual de temperaturas sobre los modelos a escala.

6.4.3. Localización de los sensores y metodología de datos recabados

Los sensores fueron colocados, según un análisis previo en el que se hicieron pruebas de posicionamiento. La instalación de los sensores se realizó en ambos modelos por igual en cuanto a situación y cantidad. Excepto en los termopares que se situaron en las fachadas para medir la temperatura superficial. En el modelo de referencia se colocó tan solo en el exterior, ya que no se apreció diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Y en el modelo mejorado se colocaron por el interior y el exterior, por lo que este modelo dispone de 4 termopares tipo k más que el modelo de referencia.

Por ello resumiendo los sensores con los que cuenta cada modelo son los que figuran indicados en la Tabla 19 para el modelo de referencia y en la Tabla 20 para el modelo mejorado:

MODELO REFERENCIA	UD	TIPO DE SENSOR O SONDA	POSICIONAMIENTO
Instrumentos de medición	8	Termopar k	Uno en cada orientación (4 ud) . En el interior y exterior de los forjados (4 ud).
	8	Luxómetro DeltaOhm	Siete en el interior del modelo a escala (7 ud) más otro en el porche exterior (1 ud).
	1	Termohigrómetro OPUS 20	Uno situado en el interior del modelo a escala (1 ud).
	1	Piranómetro CMP3	Uno situado en el exterior, en la parte superior de la fachada sur del modelo a escala (1 ud).

Tabla 19. Instrumento de medición en el modelo de referencia.

MODELO MEJORADO	UD	TIPO DE SENSOR O Sonda	POSICIONAMIENTO
Instrumentos de medición	12	Termopar k	Dos en cada orientación situados en el interior y en el exterior del vidrio (8 ud). En el interior y exterior de los forjados (4 ud).
	8	Luxómetro DeltaOhm	Siete en el interior del modelo a escala (7 ud) más otro en el porche exterior (1 ud).
	1	Termohigrómetro OPUS 20	Uno situado en el interior del modelo a escala (1 ud).
	1	Piranómetro CMP3	Uno situado en el exterior, en la parte superior de la fachada sur del modelo a escala (1 ud).

Tabla 20. Instrumento de medición en el modelo mejorado.

Los datos recabados de cada uno de los instrumentos de medida han sido posteriormente analizados, para ello cada sensor fue identificado por un código alfanumérico que facilita su comprensión en los análisis posteriores. Siendo esta nomenclatura la siguiente:

- o La **primera letra** se referirá al posicionamiento en cada uno de los modelos a escala (referencia o mejorado) como se muestra en la Figura 69:

- La letra “**M**”, para los datos recabados en el modelo mejorado.

- La letra “**R**”, para datos recabados en el modelo de referencia.

Figura 69. Modelo referencia (MR) y modelo mejorado (MM).

- o Seguida de la inicial, se indica con **tres letras** la **magnitud** medida con el sensor. (tem_, lux_, rad_)
- o A continuación del guion bajo se identifica con un **número** la **posición que ocupa** el sensor dentro de cada uno de los modelos a escala. (1, 2, 3, n)

- Ejemplos de nomenclatura utilizada para el análisis experimental:

<p>Mtem_7</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sensor situado en el modelo mejorado. ○ Mide la temperatura ○ La posición nº 7 corresponde con el sensor situado en el vidrio de la orientación sur. 	<p>RIlux_4</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sensor situado en el modelo de referencia. ○ Mide cantidad de lux (iluminancia). ○ La posición nº 4 corresponde con el sensor situado en el porche, orientación oeste.
---	--

A continuación, se hace un análisis detallado de cada uno de los sensores posicionados en el interior de los modelos a escala.

- **Temperatura superficial** medida con los termopares tipo K, colocados sobre las superficies de los cerramientos: “**tem _1 al 8**”

- La posición 1 corresponde con el sensor situado en el forjado de techo por la cara interior, en ambos modelos.
- La posición 2 corresponde con el sensor situado en el forjado de suelo por la cara interior, en ambos modelos.
- La posición 6 corresponde con el sensor situado en el forjado de suelo por la cara exterior, en ambos modelos.
- La posición 8 corresponde con el sensor situado en el forjado de techo por la cara exterior, en ambos modelos.

Estos sensores (1, 2, 6 y 8) fueron colocados para poder analizar el control del flujo de la temperatura interior a través de los paneles sándwich que conforman los forjados superior e inferior de ambos modelos.

- La posición 3, 4, 5 y 7 corresponde con los sensores situados sobre los vidrios por la cara exterior, en ambos modelos.
- La posición 3i, 4i, 5i y 7i corresponde con los sensores situados sobre los vidrios por la cara interior, únicamente en el modelo mejorado. (siendo estos los sensores extras que se colocaron en este modelo)

Los sensores 3, 4, 5 y 7 son los que se han utilizado en el análisis experimental, debido a que nos aportan los datos que necesitamos conocer para deducir el comportamiento del flujo a través de los diferentes vidrios de ambos modelos.

En la Figura 70 se muestra el posicionamiento dentro de los modelos a escala de cada uno de los termopares tipo K, que se han utilizado ya sea para el control o el análisis de la variable temperatura superficial.

Figura 70. Posicionamiento de los sensores que miden temperatura superficial.

Las temperaturas superficiales han sido recogidas por 20 termopares tipo K, no obstante 8 sensores (los situados en los forjados de los modelos a escala) se han utilizado únicamente para el control de la temperatura y para el análisis experimental se han utilizado los 12 sensores restantes, 4 en el modelo de referencia y 8 en el modelo mejorado (temperatura interior y exterior superficial de los vidrios dobles).

- **Temperatura ambiente**

medida en el interior de los modelos a escala con dos unidades de OPUS 20: “tem_9”.

La posición se puede ver reflejada en la Figura 71.

Figura 71. Posicionamiento de los sensores que miden temperatura ambiente en el interior de los modelos a escala y en el exterior.

- **Radiación solar** medida en el exterior de cada uno de los modelos a escala con dos unidades de piranómetro CMP3: “rad_12”.

La posición se puede ver reflejada en la Figura 72.

Figura 72. Posicionamiento de los sensores que miden la radiación solar en el exterior.

- **Luxómetros** que miden la iluminancia en lux, colocados sobre ambos modelos a escala por igual (8 unidades en cada uno de ellos), haciendo un total de 16 unidades: “lux _1 al 8”. El posicionamiento de los luxómetros se puede ver reflejado en la Figura 73.

Figura 73. Posicionamiento de los luxómetros que miden la iluminancia en ambos modelos a por igual.

A continuación, en la Tabla 21 y en la Figura 74, se muestra un resumen y un gráfico con el posicionamiento de cada uno de los instrumentos de medición y con la nomenclatura anteriormente citada, que corresponde también con el archivo de datos analizados en los resultados experimentales.

MODELO	SENSORES	OBSERVACIONES
Referencia "R"	Temperatura superficial "tem_ 1 al 8"	Termopar k (4 sensores extras)
	Temperatura ambiental "tem_ 9"	Termohigrómetro OPUS 20
	Radiación solar "rad_12"	Piranómetro CMP3
	Iluminancia "lux_ 1 al 8"	Luxómetro DeltaOhm
Mejorado "M"	Temperatura superficial "tem_ 1 al 8"	Termopar k
	Temperatura ambiental "tem_ 9"	Termohigrómetro OPUS 20
	Radiación solar "rad_12"	Piranómetro CMP3
	Iluminancia "lux_ 1 al 8"	Luxómetro DeltaOhm

Tabla 21. Tabla de nomenclatura de sensores.

Figura 74. Posicionamiento de sensores finalmente analizados en los resultados.

Además de los sensores que se han instalado en el interior de los modelos a escala y que han sido detallados anteriormente, se dispone de datos para las variables climatológicas ambientales exteriores durante el periodo de monitorización comprendido del 1 de agosto de 2017 al 31 de julio de 2018.

Para la obtención de esta base climatológica se contó con la colaboración de la Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET), la cual ha ido periódicamente facilitándonos todos los datos de la estación meteorológica más cercana a los modelos a escala, siendo esta la de Ciudad Universitaria de Madrid (nº Id de la estación 3194U), con número de autorización de prestaciones meteorológicas 990180161.

6.5. FASE 5. VERIFICACIÓN ESTACIONAL DE LOS DATOS REGISTRADOS DURANTE LA MONITORIZACIÓN DE LOS MODELOS A ESCALA

Tras la recopilación de datos obtenidos en el periodo de monitorización de los modelos a escala, se realiza el ajuste y la adecuación de los valores para poder ser tratados y analizados.

Se lleva a cabo el análisis estadístico descriptivo de las variables que nos organiza, presenta y describe el conjunto de datos obtenido de cada sensor, para facilitar información sobre las características de cada uno de ellos. Así como para poder detectar algún tipo de anomalía en la recogida de datos de ese sensor y poder ser corregida previo a ser analizado.

En los Anexos 4 y 5 se muestran gráficas, valores de rango, valores mínimo y máximo, media, desviación estándar y varianza de cada uno de los sensores, tanto térmicos como lumínicos, a lo largo de todo el año.

Los cálculos del presente estudio se han realizado con los programas informáticos IBM SPSS® en su versión 25, el programa R® en su versión 3.5.1. y excel® en su versión 18.03.

6.6. FASE 6. ELECCIÓN DE REGISTRO DE DATOS REPRESENTATIVOS Y ANALISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

En esta fase se diseña el análisis del comportamiento de la variable temperatura ambiental exterior en las distintas estaciones del año, para poder seleccionar el periodo más representativo en cada una de ellas.

Considerando el periodo de monitorización y con los datos suministrados por la Agencia Estatal, se analiza de forma estacional el comportamiento de la temperatura del aire exterior a lo largo de todo el año. Se realiza un análisis estadístico previo, de forma estacional, donde se obtiene que el valor p , nivel de significación, es menor de 0,05, por lo que las variables están relacionadas y por tanto hay diferencias significativas entre las variables estudiadas en cada uno de los casos. Los datos analizados se ajustan a la distribución normal y existen diferencias significativas en las muestras comparadas, tanto en sus valores mínimos y máximos como en los valores promedios.

Tras el análisis estadístico estacional a lo largo de todo el año de monitorización, se elige dentro de cada estación el periodo más estable. En base a este criterio se seleccionan los periodos representativos donde los registros de datos muestran, durante tres días consecutivos, el menor valor porcentual que difiere respecto al promedio de temperatura a lo largo de cada estación.

Por todo ello, y tras el estudio minucioso de los registros recabados en la estación estival, se seleccionan ambos periodos que muestran una diferencia de temperaturas insignificante, considerándose como si ambos periodos fueron medidos simultáneamente en ambos casos, nombrándose de aquí en adelante, en los resultados posteriormente expuestos, como día 1, 2 y 3 de la estación de verano.

Tras la elección de los periodos más representativos, en el capítulo de resultados se analiza por un lado las variables térmicas medidas: temperatura ambiental interior, temperatura superficial exterior y temperatura superficial interior. Y por otro lado las variables lumínicas, como son: análisis de la iluminancia, estudio lumínico por orientaciones y parámetros de confort visual.

6.7. FASE 7. VALIDACIÓN DEL ANALISIS COMPUTACIONAL

Los análisis continúan con la fase computacional, donde se ha utilizado para el estudio numérico el programa de simulación Design Builder®, v.5.0.1.020, basado en el motor de cálculo de Energy Plus®.

La simulación energética del edificio juega un papel importante en el estudio de esta investigación, debido a que agiliza el proceso, a la hora de plantear diversos escenarios para poder llegar a la optimización del modelo. Esta herramienta posee diversas ventajas frente al análisis experimental como puede ser; evaluar el rendimiento de los sistemas, valorar las características de la envolvente, disminuir los tiempos y el coste del proceso, facilitar el análisis e interpretación de los datos, etc. Por ello, para aceptar las soluciones propuestas por el modelo simulado, es necesario llevar a cabo la validación de los datos en base a errores y desviaciones máximas admisibles, respecto a los datos experimentales, para ello se ha llevado a cabo:

- Dentro del programa de simulación, se ha modelado la Casa Farnsworth a escala 1/6, con sus características constructivas y la base climática cedida por AEMET.
- El modelo se simula, estableciendo la salida de datos (temperatura ambiental interior) de forma mensual a lo largo de todo un año.
- Exportamos los datos generados a un Excel para poder analizar los errores y desviaciones máximas admisibles, como se muestra en el capítulo de resultados.

Los datos de ocupación, sistemas de climatización, funcionamiento, uso, etc, han sido obviados para las simulaciones de validación ya que, en los modelos a escala de la fase experimental, era complejo recrear estos escenarios. De cualquier manera, no se persigue la validación del modelo en cuanto a su consumo energético, si no poder observar cómo se comporta térmicamente la vivienda en función de sus temperaturas ambientales interiores y exteriores y si se ajusta a las tolerancias admitidas por la norma para poder llevar a cabo posteriormente el análisis energético para los diferentes escenarios diseñados con las diversas estrategias pasivas.

Al haber recogido datos horarios de todas las variables atmosféricas exteriores a través de la estación meteorológica que AEMET tiene en Ciudad Universitaria (Madrid) cercana a los modelos, se ha implementado en la herramienta informática el archivo climático real a lo largo del periodo de monitorización anual. Los datos de salida de las temperaturas ambientales interiores son los comparados con los resultados experimentales, a través del análisis del error medio de sesgo (NMBE: normalized mean bias error) y el coeficiente del error medio cuadrático (CV(RMSE): coefficient of variance of the root mean square error).

6.8. FASE 8. ESTUDIO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE SIMULACIONES

Para el análisis energético y de emisiones de CO₂, se han simulado diferentes escenarios de la vivienda a escala real, siendo estos (Figura 75):

- Escenario 1: Con vidrios sencillos de 6 mm de espesor en todas las orientaciones.
- Escenario 2: Con vidrio (6+16+6) mm en orientación Norte y vidrio 6+16+6 mm con LCS en el resto de las orientaciones.
- Escenario 3: Con vidrios sencillos de 6 mm de espesor en todas las orientaciones y voladizos en orientación sur y este.
- Escenario 4: Con vidrio (6+16+6) mm en orientación Norte y vidrio 6+16+6 mm con LCS en el resto de las orientaciones y voladizos en orientación sur y este.

ESCENARIO 1: ESCALA REAL VIDRIOS SENCILLOS	ESCENARIO 2: ESCALA REAL VIDRIOS MEJORADOS	ESCENARIO 3: ESCALA REAL CON VOLADIZOS + VIDRIOS SENCILLOS	ESCENARIO 4: ESCALA REAL CON VOLADIZOS + VIDRIOS MEJORADOS
---	---	---	---

Figura 75. Escenarios planteados para el análisis energético.

Una vez finalizado el periodo de monitorización y después del análisis de los resultados experimentales, se lleva a cabo otro conjunto de simulaciones con una base climatológica propia, que se crea con los datos recogidos durante el año completo que dura la monitorización. Para el procesamiento de los datos climáticos se ha utilizado el software multiplataforma y de código abierto, Big Ladder Elements, que sirve para editar archivos meteorológicos personalizados

en formato .epw y posteriormente importarlos al programa de cálculo Design Builder®.

En este último conjunto de simulaciones finales, se lleva a cabo el análisis energético de consumos, demandas y emisiones de CO₂ de la vivienda. Todas las simulaciones, tanto las iniciales como las finales, han sido realizadas con los parámetros establecidos en el punto 6.2.2.

Además de esos parámetros se han diseñado las condiciones de los sistemas mecánicos de calefacción y de refrigeración, para mantener un confort adecuado en el interior de la vivienda, se determinan de acuerdo a lo que establece el Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, que aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) (Ministerio de Fomento, 2008), y en el Real Decreto 1027/2007 que aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (Industria & Ministerio de vivienda, 2013). Para el análisis de la demanda energética de calefacción, Design Builder® considera las variables meteorológicas correspondientes a un día tipo de invierno, predeterminado, de la zona climática seleccionada, y aplica un coeficiente de seguridad que garantiza que el sistema de calefacción mantendrá las condiciones de confort definidas, incluso ante condiciones meteorológicas de invierno extremas. En este trabajo, se ha tomado el valor predeterminado de 1,25 que significa que el sistema se sobredimensiona en un 25%.

Sin embargo, para la demanda del sistema de refrigeración el programa necesita fijar un mes y un día de verano, debido a que tiene en cuenta la plantilla de actividad. En el dimensionado del sistema de refrigeración se aplica, también, un coeficiente de seguridad que ofrece mayor certeza para mantener las condiciones de confort definidas, incluso ante situaciones meteorológicas de verano extremas. En esta investigación se ha tomado el valor 1,15, por lo que el sistema se sobredimensiona en un 15%.

Para el análisis del consumo de la vivienda, se ha procedido a dimensionar las instalaciones de calefacción, refrigeración e iluminación. Para ello se ha estimado para todas las simulaciones las siguientes características en cada uno de los sistemas:

- En calefacción se ha previsto de una caldera mixta, de gas natural, de la marca Saunier Duval, modelo Thema Condens con un rendimiento estacional de 107,1%.
- En la instalación de refrigeración se ha proyectado una bomba de calor aire-aire (combustible electricidad) de la marca Mitsubishi modelo MSZ-HR-25VF y con un EER estacional de 3,71.
- Para la iluminación de la vivienda se ha previsto de una ratio de 2,2 W/m² a 10 lux.

También se analiza las emisiones de CO₂, para cada uno de los escenarios planteados, porque es el gas que en mayor medida contribuye al calentamiento del planeta (Tabla 22).

Gases de Efecto Invernadero			
Gas	Fuente Emisora	Tiempo de Vida	Contribución al Calentamiento (%)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Combustibles fósiles, deforestación, destrucción de suelos	500 años	77
Metano (CH ₄)	Ganado, biomasa, arrozales, escapes de gasolina, minería	7 - 10 años	14
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Combustibles fósiles, cultivos, deforestación	140 - 190 años	8
Gases Fluorados (HFC's, SF ₆ , etc.)	Refrigeración, aire acondicionado, aerosoles, espumas plásticas, fotoquímicos, automóviles, etc.	65 - 110 años	1

Tabla 22. Gases de efecto invernadero. Fuente: Panel intergubernamental sobre el cambio climático.

Estas emisiones de dióxido de carbono están asociados a los sistemas de climatización, agua caliente sanitaria e iluminación.

6.9. FASE 9. RENTABILIDAD DEL EDIFICIO DESDE LA PERSPECTIVA COSTE-EFICACIA

Desde el punto de vista de la Directiva Europea, las medidas de mejora de la eficiencia energética para rehabilitación o construcción de nuevos edificios, deben considerar su rentabilidad y su relación coste-eficacia, por lo que se decide analizar estos parámetros para cada uno de los escenarios planteados.

En primer lugar, se ha realizado un estudio del coste de materiales para las diversas configuraciones de fachada. En los precios no se incluye la mano de obra, tan solo el coste del material, y todos ellos se indican por m², para poder realizar una comparación lineal en cada situación.

Las configuraciones estudiadas constituyen 4 escenarios de cerramiento, siendo estos los estudiados anteriormente.

ACRIS. MONO. 6mm					
m ² . Acristalamiento con vidrio monolítico incoloro de 6 mm de espesor.					
Código	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Importe total
MONO. 6mm	1,00	m ²	Vidrio monolítico incoloro de 6 mm de espesor.	16,8	16,8
				Precio Total por m ² :	16,8

DOBLE ACRIST. 6+16+6					
m ² . Doble acristalamiento. Cámara de aire. Espesores: 6+16+6. Características: g = 77,1 %, transmisión sola directa = 72,2%, transmisión de luz = 81,9%, valor U = 2,7 W/m ² K)					
Código	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Importe total
DOB	1,00	m ²	Doble acristalamiento. 6+16+6	38,11	38,11
				Precio Total por m ² :	38,11

DOBLE ACRIST. CON CONTROL SOLAR 6+16+6					
m ² . Doble acristalamiento con control solar en la cara 2. Cámara de aire. Espesores: 6+16+6. Características: g = 58,8 %, transmisión sola directa = 53,1%, transmisión de luz = 61%, valor U = 2,6 W/m ² K)					
Código	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Importe total
DOB+CS	1,00	m ²	Doble acristalamiento con lámina de control solar. 6+16+6	75,83	75,83
				Precio Total por m ² :	75,83

ALERO					
m ² . Formación de alero, incluso accesorios, piezas especiales y elementos de anclaje.					
Código	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Importe total
ALE	1,00	m ²	Alero.	169,7	169,7
				Precio Total por m ² :	169,7

Tabla 23. Precio / m² de materiales.

También se realiza el estudio de los consumos de combustibles durante todo un año. Por un lado, se analiza el consumo de gas, debido al consumo en calefacción durante todo el año y por otro de electricidad debido al consumo de la instalación de refrigeración realizada con bomba de calor y de la iluminación estimada para la vivienda.

Para el análisis de coste, se ha tenido en cuenta un precio de 0,0247 €/kWh para el gas y de 0,0946 €/kWh para la energía eléctrica. Estos datos han sido recabados de las tarifas de las compañías suministradoras, vigentes en enero de 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. ANÁLISIS PREVIOS.

- 7.1.1. Selección del prototipo. (Fase 1)
- 7.1.2. Elección de los sistemas pasivos. (Fase 2)

7.2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.

- 7.2.1. Construcción y monitorización de los modelos a escala. (Fase 3 y 4)
- 7.2.2. Verificación estacional de los datos registrados durante la monitorización de los modelos a escala. (Fase 5)
- 7.2.3. Elección de registro de datos representativos y análisis de datos experimentales. (Fase 6)

7.3. ANÁLISIS COMPUTACIONAL.

- 7.3.1. Validación del análisis computacional (Fase 7).
- 7.3.2. Estudio energético a través de simulaciones y rentabilidad del edificio desde la perspectiva coste-eficacia. (Fase 8 y 9).

7. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos planteados tras aplicar la metodología descrita en el capítulo anterior. Los resultados se van a agrupar en tres grandes subapartados, que incorporan los resultados obtenidos en todas las fases desarrolladas en la investigación y atendiendo a si el análisis de los mismos ha sido previo, experimental o computacional, tal y como se explica a continuación.

En primer lugar, tras el estudio bibliográfico, se selecciona el edificio que va a servir como referencia y las estrategias pasivas a implementar (fase teórica) (Figura 76).

Figura 76. Fases del análisis teórico del capítulo de resultados.

Seguidamente se analizan los datos térmicos y lumínicos obtenidos durante el periodo de monitorización (fase experimental) (Figura 77).

Figura 77. Fases del análisis experimental del capítulo de resultados.

Por último, se realizan simulaciones para la obtención de los resultados basados en parámetros energéticos (fase computacional) (Figura 78).

Figura 78. Fases del análisis computacional del capítulo de resultados.

7.1. ANÁLISIS PREVIOS

A continuación, se presentan los datos obtenidos en las dos primeras fases definidas en la metodología en los puntos 6.1 y 6.2. alcanzando los siguientes resultados: la selección del prototipo y la elección de las estrategias pasivas.

7.1.1. Selección del prototipo. (Fase 1)

En los siguientes apartados se muestra la elección del edificio de referencia, su ubicación y la climatología existente en ese emplazamiento.

7.1.1.1. Elección y caracterización del edificio de referencia

Después de realizar una minuciosa búsqueda bibliográfica de diferentes edificaciones con fachadas de vidrio y de marcar, en el capítulo de metodología, los criterios para seleccionar la vivienda que se pretende utilizar como referencia, para construir los modelos a escala y lograr los objetivos marcados, se analizan las viviendas unifamiliares según se muestra en la Tabla 24:

VIVIENDA	Todas sus fachadas acristaladas	Próximo a latitud 40° N. aprox.	Sencillez arquitectónica	Inconvenientes energéticos.	Referente en la arquitectura.
La Casa del Desierto. Granada (España)	✓	✓	✓		
La Casa de Cristal. Bornholm (Dinamarca)	✓			✓	
Brandywine house. Washington (EEUU)		✓			
Vivienda Rietveld Huis. Ijburg (Amsterdam)			✓		
Farnsworth 33. Ávila (España)	✓	✓	✓	✓	
El Pabellón Escondido. Las Rozas de Madrid (España)	✓	✓	✓		
House R128. Stuttgart (Alemania)	✓		✓		
Casa de Cristal Church Point. Australia	✓		✓	✓	
Casa de Miami. Tokio (Japón)			✓		

VIVIENDA	Todas sus fachadas acristaladas	Próximo a latitud 40° N. aprox.	Sencillez arquitectónica	Inconvenientes energéticos.	Referente en la arquitectura.
Glass House. Connecticut. (EEUU)	√	√	√		
La Casa del Bosque. Milán (Italia)	√		√		
La Casa del Mar. Milán (Italia)	√		√		
La Casa Farnsworth. Illinois. (EEUU)	√	√	√	√	√
Meier Architekten Zurich. (Suiza)			√		
Innenarchitektur. Berlín (Alemania)	√		√		
Flexhouse. Zurich (Suiza)					
Casa en el lago. Ámsterdam (Países Bajos)	√				
Architekturbüro Dongus. Luxemburgo (Alemania)			√		
Kauffman thelig & partner Ostfildern (Alemania)					

Tabla 24. Comparativa de viviendas con fachadas de vidrio.

Finalmente, la vivienda seleccionada y que ha servido de base para hacer los correspondientes estudios de esta investigación es la Casa Farnsworth, por su ubicación, por estar resuelta con fachadas de vidrio en todas sus orientaciones, por su sencillez arquitectónica, por los problemas energéticos que acarreó y por el hito que marcó en la historia de la arquitectura.

“Farnsworth House” recibe el nombre por el apellido de su inicial propietaria precursora de la construcción, la cual deseaba una vivienda de fin de semana para su descanso.

Edith Farnsworth, una destacada nefróloga de Chicago, había adquirido un solar boscoso, donde encontrarían las mínimas restricciones funcionales, siendo un emplazamiento aislado de núcleos urbanos y en constante contacto con la naturaleza (Figura 79).

El diseño y la ejecución fue dirigida por el arquitecto alemán Ludwig Mies van der Rohe. La construcción se llevó a cabo entre los años 1946-1951, con gran sencillez arquitectónica y perfección en los detalles constructivos, constituyendo un ejemplo pionero y paradigmático del minimalismo (Maritz Vandenberg, 2005).

Figura 79. Construcción de la Casa Farnsworth. Estructura de acero. Fuente: (Arquitectura, 2009)

La vivienda no dispone de divisiones interiores, más que el núcleo central y un armario que separa la cama, por ello se podría hablar más que de un espacio fluido y abierto, de un espacio contemplativo: *“la naturaleza también debería tener su vida propia. Deberías cuidarnos de no perturbarla con el colorido de nuestras casas y con el mobiliario interior, sino que deberíamos intentar conseguir establecer una mayor armonía entre la naturaleza, las casas y el ser humano. Cuando se mira a la naturaleza a través de las paredes de vidrio de la Casa Farnsworth, ésta adquiere un significado más profundo que cuando uno está afuera. De esta manera se realza la naturaleza, que pasa a formar parte de un todo mayor.”* (Mies van der Rohe en conversación con Christian Norberg-Schultz, en *Baukunst und Werkform*, 11 de noviembre de 1958) (Schulze & Windhorst, 2016).

Figura 80. Interiores de la Casa Farnsworth. Fuente: (Arquitectura, 2009)

Para poder lograr una neutralidad de los tonos, la paleta de materiales es muy restringida: perfiles de acero pintados en blanco, cortinas blancas, *“el blanco era el color adecuado en el campo, contra el verde”* (entrevista para la BBC, 1959), techo de escayola blanco, vidrio reflectante de una hoja de 6 mm de espesor, pavimento de losa de travertino italiano, contrachapado de pino para el recubrimiento del núcleo de servicios y de teca para el armario que separa la cama. *“creo que nunca se ha entendido realmente la Casa Farnsworth. Yo mismo he estado en esta casa desde la mañana a la noche y hasta entonces no supe cuán cargada puede estar de colores de la Naturaleza. Hay que poner mucho cuidado en poner tonos neutros en los espacios interiores, pues en el exterior ya hay todo tipo de colores. Estos colores cambian por completo de una manera continua, y me gustaría decir que es simplemente soberbio”* (entrevista con Mies van der Rohe, BBC, Julio de 1959) (Puente, 2006).

La Casa Farnsworth es un diseño de gran elegancia y precisión, donde todo estaba meditado llegando a enfatizar las proporciones con espacios abiertos y neutrales. Es un lugar acogedor a pesar de sus materiales fríos y un espacio en constante contacto con el medio exterior. *“La naturaleza se convierte en una imagen detrás del vidrio, montada en un marco formado por el techo, el suelo, y los pilares. Un hombre en el interior de la casa es un observador alejado que no está expuesto a las fuerzas de la naturaleza. A pesar de la transparencia, conserva la sensación de envolvente protectora; no se elimina la separación entre exterior e interior. No obstante, en contraposición a la arquitectura convencional de muros y ventanas, la vista a través de los vidrios a toda altura permite una intervención más activa con el mundo exterior. (...)”* escrito por Hans-Christian Schink para G2. (Arquitectura, 2009)

La Casa Farnsworth tenía problemas de confort, tanto en estaciones frías como calurosas (Figura 81) por ello algunos autores la referencian en sus bibliografías, mostrándola como ejemplo y expresando soluciones constructivas que en aquella época Mies evitó, presumiblemente por no destruir la hermosa simplicidad de su vidrio y acero.

Figura 81. La Casa Farnsworth en distintas estaciones climatológicas. Fuente: (Vandenberg, 2003).

Según indica Guillermo Yáñez Parareda en su libro “Arquitectura solar e iluminación natural” (Guillermo Yáñez Parareda, 2008), la casa Farnsworth planteó graves problemas de sobrecalentamiento en verano, sobre todo por ventilación natural insuficiente, que atenuase el efecto invernadero y por la ausencia de protección solar que redujese las ganancias solares.

Por otra parte, la vivienda se enfriaba mucho en invierno por la escasa resistencia térmica del cerramiento vítreo. En algún momento su propietaria llegó a decir que “esa caja de cristal” era inhabitable. (Parareda, 2008). Por lo que existe un alto

interés en su estudio, debido a los problemas energéticos que tenía por su alto consumo en climatización.

La casa Farnsworth fue icono en su época, al tratarse de una de las primeras viviendas de concepto abierto, recogida en una simple estructura metálica que se cierra con vidrio por todo su perímetro, permitiendo una fuerte relación con el entorno y manteniendo la conexión con la naturaleza, siendo a su vez esencia de la simplicidad en un único volumen de líneas rectas.

Desde el punto de vista constructivo la vivienda se eleva 1,6 m del terreno, no solo para poder disponer de mejores vistas, sino también por encontrarse en una zona inundable por la cercanía al Río Fox. Una plataforma con un pavimento de travertino italiano sirve para mediar entre el terreno y el porche cubierto de la casa, una vez alcanzado el porche, se accede a la casa tras efectuar un giro de 90°. La casa no toca el terreno y deja que la mirada desde lejos la atraviere tanto por debajo como por el porche y a través de los vidrios, dejando únicamente visible las franjas blancas horizontales de los forjados (Figura 82).

Figura 82. Fachada principal y posterior de la Casa Farnsworth.

En el interior solo se dispone de un volumen central longitudinal que tiene dos aseos y un pequeño cuarto de instalaciones por donde desaguan las bajantes que recogen el agua de la cubierta (Figuras 83 y 84).

Figura 83. Núcleo central de la Casa Farnsworth. Fuente: (Vandenberg, 2003)

Figura 84. Planta y sección de la Casa Farnsworth.

La casa tiene una superficie total de 198,2 m², con una planta rectangular de 8,45 m x 23,46 m y una altura libre de 2,9 m. De dicha superficie, 59,00 m² corresponden al porche (7,2 m de longitud) que se dispone en su orientación oeste y se encuentra abierto al exterior.

La estructura está formada por ocho perfiles en “H” colocados en los lados largos del rectángulo y separados 6,6 m entre sí. Estos perfiles sustentan las dos bandejas de los forjados, quedando la edificación abierta al exterior a través del cierre con vidrio monolítico, de 6 mm de espesor que conforma las fachadas de las cuatro orientaciones.

Dichos vidrios se asientan directamente sobre un canal estructural, formado por una perfilera de acero pintada en blanca. Esto se puede ver reflejado en la Figuras 85 y 86.

Figura 85. Encuentro de vidrio con carpintería metálica.

Figura 86. Detalle de carpintería metálica. Fuente: (Vandenberg, 2003)

Uno de los grandes problemas del diseño constructivo, fue la condensación que se producía en los acristalamientos, debido al salto térmico tan importante que existía (sobre todos en estaciones frías) entre el exterior y el exterior de la vivienda. (Vandenberg, 2003)

Además, los únicos huecos practicables de la vivienda son (Figura 87), por un lado, la puerta de acceso situada en la fachada oeste y que comunica con el porche exterior, y dos ventanas batientes situadas en la parte inferior de la fachada este. Esto también fue un problema a la hora de intentar disipar el calor interior, la ventilación cruzada era ineficiente e inadecuada y se sumaba la falta de protección solar en las orientaciones sur y este. (Vandenberg, 2003)

Figura 87. Huecos practicables en la Casa Farnsworth.

Del resto de la estructura cabe mencionar, que el forjado superior que conforma la cubierta está compuesto por un encachado de piedra que descansa sobre una membrana asfáltica impermeable en la cara externa, aislamiento de fibra de vidrio, placa de hormigón armado prefabricado y techo de escayola continuo por el interior que descuelga del forjado sustentado por una perfilería auxiliar.

El forjado inferior está formado de baldosa de mármol travertino, se trata el acabado que se ve en el interior de la vivienda, sobre una cama de mortero, encachado de piedra, un aislamiento de fibra de vidrio y unas losas alveolares de hormigón prefabricado. Todo esto se puede ver reflejado en la Figura 88.

Figura 88. Detalle constructivo forjado superior e inferior. Fuente: (Archives at the Museum of Modern, 1976)

7.1.1.2. Situación del edificio de referencia y características climáticas de la zona

La casa Farnsworth está situada en la ciudad de Plano, dentro del condado de Kendall, en el Estado de Illinois (Estados Unidos), a unos noventa kilómetros aproximadamente de Chicago. Las coordenadas geográficas de la vivienda son: latitud: 41°38'5.9"N y longitud: 88°32'8.6"O. La Figura 89, muestra el emplazamiento de la Casa Farnsworth.

Figura 89. Situación y emplazamiento de la Casa Farnsworth. Fuente: Google maps.

Su ubicación es próxima a la orilla norte del Río Fox y se encuentra rodeada por vegetación a lo largo de las 3,9 Ha de superficie con las que cuenta la parcela en la que se sitúa.

La Casa Farnsworth se ha visto afectada en varias ocasiones por el agua de las crecidas del Río Fox, sin ser sus daños muy perjudiciales debido a que se encuentra sobreelevada del terreno 1,60 m (Figura 90). No obstante, en el año 2008 a causa del huracán Ike la casa quedó con 40 cm de agua en su interior.

Figura 90. Proximidad de la Casa Farnsworth al Río Fox y detalle de elevación con respecto al terreno.

En cuanto al clima de Chicago, que en su día no se tuvo en cuenta para la elección de la tipología de vidrios seleccionados, se caracteriza por veranos calientes y húmedos y los inviernos son fríos y ventosos. Durante el transcurso del año la temperatura generalmente varía de -6°C a 28°C y rara vez baja a menos de -15°C o sube a más de 33°C .

En la siguiente Figura 91 se muestra la temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diarias. Las líneas punteadas son las temperaturas promedio percibidas.

Figura 91. Temperatura máxima y mínima promedio en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

En Chicago el promedio del porcentaje del cielo cubierto con nubes varía considerablemente en el transcurso del año. Los meses con cielos más despejados corresponden a junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En la siguiente Figura 92 se muestra el porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto.

Figura 92. Porcentaje de nubosidad en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

El periodo más lluvioso en Chicago corresponde a la banda móvil de 31 días centrados alrededor del 1 de junio. La Figura 93 muestra la lluvia promedio (línea continua) acumulada en un periodo de 31 días. La línea delgada punteada es el equivalente de nieve en líquido promedio correspondiente.

Figura 93. Lluvia promedio acumulada en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

La duración del día en Chicago varía considerablemente durante el año. En 2018 el día más corto fue el 21 de diciembre con 9 horas y 8 minutos de luz natural y el día más largo el 21 de junio con 15 horas y 14 minutos.

En la siguiente Figura 94 la cantidad de horas durante las cuales el sol esta visible (línea negra).

Figura 94. Cantidad de horas durante las cuales el sol esta visible en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

7.1.2. Elección de los sistemas pasivos. (Fase 2)

Tras un análisis profundo de la bibliografía, se decide trabajar sobre dos estrategias pasivas bien diferenciadas. Por una parte, debido al desarrollo que en los últimos años se ha experimentado con el vidrio, se seleccionan varios modelos de vidrios para poder ser analizados con profundidad. Por otra parte, debido a los buenos resultados que se han obtenido en otras investigaciones consultadas, se instalarán a los modelos a escala voladizos.

Inicialmente se han simulado 30 modelos con diferentes combinaciones de estrategias pasivas, de las cuales se han seleccionado las 5 más representativas para realizar un estudio energético minucioso.

En la Tabla 25 se muestran las características de las estrategias incorporadas en las distintas fachadas para cada una de las simulaciones realizadas.

Nomenclatura	Modelo	Características
MB	Modelo base	Vidrio sencillo de 6 mm de espesor en todas las orientaciones.
EVS	Modelo 1	Vidrio sencillo de 6 mm de espesor en orientación Norte y Oeste, y vidrio sencillo de 6 mm de espesor con Lámina de Control Solar (LCS) en orientación Este y Sur.
EVD+LCS	Modelo 2	En orientaciones Norte y Oeste vidrio (6+16+6) mm y en orientaciones Sur y Este vidrio (6+16+6) mm con LCS.
EVD+VO6.6+VS	Modelo 3	Vidrio (6+16+6) mm en todas las orientaciones. Además, en Sur voladizo de 1,80 m y en Este voladizo de 6,60 m de longitud.
EVD+VO1.8+VS	Modelo 4	Vidrio (6+16+6) mm en todas las orientaciones. Además, en Sur y Este voladizo de 1,80 m de longitud.
EVD	Modelo 5	Vidrio (6+16+6) mm en todas las orientaciones.

Tabla 25. Combinación de estrategias pasivas simuladas.

Todos se caracterizan por tener la misma geometría y las mismas propiedades constructivas, en forjado de cubierta y en el forjado de suelo diferenciándose, por tanto, en la estrategia pasiva implementada o no en sus diferentes fachadas.

Se adjunta ficha del fabricante de los paneles instalados, Figura 95:

Panel frigorífico para bajos espesores		Isoterm-1000 (bajo espesor)	
Esesor panel (mm)	40
Transmitancia Térmica			
Kcal/m ² h°C	0,46		
W/m ² °C	0,52		
Ancho útil (mm)	1.000		

Figura 95. Características técnicas de los paneles sándwich instalados. Fuente: Metalpanel.

Los vidrios de ambos modelos que conforman la vivienda han sido colocados sobre los perfiles metálicos sin tener contacto directo con estos, debido a que se han colocado sobre bandas de neopreno que aíslan el puente térmico entre el vidrio y el metal.

El modelo a escala de referencia está compuesto de acristalamientos monolíticos de 6 mm de espesor en sus cuatro orientaciones. Dicho vidrio dispone de las siguientes especificaciones técnicas facilitadas por el fabricante:

Propiedades	Vidrio sencillo de 6 mm (Clear Float Glass)
Transmisión solar Total SHGC “g” (%)	86,0
Transmisión solar Directa (%)	78,0
Transmisión de luz (%)	89,0
Valor U (ISO 10292) (W/m ² K)	5,7

Tabla 26. Especificaciones técnicas modelo de referencia. Fuente: Guardian Glass.

El modelo mejorado dispone en las fachadas con orientación Sur, Este y Oeste de vidrios dobles (6+16+6) mm con lámina de control solar en la cara 2. Este tipo de acristalamiento cuenta con una transmitancia térmica de 2,6 W/m²·K.

En la fachada Norte se ha dispuesto de un vidrio (6+16+6) mm, con transmitancia térmica de 2,7 W/m²·K. En la Figura 96 se muestra el esquema de los vidrios utilizados en cada una de las orientaciones:

SunGuard Solar Neutral 67				DA Convencional											
Fachada Sur, Este y Oeste.				Fachada Norte											
Outdoors				Outdoors											
GLASS 1	Guardian Float Glass ExtraClear (CE)			#1	GLASS 1	Guardian Float Glass ExtraClear (CE)			#1						
	Thickness = 6mm			#2		Thickness = 6mm			#2						
GAP 1		100% Air, 16mm (.630")				GAP 1		100% Air, 16mm (.630")							
GLASS 2	Guardian Float Glass ExtraClear (CE)			#3	GLASS 2	Guardian Float Glass ExtraClear (CE)			#3						
	Thickness = 6mm			#4		Thickness = 6mm			#4						
Total Unit (Nominal) = 1 3/32 in / 28 mm				Indoors				Total Unit (Nominal) = 1 3/32 in / 28 mm				Indoors			
Estimated Nominal Glazing Weight: 29.19 kg/m²								Estimated Nominal Glazing Weight: 29.19 kg/m²							

Figura 96. Disposición de vidrios en el modelo mejorado.

Dichos vidrios disponen de las siguientes especificaciones técnicas facilitadas por el fabricante:

Propiedades	Doble acristalamiento (DA Convencional)	Doble acristalamiento + LCS (SunGuard Solar Neutral 67)
Transmisión solar Total SHGC “g” (%)	77,1	58,8
Transmisión solar Directa (%)	72,2	53,1
Transmisión de luz (%)	81,9	61,0
Valor U (ISO 10292) (W/m² K)	2,7	2,6

Tabla 27. Especificaciones técnicas vidrios modelo mejorado.

En la Figura 97 se muestra un detalle constructivo de los perfiles que soportan los cerramientos de vidrio.

Figura 97. Detalle constructivo, perfiles de soporte de vidrios.

En este análisis de simulaciones preliminares se han obtenido los siguientes resultados en relación con la demanda y al consumo de los equipos de refrigeración y calefacción que mantienen las mismas propiedades en todos los escenarios analizados.

La Figura 98 recoge la demanda de los equipos de climatización requerida en cada uno de los casos.

Figura 98. Demanda de sistemas de calefacción y refrigeración (kW)

Respecto a la incorporación de vidrios dobles (6+16+6) mm, en los modelos 2, 3, 4 y 5, en todas sus fachadas con o sin lámina de control solar, mejora la demanda energética, principalmente, asociada a la demanda de calefacción del orden del 29% respecto del modelo base.

En la demanda en refrigeración, es de destacar que los modelos 1 y 5, junto al modelo base, son los que requieren mayor demanda energética en refrigeración, debido a que no disponen de LCS ni de voladizo. La ganancia de calor por radiación solar en estos modelos es semejante, atribuyendo la diferencia, en relación con el modelo base, al efecto de lámina de control solar y al doble vidrio en los respectivos modelos.

En cuanto a la incorporación de LCS, el modelo 1, en el que se sustituye los vidrios sencillos, de las fachadas sur y este, por vidrios sencillos con LCS, la demanda de calefacción prácticamente es la misma que la del modelo base,

mejorando ligeramente la demanda de refrigeración. En consecuencia, la utilización de vidrios sencillos con LCS no mejora sustancialmente la demanda de climatización del modelo de edificación elegido.

Del análisis de los modelos 2 y 5 observamos que el modelo 2, con lámina de control solar en sus fachadas sur y este, prevé una demanda de refrigeración de hasta 5 kW menos que la correspondiente al modelo 5, lo que representa un 23,5% menos de demanda energética. Se atribuye este comportamiento al hecho de que el modelo con lámina de control solar (modelo 2), deja pasar menos radiación solar hacia el interior de la edificación, que el modelo con vidrios dobles (6+16+6) mm (Figura 99). Por tanto, la LCS tiene un efecto mucho mayor con acristalamientos dobles con cámara, que en acristalamientos sencillos.

En cuanto a la demanda de refrigeración se obtiene una mejora en el modelo 3 con relación a los modelos 2 y 5 del 25,8% y del 43,2% respectivamente. Por tanto, la incorporación de voladizos es la medida más eficiente para disminuir la demanda de refrigeración, consiguiendo potencias análogas a los sistemas de calefacción.

Referente a la incorporación de voladizos, los modelos 3 y 4 tienen un comportamiento semejante a los modelos 2 y 5 en la demanda de calefacción. En cuanto a la demanda de refrigeración se obtiene una mejora en el modelo 3 con relación a los modelos 2 y 5 del 25,8% y del 43,2% respectivamente. Por tanto, la incorporación de voladizos es la medida más eficiente para disminuir la demanda de refrigeración, consiguiendo potencias análogas a los sistemas de calefacción.

Comparando los modelos 3 y 4 comprobamos que la demanda de refrigeración es de un 8,6% menos el modelo 3 que en el modelo 4. Este resultado se atribuye a la diferencia en la ganancia de radiación solar a través de los vidrios en las primeras horas de la mañana debido al sobredimensionado del voladizo en la fachada Este, en el modelo 3. Por tanto, la dimensión del voladizo en la fachada este no influye de forma muy significativa.

Figura 99. Ganancias solares por los acristalamientos. (kW)

En la Figura 100 se muestran las simulaciones realizadas a lo largo de una semana típica de invierno (entre el 1 y el 7 de diciembre) y para una semana típica de verano (entre el 1 y el 7 de agosto). Mostrando los consumos en calefacción y refrigeración del modelo base y de los cinco modelos propuestos, en función de las estrategias pasivas diseñadas en cada uno de ellos y a partir de las programaciones estipuladas para todos por igual.

Los resultados muestran que la solución más idónea, para una edificación singular, como la que se ha tomado como referencia, situada en clima mediterráneo-continental con las condiciones de temperatura de consigan primaria y secundaria consideradas en el programa, corresponde al modelo 3. Esto significa que la combinación de voladizos en las fachas sur y este con acristalamiento en sus fachadas de un vidrio (6+16+6) mm, es la estrategia pasiva que mejor optimiza la demanda energética de la edificación.

Figura 100. Consumos de calefacción y refrigeración. (kWh)

Se pone de manifiesto, por un lado, que, comprobando los dos modelos de voladizos calculados, con los criterios definidos en esta investigación, el voladizo de 6,60 m de longitud respecto al de 1,80 m de longitud, ambos en fachada este, no supone una mejora sustancial en cuanto a la demanda de energía en refrigeración, pudiendo ser, por el contrario, significativo la disminución de iluminación natural en los meses no estivales. Por otro lado, las LCS, en la segunda cara del vidrio, en las fachadas este y sur, sin voladizos, produce un incremento de la radiación solar reflejada por la lámina que eleva de forma considerable la temperatura de la superficie exterior del segundo vidrio, lo que implica un incremento del calor, en el interior, que debe compensarse con un aumento de energía en refrigeración para mantener las temperaturas de consigna establecidas.

Tras este análisis preliminar, de diferentes escenarios en los modelos a escala y realizado a través de simulaciones energéticas con el programa Design Builder ©, se sacan conclusiones parciales que serán comparadas con los resultados obtenidos en las simulaciones finales.

Los resultados previos obtenidos en este análisis nos indican:

- Incorporar vidrios sencillos con LCS en las fachadas este y sur no presenta una mejora energética significativa, en la demanda de calefacción en relación con el modelo original. En la demanda de refrigeración la disminución del sistema es de un 7,3%.

- Incorporar vidrios dobles en todas las orientaciones, y comparándolo con un modelo de vidrios dobles con LCS en sus fachadas este y sur, no supone una disminución en la demanda del sistema de calefacción (igual que ocurría con los vidrios sencillos), pero si se observa una gran disminución de demanda de energía en el equipo de refrigeración, siendo esta de un 30,7%.
- Sustituir vidrio simple, por doble acristalamiento, supone una disminución del sistema de calefacción de un 28,3% y en el sistema de refrigeración de un 11,5%. En los mismos modelos, pero ambos con LCS en sus fachadas este y sur, supone la misma disminución en el diseño del sistema de calefacción (28,3%) y en refrigeración el equipo se minora un 27,0%. Esto es debido a que la LCS impide la entrada de energía calorífica proveniente de la radiación solar, reflejando hacia el exterior las ganancias que podamos tener en las zonas más expuestas de la edificación y protegiendo así del sobrecalentamiento en el interior.
- Incorporar voladizos en las fachadas este y sur, diseñados con una longitud de 6,60 m y 1,80 m, suponen una disminución en el sistema de refrigeración de un 43,2% y 37,9% respectivamente. Siendo la diferencia inapreciable para el sistema de calefacción. Voladizos superiores a 1,80 m en la fachada Este, no conlleva diferencia energética relevante en el sistema de refrigeración, siendo esta de 5,3%, pudiendo ser, por el contrario, significativo la disminución de iluminación natural en los meses de verano.

Basándonos en estas consideraciones se construyen los dos modelos a escala, uno como referencia, con la configuración originaria que tiene la Casa Farnsworth y otro como mejorado con la incorporación de voladizos y de vidrios de altas prestaciones.

7.2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

A continuación, se presentan los datos obtenidos en las fases 3, 5 y 6 definidas en la metodología en los puntos 6.3, 6.5 y 6.6. Alcanzando los siguientes resultados: construcción de los modelos a escala, verificación estacional y anual de los datos recabados durante el periodo de monitorización, elección del periodo de tiempo más representativo, para finalmente realizar el análisis de datos, de temperatura e iluminación, obtenidos en ese intervalo.

7.2.1. Construcción y monitorización de los modelos a escala. (Fase 3 y 4)

En los siguientes apartados se muestra la ejecución y la caracterización de los modelos a escala, su ubicación y la climatología existente en ese emplazamiento.

7.2.1.1. Ejecución y caracterización del edificio de referencia.

La construcción de los modelos a escala se realizó con perfiles de tubo metálico para los pilares y con angulares en forma de “L” para los bastidores que sustentan los forjados, realizados con paneles sándwich como se muestra en la Figura 101:

Figura 101. Ejecución de modelos a escala.

Los vidrios de ambos modelos que conforman la vivienda han sido colocados sobre los perfiles metálicos sin tener contacto directo con estos, debido a que se han colocado sobre bandas de neopreno que aíslan el puente térmico entre el vidrio y el metal, como se puede ver reflejado en las imágenes recogidas en la Figura 102:

Figura 102. Detalle de bandas de neopreno en los perfiles.

Los vidrios instalados, en el modelo de referencia, son sencillos de 6 mm de espesor, como se muestra en la Figura 103.

Figura 103. Instalación de vidrios sencillos en el modelo a escala.

Para el modelo mejorado se instalaron: (Figura 104)

- Vidrio de doble acristalamiento (6+16+6) mm, denominado “DA convencional”; en la orientación norte.
- Vidrio de doble acristalamiento (6+16+6) mm y lámina de control solar (LCS) situada en la cara dos del acristalamiento, siendo su denominación “SunGuard Solar Neutral 67”, en el resto de las orientaciones.

Figura 104. Instalación de vidrios mejorados en el modelo a escala.

A los modelos a escala se les dotó de ventilación natural a través de un sistema que garantiza la circulación del aire de los locales secos a los húmedos. Esta ventilación simula la ventilación natural existente en la vivienda originaria, no teniéndose en cuenta como estrategia para ser analizada. Se ejecutaron en los cuatro vértices del perímetro del forjado inferior de los modelos, cuatro perforaciones de diámetro 6 cm (área 28 cm²) por donde entraría el aire limpio y en el núcleo central que simula la zona de cuartos húmedos, se instalaron en la parte superior del paramento dos perforaciones en cada uno de los lados largos del núcleo, con una perforación de 6 cm (área 28 cm²). Y por la parte superior de este núcleo húmedo se realizó la salida para conectar con la chimenea exterior (Figura 105).

Figura 105. Hueco en núcleo central y hueco en forjado inferior.

La ventilación eólica, que se muestra en la Figura 106, se realizó a través de un elemento dinámico compuesto por unas aspas que se movían en función de la corriente y la velocidad del aire.

Figura 106. Incorporación de ventilación natural en modelos a escala.

Además, otra estrategia pasiva que se llevó a cabo en los modelos a escala durante una parte de la estación de verano (del 21 de junio al 31 de julio de 2018) fue la incorporación en ambos modelos de un voladizo en las fachadas sur y este de 0,30 m de longitud (1,80 m reales), como se muestra en la Figura 107.

Figura 107. Modelos a escala con voladizos en fachada sur y este.

En el Anexo 3 se muestra una secuencia fotográfica del proceso constructivo de los modelos a escala.

7.2.1.2. Situación de los modelos a escala y características climáticas de la zona

Los modelos a escala se situaron en el interior del complejo de la Escuela Técnica Superior de Edificación, de la Universidad Politécnica de Madrid (España) que dispone de unas coordenadas geográficas de, latitud: 40°26'22.1"N y longitud: 3°43'58.1"O. (Figura 108)

Figura 108. Ubicación de los modelos a escala dentro del complejo de la Escuela Técnica Superior de Edificación.

Por tanto, comparando las coordenadas geográficas (Figura 109), la vivienda originaria situada en Plano (Illinois) difiere en latitud tan solo 1º norte (la distancia sería de unos 111 Km aproximadamente), respecto al posicionamiento de los modelos a escala en Madrid (España).

Figura 109. Ubicación de la edificación originaria y la situación final de los modelos a escala.

De esta manera la edificación de vidrio es analizada en Madrid dentro del dominio climático mediterráneo-continental matizado por su ubicación en el interior de la Península Ibérica y está caracterizado principalmente por la estacionalidad de las temperaturas, la sequía estival y la irregularidad de las precipitaciones a lo largo del año (Gomez, Martín, & Salas, 2015).

En Madrid la climatología se caracteriza por veranos muy calientes, secos y mayormente despejados y los inviernos son muy fríos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año la temperatura generalmente varía de 0°C a 33°C y rara vez baja a -5°C o sube a 42°C

A continuación, se presenta el comportamiento de las variables climatológicas, en la Figura 110 se muestra la temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diarias. Las líneas punteadas son las temperaturas promedio percibidas.

Figura 110. Temperatura máxima y mínima promedio en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

En Madrid el promedio del porcentaje del cielo cubierto con nubes varía considerablemente en el transcurso del año. Los meses con cielos más despejados corresponden a junio, julio, agosto y septiembre (periodo más corto que en Chicago). En la siguiente Figura 111 se muestra el porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto.

Figura 111. Porcentaje de nubosidad en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

El periodo más lluvioso corresponde a la banda móvil de 31 días centrados alrededor del 27 de octubre. La Figura 112 muestra la lluvia promedio (línea continua) acumulada en un periodo de 31 días. La línea delgada punteada es el equivalente de nieve en líquido promedio correspondiente.

Figura 112. Lluvia promedio acumulada en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

La duración del día en Madrid varía considerablemente durante el año. En 2018 el día más corto fue el 21 de diciembre con 9 horas y 17 minutos de luz natural y el día más largo el 21 de junio con 15 horas y 4 minutos.

Al comparar estos datos con las horas de luz de Chicago se observan datos prácticamente iguales, esto es debido a que ambos sitios se encuentran en latitud similar. En la Figura 113 se muestra la cantidad de horas durante las cuales el sol esta visible (línea negra).

Figura 113. Cantidad de horas durante las cuales el sol está visible en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)

Como se ha mencionado, los modelos a escala fueron posicionados dentro del complejo de la Escuela Superior de Edificación, orientándolos hacia el norte geográfico y el modelo mejorado fue separado 2 metros hacia el norte del modelo de referencia, para evitar la interferencia de sombras entre los propios modelos.

Figura 114. Posicionamiento y orientación de los modelos a escala.

No obstante, los modelos quedan cubiertos parcialmente por sombras debido al módulo noroeste del edificio de la Escuela de Edificación.

Figura 115. Edificio de la ETSEM que arroja parcialmente sombra a los modelos a escala.

Como se puede observar en la Figura 116, donde se presentan los patrones de sombra del modelo de referencia (color rojo) y el patrón de sombras del modelo a mejorado (color verde), ambos modelos reciben sombra del edificio de la ETSEM durante el amanecer, debido a que sus acimut son negativos.

Figura 116. Patrones de sombra de los modelos a escala.

En el caso del modelo de referencia, recibe sombra durante los meses de marzo y septiembre desde el alba hasta las 6:30 am, abril y agosto hasta las 7:30 am, mayo y julio hasta las 8:30 am y junio hasta las 9:30 am.

Y en el modelo mejorado, se recibe sombra en diciembre desde el amanecer hasta las 7:30 am, en enero y noviembre hasta las 8:00 am, en febrero y octubre hasta las 8:30 am, en marzo y septiembre hasta las 9:00 am, en abril y agosto hasta las 9:45 am, en mayo y julio hasta las 10:15 am y en junio hasta las 10:30 am.

Como se puede observar, la diferencia horaria entre el comienzo de la sombra y el fin, entre un modelo y otro, está en torno a dos horas. Además, a partir de las 10:30 am, ninguno de los modelos recibe sombra arrojada, por lo que se toman estos datos de referencia para poder realizar las comparaciones oportunas en los análisis y de esta manera poder analizar de forma certera los resultados.

7.2.2. Verificación estacional de los datos registrados durante la monitorización de los modelos a escala. (Fase 5)

En este apartado se presentan los intervalos de variación de los datos obtenidos en ambos modelos a escala y en cada una de las estaciones climatológicas, con el objetivo de indicar de forma resumida el comportamiento de la temperatura superficial y de la iluminancia, a través de los datos recogidos en la fase experimental.

- Temperaturas superficiales:

La Tabla 28 muestra estacionalmente el intervalo de variación para temperatura superficial, de sus valores mínimos, máximos, medios y desviación estándar (σ).

VERANO				
	Intervalo $T_{\min}$ °C	Intervalo $T_{\max}$ °C	Intervalo T_{media} °C	Intervalo σ °C
Modelo referencia	6,1 – 8,3	46,5 – 50,4	26,07 – 27,57	7,18 – 8,04
Modelo mejorado	6,3 – 11,3	45,9 – 69,6	25,07 – 36,15	7,15 – 10,09
OTOÑO				
	Intervalo $T_{\min}$ °C	Intervalo $T_{\max}$ °C	Intervalo T_{media} °C	Intervalo σ °C
Modelo referencia	(-8,5) – (-5,3)	38,6 – 48,6	12,5 – 13,8	8,9 – 10,2
Modelo mejorado	(-6,0) – (-4,3)	39,5 – 56,7	11,9 – 16,1	8,8 – 12,2
INVIERNO				
	Intervalo $T_{\min}$ °C	Intervalo $T_{\max}$ °C	Intervalo T_{media} °C	Intervalo σ °C
Modelo referencia	(-7,1) – (-4,6)	25,8 – 34,7	7,5 – 8,6	5,3 – 6,8
Modelo mejorado	(-5,7) – (-4,8)	24,3 – 43,9	6,6 – 11	5,1 – 9
PRIMAVERA				
	Intervalo $T_{\min}$ °C	Intervalo $T_{\max}$ °C	Intervalo T_{media} °C	Intervalo σ °C
Modelo referencia	(-3,5) – (-1,2)	39,8 – 45,1	8,6 – 15,9	7,3 – 7,9
Modelo mejorado	(-2,8) – (-1,5)	36,5 – 50,8	16,4 – 18,8	7,1 – 9,4

Tabla 28. Intervalo de variación de temperaturas superficiales.

En la Tabla 28 se observa que el modelo de referencia, en los periodos de verano e invierno, presenta una diferencia entre los valores medios de las temperaturas superficiales del acristalamiento no superior a 1,5°C. Sin embargo, esta diferencia

es más significativa en los periodos de otoño y primavera. Este comportamiento, se atribuye, a que en una zona climática como la de Madrid, en verano e invierno la atmosfera es bastante estable y la diferencia de temperatura entre los valores máximos y mínimos es relativamente pequeña. Por el contrario, en el periodo de otoño y primavera la atmósfera se caracteriza por su gran inestabilidad y esto llevaba asociado una importante amplitud térmica entre los valores máximos y mínimos.

Respecto al modelo mejorado, no se observa un comportamiento semejante al de modelo referencia. Esto es debido a las propiedades características de los acristalamientos que, en general, contribuyen a alcanzar valores muy elevados de las temperaturas superficiales máximas en todas las estaciones. No obstante, este hecho permite que el intervalo de temperatura en el que se mueven las temperaturas superficiales mínimas de los acristalamientos para otoño, invierno y primavera es inferior a sus correspondientes en el modelo de referencia, lo que representa una mejora en la temperatura ambiente interior en estas épocas del año. En relación al periodo de verano, el comportamiento descrito no se observa, debido a que las temperaturas superficiales registradas por los termopares en todos los acristalamientos son muy elevadas.

Cabe destacar, en el MM, que las temperaturas superficiales máximas, en todos los periodos, se alcanzan por el interior (Figura 117). De todas ellas, los mayores valores corresponden a los acristalamientos con LCS y de entre ellas, el máximo valor corresponde a la fachada oeste (Mtem_4i) seguida de la fachada sur (Mtem_7i). Este efecto es debido, por un lado, a que la LCS contribuye al incremento de la resistencia térmica del propio acristalamiento y por otro lado, durante las horas de sol, parte de la radiación la refleja pero parte es absorbida en forma de calor y parte de esta energía calorífica es transmitida por conducción hacia el interior. El hecho de que se alcancen mayores temperaturas en la fachada oeste que en la fachada sur, en contra a lo que era de esperar, sobre todo durante los meses de verano, es debido a que el modelo dispone de un porche, en la fachada oeste que disminuye el ritmo de transferencia de calor por convección, hacia el exterior, durante el periodo nocturno.

Figura 117. Valores promedios de temperatura superficial en cada estación.

- Iluminancias:

La Tabla 29 muestra estacionalmente el intervalo de variación para temperatura superficial, de sus valores mínimos, máximos, medios y desviación estándar (σ).

VERANO				
	Intervalo Imin(lux)	Intervalo Imax(lux)	Intervalo Imedia(lux)	Intervalo σ (lux)
Modelo referencia	0	7205 – 2x104	1425,65 – 1691,90	1488,17 – 2859, 81
Modelo mejorado	0	5739 - 2x104	809,70 – 1690,50	1133, 52 – 2714, 92
OTOÑO				
	Intervalo Imin(lux)	Intervalo Imax(lux)	Intervalo Imedia(lux)	Intervalo σ (lux)
Modelo referencia	0	6411 – 2x104	914,2 – 1877,8	1402– 3860,5
Modelo mejorado	0	5458 - 2x104	739 – 1641,8	1120, 1 – 3737
INVIERNO				
	Intervalo Imin(lux)	Intervalo Imax(lux)	Intervalo Imedia(lux)	Intervalo σ (lux)
Modelo referencia	0	9662 – 2x104	1058,6 – 1642,7	1645,7– 3697,7
Modelo mejorado	0	9000 - 2x104	873,5 – 1546,7	1333,8 – 3719,3
PRIMAVERA				
	Intervalo Imin(lux)	Intervalo Imax(lux)	Intervalo Imedia(lux)	Intervalo σ (lux)
Modelo referencia	0	8556 – 2x104	799,5 – 2186,2	1562,9– 3465,1
Modelo mejorado	0	6807 - 2x104	873,5 – 1342	1197,2 – 1480

Tabla 29. Intervalo de variación de iluminancia.

Cabe destacar que de forma estacional los dos modelos presentan una iluminación elevada, obteniendo registros de hasta 2×10^4 luxes considerados registros “over flow”, para los sensores utilizados, y que se utilizan, en iluminación natural en edificación. No obstante, los resultados muestran una disminución de iluminación en el modelo mejorado, incluso el número de veces que se obtienen registros superiores a los 2×10^4 luxes es significativamente menor que en el modelo sencillo. Este comportamiento es debido a la LCS que deja pasar menos flujo lumínico mejorando, por tanto, el exceso de iluminación que presenta el modelo de referencia.

La Figura 118 muestra la variación los valores promedios para cada sensor, en cada estación y para los dos modelos donde se observa claramente la disminución de flujo lumínico en el modelo mejorado.

Figura 118. Valores promedios de iluminancia en cada estación.

Con este análisis de resultados se ha expuesto de forma resumida el comportamiento de las variables temperatura superficiales e iluminancias.

7.2.3. Elección de registro de datos representativos y análisis de datos experimentales. (Fase 6)

En este apartado, en primer lugar, se realiza la selección de los días más representativos de cada estación climatológica (apartado 7.2.3.1.), para posteriormente analizar térmicamente (apartado 7.2.3.2.) y lumínicamente (apartado 7.2.3.3.), dichas período de tiempo.

7.2.3.1. Periodo representativo.

A) Elección del periodo climatológico de verano

Los parámetros de estudios se registraron durante el verano en dos etapas diferenciadas por la incorporación o no de voladizo, en los modelos a escala en las orientaciones sur y este. Además, cada una de estas etapas fue en un año distinto, debido a que la monitorización comenzó el 1 de agosto de 2017 y finalizó el 31 de julio de 2018.

Según lo anteriormente indicado las variables se registraron en los meses de verano en 2 años diferentes (2017 y 2018), puesto que era importante que las condiciones externas durante ambos periodos seleccionados fueran lo más similares posibles para que las muestras fueran comparables.

Como se describe en el capítulo de metodología, apartado 6.6., se comparó la temperatura ambiente exterior durante la estación de verano y se calculó la desviación en las temperaturas entre el año 2017 y 2018, seguidamente se promediaron los registros de temperatura y se encontraron los tres días consecutivos en los que la temperatura promedio se desviaba tan solo un 2% del periodo con voladizo (2018). De esta manera los días seleccionados están comprendidos del 5 al 7 de septiembre de 2017 y del 12 al 14 de julio de 2018.

La elección de estos tres días por periodo se realizó en base a los siguientes resultados:

La temperatura ambiental exterior promedio, en estos periodos seleccionados, fue de 25,71 °C durante la etapa sin voladizo y de 26,27 °C en el periodo en el que los modelos disponían de voladizo, siendo tan solo la diferencia de 0,56 °C.

Además, seguidamente se analizó la desviación de cada uno de los periodos con respecto a la temperatura promedio de toda la estación de verano y se obtuvo que esta temperatura en el periodo sin voladizo fue de 25,71 °C, obteniéndose una diferencia de temperatura respecto a la temperatura media total de toda la estación de verano (24,57 °C) de tan solo 1,14 °C. Y la temperatura promedio en el periodo con voladizo fue de 26,27 °C, obteniéndose una diferencia de temperatura respecto a la temperatura media total de toda la estación de verano (24,57 °C) de tan solo 1,70 °C.

En ambos periodos las temperaturas máximas y mínimas muestran una importante similitud que favoreció la selección de los periodos, no mostrando una variación significativa.

Durante el verano, en el periodo en el que los modelos a escala no disponían de voladizo, la temperatura máxima se observó el día 05-09-2017 a las 17:20 horas siendo esta de 36,2 °C, mientras la temperatura mínima se registró el día 05-09-2017 a las 7:50 horas con un valor de 17,2 °C.

En el periodo seleccionado en el que se instalaron los voladizos en la orientación sur y este, la temperatura máxima fue registrada el 14-07-2018 a las 16:20 horas con un valor de 34,1 °C y la temperatura mínima fue de 17,6 °C el mismo día a las 5:30 horas. Todo lo indicado anteriormente se puede ver reflejado en la siguiente Tabla 30.

Periodo	Día	Hora Temp. Max. (h)	Temperatura máxima (°C)	Hora Temp. Min. (h)	Temperatura mínima (°C)
Sin Voladizo	05/09/2017	17:20	36,2	7:50	17,2
Con Voladizo	14/07/2018	16:20	34,1	5:30	16,6

Tabla 30. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en los periodos seleccionados de verano.

Cabe destacar que tanto para el estudio sin voladizo como con voladizo se presentaron temperaturas ambientales exteriores similares, lo que justifica la selección de ambos periodos para el análisis experimental del resto de variables.

El análisis de estos resultados indica que los resultados de las monitorizaciones sin y con voladizo, en periodo de verano, en años diferentes para los tres días

seleccionados en cada caso, son comparables. Se puede considerar que la monitorización con y sin voladizo se realizó simultáneamente. Por tanto, en el análisis del comportamiento de los modelos, los tres días elegidos para el periodo estival los nombraremos día 1, 2 y 3.

B) Elección del periodo climatológico de otoño

La temperatura ambiente exterior promedio en la estación de otoño fue de 9,80 °C, según los datos facilitados por AEMET. A partir de aquí se seleccionó el periodo de 3 días más cercano a la media, donde la diferencia de temperatura distase el menor valor posible al valor promedio calculado.

Según el análisis realizado el periodo seleccionado es del 15 al 17 de noviembre de 2017 donde la temperatura promedio en dichos 3 días fue de 7,71 °C, obteniéndose una diferencia de temperatura respecto a la temperatura media total de toda la estación de otoño de 2,09 °C.

En el periodo seleccionado en otoño, (que también denominaremos como día 1, 2, y 3) que abarca desde el 15 al 17 de noviembre de 2017, la temperatura máxima fue recogida el 16-11-2017 a las 14:30 horas con un valor de 19,6 °C y la temperatura ambiental mínima exterior fue anotada el mismo día a las 6:30 horas siendo de -0,6 °C. Todo lo indicado anteriormente se puede ver reflejado en la siguiente Tabla 31.

Periodo	Día	Hora Temp. Max. (h)	Temperatura máxima (°C)	Hora Temp. Min. (h)	Temperatura mínima (°C)
Otoño	16/11/2017	14:30	19,9	6:30	-0,6

Tabla 31. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de otoño.

C) Elección del periodo climatológico de invierno

La temperatura ambiente exterior promedio, en la estación de invierno fue de 6,22 °C, según los datos facilitados por AEMET. A partir de aquí se seleccionó el periodo de 3 días más cercano a la media, donde la diferencia de temperatura distase el menor valor posible al valor promedio calculado.

Según el análisis realizado, el periodo seleccionado es del 21 al 23 de febrero de 2018 (que también denominaremos como día 1, 2, y 3) donde la temperatura promedio en dichos 3 días fue de 5,67 °C, obteniéndose una diferencia de temperatura respecto a la temperatura media total de toda la estación de invierno de tan solo 0,55 °C.

En el periodo seleccionado la temperatura máxima fue recogida el 22-02-2018 a las 16:30 horas con un valor de 15,1 °C y la temperatura ambiental mínima exterior fue anotada el 23-02-2018 a las 7:30 horas siendo de -4,3 °C. Todo lo indicado anteriormente se puede ver reflejado en la siguiente Tabla 32.

Periodo	Día	Hora Temp. Max. (h)	Temperatura máxima (°C)	Hora Temp. Min. (h)	Temperatura mínima (°C)
Invierno	22/02/2018	16:30	15,1	---	---
Invierno	23/02/2018	---	---	7:30	-4,3

Tabla 32. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de invierno.

D) Elección del periodo climatológico de primavera

La temperatura ambiente exterior promedio en la estación de primavera fue de 14,66 °C, según los datos facilitados por AEMET. A partir de aquí se seleccionó el periodo de 3 días más cercano a la media, donde la diferencia de temperatura distase el menor valor posible al valor promedio calculado.

Según el análisis realizado el periodo seleccionado es del 25 al 27 de abril de 2018 (que también denominaremos como día 1, 2, y 3) donde la temperatura promedio en dichos 3 días fue de 19,03 °C, obteniéndose una diferencia de temperatura respecto a la temperatura media total de toda la estación de primavera de 4,37 °C.

En el periodo seleccionado en primavera, la temperatura máxima fue recogida el 25-04-2018 a las 15:30 horas con un valor de 28,1 °C y la temperatura ambiental mínima exterior fue anotada el día 27-04-2018 a las 6:00 horas siendo de 12,7 °C. Todo lo indicado anteriormente se puede ver reflejado en la siguiente Tabla 33.

Periodo	Día	Hora Temp. Max. (h)	Temperatura máxima (°C)	Hora Temp. Min. (h)	Temperatura mínima (°C)
Primavera	25/04/2018	15:30	28,1	---	---
Primavera	27/04/2018	---	---	6:00	12,7

Tabla 33. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de primavera.

7.2.3.2. Análisis térmico en los periodos representativos de cada estación

Dentro del análisis térmico se realiza el estudio de la temperatura ambiental interior y de las temperaturas superficiales de los vidrios, exterior e interior.

7.2.3.2.1. Análisis de temperaturas ambientales interiores en los periodos representativos

A) Análisis de resultados en verano

A continuación, se analiza en la siguiente Figura 119, el comportamiento de la temperatura interior ambiental en el modelo de referencia. Se ha indicado en color verde oscuro con línea discontinua (Rtemp9_SIN Voladizo) la temperatura interior cuando el modelo no disponía de voladizo y en línea continua en color verde claro (Rtemp9_CON Voladizo) la temperatura ambiente interior cuando si disponía de la instalación de voladizos en las orientaciones sur y este.

De la misma manera se ha dispuesto la Figura 120, la temperatura interior ambiental en el modelo mejorado. Se ha indicado en color naranja con línea discontinua (Mtemp9_SIN Voladizo) la temperatura interior cuando el modelo no disponía de voladizo y en línea continua en color rojo (Mtemp9_CON Voladizo) la temperatura ambiente interior cuando si disponía de la instalación de voladizos en las orientaciones sur y este.

Además, en ambas gráficas, en color azul (Etemp) se refleja la temperatura ambiente exterior en el periodo representativo de verano.

Figura 119. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Modelo a escala de referencia. Periodo de verano.

Figura 120. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Modelo a escala de mejorado. Periodo de verano.

Se observa que las temperaturas interiores en ambas gráficas siguen la misma tendencia y el mismo comportamiento en relación con la temperatura ambiente exterior. Así mismo, los valores máximos y mínimos se alcanzan prácticamente en las mismas horas del día. La Tabla 34 muestra los valores máximos, mínimos y promedios para los registros de la monitorización sin y con voladizo. Del análisis de la tabla se deduce:

- La incorporación de voladizos en los modelos a escala de lugar a que durante las horas de mayor radiación solar, la temperatura ambiental interior desciende con respecto a los modelos que no disponen de voladizos en 5,60 °C en el caso del modelo de referencia y 6,40 °C en el modelo mejorado: una diferencia de 0,80 °C entre ambos modelos. Esta diferencia de 0,80 °C se debe a las mejores prestaciones de los vidrios. No obstante, cabe destacar que tanto el modelo de referencia como el mejorado, corrigen la temperatura ambiente en el interior de los modelos a escala, en las horas centrales del día, con la incorporación de los voladizos.

- Las temperaturas mínimas que se alcanzan en el interior son superiores en los modelos que se analizaron con la incorporación de los voladizos. Esto se debe a que cuando disminuyen la temperatura en el exterior, el voladizo relentiza la disipación del calor, observándose que las temperaturas interiores descienden 1,6 °C y 1,7 °C menos en los modelos con voladizos.

- El salto térmico entre las temperaturas máximas y las mínimas en el interior de los modelos es menor cuando se disponía de voladizos ($\Delta T_{\max} = 25,9^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T_{\min} = 24,9^{\circ}\text{C}$) frente a un mayor incremento en los modelos que no disponían de voladizo ($\Delta T_{\max} = 33,2^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T_{\min} = 32,9^{\circ}\text{C}$). Siendo la diferencia en este incremento de hasta 8°C, lo que conllevaría a que los equipos de climatización en el interior tengan un mayor consumo al trabajar con un incremento de temperatura mayor a lo largo de todo el día.

VERANO - SIN VOLADIZO			
Modelo	Tª interior promedio (°C)	Tª interior Máxima (°C)	Tª interior Mínima (°C)
REFERENCIA	28,60	50,00	16,80
MEJORADO	28,69	50,00	17,10
VERANO - CON VOLADIZO			
Modelo	Tª interior promedio (°C)	Tª interior Máxima (°C)	Tª interior Mínima (°C)
REFERENCIA	29,09	44,40	18,50
MEJORADO	28,97	43,60	18,70

Tabla 34. Análisis de la temperatura interior en los modelos a escala, en el periodo seleccionado de verano.

Con el fin de cuantificar el efecto de la estrategia pasiva (incorporación de voladizos) en el comportamiento de la temperatura ambiental interior, en relación

con la temperatura ambiente exterior, se determina la relación entre ellas mediante un ajuste de regresión lineal para cada una de las cuatro situaciones que se contemplan.

En la siguiente Tabla 35, se muestra el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación, como resultado de las regresiones lineales realizadas.

VERANO - SIN VOLADIZO		
Modelo	r (T^a int/ T^a ext.) (Coef.correlación)	R^2 (%) - (T^a int/ T^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	0,961914	92,527931
MEJORADO	0,961174	92,385462
VERANO - CON VOLADIZO		
Modelo	r (T^a int/ T^a ext.) (Coef.correlación)	R^2 (%) - (T^a int/ T^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	0,718107	51,567833
MEJORADO	0,643541	41,414518

Tabla 35. Regresiones lineales entre la temperatura interior y exterior, en el periodo seleccionado de verano.

Los modelos sin voladizo muestran un coeficiente de correlación del orden de 0,96 con una probabilidad de que la temperatura interior este influida por la exterior del 92%.

Sin embargo, para los dos modelos que cuentan con la incorporación de los voladizos, las temperaturas ambientales exterior e interior muestran una escasa relación, tal y como se desprende de los valores obtenidos en su coeficiente de correlación y de determinación. Por tanto, se muestra una disminución en la relación de las temperaturas interiores, respecto a las temperaturas ambientales exteriores, siendo más acusado en el caso en el modelo mejorado más voladizos, con una probabilidad de la influencia de la temperatura exterior sobre la interior de un 41,41%.

En consecuencia, el voladizo en los dos modelos (con vidrios sencillos y vidrios mejorados) es el que más influye (en relación con la instalación de vidrios) en la temperatura interior en las horas centrales del día, mitigando el incremento de temperatura y también ralentizando el enfriamiento nocturno.

B) Análisis de resultados en el resto de las estaciones

En las siguientes Figuras 121, 122 y 123 se muestra el comportamiento de la temperatura ambiental interior del modelo de referencia en color verde (Rtemp_9), del modelo mejorado en color rojo (Mtemp_9) y la temperatura ambiente exterior en color azul (ETemp), para las respectivas estaciones meteorológicas.

Figura 121. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de otoño.

Figura 122. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de invierno.

Figura 123. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de primavera.

Se observa, en el análisis estacional que en las horas de menor o nula radiación solar, el ritmo de enfriamiento en el modelo de referencia y en el mejorado, es el mismo, por lo que alcanzan sus valores mínimos al mismo tiempo. No obstante, cabe destacar:

- La comparación de los dos modelos en todas las estaciones muestra que la amplitud de la onda térmica en las horas centrales del día aumenta secuencialmente con la amplitud horaria de la salida y la puesta del sol.
- Según la temperatura exterior aumenta, en las distintas estaciones, (curva en color azul), la diferencia con los valores máximos es menor. Además, se aprecia en invierno una subida de temperatura interior, en los dos modelos, y una bajada, muy pronunciada (prácticamente vertical), al acercarse las horas centrales del día, entre las 12:00 horas y las 18:00 horas. En la estación de otoño (semejante a la de invierno) la subida se realiza de forma brusca, pero la bajada de la temperatura interior es más paulatina. En primavera, tanto el ascenso como el descenso de temperatura interior es muy progresivo, ampliándose la onda térmica a una franja horaria comprendida entre las 8:00 horas y las 22:00 horas, realizándose una dispersión mejor del calor.
- En otoño y en invierno la onda térmica, durante los periodos diurnos, esta retrasada en el modelo mejorado en relación con el modelo de referencia,

hecho que ocurre al contrario en la estación de primavera. Además, la diferencia entre los valores máximos de ambos modelos a escala es de 6,6 °C en otoño y de 5,7 °C en invierno, lo que supone una diferencia estacional de 0,9 °C, no observándose diferencia durante la primavera. Estos resultados se atribuyen a la lámina de control solar que se dispone en el modelo mejorado, que en otoño y en invierno no permite que, entre toda la radiación solar incidente sobre los vidrios, mientras que en primavera, el incremento importante de número de horas de sol hace que el sobrecalentamiento del vidrio, que dispone de la lámina de control solar, caliente más rápidamente el aire interior, invirtiendo el proceso.

En la Tabla 36, se muestra un análisis de las temperaturas promedias, máximas y mínimos para las tres estaciones consideradas en este apartado. Se observa que la diferencia de los promedios de temperatura exterior respecto a la interior en invierno, otoño y primavera son de 6,47 °C, 4,37 °C y 4,24 °C respectivamente en el modelo de referencia y de 5,58 °C, 3,84 °C y 5,00 °C en el modelo mejorado. Según esto se corrobora lo indicando anteriormente, que es que donde se encuentra una diferencia significativa en las estaciones de otoño e invierno, pero en primavera ocurre el proceso inverso.

Además, en otoño y en invierno las temperaturas interiores promedias (en torno a 12 °C) se mantienen muy igualadas, existiendo gran diferencia con la temperatura promedio interior registrada en la estación de primavera (en torno a 24 °C). No obstante, es de destacar la gran diferencia que existe entre los valores máximos y mínimos de cada una de las estaciones.

OTOÑO					
Modelo	Tª exterior promedio (°C)	Tª interior promedio (°C)	Diferencia Tªs promedios (°C)	Tª interior Máxima (°C)	Tª interior Mínima (°C)
REFERENCIA	7,71	12,08	4,37	50,00	-0,90
MEJORADO		11,55	3,84	43,40	-0,40
INVIERNO					
Modelo	Tª exterior promedio (°C)	Tª interior promedio (°C)	Diferencia Tªs promedios (°C)	Tª interior Máxima (°C)	Tª interior Mínima (°C)
REFERENCIA	5,67	12,24	6,57	48,90	-5,50
MEJORADO		11,25	5,58	43,20	-4,80

PRIMAVERA					
	Tª exterior promedio (°C)	Tª interior promedio (°C)	Diferencia Tªs promedios (°C)	Tª interior Máxima (°C)	Tª interior Mínima (°C)
REFERENCIA		23,27	4,24	46,30	10,00
MEJORADO	19,03	24,03	5,00	46,30	10,60

Tabla 36. Análisis de la temperatura interior en los modelos a escala, en los periodos seleccionado en las estaciones de otoño, invierno y primavera.

Para cuantificar el grado de relación entre la temperatura interior de los modelos y la temperatura ambiental exterior, se hace un análisis de regresión lineal simple para cada una de las estaciones, como se muestra en la Tabla 37.

OTOÑO		
Modelo	r (Tª int/ Tª ext.) (Coef.correlación)	R² (%) - (Tª int/ Tª ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	0,860601	74,063324
MEJORADO	0,835129	69,743968
INVIERNO		
Modelo	r (Tª int/ Tª ext.) (Coef.correlación)	R² (%) - (Tª int/ Tª ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	0,869887	75,670409
MEJORADO	0,902663	81,480138
PRIMAVERA		
Modelo	r (Tª int/ Tª ext.) (Coef.correlación)	R² (%) - (Tª int/ Tª ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	0,785415	61,687656
MEJORADO	0,721917	52,116380

Tabla 37. Análisis de correlación entre la temperatura interior y exterior, en el periodo seleccionado de otoño, invierno y primavera.

Como se puede observar en el mes de invierno los coeficientes de correlación son menores en el modelo de referencia, por ello existe menos relación entre las temperaturas interiores y las exteriores. En esta estación, donde las temperaturas son más frías, los vidrios con control solar se comportan peor. Para las estaciones con temperaturas bajas en el exterior sería preferible la utilización de vidrios con transmitancias térmicas más bajas y así será menor el paso de energías entre ambas caras.

En otoño y primavera como existe más variación en la diferencia de temperaturas interiores y exteriores, es mejor el comportamiento del modelo mejorado en un 4,32% en otoño y un 9,57% en primavera. De esto se puede concluir que el

comportamiento de los vidrios con lámina de control solar tiene un rendimiento mejor en estaciones con temperaturas más cálidas.

7.2.3.2.2. Comportamiento de temperaturas superficiales exteriores.

En el siguiente análisis de resultados se muestra el comportamiento de las temperaturas superficiales exteriores de los cerramientos en ambos modelos, en las estaciones de verano y de invierno, por ser las estaciones que más datos nos aportan en la investigación. No obstante, las figuras del resto de estaciones pueden verse en el Anexo 5.

A) Análisis de resultados en el periodo representativo de verano

En la Figura 124 de las temperaturas superficiales exteriores de la fachada sur y Figura 125 de la fachada este (fachadas en las que se instalaron las protecciones pasivas), se muestra con línea continuas los registros obtenidos en el periodo en el que los modelos disponían de voladizo y en discontinua cuando se encontraban sin ellos.

Figura 124. Temperaturas superficiales en la estación climatológica de verano. Fachada sur.

Se analiza la orientación sur sin voladizo, en el modelo a escala mejorado, (curva roja discontinua) que alcanza los 52,80 °C y el vidrio sencillo alcanza hasta los 46

°C (curva azul discontinua), con una diferencia entre ambos modelos de 6,80 °C. En el periodo donde se dispuso el voladizo las temperaturas fueron más bajas y muy similares entre ellas, (39,50 °C y 39,30 °C), existiendo una diferencia insignificante entre ambos modelos. Esto indica que la instalación de voladizos en orientación sur favorece la disminución de la temperatura en periodos cálidos, debido a que la diferencia de temperaturas entre el modelo con voladizo y el modelo sin voladizo en los modelos mejorados, en la orientación sur, era de 13,50 °C (Tabla 38).

VERANO – ORIENTACION SUR – SIN VOLADIZO					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	46,00	16,00	26,90	0,961143	92,379557%
MEJORADO	52,80	16,50	27,88	0,966494	93,411067%
VERANO – ORIENTACION SUR – CON VOLADIZO					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	39,50	18,30	27,72	0,975017	95,065785%
MEJORADO	39,30	18,30	28,10	0,933467	87,135992%

Tabla 38. Análisis entre las temperaturas superficiales, en los periodos seleccionados de verano y en orientación sur.

El estudio de las temperaturas superficiales en la orientación este se dispone de la misma comparación en cuanto a tipología de vidrios que en la orientación sur, analizada anteriormente.

Se muestra en la Figura 125, en la que se observa que con los dos tipos de vidrios siguen la misma tendencia, no existiendo grandes diferencias en las temperaturas superficiales de ambos modelos. En esta orientación la incidencia del sol sobre el acristalamiento es más baja y la instalación de voladizos no es tan beneficiosa como ocurría en la orientación sur.

Figura 125. Temperaturas superficiales en la estación climatológica de verano. Fachada este.

La diferencia de temperaturas entre los modelos con y sin voladizo, en la orientación sur, era de 13,50 °C, siendo ahora de 0,70 °C en orientación este.

En la Tabla 39 se observa que la correlación con menor porcentaje la tiene el modelo mejorado con voladizo en orientación sur (87,13%). En general existe una fuerte relación entre la temperatura ambiente exterior y las temperaturas superficiales exteriores en los diferentes casos.

VERANO – ORIENTACION ESTE – SIN VOLADIZO					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	41,00	16,90	26,60	0,981645	96,362618%
MEJORADO	41,20	16,60	26,35	0,987552	97,525941%
VERANO – ORIENTACION ESTE – CON VOLADIZO					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	39,90	18,40	28,05	0,969410	93,975631%
MEJORADO	40,50	18,50	28,27	0,965727	93,262787%

Tabla 39. Análisis entre las temperaturas superficiales, en los periodos seleccionados de verano y en orientación este.

B) Análisis de resultados en el periodo representativo de invierno

Como ya se ha comentado, el periodo representativo de invierno está comprendido entre los días 21 y 23 de febrero de 2018 y registra temperaturas ambientales exteriores que varían a lo largo del día desde los -4,30 °C a los 15,10 °C. Las gráficas de la Figura 126 muestra el comportamiento de las temperaturas superficiales exteriores, en cada uno de los modelos y en cada una de las orientaciones, así como el comportamiento de la temperatura exterior para el periodo en estudio.

Figura 126. Gráficas con temperaturas superficiales en la estación climatológica de invierno.

En la orientación sur, se compara la temperatura superficial de un doble acristalamiento con lámina de control solar (curva roja) que alcanza prácticamente los 39,60 °C, con un vidrio sencillo de 6 mm, que llega a un valor de 30,30 °C (curva verde).

Aunque existe mucha diferencia entre la temperatura ambiente exterior y las temperaturas superficiales, sobre todo en las horas centrales del día, cabe destacar que a partir del momento en el que empieza a caer el sol el modelo de mejorado pierde menos temperatura que el de referencia.

Esto se debe a la lámina de control solar situada en la cara dos del acristalamiento del modelo mejorado, va acumulando todo el calor radiante que no deja pasar al interior y lo va cediendo gradualmente con la bajada de las temperaturas.

El resultado del ajuste por regresión lineal entre la temperatura exterior y la temperatura superficial para los correspondientes vidrios muestra coeficientes de correlación relativamente aceptables pero el resultado de los coeficientes de determinación muestra un valor de determinación escaso, como se muestra en la Tabla 40.

INVIERNO – ORIENTACION SUR					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	30,30	-6,30	7,10	0,930761	86,631514%
MEJORADO	39,60	-4,80	9,73	0,905117	81,923614%

Tabla 40. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación sur.

Para la orientación norte (Tabla 41), el estudio de las temperaturas superficiales se realiza entre un doble acristalamiento en el modelo mejorado (sin lámina de control solar) y se compara con un vidrio sencillo de 6 mm en el modelo de referencia. El doble acristalamiento (curva roja) alcanza temperaturas similares y que siguen la misma tendencia que las temperaturas ambiente exteriores (curva azul). El vidrio sencillo (curva verde) alcanza hasta 4,80 °C más que el mejorado, ocurriendo a la inversa de lo que sucedía en la orientación sur, donde se disponía de un doble acristalamiento con lámina de control solar. Las temperaturas en la superficie del vidrio del modelo mejorado son menores que la del modelo con vidrio simple.

En relación al análisis de regresión para la orientación norte, los resultados muestra una fuerte influencia de la temperatura ambiente exterior sobre la temperatura superficial en los dos modelos, con valores, en los dos casos, del coeficiente de determinación por encima del 95%. El porcentaje de determinación es más bajo en el modelo de referencia el cual deja pasar más calor en las horas centrales del día (1,83%) que el modelo mejorado.

INVIERNO – ORIENTACION NORTE					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	21,20	-3,90	7,34	0,981327	96,300203%
MEJORADO	16,40	-5,40	4,97	0,990607	98,130223%

Tabla 41. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación norte.

En la orientación este (Tabla 42), se dispone de un doble acristalamiento con lámina de control solar en el modelo mejorado y un vidrio sencillo de 6 mm en el otro modelo a escala. La comparación en este caso es similar al caso analizado en la orientación sur, pero en las horas centrales del día (de 12:00 horas a 16:00 horas) la temperatura sube mucho menos respecto a la orientación sur, esto es debido al ángulo de incidencia de la radiación solar en esta orientación.

Las temperaturas superficiales de ambos acristalamientos siguen la misma tendencia, no existiendo grandes diferencias significativas entre ambos modelos, al igual que sucedía en periodo estival.

INVIERNO – ORIENTACION ESTE					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	20,20	-4,70	6,78	0,962108	92,565172%
MEJORADO	20,10	-5,00	5,81	0,982847	96,598810%

Tabla 42. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación este.

El estudio de las temperaturas superficiales en la orientación oeste Tabla 43, donde se dispone de un doble acristalamiento con lámina de control solar en el modelo mejorado y un vidrio sencillo de 6 mm en el modelo de referencia. Estaríamos en el mismo caso analizado en la orientación sur y este, con la variación de que se dispone de un voladizo original de la edificación, que se ha reproducido en ambos modelos a escala con una longitud de 1,20 m. El doble acristalamiento con lámina de control solar (curva roja) alcanza temperaturas ligeramente inferiores a las del acristalamiento sencillo (curva verde).

Se puede observar que las temperaturas entre la orientación este y oeste son muy similares y el comportamiento es análogo. Esta diferencia de temperaturas entre los dos periodos es debida al ángulo de inclinación de la trayectoria solar, en invierno el sol está más bajo por lo que incide sobre el acristalamiento al librar la longitud del voladizo.

INVIERNO – ORIENTACION OESTE					
Modelo	T ^a superficial máxima (°C)	T ^a superficial mínima (°C)	T ^{as} superficial promedios (°C)	r (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef.correlación)	R ² (%) - (T ^a sup/ T ^a ext.) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	23,10	-5,00	7,38	0,952759	90,774905%
MEJORADO	22,60	-5,10	6,55	0,970983	94,280703%

Tabla 43. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación oeste.

7.2.3.2.3. Comportamiento de temperaturas superficiales interiores

En el modelo mejorado, se colocaron sensores por la parte interior y exterior del acristalamiento y se muestra en las Tablas 44 y 45, el resultado entre ambos registros de temperaturas superficiales, tanto en la fachada norte (sensores MTemp_5 y 5i) donde se disponía de un doble acristalamiento, como en la fachada sur (sensores MTemp_7 y 7i) que contaba con un doble acristalamiento con lámina de control solar en la cara dos del acristalamiento.

FACHADA NORTE			
Estación	Tª superf. Ext. promedio (°C)	Tª superf. Int. promedio (°C)	Promedio Diferencia Tª Superficial ext-int (°C)
OTOÑO	7,59	9,34	-1,75
PRIMAVERA	20,53	22,97	-2,44
INVIERNO	4,97	8,01	-3,04
VERANO CON VOLADIZO	27,78	28,96	-1,18
VERANO SIN VOLADIZO	25,62	27,58	-1,96

Tabla 44. Análisis entre las temperaturas superficiales promedio interiores y exteriores, en la fachada norte.

FACHADA SUR			
Estación	Tª superf. Ext. promedio (°C)	Tª superf. Int. promedio (°C)	Promedio Diferencia Tª Superficial ext-int (°C)
OTOÑO	10,37	12,00	-1,63
PRIMAVERA	22,88	24,83	-1,95
INVIERNO	9,75	11,70	-1,95
VERANO CON VOLADIZO	28,10	29,02	-0,92
VERANO SIN VOLADIZO	27,88	29,51	-1,63

Tabla 45. Análisis entre las temperaturas superficiales promedio interiores y exteriores, en la fachada sur.

Como era de esperar, el comportamiento de la temperatura superficial promedio en el interior es siempre mayor que la temperatura superficial promedio exterior, tanto en ambas orientaciones, como en todas las estaciones meteorológicas. Esto se debe a la acumulación de calor que se genera en el interior del modelo durante el periodo diurno. Los promedios de temperatura superficial en la fachada norte son menores debido a que dicha fachada no se encuentra sometida a la incidencia directa de los rayos solares.

Además, se observa que la fachada sur, que se encuentra sometida a radiación solar directa, tiene valores menores en la diferencia de la temperatura superficial exterior promedio menos la interior, que la fachada norte (la cual no se encuentra sometida a radiación solar directa). Esto indica que la lámina de control solar está evitando el paso de calor hacia el interior, reflejando parte de la radiación hacia el exterior y evitando que entre en el interior.

7.2.3.3. Análisis lumínico en los periodos representativos de cada estación

En la siguiente parte de la fase experimental se realiza el siguiente análisis de resultados donde se estudia el comportamiento de la radiación solar lumínica al atravesar los vidrios en ambos modelos a escala y en las distintas estaciones del año. Se analizan los valores de iluminancia promedios en el interior de la vivienda, así como de forma pormenorizada en cada una de las orientaciones de las fachadas de vidrio. Además, se examinan los parámetros de confort visual para la iluminación natural en el interior de cada uno de los modelos a escala.

7.2.3.3.1. Estudio de iluminancias

A) Análisis de resultados en el periodo representativo de verano

En las Figuras 127 y 128 se muestra la iluminancia promedia recogida por los ocho luxómetros colocados en cada uno de los modelos a escala (lux) y la irradiancia recogida por el piranómetro exterior (W/m^2). La línea continua en color verde indica los registros obtenidos de iluminancia promedia en el modelo de referencia y la de color rojo en el modelo mejorado. Además, la línea discontinua en color amarillo muestra el registro de irradiancia en el periodo representativo de verano.

En esta estación los registros de datos muestran un incremento en los valores de iluminancia con la salida del sol, a partir de las 7:00 h de la mañana y hasta las 20:00 h de la tarde con el ocaso. Al ser un edificio con fachadas acristaladas, los valores de iluminación en el interior son elevados, por lo que es preciso regular y atenuar la luz que entra al interior.

La Figura 127 muestra el periodo donde no se disponía de la instalación de voladizos y se obtiene un 29,30% más de iluminancia en el modelo de referencia que en el mejorado. Los vidrios del modelo a escala mejorado disponen de barrera de control solar en sus orientaciones sur, este y oeste con mayor poder de reflexión de la energía solar en su espectro de radiación luminosa, que los vidrios sencillos.

Figura 127. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de verano. Periodo sin voladizo.

En la Figura 128, se obtienen los resultados sobre los modelos con voladizos en orientaciones sur y este, se obtiene un 34,76% más de iluminancia en el modelo de referencia que en el mejorado. Ocurriendo el mismo efecto mencionado anteriormente debido a los vidrios con lámina de control solar.

Figura 128. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de verano. Periodo con voladizo.

Como se puede observar en la Tabla 46 en el modelo a escala con voladizos y con vidrios mejorados, los coeficientes de correlación son menores que en el resto de los casos, por ello existe menos relación entre la irradiancia exterior y la iluminancia promedio en el interior de dicho modelo. De esta manera el nivel de iluminación se minora, existiendo una probabilidad de influencia de la irradiancia exterior sobre la iluminancia interior de 61,56%.

VERANO – SIN VOLADIZO					
Modelo	Iluminancia promedio (lux)	% diferencia entre modelos M_ y S_	Iluminancia máxima (lux).	r (Ilum./ Irradianc) (Coef.correlación)	R² (%) - (Ilum./ Irradianc) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	1.800	29,30%	8.921,3	0,858123	72,47
MEJORADO	1.340		8.757,4	0,829594	68,82
VERANO – CON VOLADIZO					
Modelo	Iluminancia promedio (lux)	% diferencia entre modelos M_ y S_	Iluminancia máxima (lux)..	r (Ilum./ Irradianc) (Coef.correlación)	R² (%) - (Ilum./ Irradianc) (Coef. Determinación)
REFERENCIA	1107	34,76%	4,672,7	0,811454	65,84
MEJORADO	779		3.303,1	0,784614	61,56

Tabla 46. Análisis de iluminancia e irradiación en la estación de verano.

Además, se observa que los voladizos producen una mejor distribución de la luz, bajando los niveles de iluminancia con respecto a los modelos analizados anteriormente que no disponían de voladizos.

La diferencia que existe en el modelo de referencia sin voladizo, respecto a los registros obtenidos en el mismo modelo, pero con la incorporación de voladizos es de un 11,92% menos de iluminancia en este último caso. Y realizando el mismo análisis en los modelos mejorados, la diferencia entre ambos, con la instalación de voladizos o sin ella, es de un 52,90%. Concluyendo que la instalación de las protecciones pasivas evita la entrada de luz al interior, distribuyendo la iluminancia en el interior de forma más constante, sin asumir picos de subidas muy elevados con la incidencia continuada de la radiación solar.

En línea con lo anteriormente expuesto, se muestran gráficos de dispersión en la Figura 129, donde se refleja que, con valores de irradiancias bajos, los modelos que disponen de voladizo, suavizan en gran parte que la iluminancia se eleve por

encima de valores de 3.000 lux. Además, en este caso existe menos dispersión en la toma de registros de iluminancia interior, no superando en ningún caso los 5.000 lux. Sin embargo, en los modelos sin voladizo se llegan alcanzar niveles de hasta 9.000 lux.

Figura 129. Gráficos de dispersión entre Iluminancia media en modelo mejorado y sencillo e irradiancia, en la estación climatológica de verano.

Esto demuestra que la incorporación de vidrios con lámina de control solar minora los niveles de iluminancia en el interior de los modelos a escala y que además la incorporación de voladizos produce una mejor distribución y control de la luz, atenuando los niveles del flujo luminoso en el interior.

B) Análisis de resultados en el resto de las estaciones

En las Figuras 130, 131 y 132 se puede ver reflejada la iluminancia media del modelo de referencia en color verde y del modelo mejorado en color rojo. Además, se muestran los registros de irradiancia en línea discontinua amarilla para las estaciones de otoño, invierno y primavera.

Figura 130. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de otoño.

Figura 131. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de invierno.

Figura 132. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de primavera.

Al igual que en la estación de verano, donde los registros de datos muestran los valores de iluminancia de 7:00 h a 20:00 h en el resto de las estaciones se reflejaban en las siguientes franjas horarias; estación de otoño de 8:00 h a 18:00 h, en invierno de 8:00 h a 19:00 h y en primavera de 7:00 a 21:00 h. Siendo esta última estación la que presenta mayor rango horario.

Tras el análisis estadístico, se confirma que en la estación de otoño se obtiene un 16,86% más de iluminancia en el modelo de referencia, frente al 24,13% en invierno y 39,99% en la de primavera.

Se observa, de este análisis que en las estaciones con mayor número de horas de radiación solar las diferencias entre el modelo de referencia y el mejorado es mucho mayor. En la gráfica de primavera (Figura 132), se puede observar que el comportamiento de los vidrios mejorados, que disponen de lámina de control solar, actúa mucho mejor en dicha estación que en el resto. No obstante, cabe destacar:

- La comparación de los dos modelos en todas las estaciones, nos indica que los vidrios mejorados disminuyen el flujo solar lumínico en el interior de las estancias, aumentando el confort visual en este tipo de edificios que disponen de un elevado porcentaje de acristalamiento.

- Según el tiempo de radiación solar en el exterior, la amplitud horaria aumenta la curva de registros y los vidrios mejorados se comportan mejor frente al paso del flujo lumínico. Además, la incidencia de radiación en la estación de primavera con un ángulo de altitud solar menor hace que la iluminancia en el interior se reparta de manera más uniforme por todo el espacio.
- En otoño y en invierno, con menos amplitud en la curvatura de horas con radiación solar al día, los picos de iluminancia son mayores y más acentuados que en primavera. En otoño y primavera también se demuestra que la lámina de control solar afecta en la disminución de la iluminancia en el interior.
- En la estación de primavera, con relación al resto de estaciones, impide que entre la radiación lumínica hacia el interior, donde la lámina de control solar no permite que entre toda la radiación solar incidente.

7.2.3.3.2. Análisis lumínico por orientaciones

En el siguiente análisis se muestra a través de las Figuras 133 y 134, los promedios de iluminancia en cada uno de los sensores (en función de su posicionamiento dentro del modelo a escala, que determina su orientación). Cada color representa un luxómetro como se indica en la leyenda y se puede relacionar con el plano adjunto en la Figura 135. El conjunto de barras está separado en cinco bloques que representan cada una de las estaciones, incluyendo en verano las dos alternativas analizadas con modelos a escala con voladizos y sin voladizos.

Figura 133. Iluminancia promedio en cada periodo y por orientación. Modelo de referencia.

Figura 134. Iluminancia promedio en cada periodo y por orientación. Modelo mejorado.

Figura 135. Posicionamiento de los luxómetros dentro de los modelos a escala.

Para mayor comprensión de las gráficas, se adjunta la Tabla 47 realizada en el análisis estadístico, donde se muestran los valores de iluminancia en cada uno de los sensores y de la que se deduce:

- En verano, en el periodo donde no se disponía de protección pasiva, la mayor diferencia de los valores de iluminancia obtenidos se produce entre el modelo mejorado y modelo de referencia se observa en la orientación este (43,90%), sin embargo, con la instalación de los voladizos las diferencias significativas además de manifestarse en esta misma orientación, también se ven reflejadas en la orientación sur (sureste con 54,11% y suroeste con 54,39%).
- En la estación de otoño la mayor diferencia se obtiene en el luxómetro situado en la orientación oeste (48,37%) ya que, al incidir la radiación con menor ángulo de inclinación solar, el flujo luminoso atraviesa en los vidrios sencillo hacia el interior, siendo menor en el modelo mejorado por la lámina de control solar.
- En invierno y primavera las diferencias más significativas se observan en el luxómetro situado en orientación este, siendo de 61,36% y de 53,10% respectivamente.
- En la orientación oeste, donde se dispone de un porche de 1,15 m de longitud, las diferencias observadas son negativas en todos los periodos analizados, esto es debido a que en esta orientación no se instaló en el modelo mejorado, acristalamiento con lámina de control solar, por ello no se minoró la entrada del flujo lumínico al interior de los modelos.
- En general esto demuestra que la incorporación de vidrios con lámina de control solar minora los niveles de iluminancia en el interior de los modelos a escala, siendo la orientación este la que mejores resultados obtiene.

VERANO SIN VOLADIZO								
	Lux_1	Lux_2	Lux_3	Lux_4	Lux_5	Lux_6	Lux_7	Lux_8
	(Este)	(Noreste)	(Sur)	(Porche)	(Noroeste)	(Sureste)	(Oeste)	(Suroeste)
Ilum. Ref. (lux)	1880,8	1431,6	2151,7	1743,4	1169,2	1803,1	1420,5	1742,4
Ilum. Mej. (lux)	1203,7	1007,5	1631,5	2275,9	917,7	1440,0	1045,5	1198,1
% Diferencia	43,90	34,78	27,50	-26,50	24,10	22,39	30,41	37,02
VERANO CON VOLADIZO								
	Lux_1	Lux_2	Lux_3	Lux_4	Lux_5	Lux_6	Lux_7	Lux_8
	(Este)	(Noreste)	(Sur)	(Porche)	(Noroeste)	(Sureste)	(Oeste)	(Suroeste)
Ilum. Ref. (lux)	1096,0	1540,3	914,9	978,9	1157,4	1242,5	774,6	1153,3
Ilum. Mej. (lux)	629,1	954,6	620,9	1200,7	920,2	713,4	536,0	660,2
% Diferencia	54,13	46,96	38,29	-20,35	22,83	54,11	36,41	54,39
OTOÑO								
	Lux_1	Lux_2	Lux_3	Lux_4	Lux_5	Lux_6	Lux_7	Lux_8
	(Este)	(Noreste)	(Sur)	(Porche)	(Noroeste)	(Sureste)	(Oeste)	(Suroeste)
Ilum. Ref. (lux)	1201,7	774,8	1514,9	1015,8	852,8	1331,4	1273,5	1284,6
Ilum. Mej. (lux)	1168,4	628,5	1357,2	1040,0	648,8	1236,5	777,5	954,5
% Diferencia	2,81	20,85	10,98	-2,35	27,16	7,39	48,37	29,48
INVIERNO								
	Lux_1	Lux_2	Lux_3	Lux_4	Lux_5	Lux_6	Lux_7	Lux_8
	(Este)	(Noreste)	(Sur)	(Porche)	(Noroeste)	(Sureste)	(Oeste)	(Suroeste)
Ilum. Ref. (lux)	2497,3	1524,6	1901,9	1867,2	1341,3	1888,9	2227,4	1379,5
Ilum. Mej. (lux)	1324,7	1038,9	1377,4	2551,7	1042,3	1390,5	1455,1	1298,3
% Diferencia	61,36	37,89	31,99	-30,98	25,09	30,39	41,94	6,07
PRIMAVERA								
	Lux_1	Lux_2	Lux_3	Lux_4	Lux_5	Lux_6	Lux_7	Lux_8
	(Este)	(Noreste)	(Sur)	(Porche)	(Noroeste)	(Sureste)	(Oeste)	(Suroeste)
Ilum. Ref. (lux)	2246,1	1704,7	2093,5	1734,6	1386,2	2938,7	1413,4	2625,0
Ilum. Mej. (lux)	1303,6	1310,1	1630,0	2113,8	1136,6	1723,0	1133,4	1734,2
% Diferencia	53,10	26,18	24,90	-19,70	19,79	52,16	21,99	40,87

Tabla 47. Análisis de iluminancia por estación y orientación.

El impacto de los voladizos, como elementos filtrantes de la radiación solar, supone una mejora importante en el confort visual del interior de los edificios.

7.2.3.3.3. Parámetros de confort visual

En este punto se estudian otros parámetros de confort visual no analizados anteriormente, particularmente la uniformidad y la diversidad de la iluminancia, el

factor de luz de día, el deslumbramiento por la incidencia de la luz solar directa y las horas del día con niveles bajos y excesivamente altos de iluminancia.

A) Uniformidad y diversidad de la iluminancia

En la Tabla 48, se muestran los valores de uniformidad obtenidos en cada uno de los modelos a escala y en cada uno de los periodos representativos.

En todas las estaciones analizadas la uniformidad es ligeramente mayor en el modelo de vidrios simples, a excepción de la primavera donde se observa un porcentaje a la inversa. No obstante, en todos los casos analizados, los valores de uniformidad de la iluminancia se encuentran en valores comprendidos entre el 64% y el 73% aproximadamente. Estos valores se encuentran entre los valores aconsejados, estando comprendidos entre un 40% y un 70%, debiendo ser esta variable mayor, cuanto más grande sea el porcentaje del factor de luz de día, que será analizado posteriormente. (Michael & Heracleous, 2017).

Por otro lado, la diversidad no deberá exceder de 5 en ningún punto del área principal del ambiente interior, siendo el mayor de los valores en todos los casos analizados de 2,5. Siendo este parámetro mayor en todas las estaciones en el modelo mejorado, a excepción de la estación de primavera donde presenta mayor valor el modelo de referencia.

VERANO SIN VOLADIZO					
	E _{max} : Iluminancia máxima (lux)	E _{min} : Iluminancia mínima (lux)	E _m : Iluminancia media en el plano horizontal (lux)	U: Uniformidad de la iluminancia (%)	D: Diversidad de la iluminancia
Referencia	2151,7	1169,2	1667,8	70,1	1,8
Mejorado	2275,9	917,7	1340,0	68,5	2,5
% Diferencia	-5,61	24,10	21,80	2,33	-29,61
VERANO CON VOLADIZO					
	E _{max} : Iluminancia máxima (lux)	E _{min} : Iluminancia mínima (lux)	E _m : Iluminancia media en el plano horizontal (lux)	U: Uniformidad de la iluminancia (%)	D: Diversidad de la iluminancia
Referencia	1540,3	774,6	1107,2	70,0	2,0
Mejorado	1200,7	536,0	779,4	68,8	2,2
% Diferencia	24,78	36,41	34,76	1,70	-11,89
OTOÑO					
	E _{max} : Iluminancia máxima (lux)	E _{min} : Iluminancia mínima (lux)	E _m : Iluminancia media en el plano horizontal (lux)	U: Uniformidad de la iluminancia (%)	D: Diversidad de la iluminancia

Referencia	1514,9	774,8	1156,2	67,0	2,0
Mejorado	1357,2	628,5	976,4	64,4	2,2
% Diferencia	10,98	20,85	16,86	4,03	-9,92

INVIERNO					
	E_{max}: Iluminancia máxima (lux)	E_{min}: Iluminancia mínima (lux)	E_m: Iluminancia media en el plano horizontal (lux)	U: Uniformidad de la iluminancia (%)	D: Diversidad de la iluminancia
Referencia	2497,3	1341,3	1828,5	73,4	1,9
Mejorado	2551,7	1038,9	1434,9	72,4	2,5
% Diferencia	-2,16	25,41	24,13	1,31	-27,53

PRIMAVERA					
	E_{max}: Iluminancia máxima (lux)	E_{min}: Iluminancia mínima (lux)	E_m: Iluminancia media en el plano horizontal (lux)	U: Uniformidad de la iluminancia (%)	D: Diversidad de la iluminancia
Referencia	2938,7	1386,2	2017,8	68,7	2,1
Mejorado	2113,8	1133,4	1510,6	75,0	1,9
% Diferencia	32,65	20,07	28,75	-8,81	12,80

Tabla 48. Análisis de parámetros de confort visual. Iluminancia.

B) Factor de luz diurna (Daylight factor)

Como se ha destacado en el capítulo de la introducción, el estudio de la luz natural en la arquitectura y el diseño de edificios sirve para evaluar los niveles internos de iluminación natural que se perciben en los planos o superficies de trabajo. Por ello, es importante conocer el factor de luz diurna para determinar la capacidad de iluminar lo suficiente para que los ocupantes realicen actividades cotidianas.

La iluminancia y su distribución en el área de tarea y en el área circundante tienen un gran impacto en como una persona percibe y realiza la tarea visual de un modo rápido, seguro y confortable. Por ello, este factor nos indica el porcentaje de iluminancia interior en relación con la iluminancia en un plano horizontal exterior sin obstáculos bajo las mismas condiciones de cielo. Al considerar condiciones de cielo nublado se excluye del DF la radiación directa en los niveles de iluminancia interior y exterior.

El día de diseño para los cálculos del factor de luz diurna (Daylight Factor) se basa en el cielo nublado estándar de CIE (Commission Internationale de l'Eclairage o Comisión Internacional de Iluminación) para el 21 de septiembre a las 12:00 h y donde el nivel de luz ambiental terrestre es 11.921 lux.

Según se muestra en la Tabla 49, el factor de luz de día para el modelo mejorado es de un 13,77% y para el modelo de referencia es de 17,05%, rebajándose este factor en un 3,28% en el modelo que dispone de vidrios con control solar respecto al sencillo.

Ei sencillo	Ei mejorado	Eo	DF sencillo (%)	DF mejorado (%)
1.641,56	2.033,09	11921	17,05	13,77

Tabla 49. Análisis factor de luz de día (DF).

Los valores obtenidos son elevados debido a que se recomienda no sobrepasar el 5% de Daylight factor, no obstante, los valores de uniformidad mencionados en el punto anterior también eran elevados (dentro de los márgenes establecidos 40% y 70%), estando en concordancia a mayor Daylight factor, mayor porcentaje de uniformidad de iluminancia.

C) Iluminancia mínima y máxima para uso residencial

Conocer el nivel de iluminancia promedio que tenemos en el interior de los modelos a escala es importante ya que determina que valores llegan al mínimo flujo lumínico en el plano de trabajo, en nuestro caso para un uso residencial. Este valor según las publicaciones consultadas (Yeh, 2019), (X. Chen et al., 2017), (Ghadi, Rasul, & Khan, 2017) se encuentra por encima de los 200 lux, para poder desarrollar una actividad con normalidad en el interior de las diferentes estancias de una vivienda.

Además, este parámetro nos fija las horas del día con radiación solar, que estamos por debajo de los 200 lux y en las cuales será necesario un aporte extra de iluminación artificial. Cuantas más horas precisemos de iluminación artificial menos eficiente será el sistema que queremos conseguir por la energía lumínica del sol.

En la Figura 136 se muestra, el porcentaje de horas de sol en cada uno de los periodos seleccionados (color amarillo) y el porcentaje de horas con valores de iluminancia por debajo de los 200 lux en el modelo de referencia (en color verde) y del modelo mejorado (color rojo).

En dicha figura se puede observar a rasgos generales, que el porcentaje de horas que no cubren el periodo completo de sol es mínimo. Tras un análisis pormenorizado se deduce:

- En el periodo de verano sin voladizo, los dos modelos tienen porcentajes muy similares, siendo ligeramente superior el modelo mejorado que dispone de lámina de control solar. Quedándose a tan solo un 4,4% de cubrir el total de las horas solares, y sin necesidad de una gran aportación extra de iluminación artificial.
- En el periodo de verano, cuando se disponía de la instalación de voladizos en orientación sur y este, se observa que el porcentaje de horas sin cubrir en el modelo mejorado es de un 14,35%.
- En el caso del otoño y del invierno, los registros recabados de iluminancias en el interior muestran que el porcentaje de horas por encima de los 200 lux es ligeramente superior a las horas de sol de las que dispone el día.
- En la estación de primavera, en el modelo mejorado es donde se alcanza mayores niveles de iluminación que quedan por debajo de los 200 lux, permaneciendo a tan solo un porcentaje de horas de sol sin cubrir de un 10,41%.

Figura 136. Horas de sol con iluminancia < 200 lux en cada una de las estaciones.

Con los registros recabados a lo largo de los periodos seleccionados, ocurre también que existen niveles muy altos que pudieran causar molestias en las personas a la hora de desarrollar actividades cotidianas dentro de la vivienda. Por ello según publicaciones consultadas, los niveles de iluminancia superiores a 2.000 lux generan malestar y discomfort en el interior de las estancias.

En la Figura 137 se muestran las horas de sol en cada uno de los periodos seleccionados (color amarillo) y el porcentaje de horas con valores de iluminancia por encima de los 2.000 lux en el modelo de referencia (en color azul) y del modelo mejorado (color rosa).

En dicha gráfica se puede observar que el porcentaje de horas por encima de los 2.000 lux es inferior en todas las estaciones en el modelo mejorado, debido a la lámina de control solar de la que disponen. Dichos vidrios no permiten el paso de toda la radiación lumínica hacia el interior, por lo que bajan los niveles de iluminancia. Siendo el caso más favorable en verano cuando se disponía de voladizos (15,74%). Estos elementos pasivos también impiden la entrada de radiación lumínica al interior, bajando esos niveles máximos por encima de los 2.000 lux.

Figura 137. Horas de sol con iluminancia > 2.000 lux en cada una de las estaciones.

En conclusión, para viviendas con alto porcentaje de superficie vidriada en sus fachadas y un clima similar al de Madrid, los parámetros de confort visual están dentro de los márgenes establecidos en la legislación. Los resultados analizados nos demuestran que la incorporación de lámina de control solar y la combinación de voladizos son favorables para alcanzar dichos niveles y proporcionar el confort visual adecuado.

La luz no tiene dimensión escalar, por lo tanto, los valores de iluminancia medidos en los modelos a escala serán los mismos que se registrarían en la vivienda a escala real. Por esta razón no ha sido preciso analizar estos parámetros con el programa de simulación numérica.

7.3. ANÁLISIS COMPUTACIONAL

La última parte es el análisis computacional, en el cual se realiza en primer lugar la validación del modelo numérico en el programa de simulación y la comparativa que existe entre el modelo a escala y el edificio real. Seguidamente se lleva a cabo un estudio energético donde se analizan las demandas, los consumos y las emisiones de CO₂ procedentes de los sistemas de climatización e iluminación.

7.3.1. Validación del análisis computacional (Fase 7)

En este apartado se realiza la validación del modelo numérico simulado, con la ayuda de los datos obtenidos durante la monitorización de los modelos a escala. Posteriormente se realiza la comparativa energética entre el modelo a escala y el edificio real.

7.3.1.1. Validación del modelo numérico

Los resultados de la validación del modelo numérico simulado del edificio se han realizado en los dos modelos a escala que se habían monitorizado durante la campaña anual. El modelo simulado con el programa DesignBuilder© se ha considerado como válido cuando los coeficientes calculados en los periodos mensuales de cada modelo a escala se han situado por debajo de los límites marcados por la normativa de referencia.

- Según la normativa ASHRAE 14-2015 el valor mensual ha de ser menor de $\pm 5\%$ para el NMBE (error medio de sesgo) y menor del 15% para el coeficiente CV(RMSE) (error medio cuadrático).
- Según la normativa IPMVP (international Performance Measurement and Verification Protocol) el valor mensual ha de ser menor de 20% para el NMBE (error medio de sesgo).
- además, ambas normativas fijan el valor del coeficiente de determinación (R^2) como valor admisible por encima de 75%.

En la Tabla 50 se pueden ver reflejados los límites admisibles para datos mensuales según las diferentes normativas.

Tipo de Dato	Índice	ASHRAE Guideline 14	IPMVP
Mensual	NMBE	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$
	CV(RMSE)	$\pm 15\%$	---
	R^2	$>75\%$	$>75\%$

Tabla 50. Límites admisibles según ASHRAE Guideline 14 y IPMVP..

El error medio de sesgo (NMBE) se define mediante en la fórmula 25, indicando que la suma de las diferencias entre los datos experimentales (y_i) y los resultados simulados ($\hat{y}_i$), normalizados por la media de los datos recogidos ($\bar{y}$).

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n - p) \times \bar{y}} \quad (24)$$

El coeficiente de variación de la raíz cuadrada del error medio cuadrático es otro (CV(RMSE)) se define mediante en la fórmula 26, en base a los mismos datos y resultados, para establecer un límite aceptable en la validación del modelo calibrado del edificio simulado.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - p)}}}{\bar{y}} \quad (25)$$

Para ambos cálculos se establece el valor de $p = 1$ respecto del número de datos totales recogidos (n), según lo indicado en la correlación de Bessel.

El análisis del coeficiente de determinación (R cuadrado) se determina según la fórmula 27 y se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (26)$$

Por ello se procede a realizar el análisis estadístico en base a los tres coeficientes mencionados, para determinar si la validación de la simulación se ajusta a los límites admisibles establecidos por la normativa.

La Tabla 51 muestra que todos los valores en cada uno de los meses del año se encuentran comprendidos entre los límites establecidos.

Año / Mes		Modelo a escala – Modelo Referencia			Modelo a escala –Modelo Mejorado		
		NMBE	CV(RMSE)	R²	NMBE	CV(RMSE)	R²
2017	Agosto	-0,01%	0,32%	96,52%	-0,03%	0,70%	94,72%
	Septiembre	-0,01%	0,17%	90,70%	-0,02%	0,56%	87,75%
	Octubre	0,01%	0,20%	79,76%	-0,01%	0,26%	85,90%
	Noviembre	0,01%	0,27%	85,01%	-0,01%	0,19%	90,52%
	Diciembre	0,00%	0,01%	84,55%	-0,01%	0,40%	91,07%
2018	Enero	0,01%	0,18%	91,82%	-0,01%	0,28%	96,00%
	Febrero	-0,02%	0,39%	75,55%	-0,02%	0,40%	90,07%
	Marzo	-0,01%	0,25%	86,03%	-0,03%	0,74%	85,11%
	Abril	-0,01%	0,29%	93,83%	-0,03%	0,80%	95,84%
	Mayo	-0,02%	0,42%	82,69%	-0,03%	0,90%	78,38%
	Junio	-0,02%	0,51%	94,15%	-0,06%	0,61%	77,16%
	Julio	-0,02%	0,42%	75,98%	-0,06%	0,62%	80,15%

Tabla 51. Valores de validación de los modelos.

Como ejemplo se adjuntan las Figuras 138 y 139 donde se muestra el ajuste conseguido con las temperaturas en el periodo de agosto durante la etapa experimental y en la simulación en los dos modelos.

Figura 138. Registro de temperaturas experimentales y simuladas. Modelo de referencia.

Figura 139. Registro de temperaturas experimentales y simuladas. Modelo mejorado.

La diferencia en la desviación media de las temperaturas es de 0,1 °C en el caso del modelo de referencia y de 0,5 °C en el modelo mejorado, lo que demuestra que el ajuste realizado entre las temperaturas obtenidas experimentalmente y las

obtenidas tras la simulación, son aptas para seguir trabajando en el análisis teórico.

Por tanto, una vez validado el modelo se aborda un estudio de simulación energética con objeto de analizar las demandas y los consumos de la vivienda. De esta manera se llegará a la optimización de la mejor solución en este tipo de construcciones con un alto porcentaje de acristalamiento en la totalidad de la fachada.

7.3.1.2. Análisis comparativo entre el modelo a escala y el edificio real a través de simulaciones.

En este apartado se analiza la relación que existe, en distintos parámetros energéticos, entre el modelo a escala 1/6 donde se han realizado todos los análisis experimentales y la misma vivienda a escala real (1/1).

En la gráfica de la izquierda de la Figura 140, se analiza el modelo a escala y el edificio real con vidrios sencillos y la temperatura tiene diferencias significativas tan solo en los meses de julio y agosto, siendo esta diferencia de temperatura ambiental media interior de 1,5 °C. En el caso de vidrios mejorados (gráfica de la derecha), las diferencias se observan en los meses que abarcan desde abril a octubre, siendo la diferencia media de temperatura ambiental interior de 2,6 °C.

Figura 140. Comparativa de temperatura ambiental interior en el modelo a escala 1/6 y en el modelo real.

En las Tablas 52 y 53 se muestran las demandas y los consumos tanto para el modelo a escala 1/6, como para el modelo a escala real.

En el caso de los modelos de referencia, la demanda calorífica del modelo a escala 1/6 representa un 4% de la demanda del modelo real. En cuanto a la demanda frigorífica es de un 1,5% y el consumo un 3,7%.

En los modelos mejorados este porcentaje es de 7% en el caso de la demanda de calefacción, 1,3% en refrigeración y 5% en el consumo.

	MODELO A ESCALA - VIDRIOS SENCILLOS			MODELO REAL - VIDRIOS SENCILLOS		
	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Total (kWh)	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	120,44	0,00	116,09	3.313,64	0,00	3.214,07
Febrero	116,18	0,00	111,62	3.090,86	0,00	2.990,98
Marzo	82,78	0,00	80,59	2.020,33	0,00	1.997,84
Abril	46,58	0,00	46,27	851,19	0,00	889,33
Mayo	18,15	0,00	19,50	126,64	0,00	207,96
Junio	0,00	-20,23	7,70	0,00	-1.212,91	406,32
Julio	0,00	-28,78	10,14	0,00	-2.112,58	653,22
Agosto	0,00	-29,51	10,63	0,00	-2.224,18	692,72
Septiembre	0,00	-19,66	8,29	0,00	-1.023,56	376,71
Octubre	30,55	0,00	31,89	341,40	0,00	431,64
Noviembre	97,78	0,00	94,76	2.625,57	0,00	2.566,71
Diciembre	121,99	0,00	117,59	3.504,59	0,00	3.393,85
Kwh	634,45	-98,17	655,06	15.874,21	-6.573,23	17.821,36
kWh / m2	3,20	-0,50	3,31	80,09	-33,16	89,92
	4%	1,50%	3,70%	100%	100%	100%

Tabla 52. Demandas y consumos del modelo a escala y del modelo real. Vidrios sencillos.

	MODELO A ESCALA - VIDRIOS MEJORADOS			MODELO REAL - VIDRIOS MEJORADOS		
	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Total (kWh)	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	80,88	0,00	79,13	1.392,87	0,00	1.420,55
Febrero	75,65	0,00	73,76	1.119,79	0,00	1.150,37
Marzo	52,11	0,00	51,95	531,09	0,00	607,22
Abril	27,59	0,00	28,50	122,24	0,00	208,65
Mayo	9,47	0,00	11,38	0,92	0,00	90,42
Junio	0,00	-24,55	8,84	0,00	-1.847,08	577,19
Julio	0,00	-32,63	11,15	0,00	-2.667,54	802,68
Agosto	0,00	-33,16	11,59	0,00	-2.684,27	816,72
Septiembre	0,00	-23,09	9,19	0,00	-1.581,58	526,99
Octubre	17,97	0,00	20,12	15,25	0,00	127,03
Noviembre	64,70	0,00	63,86	1.036,26	0,00	1.082,54
Diciembre	84,02	0,00	82,11	1.646,98	0,00	1.659,19
Kwh	412,39	-113,42	451,58	5.865,40	-8.780,46	9.069,55
kWh / m2	2,08	-0,57	2,28	29,59	-44,30	45,76
	7%	1,30%	5%	100%	100%	100%

Tabla 53. Demandas y consumos del modelo a escala y del modelo real. Vidrios mejorados.

7.3.2. Estudio energético a través de simulaciones y rentabilidad del edificio. (Fase 8 y 9)

A continuación, se realiza el análisis de las ganancias solares y las pérdidas por los acristalamientos, de la demanda energética, de los consumos en los sistemas de climatización e iluminación y se también se estudian los indicadores de ahorro energético y emisiones de CO₂.

7.3.2.1. Ganancias solares y pérdidas por acristalamientos.

Para el análisis de las ganancias solares y las pérdidas por acristalamientos, se han simulado cuatro escenarios de la vivienda a escala real, mencionados en el capítulo de metodología.

En la Figura 141 se muestran las ganancias solares en kWh que se obtienen a través de los acristalamientos que tiene la vivienda.

Los escenarios 1 y 2 que son los que no disponen de voladizos, cuentan con mayor ganancia de energía calorífica, siendo beneficioso en los meses fríos para minimizar el aporte de energía por el sistema de calefacción y desfavorable para los meses cálidos donde el consumo en energía para el sistema de refrigeración se verá incrementado.

Dentro de estos dos escenarios, el que dispone de mayores ganancias es el escenario 1 formado por vidrios simples. El escenario 2 al disponer de vidrios con LCS, parte de la energía calorífica es reflejada al exterior, impidiendo que entre dicha energía en su totalidad.

Figura 141. Ganancias solares por acristalamientos.

En la Figura 142 se indican las pérdidas que se producen por los acristalamientos de la vivienda en kWh.

El escenario que menos pérdidas presenta por los acristalamientos es el escenario 2, que dispone de vidrios mejorados con LCS y sin voladizos, teniendo una diferencia significativa con el resto de los escenarios. Esto es debido a que como hemos visto en el análisis experimental, la LCS capta temperatura procedente de la radiación y se calienta.

Por ello en el escenario 4 que también dispone de LCS, las pérdidas son mucho mayores, debido a que los voladizos no permiten que la LCS aumente de temperatura por la energía calorífica procedente de la radiación solar (los voladizos dejan en sombra la mayor parte de la fachada) y no pueden ceder calor para minimizar las pérdidas.

Figura 142. Pérdidas por acristalamientos.

7.3.2.2. Demanda energética

En este apartado se examina la demanda y el consumo de los diferentes escenarios planteados en el punto anterior para modelos a escala real.

En las siguientes figuras se analiza la energía útil necesaria que tendrían que proporcionar los sistemas de climatización para mantener en el interior de la vivienda las condiciones de confort preestablecidas.

La Figura 143 representa la demanda en calefacción y en refrigeración mensual, para el escenario 1 y en la Figura 144 para el escenario 2.

Si se analiza la energía útil total para cada uno de los sistemas, se puede observar que en el escenario 1 la demanda total de calefacción (15.874,21 kWh) es un 92,0% superior que la demanda de energía del escenario 2 (5.865,40 kWh) donde se dispone de vidrios mejorados. En cuanto a la demanda de refrigeración sucede a la inversa, el escenario 2 (8.780,46 kWh) demanda un 28,7% más que el escenario 1 (6.573,23 kWh).

Figura 143. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 1.

Figura 144. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 2.

Es de destacar que en el escenario 2, existen meses donde los consumos de calefacción son mínimos o casi nulos, estando dentro de la banda de confort. Las ganancias que se obtienen por los acristalamientos son suficientes para cubrir la demanda necesaria en meses más cálidos, sin necesidad de consumo de los sistemas.

En las Figuras 145 y 146 se muestran los escenarios 3 y 4, ambos con voladizos en orientación sur y este, donde la diferencia en las demandas de climatización son menos acusadas que en los escenarios anteriores.

Se observa que en el escenario 3 la demanda total de calefacción (16.581,05 kWh) es un 13,6% superior que la demanda de energía del escenario 4 (14.465,29 kWh) donde se dispone de vidrios mejorados. En cuanto a la demanda de refrigeración existe poca diferencia, el escenario 4 (5.657,83 kWh) demanda un 2,7% más que el escenario 3 (5.504,25 kWh).

Figura 145. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 3.

Figura 146. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 4.

Además, la influencia que tiene la instalación de los voladizos se ve reflejada en los resultados obtenidos, debido a que donde en los modelos que disponen de vidrio sencillo (escenarios 1 y 3), en el escenario 3 la demanda total de calefacción (16.581,05 kWh) es un 4,4% superior que la demanda de energía del escenario 1 (15.874,21 kWh) esto es debido a que los voladizos, en invierno no dejan pasar la energía calorífica por lo que se requiere más energía útil del sistema de calefacción.

En cuanto a los escenarios que disponen de vidrios con propiedades mejoradas, se observa que la demanda de refrigeración es menor en el escenario 4 (5.657,83 kWh) el cual dispone de voladizos, respecto al escenario 2 (8.780,46 kWh).

7.3.2.3. Consumos energéticos en los diferentes sistemas

Para el análisis del consumo de la vivienda, se ha procedido a dimensionar las instalaciones de calefacción, refrigeración e iluminación, según lo indicado en el capítulo de metodología.

En las Tablas 54, 55, 56 y 57 se muestran los consumos mensuales que tiene la vivienda en los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación, para cada uno de los escenarios propuestos.

ESCENARIO 1: ESCALA REAL VIDRIOS SENCILLOS	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Calefacción ^(*) (kWh)	Consumo Refrigeración ^(*) (kWh)	Consumo Iluminación ^(*) (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	3.313,64	0,00	3.093,97	0,00	120,11	3.214,07
Febrero	3.090,86	0,00	2.885,96	0,00	105,03	2.990,98
Marzo	2.020,33	0,00	1.886,39	0,00	111,45	1.997,84
Abril	851,19	0,00	794,76	0,00	94,57	889,33
Mayo	126,64	0,00	118,24	0,00	89,72	207,96
Junio	0,00	-1.212,91	0,00	326,93	79,39	406,32
Julio	0,00	-2.112,58	0,00	569,43	83,80	653,22
Agosto	0,00	-2.224,18	0,00	599,51	93,21	692,72
Septiembre	0,00	-1.023,56	0,00	275,89	100,81	376,71
Octubre	341,40	0,00	318,77	0,00	112,87	431,64
Noviembre	2.625,57	0,00	2.451,51	0,00	115,20	2.566,71
Diciembre	3.504,59	0,00	3.272,26	0,00	121,59	3.393,85
TOTAL ANUAL	15.874,21	-6.573,23	14.821,86	1.771,76	1.227,74	17.821,36

(*) Calefacción: Caldera de gas Saunier Duval Thema Condens AS30. Rendimiento 107,1%

(*) Refrigeración: Bomba de calor Mitsubishi MSZ-HR-25VF. EER=3,71

(*) Iluminación: ratio de 2,2 W/m² a 10 lux.

Tabla 54. Demandas y consumos. Escenario 1.

ESCENARIO 2: ESCALA REAL VIDRIOS MEJORADOS	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Calefacción ^(*) (kWh)	Consumo Refrigeración ^(*) (kWh)	Consumo Iluminación ^(*) (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	1.392,87	0,00	1.300,53	0,00	120,02	1.420,55
Febrero	1.119,79	0,00	1.045,56	0,00	104,82	1.150,37
Marzo	531,09	0,00	495,88	0,00	111,34	607,22
Abril	122,24	0,00	114,13	0,00	94,52	208,65
Mayo	0,92	0,00	0,86	0,00	89,56	90,42
Junio	0,00	-1.847,08	0,00	497,86	79,32	577,19
Julio	0,00	-2.667,54	0,00	719,01	83,66	802,68
Agosto	0,00	-2.684,27	0,00	723,52	93,19	816,72
Septiembre	0,00	-1.581,58	0,00	426,30	100,69	526,99
Octubre	15,25	0,00	14,24	0,00	112,79	127,03
Noviembre	1.036,26	0,00	967,56	0,00	114,97	1.082,54
Diciembre	1.646,98	0,00	1.537,80	0,00	121,39	1.659,19
TOTAL ANUAL	5.865,40	-8.780,46	5.476,56	2.366,70	1.226,29	9.069,55

(*) Calefacción: Caldera de gas Saunier Duval Thema Condens AS30. Rendimiento 107,1%

(*) Refrigeración: Bomba de calor Mitsubishi MSZ-HR-25VF. EER=3,71

(*) Iluminación: ratio de 2,2 W/m² a 10 lux.

Tabla 55. Demandas y consumos. Escenario 2.

ESCAPARIO 3: ESCALA REAL CON VIDRIOS SENCILLOS Y VOLADIZOS	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Calefacción ^(*) (kWh)	Consumo Refrigeración ^(*) (kWh)	Consumo Iluminación ^(*) (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	3402,186	0	3182,222	0	120,2357	3.302,46
Febrero	3229,333	0	3020,472	0	105,1869	3.125,66
Marzo	2203,182	0	2061,808	0	111,5206	2.173,33
Abril	950,1807	0	890,0937	0	94,61219	984,71
Mayo	153,6045	0	144,3199	0	89,79926	234,12
Junio	0	-996,3243	0	302,2568	79,47606	381,73
Julio	0	-1819,453	0	533,6628	83,87154	617,53
Agosto	0	-1942,185	0	562,244	93,22658	655,47
Septiembre	0	-746,2831	0	229,3899	100,9331	330,32
Octubre	371,944	0	349,1854	0	112,9462	462,13
Noviembre	2693,599	0	2520,007	0	115,3991	2.635,41
Diciembre	3577,025	0	3345,347	0	121,7727	3.467,12
TOTAL ANUAL	16.581,05	-5.504,25	15.513,46	1.627,55	1.228,98	18.369,99

(*) Calefacción: Caldera de gas Saunier Duval Thema Condens AS30. Rendimiento 107,1%

(*) Refrigeración: Bomba de calor Mitsubishi M SZ-HR-25VF. EER=3,71

(*) Iluminación: ratio de 2,2 W/m² a 10 lux.

Tabla 56. Demandas y consumos. Escenario 3

ESCAPARIO 4: ESCALA REAL CON VIDRIOS MEJORADOS Y VOLADIZOS	Demanda Energía Calorífica (kWh)	Demanda Energía Frigorífica (kWh)	Consumo Calefacción ^(*) (kWh)	Consumo Refrigeración ^(*) (kWh)	Consumo Iluminación ^(*) (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	3013,924	0	2819,446	0	120,139	2.939,59
Febrero	2825,37	0	2643,074	0	105,097	2.748,17
Marzo	1886,47	0	1765,883	0	111,4676	1.877,35
Abril	762,0386	0	714,1516	0	94,58109	808,73
Mayo	110,6752	0	103,9937	0	89,72411	193,72
Junio	0	-1034,031	0	315,2974	79,38646	394,68
Julio	0	-1851,176	0	542,2943	83,80515	626,10
Agosto	0	-1972,887	0	570,8366	93,21767	664,05
Septiembre	0	-799,7377	0	244,9198	100,853	345,77
Octubre	280,3413	0	263,3631	0	112,9019	376,27
Noviembre	2378,214	0	2225,356	0	115,2912	2.340,65
Diciembre	3208,255	0	3000,855	0	121,6525	3.122,51
TOTAL ANUAL	14.465,29	-5.657,83	13.536,12	1.673,35	1.228,12	16.437,59

(*) Calefacción: Caldera de gas Saunier Duval Thema Condens AS30. Rendimiento 107,1%

(*) Refrigeración: Bomba de calor Mitsubishi M SZ-HR-25VF. EER=3,71

(*) Iluminación: ratio de 2,2 W/m² a 10 lux.

Tabla 57. Demandas y consumos. Escenario 4.

En las tablas anteriores se puede observar que el mayor consumo pertenece al sistema de calefacción, siendo además el que más meses es preciso utilizar para alcanzar los parámetros de confort en el interior de la vivienda.

En el escenario 2 (Tabla 55) donde se dispone de vidrios mejorados con LCS (sin voladizos), se refleja que existen meses que no demandan prácticamente ni calefacción ni refrigeración. Sin embargo, en el resto de los casos se dispone de un consumo bastante elevado en calefacción y algo menor en el sistema de refrigeración (en este último caso una diferencia poco significativa). Por ello a pesar de que en el escenario 2 se disponga de más consumo en el sistema de refrigeración, este se compensa con los meses de consumo nulo y con el poco gasto de energía en el sistema de calefacción.

Analizando los consumos a lo largo de todo un año (Figura 147), se puede observar que el mayor peso en el consumo de energía útil recae sobre el sistema de calefacción, el cual dispone de grandes valores en todos los casos excepto en el escenario 2. Esto es debido a que la LCS en invierno no deja salir el calor del interior de la vivienda, por lo que hay menos pérdidas caloríficas que en el resto de los casos.

Además, la LCS protege de la radiación solar directa desde el exterior hacia el interior, pero no en su totalidad, parte de la energía pasa al interior y parte es reflejada hacia el exterior. En el caso del escenario 4 el cual dispone además de los vidrios mejorados, de voladizos en orientación sur y este, no permite que entre prácticamente nada de energía calorífica por lo que en periodos fríos sube el consumo de calefacción y en meses calurosos baja el consumo de refrigeración (siendo dicho escenario de los que menos energía necesita para el sistema de refrigeración).

En cuanto al consumo en iluminación no existen diferencias significativas entre los distintos escenarios planteados, no obstante, el que menos consumo tiene sería el escenario 2 con vidrios mejorados con LCS y sin voladizos.

Figura 147. Consumo anual de los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación.

En la Tabla 58, se muestra la energía que es necesario suministrar a cada uno de los sistemas, por metro cuadrado de vivienda (139,20 m²).

DEMANDA - CONSUMO ANUAL		ESCENARIO	Demanda Calefacción (kWh/m ²)	Demanda Frigorífica (kWh/m ²)	Consumo Calefacción (kWh/m ²)	Consumo Refrigeración (kWh/m ²)	Consumo Iluminación (kWh/m ²)	Consumo Total (kWh/m ²)
SIN ALEROS	VIDRIOS SENCILLOS	1	114,04	-47,22	106,48	12,73	8,82	128,03
	VIDRIOS MEJORADOS	2	42,14	-63,08	39,34	17,00	8,81	65,15
CON ALEROS	VIDRIOS SENCILLOS	3	119,12	-39,54	111,45	11,69	8,83	131,97
	VIDRIOS MEJORADOS	4	103,92	-40,65	97,24	12,02	8,82	118,09

Tabla 58. Demandas y consumos por m².

En línea con lo comentado anteriormente el escenario que menos consumo presenta es el 2, siendo este valor en torno a la mitad que el resto de los escenarios, con un consumo total de 65,15 kWh/m². El motivo, como se ha comentado anteriormente, es el bajo valor en el consumo de calefacción, a pesar de tener el consumo más alto en el sistema de refrigeración.

Este consumo total y anual en el escenario 2, queda dentro de los parámetros que establece el Código Técnico de la Edificación, en su documento básico de ahorro de energía ((Ministerio de Vivienda, 2007)) donde limita el consumo máximo anual por metro cuadrado de vivienda para la zona climática de Madrid.

Según se muestra en la Tabla 59, el valor máximo establecido en el CTE es de 76 kWh/m² superior al valor de 65,15 kWh/m² obtenido en el escenario 2.

Valor límite $C_{ep,tot,lim}$ [kW·h/m ² ·año] para uso residencial privado						
	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	40	50	56	64	76	86
Cambios de uso a residencial privado y reformas	55	75	80	90	105	115

Tabla 59. Valor límite de energía primaria total para uso residencial privado según CTE.

7.3.2.4. Emisiones de CO2

A continuación, se realiza el estudio de las emisiones de dióxido de carbono que se emiten a la atmósfera en cada uno de los escenarios estudiados.

Además, se indica el ahorro de emisiones con respecto al caso más desfavorable, siendo el escenario 2 el que produce menos emisiones.

	EMISIONES DE CO 2 (Kg)	AHORRO DE EMISIONES (%)
ESCENARIO 1	4.597,68	-0,93
ESCENARIO 2	3.204,53	-30,95
ESCENARIO 3	4.640,76	0,00
ESCENARIO 4	4.297,12	-7,40

Tabla 60. Emisiones de CO2 (Kg) y ahorro (%).

7.3.2.5. Rentabilidad del edificio desde la perspectiva coste-eficacia

Después de realizar el estudio de costes, en el capítulo de metodología, para cada uno de los escenarios, los resultados que se obtienen son los siguientes:

El escenario 4, es el más costoso, según el análisis realizado tomando como referencia el coste más elevado se analiza el ahorro que se produciría con la instalación del resto de cerramientos de vidrio y protecciones pasivas. Como se refleja en la Tabla 61.

	COSTE INVERSION (€)	AHORRO INVERSION (%)
ESCENARIO 1	1.072,18	88,56
ESCENARIO 2	3.954,56	57,79
ESCENARIO 3	6.487,30	30,76
ESCENARIO 4	9.369,69	0,00

Tabla 61. Ahorro en función del tipo de cerramiento a instalar.

A continuación, se realiza el estudio de los consumos de combustibles durante todo un año. Por un lado, se analiza el consumo de gas, debido al consumo en calefacción durante todo el año y por otro de electricidad debido al consumo de la instalación de refrigeración realizada con bomba de calor y de la iluminación estimada para la vivienda.

En la Figura 148 se pueden ver reflejados los consumos y los costes de combustible en los diferentes escenarios analizados. Es cierto que la energía eléctrica es más cara que el consumo de gas, por ello se analiza el coste de cada uno de los consumos en función del combustible empleado.

Para el análisis de costes, se ha tenido en cuenta un precio de 0,0247 €/kWh para el gas y de 0,0946 €/kWh para la energía eléctrica. Estos datos han sido recabados de las tarifas de las compañías suministradoras, vigentes en enero de 2020 (<https://www.iberdrola.es/luz>).

El escenario 2, presenta el menor consumo en energía para los sistemas que se alimentan con gas natural, sin embargo, en el consumo en energía eléctrica está por encima de los otros escenarios. No obstante, el bajo valor en el consumo de calefacción contrarresta el aumento en el sistema de refrigeración.

Figura 148. Consumo y coste de gas y electricidad.

Como se refleja en la Tabla 62 el mayor coste en energía eléctrica lo tiene el escenario 2 y en gas el escenario 3. Tomando como referencia el mayor coste se analiza el ahorro que se produciría respecto al valor más elevado en cada uno de los casos.

	COSTE ENERGIA ELECTRICA (€)	AHORRO ENERGIA ELECTRICA (%)	COSTE ENERGIA GAS (€)	AHORRO ENERGIA GAS (%)
ESCENARIO 1	283,81	16,52	632,89	4,46
ESCENARIO 2	339,97	0,00	233,85	64,70
ESCENARIO 3	270,29	20,50	662,42	0,00
ESCENARIO 4	274,54	19,25	577,99	12,75

Tabla 62. Coste total de las energías y ahorro en cada uno de los escenarios.

En la Figura 149 se muestra el coste total (gas + electricidad) anual de energía que conllevaría cada uno de los escenarios planteados (línea discontinua azul) y

el ahorro de energía (línea continua naranja), tomando como referencia el mayor valor de consumo de energía total.

Como se puede observar el escenario 2 es el que presenta mejores resultados al tener menor consumo y consecuentemente mayor ahorro de energía.

Figura 149. Costes totales en gas y electricidad (€) y ahorro de energía. (kWh)

Observando el análisis realizado de los consumos a lo largo de todo un año, se ve reflejado que la mejor solución sería la vivienda con vidrios mejorados y sin voladizos. Esto es debido a que el incremento que este tiene en la parte de la refrigeración es mucho menor al consumo en calefacción que prevalece durante más meses al año. Además, el sistema de refrigeración tiene un rendimiento mayor al de la caldera de gas, por ello no se ve prácticamente penalizado en los meses de verano.

Según los datos estudiados anteriormente y los ahorros que se producen tanto en la inversión de materiales de construcción, de protecciones pasivas, de consumos en gas y electricidad, y de emisiones a la atmosfera de dióxido de carbono, se obtiene el siguiente gráfico resumen. (Figura 150)

Figura 150. Ahorro (%) en el total de los parámetros que influyen para la elección del modelo más rentable.

En la Figura 150 se observa que el escenario que presenta más ahorro en el conjunto de todos los parámetros analizados es el 2 que dispone de vidrios mejorados con LCS y sin voladizos. A pesar de que el coste en vidrios es algo más elevado, a lo largo de los años se amortiza por el ahorro que supone en el consumo de las instalaciones de calefacción, refrigeración e iluminación.

CONCLUSIONES

8.1. CONCLUSIONES GENERALES.

8.2. CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS PREVIOS.

8.3. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL.

8.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL.

8. CONCLUSIONES

A continuación, se resumen las conclusiones que pueden extraerse del trabajo de investigación desarrollado, de acuerdo con el objetivo principal planteado en esta Tesis Doctoral.

8.1. CONCLUSIONES GENERALES

Con esta investigación se ha alcanzado el objetivo principal de la tesis, demostrándose la viabilidad de utilizar modelos a escala para el análisis del comportamiento energético, las emisiones de CO₂ y el coste económico en los sistemas de climatización e iluminación, en viviendas unifamiliares aisladas con grandes superficies acristaladas.

Además, respecto a los objetivos específicos se resumen algunas de las conclusiones obtenidas:

La investigación realizada ratifica experimentalmente los datos teóricos encontrados en la literatura técnica y científica.

La mejora energética se sitúa principalmente en el campo de la captación de la energía solar, permitiendo un control de la misma y un aprovechamiento completo. El aprovechamiento de la energía solar incidente es fundamental para lograr el máximo confort en el edificio, con el mínimo gasto energético de recursos no renovables.

Se ha podido comprobar que la mayor parte del año, para una zona climática como es Madrid, es preciso el sistema de calefacción, siendo los consumos mucho más elevados que en refrigeración.

Las ganancias solares minimizan los consumos de calefacción y de iluminación natural y penalizan la refrigeración. Por ello es preciso la implantación de acristalamiento con lámina de control solar .

La utilización de un vidrio con lámina de control solar, amplia la libertad de diseño arquitectónico, permitiendo la utilización de grandes superficies acristaladas, sin comprometer por ello la eficiencia energética de la envolvente. Esto conlleva un nuevo reto a la hora de construir, ejecutando viviendas con grandes superficies acristaladas que admitan el contacto con el entorno exterior y permitan la entrada de luz natural, acercándonos a una construcción regenerativa. Características importantes y necesarias durante la pandemia mundial (COVID-19), al tener que sobrellevar la realización de un gran número de actividades, en el interior de la vivienda, por parte de los usuarios.

Tras los análisis realizados y el estudio obtenido de las simulaciones, se determina que la vivienda que presenta mejores resultados energéticos, medio ambientales y de costes, estaría compuesta por vidrios con lámina de control solar y sin la instalación de voladizos.

En zonas con clima continental, vidrios con factor solar "g" del 58% presenta un mejor comportamiento energético con relación a la demanda de climatización, siendo más efectivo en los sistemas de calefacción.

El voladizo presenta buenos resultados en ciertos casos, como puede ser minimizar la temperatura en el interior de la vivienda, disminuir el consumo de refrigeración, atenuar la iluminancia que en este tipo de viviendas con grandes acristalamientos puede llegar a ser elevada. Por ello una buena alternativa sería disponer de voladizos móviles que puedan utilizarse en ciertas ocasiones.

8.2. CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS PREVIOS

Las viviendas de vidrio se enmarcan en el campo de la calidad ambiental, la mejora de la salud y el confort en el interior de los edificios, además aportan ahorro energético en el consumo de los sistemas, debido al aprovechamiento de la radiación solar.

Se amplía el conocimiento sobre el comportamiento térmico y lumínico de viviendas unifamiliares, que además disponen de sus fachadas acristalada en todas sus orientaciones y en la totalidad de su superficie. También en el campo

de las estrategias pasivas que afectan a la iluminación, a la mejora de la salud y al bienestar, consiguiendo beneficios sociales, económicos y medio ambientales.

El análisis computacional a través de programas de simulación energética es una buena herramienta para el diseño de los modelos experimentales. Además, la monitorización de modelos a escala en condiciones climatológicas reales presenta buenos resultados que complementan y contractan los resultados obtenidos en las simulaciones energéticas.

8.3. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Análisis en modelos a escala

Se concluye que la utilización de modelos a escala para el análisis de fenómenos de transferencia de calor proporciona una forma alternativa y también complementaría a las simulaciones computacionales y a la utilización de edificios a escala real.

El combinar el análisis experimental a través de modelos a escala, con software de simulación energética, conlleva tener una visión más detallada de varios factores, como son; capacidad de los sistemas de climatización, niveles de confort, consumo energético, emisiones de CO₂, etc.

Temperaturas en la estación de verano

La instalación de voladizos en la estación de verano influye en la temperatura interior sobre todo en las horas centrales del día, mitigando el incremento de temperatura y también ralentizando el enfriamiento nocturno. Siendo muy favorable el uso de voladizo para la estación de verano donde las temperaturas que se alcanzan en Madrid son elevadas. Por otro lado, la lámina de control solar evita el paso de parte de la energía calorífica, siendo insuficiente para los meses de verano. Además, con esta lámina se eleva la temperatura superficial exterior causado por la energía que reflejan al exterior. En concreto es de señalar que:

- En las horas de mayor radiación solar los voladizos descienden la temperatura ambiental interior 5,60°C en el caso del modelo de referencia y 6,40 °C en el mejorado.
- Las temperaturas mínimas ambientales interiores son superiores en los modelos que disponían de los voladizos. Esto se debe a que cuando disminuye la temperatura en el exterior, el voladizo provoca que se ralentice la disipación del calor, observándose que las temperaturas interiores descienden en torno a 1,6 °C y 1,7 °C menos en los modelos que disponen de voladizos.
- El salto térmico entre las temperaturas máximas y las mínimas en el interior de los modelos a escala es menor cuando se disponía de voladizos. Si el salto térmico en el interior es menor, se reduce la temperatura de trabajo de los equipos y como consecuencia se reduce el consumo.
- En la orientación sur, sin voladizo en ninguno de los modelos, existe una diferencia en la temperatura superficial exterior de 6,80 °C más en el modelo de vidrios con lámina de control solar.

Temperaturas en el resto de las estaciones

Existe mucha diferencia entre la temperatura ambiente exterior y las temperaturas superficiales, sobre todo en las horas centrales del día, cabe destacar que a partir del momento en el que empieza a caer el sol el modelo mejorado pierde menos temperatura que el modelo de referencia. Esto se debe a la lámina de control solar situada en la cara dos del acristalamiento del modelo mejorado, que va acumulando todo el calor radiante que no deja pasar al interior y lo va cediendo gradualmente con la bajada de las temperaturas.

En el mes de invierno donde las temperaturas son más frías, los vidrios con control solar se comportan peor. Para las estaciones con temperaturas bajas en el exterior sería preferible la utilización de vidrios con baja transmitancia térmica y así será menor el paso de energías entre ambas caras. De esto se deduce que el comportamiento de los vidrios con lámina de control solar tiene un rendimiento mejor en estaciones con temperaturas más cálidas. En concreto indicar que:

- La diferencia entre los valores máximos de las temperaturas ambientales interiores es de 6,6°C en otoño y de 5,7°C en invierno, más en el modelo de referencia, no observándose diferencia durante la primavera. Estos resultados se atribuyen a la lámina de control solar, que en otoño y en invierno no permite que entre toda la radiación solar incidente sobre los vidrios, mientras que en primavera el incremento del número de horas de sol hace que el sobrecalentamiento del vidrio que dispone de lámina de control solar caliente más rápidamente el aire interior.
- En la estación de invierno, en la orientación sur, la temperatura superficial exterior del doble acristalamiento con lámina de control solar es de 9,30 °C más que un vidrio sencillo. Esto es debido a la energía calorífica que absorbe el vidrio que dispone de la lámina de control solar.
- En la misma estación, pero en este caso en la orientación norte, el doble acristalamiento alcanza temperaturas similares y que siguen la misma tendencia que las temperaturas ambientes exteriores. El vidrio sencillo alcanza temperaturas superficiales mayores (hasta 4,80 °C más que el mejorado), ocurriendo a la inversa de lo que sucedía en la orientación sur, donde se disponía de un doble acristalamiento con lámina de control solar.

De la iluminancia

Se ha podido demostrar que la utilización de vidrios con lámina de control solar minora los niveles de iluminancia en el interior de los modelos a escala y que además la incorporación de voladizos produce una mejor distribución y control de la luz, atenuando los niveles del flujo luminoso en el interior. Siendo la orientación este la que mejores resultados obtiene para este tipo de viviendas acristaladas en la totalidad de sus fachadas. En concreto es de señalar que:

- En el periodo donde no se disponía de la instalación de voladizos, se obtiene un 29,30% más de iluminancia en el modelo de referencia que en el modelo mejorado. Los vidrios del modelo a escala mejorado disponen de lámina de control solar en sus orientaciones sur, este y oeste con mayor poder de reflexión de la energía solar en su espectro de radiación

luminosa, que el modelo de referencia. Por lo cual es beneficioso este tipo de vidrios debido a que esta vivienda al tener grandes acristalamientos la iluminancia puede llegar a ser elevada y esta lámina lo atenúa.

- Modelos a escala con voladizos en sus orientaciones sur y este, se obtiene un 34,76% más de iluminancia en el modelo de referencia que en el modelo mejorado. Ocurriendo el mismo efecto mencionado anteriormente debido a los vidrios con lámina de control solar.
- La lámina de control solar hace que la iluminación se minore, existiendo una probabilidad de influencia de la irradiancia exterior sobre la iluminancia interior de 61,56%.
- Además, se observa que los voladizos producen una mejor distribución de la luz, bajando los niveles de iluminancia con respecto a los modelos analizados anteriormente que no disponían de voladizos.
- La diferencia que existe en el modelo de referencia sin voladizo, respecto a los registros obtenidos en el mismo modelo, pero con la incorporación de voladizos es de un 11,92% menos de iluminancia en este último caso.

De la uniformidad

Con respecto a la uniformidad se concluye que en todas las estaciones analizadas la uniformidad es ligeramente mayor en el modelo de vidrios simples, a excepción de la primavera donde se observa un porcentaje a la inversa.

Del factor de luz diurna

- Las conclusiones sobre el factor de luz diurna indican que la lámina de control solar en el vidrio influye positivamente. Se estima que el factor de luz diurna mejora en torno a un 3,28% respecto al modelo que no dispone de lámina de control solar.

De la iluminación mínima y máxima

La conclusión principal sobre la iluminación es que para viviendas con alto porcentaje de superficie vidriada en sus fachadas, los parámetros de confort visual están dentro de los márgenes establecidos en la legislación. Los resultados analizados nos demuestran que la incorporación de lámina de control solar y la combinación de voladizos son favorables para alcanzar dichos niveles y proporcionar el confort visual adecuado. En concreto indicar que:

- En el periodo de verano sin voladizo, tanto el modelo mejorado como el sencillo tienen porcentajes muy similares, siendo ligeramente superior el modelo mejorado que dispone de lámina de control solar. Quedándose a tan solo un 4,4% de cubrir el total de las horas solares, y sin necesidad de una gran aportación extra de iluminación artificial.
- En el periodo de verano, cuando se disponía de la instalación de voladizos en orientación sur y este, se observa que en este caso el porcentaje de horas sin cubrir en el modelo de vidrios mejorado es de un 14,35%.
- En el caso del otoño y del invierno, los registros recabados de iluminancias en el interior muestran que el porcentaje de horas por encima de los 200 lux es ligeramente superior a las horas de sol de las que dispone el día.
- En la estación de primavera, en el modelo mejorado es donde se alcanza mayores niveles de iluminación que quedan por debajo de los 200 lux, permaneciendo a tan solo un porcentaje de horas de sol sin cubrir de un 10,41%.

8.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL

Validación del programa de simulación

Se confirma que el programa de simulación energética Design Builder® es adecuado para este tipo de análisis, ya que las temperaturas obtenidas experimentalmente se ajustan a las obtenidas en las simulaciones.

Demandas energéticas

- En los modelos simulados con vidrios sencillos, las demandas y el consumo es superior en el modelo a escala respecto al modelo real. Siendo de un 4% superior en la demanda del sistema de calefacción, un 1,5% superior en la demanda del sistema de refrigeración y un 3,7% mayor en el consumo total.
- En los modelos mejorados estos porcentajes también son mayores que en los modelos a escala. Siendo de 7% en el caso de la demanda de calefacción, 1,3% en refrigeración y 5% en el consumo total.

Ganancias solares y pérdidas por acristalamientos

- Se constata que los voladizos son de utilidad en los meses cálidos que disponen de muchas horas de radiación solar. El vidrio con lámina de control solar presenta mejores resultados que el vidrio sencillo, esto se debe a que la lámina de control solar hace que parte de la energía calorífica sea reflejada al exterior.
- Por otro lado, la simulación que menos pérdidas energéticas por acristalamientos presenta, es la que dispone de vidrios mejorados con LCS y sin voladizos, teniendo una diferencia significativa con el resto de las simulaciones.

Consumos energéticos

- Analizando los consumos a lo largo de todo un año, se concluye que el mayor peso en el consumo de energía útil recae sobre el sistema de calefacción, el cual dispone de grandes valores en todos los casos excepto en la simulación que dispone de vidrios mejorados con lámina de control solar y no dispone de voladizo. Esto es debido a que la lámina de control solar en invierno no deja salir el calor del interior de la vivienda, por lo que hay menos pérdidas caloríficas que en el resto de los casos. Y a diferencia del voladizo la lámina de control solar si que permite el paso al interior de la vivienda de parte de la radiación solar.

- El sistema de refrigeración, que es utilizado durante menos meses al año y que dispone de un peso menor que el sistema de calefacción, muestra su menor consumo en la simulación que dispone de vidrios con LCS y además cuenta con voladizos en las orientaciones sur y este.
- El mayor peso en el consumo se lo lleva el sistema de calefacción, por ello el menor consumo total lo obtenemos en el escenario que dispone de vidrios con LCS y sin voladizo.

Análisis económico

- El escenario que presenta más ahorro en el conjunto de todos los parámetros analizados es el que dispone de vidrios mejorados con LCS y sin voladizos. A pesar de que el coste en vidrios es algo más elevado, a lo largo de los años se amortiza por el ahorro que supone en el consumo de las instalaciones de calefacción, refrigeración e iluminación.

Emisiones de CO₂

- En cuanto a las emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera, el escenario 2, que dispone de vidrios mejorados con LCS y sin voladizos, es el que menos emite. Siendo de un ahorro de un 32,54% con respecto al escenario más desfavorable.

CONCLUSIONS

8.1. GENERAL CONCLUSIONS.

8.2. CONCLUSIONS OF PREVIOUS ANALYSES

8.3. CONCLUSIONS OF THE EXPERIMENTAL ANALYSIS

8.4. CONCLUSIONS OF THE COMPUTATIONAL ANALYSIS.

8. CONCLUSIONS

The conclusions that can be drawn from the research work carried out are summarized below, in accordance with the main and specific objectives set forth in this Doctoral Thesis.

8.1. GENERAL CONCLUSIONS

With this research, the main objective of the thesis has been reached, demonstrating the feasibility of using scale models for the analysis of energy behavior, CO₂ emissions and the economic cost of air conditioning and lighting systems in isolated single-family homes with large glazed surfaces.

In addition, with respect to the specific objectives, some of the conclusions obtained are summarized:

The research carried out experimentally confirms the theoretical data found in the technical and scientific literature.

Energy improvement is located mainly in the field of solar energy capture, allowing its control and full use. The use of incident solar energy is essential to achieve maximum comfort in the building, with the minimum energy expenditure of non-renewable resources.

It has been found that most of the year, for a climatic zone such as Madrid, the heating system is necessary, with consumption being much higher than in cooling.

Solar gains minimize heating and natural lighting consumption and penalize cooling. For this reason it is necessary to install glazing with a solar control sheet.

The use of a glass with a solar control sheet expands the freedom of architectural design, allowing the use of large glazed surfaces, without compromising the energy efficiency of the envelope. This entails a new challenge when it comes to building, executing homes with large glazed surfaces that allow contact with the outside environment and allow the entry of natural light, bringing us closer to a

regenerative construction. Important and necessary characteristics during the global pandemic (COVID-19), when having to cope with the realization of a large number of activities, inside the home, by users.

After the analyzes carried out and the study obtained from the simulations, it was determined that the house with the best energy, environmental and cost results would be made up of glass with a solar control sheet and without the installation of overhangs.

In areas with a continental climate, glass with a solar factor "g" of 58% has better energy performance in relation to the demand for air conditioning, being more effective in heating systems.

The cantilever presents good results in certain cases, such as minimizing the temperature inside the house, reducing the consumption of refrigeration, reducing the illuminance that in this type of houses with large glazing can become high. Therefore, a good alternative would be to have mobile overhangs that can be used on certain occasions.

8.2. CONCLUSIONS OF PREVIOUS ANALYSES

Glass houses are part of the field of environmental quality, the improvement of health and comfort inside buildings, and they also provide energy savings in the consumption of systems, due to the use of solar radiation.

Knowledge about the thermal and light behavior of single-family homes is expanded, which also have glass facades in all their orientations and on their entire surface. Also in the field of passive strategies that affect lighting, improving health and well-being, achieving social, economic and environmental benefits.

Computational analysis through energy simulation programs is a good tool for designing experimental models. In addition, the monitoring of scale models in real weather conditions presents good results that complement and contract the results obtained in energy simulations.

8.2. CONCLUSIONS OF THE EXPERIMENTAL ANÁLISIS

Analysis in scale models

It is concluded that the use of scale models for the analysis of heat transfer phenomena provides an alternative way and would also complement computer simulations and the use of real-scale buildings.

Combining the experimental analysis through scale models, with energy simulation software, entails having a more detailed vision of several factors, such as; capacity of air conditioning systems, comfort levels, energy consumption, CO₂ emissions, etc.

Temperatures in the summer season

The installation of cantilevers in the summer season influences the interior temperature especially in the central hours of the day, mitigating the increase in temperature and also slowing down the cooling at night. Being very favorable the use of cantilever for the summer season where the temperatures that are reached in Madrid are high. On the other hand, the solar control sheet prevents the passage of part of the heat energy, being insufficient for the summer months. In addition, with this sheet the external surface temperature rises caused by the energy that they reflect outside. Specifically, it should be noted that:

- In the hours of greatest solar radiation, the overhangs lower the interior ambient temperature by 5.60°C in the case of the reference model and 6.40 °C in the improved one.
- The minimum indoor ambient temperatures are higher in the models that had overhangs. This is due to the fact that when the temperature outside decreases, the overhang causes the dissipation of heat to slow down, observing that the indoor temperatures drop by around 1.6 °C and 1.7 °C less in the models that have overhangs .

- The thermal jump between the maximum and minimum temperatures inside the scale models is smaller when overhangs were available. If the thermal jump inside is less, the working temperature of the equipment is reduced and consequently consumption is reduced.
- In the south orientation, without cantilever in any of the models, there is a difference in the exterior surface temperature of 6.80 °C more in the model of glass with solar control sheet.

Temperatures in the rest of the seasons

There is a lot of difference between the outdoor ambient temperature and the surface temperatures, especially in the central hours of the day, it should be noted that from the moment the sun begins to fall, the improved model loses less temperature than the reference model. This is due to the solar control sheet located on face two of the glazing of the improved model, which accumulates all the radiant heat that does not allow it to pass into the interior and gradually releases it with the drop in temperatures.

In the winter month where the temperatures are colder, the glasses with solar control perform worse. For stations with low temperatures outside, it would be preferable to use glasses with low thermal transmittance and thus the passage of energy between both faces will be less. From this it is deduced that the behavior of the glasses with solar control film has a better performance in stations with warmer temperatures. Specifically indicate that:

- The difference between the maximum values of indoor environmental temperatures is 6.6°C in autumn and 5.7°C in winter, more in the reference model, with no difference being observed during spring. These results are attributed to the solar control sheet, which in autumn and winter does not allow all the solar radiation incident on the glass to enter, while in spring the increase in the number of hours of sunshine causes the glass it has to overheat. solar control sheet heats indoor air more quickly.
- In the winter season, in the south orientation, the exterior surface temperature of the double glazing with solar control sheet is 9.30 °C more

than a single glass. This is due to the heat energy absorbed by the glass that has the solar control sheet.

- In the same season, but in this case in the north orientation, the double glazing reaches similar temperatures that follow the same trend as the outdoor ambient temperatures. Simple glass reaches higher surface temperatures (up to 4.80 °C more than the improved one), which is the opposite of what happened in the south orientation, where double glazing with a solar control sheet was available.

Of illuminance

It has been shown that the use of glass with a solar control sheet reduces the levels of illuminance inside the scale models and that, in addition, the incorporation of cantilevers produces a better distribution and control of light, attenuating the levels of luminous flux. inside. The east orientation being the one that obtains the best results for this type of glazed housing on all of its facades. Specifically, it should be noted that:

- In the period where the installation of overhangs was not available, 29.30% more illuminance is obtained in the reference model than in the improved model. The glasses of the improved scale model have a solar control sheet in their south, east and west orientations with a greater power of reflection of the solar energy in its spectrum of light radiation than the reference model. Therefore, this type of glass is beneficial because this house has large glazing, the illuminance can be high and this sheet attenuates it.
- Scale models with cantilevers in their south and east orientations, obtaining 34.76% more illuminance in the reference model than in the improved model. Occurring the same effect mentioned above due to the glass with solar control sheet.
- The solar control sheet reduces the illumination, with a probability of influence of the exterior irradiance on the interior illuminance of 61.56%.

- In addition, it is observed that the overhangs produce a better light distribution, lowering the illuminance levels with respect to the previously analyzed models that did not have overhangs.
- The difference that exists in the reference model without overhang, with respect to the records obtained in the same model, but with the incorporation of overhangs, is 11.92% less illuminance in the latter case.

Of uniformity

With regard to uniformity, it is concluded that in all the stations analyzed, uniformity is slightly higher in the simple glass model, except for spring where a percentage is observed in reverse.

Daylight factor

The conclusions about the daylight factor indicate that the solar control film on the glass has a positive influence. It is estimated that the daylight factor improves by around 3.28% compared to the model that does not have a solar control sheet.

Of the minimum and maximum illumination

The main conclusion about lighting is that for homes with a high percentage of glazed surface on their facades, the visual comfort parameters are within the margins established in the legislation. The results analyzed show us that the incorporation of a solar control sheet and the combination of overhangs are favorable to achieve these levels and provide adequate visual comfort. Specifically indicate that:

- In the summer period without overhang, both the improved and the simple models have very similar percentages, the improved model with a solar control sheet being slightly higher. Remaining only 4.4% from covering the total solar hours, and without the need for a large extra contribution of artificial lighting.
- In the summer period, when the installation of cantilevers facing south and east was available, it is observed that in this case the percentage of uncovered hours in the improved glass model is 14.35%.

- In the case of autumn and winter, the records collected on indoor illuminance show that the percentage of hours above 200 lux is slightly higher than the hours of sunshine available during the day.
- In the spring season, the improved model is where higher levels of illumination are reached, which are below 200 lux, remaining only a percentage of hours of uncovered sunlight of 10.41%.

8.2. CONCLUSIONS OF THE COMPUTATIONAL ANALYSIS

Validation of the simulation program

It is confirmed that the Design Builder © energy simulation program is suitable for this type of analysis, since the temperatures obtained experimentally are adjusted to those obtained in the simulations.

Energy demands

- In the simulated models with simple glasses, the demands and consumption is higher in the scale model compared to the real model. Being 4% higher in demand for the heating system, 1.5% higher in demand for the cooling system and 3.7% higher in total consumption.
- In improved models these percentages are also higher than in scale models. Being 7% in the case of heating demand, 1.3% in cooling and 5% in total consumption.

Solar gains and losses from glazing

- It is found that the overhangs are useful in warm months that have many hours of solar radiation. The glass with a solar control sheet presents better results than simple glass, this is because the solar control sheet causes part of the heat energy to be reflected outside.
- On the other hand, the simulation that presents the least energy losses due to glazing is the one that has improved glass with LCS and without overhangs, having a significant difference with the rest of the simulations.

Energy consumption

- Analyzing the consumptions throughout a year, it is concluded that the greatest weight in the consumption of useful energy falls on the heating system, which has large values in all cases except in the simulation that has improved glass with solar control sheet and does not have an overhang. This is due to the fact that the solar control sheet in winter does not let the heat out of the interior of the house, so there is less heat loss than in the rest of the cases. And unlike the cantilever, the solar control sheet does allow part of the solar radiation to pass into the house.
- The cooling system, which is used for fewer months a year and has a lower weight than the heating system, shows its lower consumption in the simulation that it has glass with LCS and also has overhangs in the south and south orientations. East.
- The greater weight in consumption is carried by the heating system, therefore the lowest total consumption is obtained in the scenario that has glass with LCS and without overhang.

Economic analysis

- The scenario that presents the most savings in all the parameters analyzed is the one with improved glass with LCS and without overhangs. Although the cost of glass is somewhat higher, over the years it pays for itself due to the savings it represents in the consumption of heating, cooling and lighting installations.

CO2 emissions

- In terms of carbon dioxide emissions to the atmosphere, scenario 2, which has glass enhanced with LCS and without overhangs, is the one that emits the least. This is a saving of 32.54% compared to the most unfavorable scenario.

Capítulo 9:

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta tesis ha proporcionado la oportunidad de desarrollar las siguientes líneas para futuros proyectos de investigación relacionados con esta área:

- Analizar un sistema de control domótico para voladizos que puedan ocultarse o integrarse en la edificación, y así aprovechar sus ventajas en los meses cálidos, para poder aprovechar el beneficio de este elemento pasivo.
- Estudiar la implicación que tienen los sistemas de ventilación mecánica en este tipo de edificaciones singulares, en cuanto al ahorro energético y al bienestar de las personas, para acercarnos a una arquitectura regenerativa.
- Incorporar energías alternativas, como puede ser la aerotermia o geotermia, a los sistemas de climatización para poder llegar a tener una vivienda de “consumo casi nulo” y con una tipología edificatoria de fachadas de vidrio en toda su superficie.
- Ampliar el estudio con otra tipología de vidrios como pueden ser vidrios con agua circulante, acristalamiento con materiales de cambio de fase, vidrios con algas, etc.
- Análisis de optimización de envolventes translúcidas con almacenamiento de energía térmica por calor latente, para conseguir el mayor rendimiento energético posible en este tipo de viviendas unifamiliares acristaladas en todas sus fachadas.
- Ampliar la investigación, de este tipo de viviendas singulares, a otras áreas donde la climatología sea distinta al tiempo de Madrid. Para conseguir un análisis completo de estas edificaciones singulares en diferentes latitudes.

Capítulo 10:

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

10. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Los resultados de esta Tesis han sido expuestos en artículos de investigación y divulgación científica y se han realizado ponencias en congresos nacionales e internacionales que se exponen a continuación:

2017

“Use of natural light”.

Patricia Aguilera Benito, Carmen Viñas Arrebola, Antonio Rodríguez Sánchez.

II International Conference on Technological Innovation in Building (CITE 2017)

8, 9 y 10 de marzo de 2017

ISBN: 978-84-16397-56-3

“Analysis of thermal behavior in a building large surfaces glazed with high performance glasses.”

Patricia Aguilera Benito, Carmen Viñas Arrebola, Antonio Rodríguez Sánchez, Sheila Varela Luján.

IV International Congress on Construction and Building Research (COINVEDI 2017)

14 y 15 de diciembre de 2017.

ISBN: 978-84-09-03294-5

2018

“Analysis of natural light through scale models.”

Patricia Aguilera Benito, Carmen Viñas Arrebola, Antonio Rodríguez Sánchez, Sheila Varela Luján.

III International Conference on Technological Innovation in Building (CITE 2018)

7, 8 y 9 de marzo de 2018

ISBN: 978-84-163-9771-6

“Analysis of the influence, in climate control demand, of passive strategies in houses with large glazed surfaces, by means of a simulation code. The Farnsworth house.”

Patricia Aguilera Benito, Carmen Viñas Arrebola, Antonio Rodríguez Sánchez, Sheila Varela

Anales de Edificación. Vol.4 – Nº3, 34-43 (2018)

Doi:10.20868/ade.2018.3798

ISSN: 2444-1309

Capítulo 11:

BIBLIOGRAFIA

11. BIBLIOGRAFIA

AENOR. (2006). UNE-EN ISO 7730. Ergonomía del ambiente térmico Octubre 2006 Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

AENOR. (2012a). UNE-EN 12464-1: 2012. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: lugares de trabajo interiores.

AENOR. (2012b). UNE-EN ISO 10456:2012 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño.

Amirkhani, M., Garcia-Hansen, V., Isoardi, G., & Allan, A. (2017). An Energy Efficient Lighting Design Strategy to Enhance Visual Comfort in Offices with Windows. *Energies*, 10(8), 1126. <https://doi.org/10.3390/en10081126>

Archivo Saint Gobain. (1665). *Lettres patentes créant la Manufacture royale de glaces et de miroirs, signature autographe de Louis XIV, contre-signature de Guénégaud, du chancelier d'Aligre et de Colbert* (Archives S). París.

Arquitectura, 2G: revista internacional de. (2009). Casa Farnsworth, Plano, 1945-1951. *2G Revista Internacional de Arquitectura*. (2009 N° 48-49), 170-197.

Aste, N., Buzzetti, M., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2018). Glazing's techno-economic performance: A comparison of window features in office buildings in different climates. *Energy and Buildings*, 159, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.088>

Banihashemi, S., Golizadeh, H., Reza Hosseini, M., & Shakouri, M. (2015). Climatic, parametric and non-parametric analysis of energy performance of double-glazed windows in different climates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4 (2), 307-322. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.09.002>

Baumgärtner, L., Krasovsky, R. A., Stopper, J., & Von Grabe, J. (2017). Evaluation of a solar thermal glass façade with adjustable transparency in cold and hot climates. *Energy Procedia*, 122, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.347>

Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G., & Spada, G. (2008). Daylight glare: a review of discomfort indexes. *Detec*.

Bianco, L., Cascone, Y., Goia, F., Perino, M., & Serra, V. (2017). Responsive glazing systems: Characterisation methods, summer performance and implications on thermal comfort. *Solar Energy*, 158, 819-836. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.050>

Cantos, J. O. (2009). Cambio climático y riesgos climáticos en España. *Investigaciones Geográficas*, 49, 197-220. <https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.10>

Cedar Lake Ventures, I. (2018). Weather Spark. Recuperado 10 de diciembre de 2018, de <https://es.weatherspark.com/y/14091/Clima-promedio-en-Chicago-Illinois-Estados- Unidos>.

Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4), 848-858. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>

Chen, X., Yang, H., & Wang, Y. (2017). Parametric study of passive design strategies for high-rise residential buildings in hot and humid climates: miscellaneous impact factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(November 2016), 442-460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.055>

Cifuentes, D. E. V. D. E. (1991). Arte e industria en gijón (18 44. *Museo de Bellas Artes de Asturias*.

Comité Español de Iluminación. (2005). *Guía Técnica Aprovechamiento de la Luz Natural de Edificios*.

Consejo de la Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética, 2018, 37-39. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3381>

Cuce, E., & Cuce, P. M. (2016). Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1345-1347. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.134>

Dirección General de Industria, E. y M. de la C. de M., & Centro de Ahorro y Eficiencia Energética de Madrid. (2006). Guía Técnica de Iluminación Eficiente. Sector Residencial y Terciario. *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM)*, 57.

Enerdata. (2018). Renewables in Electricity Production | Statistics Map by Region | Enerdata. *Enerdata*.

Espuelas, F. (2010). Madre Materia. En A. G. Yeste (Ed.), *Revista de libros de arte y cultura visual*. (pp. 61-63). La Rioja.

Esteban Sáiz, J. L. (1991). Análisis sobre el almacenamiento térmico en la edificación (Analysis of the thermal storage in construction). *Informes de la Construcción*, 43(416), 81-96.

Etheridge David, S. M. (1996). *Building Ventilation. Theory and measurement*. John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1 UD, England.

Evans J.M., Bogatto M., Eguia S., B. G. (1993). Uso de modelos a escala en el cielo artificial. Características de reflexión de los acabados superficiales interiores y exteriores., (1428).

F.S.P. Centro Nacional del Vidrio. (2017). Real fábrica de cristal de La Granja. Recuperado 20 de enero de 2017, de <http://www.realfabricadecristales.es/es>

Fabrizio Ascionea, Nicola Biancoa, Claudio De Stasioa, Gerardo Maria Mauroa, G. P. V. (2017). A new comprehensive approach for cost-optimal building design integrated with the multi-objective model predictive control of HVAC systems.pdf.

Fazel, A., Izadi, A., & Azizi, M. (2016). Low-cost solar thermal based adaptive window: Combination of energy-saving and self-adjustment in buildings. *Solar Energy*, 133, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.008>

Felices Puértolas, R. (2017). Influencia de las estrategias pasivas de la envolvente en el confort térmico de un edificio bioclimático.

Fernández Navarro, J. M. (2003). *El vidrio* (3a ed.). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Ferrón, L., Pattini, A., & Lara, M. A. (2010). Aplicabilidad de sistemas de iluminación natural de bajo low cost daylighting systems applicability . Lighting retrofitting case at an office environment., 25, 57-63.

Frank Kreith, Raj M. Manglik, M. S. B. (2012). *Principios de transferencia de calor*. Cengage Learning Editores S.A.

Friess, W. A., & Rakhshan, K. (2017). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(November 2016), 485-496.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026>

Friess, W. A., Rakhshan, K., Hendawi, T. A., & Tajerzadeh, S. (2012). Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings*, 44(1), 26-32.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.005>

Garretón, J. Y., Vilalba, A., Monteoliva, J. M., & Pattini, A. (2015). Aplicación de sistemas de sombreado interior . Annual glare analysis . Use of indoor shading systems .., 4, 13-24.

Gentile, N., Laike, T., & Dubois, M. C. (2016). Lighting control systems in individual offices rooms at high latitude: Measurements of electricity savings and occupants' satisfaction. *Solar Energy*, 127, 113-123.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.053>

Ghadi, Y. Y., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2017). The Integration of Day Light with Advance Fuzzy Based Controllers for Institutional Buildings in the Region of Central Queensland, Australia. *Energy Procedia*, 105, 2429-2437.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.698>

Giménez, M. D. C. (2011a). *Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos : los vidrios dinámicos TESIS DOCTORAL*.

Giménez, M. D. C. (2011b). *Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos : los vidrios dinámicos TESIS DOCTORAL*. Universidad Politécnica de Madrid.

Gomez, I., Martín, M. del P., & Salas, F. J. (2015). ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE INCENDIOS FORESTALES Y SU RELACIÓN CON LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID (1989- 2010). *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 281-304.

Gutiérrez, S., Álvarez, J., Velázquez, R., & Lay-Ekuakille, A. (2018). Use of automated blinds in smart buildings for energy savings: A Mexican case. *2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention, CONCAPAN 2017, 2018-Janua*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2017.8278509>

Hamedani, Z., Solgi, E., Hine, T., Skates, H., Isoardi, G., & Fernando, R. (2020). Lighting for work: A study of the relationships among discomfort glare, physiological responses and visual performance. *Building and Environment*, 167(October 2019), 106478. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106478>

Hernández Ramirez, M. (2006). El cristal de Sevilla . La fábrica de vidrios de La Trinidad. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 56, 86-91.

IDAE. (2011). Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020. Madrid.

IDAE. (2014). *Memoría IDAE anual 2014*. Madrid.

Industria, D. E., & Ministerio de vivienda. (2013). Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. *Boletín oficial del estado*, (74), 11816-11831.

Jamrozik, A., Clements, N., Hasan, S. S., Zhao, J., Zhang, R., Campanella, C., ... Bauer, B. (2019). Access to daylight and view in an office improves cognitive performance and satisfaction and reduces eyestrain: A controlled crossover study. *Building and Environment*, 165(March), 106379. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106379>

José María de la Poza Lleida. (1992). *El vidrio y sus aplicaciones* (Oikos-Tau). Barcelona.

Juan, A., & Lirola, M. (2016). *Simulation of thermal performance of glazing in the architecture using scale models*. Universidad Politécnica de Madrid.

Karlsen, L., Heiselberg, P., Bryn, I., & Johra, H. (2016). Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. *Energy and Buildings*, 118(0130), 316-328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.014>

Konstantzos, I., & Tzempelikos, A. (2014). Daylight Glare Probability Measurements And Correlation With Indoor Illuminances In A Full- Scale Office With Dynamic Shading Controls. *International High Performance Buildings Conference*, 147.

Lim, Y. W., & Heng, C. Y. S. (2016). Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings. *Building and Environment*, 106, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.030>

Maritz Vandenberg. (2005). *Farnsworth House: Ludwig Mies van der Rohe*. Phaidon Press.

Maurer, C., Cappel, C., & Kuhn, T. E. (2017). Progress in building-integrated solar thermal systems. *Solar Energy*, 154, 158-186. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.065>

Michael, A., & Heracleous, C. (2017). Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. *Energy and Buildings*, 140, 443-457. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.087>

Ministerio de Fomento. Gobierno de España. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE, 3, 141.

Ministerio de Fomento. (2008). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Ministerio de Fomento*, 160.

Ministerio de Fomento. (2014). *ERESEE 2014. Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España*.

Ministerio de Fomento. (2017). *ERESEE 2017. Actualización 2017 de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España*.

Ministerio de Vivienda. (2007). DB HE-Ahorro de Energía. *Código Técnico de la Edificación*, 2013, 1-129.

Monteoliva, J. M. (2013). Iluminación natural en aulas: análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados, 235-248.

Motamed, A., Deschamps, L., & Scartezzini, J. L. (2017). On-site monitoring and subjective comfort assessment of a sun shadings and electric lighting controller

based on novel High Dynamic Range vision sensors. *Energy and Buildings*, 149, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.017>

Neila González, F. J. (2000). Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible : buenas prácticas edificatorias. En C. de investigación Urbanística (Ed.) (pp. 89-99). Madrid.

Neumeyer, F. (1995). *Mies van der Rohe : la palabra sin artificio : reflexiones sobre la arquitectura 1922-1968* (El Croquis). Madrid.

Oliva Prat, M. (1951). Catalogo de los vidriós del museo arqueológico de gerona. *Annals de l'Institut d'Estudis Gironins*, 6, 113-157.

Ortiz, J., Fonseca i Casas, A., Salom, J., Garrido Soriano, N., & Fonseca i Casas, P. (2016). Cost-effective analysis for selecting energy efficiency measures for refurbishment of residential buildings in Catalonia. *Energy and Buildings*, 128, 442-457. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.059>

Parareda, G. Y. (2008). *Arquitectura solar e iluminación natural* (Munilla-Le). Madrid.

Pastor Rey de Viñas, P. (1998). *La Real Fábrica de Cristales de La Granja : historia, repertorios decorativos y tipologías formales*. Arte Segovia.

Pérez-Pujazón Millán, B. (2015). *La implementación arquitectónica de los acristalamientos activos con agua circulante, y su contribución en edificios de consumo de energía casi nulo*. Universidad Politecnica de Madrid.

Pierson, C., Wienold, J., & Bodart, M. (2017). Discomfort glare perception in daylighting: Influencing factors. *Energy Procedia*, 122, 331-336.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.332>

Plinio Segundo, C. (1499). *Naturae historiarum libri XXXVII*. (Venetiis: Per Ioannem Alvisium de Varisio Mediolanensem, Ed.) (Copia digi). París.

Porras-Amores, C., Viñas-Arrebola, C., Rodríguez-Sánchez, A., & Villoria-Sáez, P. (2014). Assessing the potential use of strategies independent from the architectural design to achieve efficient ventilation: A Spanish case study. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(5), 529-542. <https://doi.org/10.1177/0143624414524065>

Psomas, T., Heiselberg, P., Lyme, T., & Duer, K. (2017). Automated roof window control system to address overheating on renovated houses: Summertime assessment and intercomparison. *Energy and Buildings*, 138, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.019>

Public works and Government Services Canada. (2002). Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings, (August), 1-86.

Puente, M. (2006). *Conversaciones con Mies van der Rohe* (Gustabo Gi). Barcelona.

Ramírez, P., Arrebola, V., Merino, R., & Del, M. (2017). *Análisis de los niveles de confort a través del estudio de un pavimento cerámico en un sistema de calefacción solar pasiva*.

Rubio Hernández, R. (2015). *El vidrio y sus máscaras*. Universidad Politecnica de Madrid.

S.L. Ledesma, G.E. Gonzalo, M.S. Cisterna, S.G. Márquez Vega, G. I. Q. (2004).

Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en san miguel de Tucumán., 8, 55-60.

Saint-Gobaint. (2017). Saint-Gobaint. Recuperado 15 de noviembre de 2017, de <http://www.saint-gobain.es/index.php?seccion=1&sub=7#etapasTodo>

Saint Gobain. (2001). *Manual del vidrio*. España.

Salvalai, G., Imperadori, M., Scaccabarozzi, D., & Pusceddu, C. (2015). Thermal performance measurement and application of a multilayer insulator for emergency architecture. *Applied Thermal Engineering*, 82, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.062>

Salvalai, G., Malighetti, L. E., Luchini, L., & Girola, S. (2017). Analysis of different energy conservation strategies on existing school buildings in a Pre-Alpine Region. *Energy and Buildings*, 145, 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.058>

Salvalai, G., Sesana, M. M., & Iannaccone, G. (2017). Deep renovation of multi-storey multi-owner existing residential buildings: A pilot case study in Italy. *Energy and Buildings*, 148, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.011>

Santamaría, J., Girón, S., & Campano, M. A. (2016). Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 128, 772-784. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.035>

Sarigiannis, A. (2013). Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments.

Schulze, F., & Windhorst, E. (2016). *Ludwig Mies van der Rohe: Una biografía crítica*. (J. Sainz, Ed.). España: Barcelona: Reverté.

Statistics Explained. (2017). Estadísticas sobre vivienda. *Eurostat*.

U.S. Energy Research and Development Administration, Office of Public Affairs, T. I. C. (1985). *Solar Energy Update. A current awareness journal*. (T. I. C. .S. Energy Research and Development Administration, Office of Public Affairs, Ed.) (.S. Energy).

Valdivieso, M. (2014). « Estudio Precost&e»: evaluación de los costes constructivos y consumos energéticos derivados de la calificación energética en un edificio de viviendas situado en Madrid. *Informes de la Construcción*, 66(535).

Vandenberg, M. (2003). *Farnsworth House, Ludwig Mies van der Rohe* (Phaidon). New York.

Varela Luján, S., Viñas Arrebola, C., Rodríguez Sánchez, A., Aguilera Benito, P., & González Cortina, M. (2019). Experimental comparative study of the thermal performance of the façade of a building refurbished using ETICS, and quantification of improvements. *Sustainable Cities and Society*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101713>

Villoria Sáez, P., & del Río Merino, M. (2019). Hacia un nuevo enfoque de sostenibilidad a través de la construcción regenerativa. *Virtualpro*, (211).

Wagdy, A., Sherif, A., Sabry, H., Arafa, R., & Mashaly, I. (2017). Daylighting simulation for the configuration of external sun-breakers on south oriented windows of hospital patient rooms under a clear desert sky. *Solar Energy*, 149, 164-175. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.009>

Walker, C., Tan, G., & Glicksman, L. (2011). Reduced-scale building model and numerical investigations to buoyancy-driven natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43(9), 2404-2413. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.022>

Yeh, S. (2019). High performance natural lighting system combined with SPSC. *Renewable Energy*, 143, 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.002>

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACS	Agua Caliente Sanitaria
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología Española
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AT	Aislamiento térmico
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CCAA	Comunidades Autónomas
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNUDMAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CTE	Código Técnico de la Edificación
ETSEM	Escuela Técnica Superior de Edificación
EUROSTAT	Oficina Europea de Estadística
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía
ISO	International Organization for Standardization
LCS	Lámina de control solar
LED	Light-Emitting Diode
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LOE	Ley de Ordenación de la Edificación
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MM	Modelo mejorado
MR	Modelo de referencia
MV	Ministerio de Vivienda
NBE	Norma Básica de la Edificación
NTE	Normas Tecnológicas de la Edificación
OMS	Organización Mundial de la Salud
RD	Real Decreto
REF	Referencia
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UPM	Universidad Politécnica de Madrid

TABLAS Y FIGURAS

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

Listado de figuras:

<i>Figura 1. Emisiones de CO₂. Fuente: Global Carbón Atlas 2016.</i>	17
<i>Figura 2. Porcentaje de Energías Renovables. Fuente: Enerdata 2018.</i>	18
<i>Figura 3. De sistemas convencionales a regenerativos. Fuente: Regenesis 2000-2016. Bill Reed.</i>	19
<i>Figura 4. Escenarios de demanda global de energía y emisiones de CO₂ para el año 2040.</i>	21
<i>Figura 5. Evolución normativa de Eficiencia Energética en Edificación.</i>	22
<i>Figura 6. Dependencia energética en España y UE27.</i>	
<i>Fuente: (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía- IDAE, 2011)</i>	23
<i>Figura 7. Tendencias del consumo energético (kept) del sector residencial en España.</i>	23
<i>Figura 8. Factores influyentes analizados.</i>	26
<i>Figura 9. Industrias del vidrio en España. Fuente: Google maps.</i>	30
<i>Figura 10. Sede de Microsoft en Milán (Italia). Fuente: (Jacques Herzog, Pierre de Meuron y Andreas Frieszrog, 2017)</i>	36
<i>Figura 11. Edificio Apple Park en Cupertino - California (Estados Unidos). Fuente: (Norman Foster, 2017)</i>	36
<i>Figura 12. Torre Anseli en Ciudad de Mexico (Mexico). Fuente: (Agustín Garza, Luis Gordo, 2017)</i>	37
<i>Figura 13. Ciudad BBVA en Madrid (España). Fuente: (Ortiz León Arquitectos, 2016)</i>	37
<i>Figura 14. City Hall de San José, California (Estados Unidos). Fuente: (Richard Meier & Partners Architects LLP, 2015)</i>	37
<i>Figura 15. Sede principal del FBI en Florida (Estados Unidos). Fuente: (Nick Merrick-Hedrich Blessing, 2015)</i>	38
<i>Figura 16. Centro de nanotecnología de la Universidad de Pensilvania (Estados Unidos). Fuente: (Michael Harshman, Kimberly Nun, Ina Ko y Michael Steiner, 2013)</i>	38
<i>Figura 17. The Crystal, sede de Siemens en Londres (Reino Unido). Fuente: (Siemens, 2011)</i>	38
<i>Figura 18. Edificio Aldar Headquarters – Abu Dhabi (Emiratos Árabes). Fuente: (MZ & Partners Architects, 2010)</i>	39
<i>Figura 19. Campus Repsol en Madrid (España). Fuente: (Filippo Poli, 2014)</i>	39
<i>Figura 20. Ocupación y tipología edificatoria en España. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2014)</i>	40
<i>Figura 21. Tipología edificatoria en la Unión Europea. Fuente: (Statistics Explained, 2017)</i>	40
<i>Figura 22. Viviendas acristaladas en Europa. Fuente: (Homify.es)</i>	41
<i>Figura 23. La Casa del Desierto, situada en Granada (España). Fuente: www.lacasadeldesierto.es. (Bianco, Cascone, Goia, Perino, & Serra, 2017)</i>	42
<i>Figura 24. Casa de Cristal, situada en Bornholm (Dinamarca). Fuente: Euronews 2016.</i>	42
<i>Figura 25. Brandy House, situada en Washington (EEUU). Fuente: Anice Hoachlander y Allen Russ.</i>	42

Figura 26. Vivienda Rietveld Huis, e IJburg (Ámsterdam). Fuente: (Arantza Álvarez, 2012)	43
Figura 27. Farnsworth, 33. Maello, Ávila (España). Fuente: (Interés, 2010)	43
Figura 28. El Pabellón Escondido, en Las Rozas de Madrid (España). Fuente: (arq.com.mx, 2016)	43
Figura 29. House R128, situada en Stuttgart (Alemania). Fuente: http://www.arquitour.com/house-r128 .	44
Figura 30. Casa de Cristal Church Point (Australia). (Tikinti, 2009)	44
Figura 31. GlassHouse en Miami, en la península de Boso (Tokio). Fuente: (Peruarki, 2008)	44
Figura 32. Glass House, situada en New Canaan, en Coneteca (EEUU). Fuente: (Munuera, 2014)	45
Figura 33. La Casa del Bosque y la Casa del Mar (Italia). Fuente: (SantambrogioMilano, s. f.)	45
Figura 34. Casa Farnsworth en Illinois (EEUU)	45
Figura 35. Técnicas de aprovechamiento de luz natural.	46
Figura 36. Beneficios energéticos y medio ambientales de la luz natural.	47
Figura 37. Beneficios de la luz natural, relacionados con el ambiente natural.	48
Figura 38. Beneficios de la luz natural sobre el bienestar social y la salud.	49
Figura 39. Procesos de la transferencia de calor.	79
Figura 40. Criterio de signos para el flujo de calor. Fuente: (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)	80
Figura 41. Modos de transferencia de calor. Fuente: (Frank Kreith, Raj M. Manglik, 2012)	84
Figura 42. Espectro de la radiación solar global según EN-410. Fuente: (AENOR, 2011a)	85
Figura 43. Esquema genérico de los factores físicos de radiación.	86
Figura 44. Esquema factor solar (g).	87
Figura 45. Esquema de un vidrio con lámina bajo emisiva.	88
Figura 46. Flujo total de energía a través de un vidrio.	90
Figura 47. Espectro electromagnético. Fuente: (José Ignacio García Laureiro, 2015)	92
Figura 48. Componentes de la luz natural.	93
Figura 49. Posibilidades de propagación de un haz incidente al pasar por un medio.	94
Figura 50. Diagramas de reflexión especular, difusa y mixta.	95
Figura 51. Diagrama de refracción de la luz.	96
Figura 52. Gráfica de Dresler. Niveles de iluminancia según latitud. Fuente: (C.E.de Iluminación, 2005)	98
Figura 53. Cantidad de horas de sol al año en el mundo en función de la posición geográfica.	99
Figura 54. Cantidad de horas de sol al año en el Europa en función de la posición geográfica.	100
Figura 55. Cantidad de horas de sol al año en España en función de la posición geográfica.	101
Figura 56. Fases de la investigación.	110
Figura 57. Voladizos diseñados en función del ángulo solar y la orientación.	116
Figura 58. Simulaciones realizadas para la elección de las estrategias pasivas.	117
Figura 59. Caracterización de los modelos simulados	117
Figura 60. Planta y sección de los modelos a escala.	118
Figura 61. OPUS 208.	121

Figura 62. OPUS 200.	122
Figura 63. OPUS 20.	122
Figura 64. Termopar k y protección a la radiación solar directa.	123
Figura 65. Piranómetro Kyyp&Zonen.	124
Figura 66. Luxómetros Delta Ohm HD2021T.	124
Figura 67. Calendario de monitorización de los modelos a escala.	126
Figura 68. Diferentes estaciones del año durante la monitorización.	127
Figura 69. Modelo referencia (MR) y modelo mejorado (MM).	128
Figura 70. Posicionamiento de los sensores que miden temperatura superficial.	130
Figura 71. Posicionamiento de los sensores que miden temperatura	131
Figura 72. Posicionamiento de los sensores que miden la radiación solar en el exterior.	131
Figura 73. Posicionamiento de los luxómetros que miden la iluminancia en ambos modelos a por igual.	132
Figura 74. Posicionamiento de sensores finalmente analizados en los resultados.	133
Figura 75. Escenarios planteados para el análisis energético.	137
Figura 76. Fases del análisis teórico del capítulo de resultados.	143
Figura 77. Fases del análisis experimental del capítulo de resultados.	144
Figura 78. Fases del análisis computacional del capítulo de resultados.	144
Figura 79. Construcción de la Casa Farnsworth. Estructura de acero. Fuente: (Arquitectura, 2009)	147
Figura 80. Interiores de la Casa Farnsworth. Fuente: (Arquitectura, 2009)	148
La Casa Farnsworth tenía problemas de confort, tanto en estaciones frías como calurosas (Figura 79) por ello algunos autores la referencian en sus bibliografías, mostrándola como ejemplo y expresando soluciones constructivas que en aquella época Mies evito, presumiblemente por no destruir la hermosa simplicidad de su vidrio y Acero.	
Figura 81. La Casa Farnsworth en distintas estaciones climatológicas. Fuente:(Vandenberg, 2003).	149
Figura 82. Fachada principal y posterior de la Casa Farnsworth.	150
Figura 83. Núcleo central de la Casa Farnsworth. Fuente: (Vandenberg, 2003)	151
Figura 84. Planta y sección de la Casa Farnsworth.	151
Figura 85. Encuentro de vidrio con carpintería metálica.	152
Figura 86. Detalle de carpintería metálica. Fuente: (Vandenberg, 2003)	153
Figura 87. Huecos practicables en la Casa Farnsworth.	154
Figura 88. Detalle constructivo forjado superior e inferior. Fuente: (Archives at the Museum of Modern,1976)	155
Figura 89. Situación y emplazamiento de la Casa Farnsworth. Fuente: Google maps.	156
Figura 90. Proximidad de la Casa Farnsworth al Rio Fox y detalle de elevación con respecto al terreno.	156
Figura 91. Temperatura máxima y mínima promedio en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	157

Figura 92. Porcentaje de nubosidad en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	158
Figura 93. Lluvia promedio acumulada en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	158
Figura 94. Cantidad de horas durante las cuales el sol esta visible en Chicago. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	159
Figura 95. Características técnicas de los paneles sándwich instalados. Fuente: Metalpanel.	160
Figura 96. Disposición de vidrios en el modelo mejorado.	161
Figura 97. Detalle constructivo, perfiles de soporte de vidrios.	162
Figura 98. Demanda de sistemas de calefacción y refrigeración (kW)	163
Figura 99. Ganancias solares por los acristalamientos. (kW)	165
Figura 100. Consumos de calefacción y refrigeración. (kWh)	166
Figura 101. Ejecución de modelos a escala.	168
Figura 102. Detalle de bandas de neopreno en los perfiles.	169
Figura 103. Instalación de vidrios sencillos en el modelo a escala.	169
Figura 104. Instalación de vidrios mejorados en el modelo a escala.	170
Figura 105. Hueco en núcleo central y hueco en forjado inferior.	170
Figura 106. Incorporación de ventilación natural en modelos a escala.	171
Figura 107. Modelos a escala con voladizos en fachada sur y este.	171
Figura 108. Ubicación de los modelos a escala dentro del completo de la Escuela Técnica Superior de Edificación.	172
Figura 109. Ubicación de la edificación originaria y la situación final de los modelos a escala.	173
Figura 110. Temperatura máxima y mínima promedio en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	174
Figura 111. Porcentaje de nubosidad en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	174
Figura 112. Lluvia promedio acumulada en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	175
Figura 113. Cantidad de horas durante las cuales el sol esta visible en Madrid. Fuente: (Cedar Lake Ventures, 2018)	175
Figura 114. Posicionamiento y orientación de los modelos a escala.	176
Figura 115. Edificio de la ETSEM que arroja parcialmente sombra a los modelos a escala.	176
Figura 116. Patrones de sombra de los modelos a escala.	177
Figura 117. Valores promedios de temperatura superficial en cada estación.	180
Figura 118. Valores promedios de iluminancia en cada estación.	181
Figura 119. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Modelo a escala de referencia. Periodo de verano.	187
Figura 120. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Modelo a escala de mejorado. Periodo de verano.	187
Figura 121. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de otoño.	190
Figura 122. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de invierno.	190
Figura 123. Temperaturas ambientales interiores y exterior. Periodo de primavera.	191
Figura 124. Temperaturas superficiales en la estación climatológica de verano. Fachada sur.	194
Figura 125. Temperaturas superficiales en la estación climatológica de verano. Fachada este.	196

Figura 126. Gráficas con temperaturas superficiales en la estación climatológica de invierno.	197
Figura 127. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de verano. Periodo sin voladizo.	203
Figura 128. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de verano. Periodo con voladizo.	203
Figura 129. Gráficos de dispersión entre Iluminancia media en modelo mejorado y sencillo e irradiancia, en la estación climatológica de verano.	205
Figura 130. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de otoño.	206
Figura 131. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de invierno.	206
Figura 132. Iluminancia media e irradiancia, en la estación climatológica de primavera.	207
Figura 133. Iluminancia promedia en cada periodo y por orientación. Modelo de referencia.	209
Figura 134. Iluminancia promedia en cada periodo y por orientación. Modelo mejorado.	209
Figura 135. Posicionamiento de los luxómetros dentro de los modelos a escala.	209
Figura 136. Horas de sol con iluminancia < 200 lux en cada una de las estaciones.	215
Figura 137. Horas de sol con iluminancia > 2.000 lux en cada una de las estaciones.	216
Figura 138. Registro de temperaturas experimentales y simuladas. Modelo de referencia.	220
Figura 139. Registro de temperaturas experimentales y simuladas. Modelo mejorado.	220
Figura 140. Comparativa de temperatura ambiental interior en el modelo a escala 1/6 y en el modelo real.	221
Figura 141. Ganancias solares por acristalamientos.	224
Figura 142. Pérdidas por acristalamientos.	225
Figura 143. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 1.	226
Figura 144. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 2.	226
Figura 145. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 3.	227
Figura 146. Energía demandada en climatización mensual. Escenario 4.	228
Figura 147. Consumo anual de los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación.	231
Figura 148. Consumo y coste de gas y electricidad.	234
Figura 149. Costes totales en gas y electricidad (€) y ahorro de energía. (kWh)	235
Figura 150. Ahorro (%) en el total de los parámetros que influyen para la elección del modelo más rentable.	236

Listado de tablas:

Tabla 1. Composición básica del vidrio.	54
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los vidrios.	55
Tabla 3. Propiedades térmicas de los vidrios.	56
Tabla 4. Propiedades ópticas de los vidrios.	57
Tabla 5. Propiedades técnicas de los vidrios.	58
Tabla 6. Parámetros térmicos del vidrio.	89

Tabla 7. Reflectancias típicas de materiales de edificación. Fuente: (Comité Español de Iluminación, 2005)	95
Tabla 8. Valores de transmisión luminosa en diferentes acristalamientos. Fuente: Guardian Glass.	97
Tabla 9. Virtudes e inconvenientes en función de la orientación. Fuente: (Pérez González, 2015)	102
Tabla 10. Magnitudes fundamentales en el diseño de iluminación natural.	104
Tabla 11. Temperaturas de consigna primaria y secundaria asignadas a los sistemas de calefacción y refrigeración.	113
Tabla 12. Distribución de cargas internas y renovación de aire.	114
Tabla 13. Especificaciones técnicas de los vidrios.	115
Tabla 14. Relación de equipamiento e instrumentación utilizada durante la monitorización.	121
Tabla 15. Características técnicas facilitadas por el fabricante del OPUS 20.	122
Tabla 16. Características técnicas facilitadas por el fabricante del termopar k.	123
Tabla 17. Características técnicas facilitadas por el fabricante del piranómetro Kyyp & Zonen.	124
Tabla 18. Características técnicas facilitadas por el fabricante de los luxómetros..	124
Tabla 19. Instrumento de medición en el modelo de referencia.	127
Tabla 20. Instrumento de medición en el modelo mejorado.	128
Tabla 21. Tabla de nomenclatura de sensores.	133
Tabla 22. Gases de efecto invernadero. Fuente: Panel intergubernamental sobre el cambio climático.	139
Tabla 23. Precio / m ² de materiales.	140
Tabla 24. Comparativa de viviendas con fachadas de vidrio.	146
Tabla 25. Combinación de estrategias pasivas simuladas.	159
Tabla 26. Especificaciones técnicas modelo de referencia. Fuente: Guardian Glass.	160
Tabla 27. Especificaciones técnicas vidrios modelo mejorado.	161
Tabla 28. Intervalo de variación de temperaturas superficiales.	178
Tabla 29. Intervalo de variación de iluminancia.	180
Tabla 30. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en los periodos seleccionados de verano.	183
Tabla 31. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de otoño.	184
Tabla 32. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de invierno.	185
Tabla 33. Registro de temperaturas ambientales exteriores, máximas y mínimas en el periodo seleccionado de primavera.	186
Tabla 34. Análisis de la temperatura interior en los modelos a escala, en el periodo seleccionado de verano.	188
Tabla 35. Regresiones lineales entre la temperatura interior y exterior, en el periodo seleccionado de verano.	189

<i>Tabla 36. Análisis de la temperatura interior en los modelos a escala, en los periodos seleccionado en las estaciones de otoño, invierno y primavera.</i>	193
<i>Tabla 37. Análisis de correlación entre la temperatura interior y exterior, en el periodo seleccionado de otoño, invierno y primavera.</i>	193
<i>Tabla 38. Análisis entre las temperaturas superficiales, en los periodos seleccionados de verano y en orientación sur.</i>	195
<i>Tabla 39. Análisis entre las temperaturas superficiales, en los periodos seleccionados de verano y en orientación este.</i>	196
<i>Tabla 40. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación sur.</i>	198
<i>Tabla 41. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación norte.</i>	199
<i>Tabla 42. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación este.</i>	199
<i>Tabla 43. Análisis entre las temperaturas superficiales, en el periodo seleccionado de invierno y en orientación oeste.</i>	200
<i>Tabla 44. Análisis entre las temperaturas superficiales promedio interiores y exteriores, en la fachada norte.</i>	201
<i>Tabla 45. Análisis entre las temperaturas superficiales promedio interiores y exteriores, en la fachada sur.</i>	201
<i>Tabla 46. Análisis de iluminancia e irradiación en la estación de verano.</i>	204
<i>Tabla 47. Análisis de iluminancia por estación y orientación.</i>	211
<i>Tabla 48. Análisis de parámetros de confort visual. Iluminancia.</i>	213
<i>Tabla 49. Análisis factor de luz de día (DF).</i>	214
<i>Tabla 50. Límites admisibles según ASHRAE Guideline 14 y IPMVP..</i>	218
<i>Tabla 51. Valores de validación de los modelos.</i>	219
<i>Tabla 52. Demandas y consumos del modelo a escala y del modelo real. Vidrios sencillos.</i>	222
<i>Tabla 53. Demandas y consumos del modelo a escala y del modelo real. Vidrios mejorados.</i>	222
<i>Tabla 54. Demandas y consumos. Escenario 1.</i>	229
<i>Tabla 55. Demandas y consumos. Escenario 2.</i>	229
<i>Tabla 56. Demandas y consumos. Escenario 3</i>	230
<i>Tabla 57. Demandas y consumos. Escenario 4.</i>	230
<i>Tabla 58. Demandas y consumos por m².</i>	232
<i>Tabla 59. Valor límite de energía primaria total para uso residencial privado según CTE.</i>	232
<i>Tabla 60. Emisiones de CO₂ (Kg) y ahorro (%).</i>	233
<i>Tabla 61. Ahorro en función del tipo de cerramiento a instalar.</i>	233
<i>Tabla 62. Coste total de las energías y ahorro en cada uno de los escenarios.</i>	234

ANEXOS:

ANEXO 1: NORMATIVA.

ANEXO 2: ANÁLISIS DE LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS.

ANEXO 3: REPORTAJE FOTOGRÁFICO.

ANEXO 4: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES.

ANEXO 5: GRÁFICOS DE DATOS EXPERIMENTALES.