

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
Investigación en Eficiencia Energética y
Sostenibilidad en Industria, Transporte,
Edificación y Urbanismo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***MODELO ENERGÉTICO SIMPLIFICADO Y
ANÁLISIS DE LAS VIVIENDAS SOCIALES
DE PORTUGALETE MEDIANTE SKETCHUP
Y OPENSTUDIO***

Estudiante	<i>Molina Candina, Jon</i>
Director/Directora	<i>Picallo Pérez, Ana</i>
Departamento	<i>Ingeniería Energética</i>
Curso académico	<i>2021/2022 Bilbao</i>



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría transmitir mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado y ayudado a lo largo de este último año.

En primer lugar, quisiera mostrar mi agradecimiento a la tutora del proyecto, la Doctora Ana Picallo Pérez, por el soporte y orientación aportados y por ayudarme a buscar soluciones a los problemas que me surgían a lo largo del proceso de investigación y desarrollo del presente trabajo. En segundo lugar, al Catedrático José María Sala Lizarraga y al Laboratorio de Control y Calidad en la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco por la ayuda prestada. En tercer lugar, a mi cuadrilla y en especial a mis compañeros de estudio Leire Bermejo y Sergio Irazabal por estar en todo momento compartiendo experiencias de estar pasando por esta etapa conjuntamente. Finalmente, pero no por ello menos importante, quisiera agradecer a mi familia todo el cariño y apoyo recibido y, aunque a veces en vano, la ayuda prestada.

Gracias a todos de corazón.



ABSTRACT

The present work analyzes energetically and dynamically the public housing of Portugalete using SketchUp Pro and OpenStudio software. Thus, the objective is based on analyzing the behaviour of various passive architectural solutions that improve energy efficiency in the building, based on insulating sandwich panels and Trombe wall. Another objective, transversal, is to learn to use those software in an autonomous way and implement them in real cases, a transcendental fact in the work. The simplified representation of the building was made in SketchUp, where the construction measures were defined and the 3D model was shaped. Then, using OpenStudio, the type of building and its use were specified by entering certain data and the detailed information required for its simulation. The result shows the demands and consumptions of the building over a typical year. This software allows the comparison of different façade typologies and building behaviour in different climatic zones. Therefore, the behaviour of the simplified model in different climatic zones is analyzed and discussed in the search for best practices and the demand reduction.

Key Words: Energy study of dwellings, SketchUp and OpenStudio.



LABURPENA

Lan honek Portugaleteko babes ofizialeko etxebizitza publikoak energetikoki eta dinamikoki aztertzen ditu, SketchUp Pro eta OpenStudio softwareen bidez. Horrela, lanaren helburua eraikuntzaren eraginkortasun energetikoa hobetzen duten zenbait irtenbide arkitektoniko pasiboren portaera aztertzea da, sandwich panel isolatzaileetan eta Trombe horman oinarrituta. Zeharkako beste helburuetako bat software horiek modu autonomoan erabiltzen ikastea da eta kasu errealetan ezartzea, eta hori oso garrantzitsua izan da lanean. Eraikinaren irudikapen sinplifikatua SketchUp-en egin zen. Bertan, eraikuntza-neurriak definitu ziren eta 3D ereduari forma eman zitzaion. Ondoren, OpenStudioren bidez, eraikin mota eta haren erabilera zehaztu ziren, simulatzeko eskatutako datu eta informazio zehatz batzuk sartuz. Emaitzek eraikinaren urtebeteko eskariak eta kontsumoak erakusten dituzte. Software horri esker, fatxada-tipologia desberdinak eta eraikinaren portaerak konpara daitezke hainbat zona klimatikotan. Horregatik, klima-eremu desberdinetan eredu sinplifikatuaren portaerak aztertu eta eztabaidatzen dira, jardunbide egokiak bilatzeko eta eskariak murrizteko.

Hitz gakoak: Etxebizitzaren energetikoa, SketchUp eta OpenStudio.



RESUMEN

El presente trabajo analiza energéticamente y de manera dinámica las viviendas públicas de protección oficial de Portugalete mediante los softwares SketchUp Pro y OpenStudio. Así, el objetivo se basa en analizar el comportamiento de diversas soluciones arquitectónicas pasivas que mejoran la eficiencia energética en la edificación, basadas en paneles sándwich aislantes y muro Trombe. Otro de los objetivos, transversales, es aprender a usar dichos softwares de una manera autónoma e implementarlos en casos reales, hecho que ha sido trascendental en el trabajo. La representación simplificada del edificio se realizó en SketchUp donde se definieron las medidas constructivas y se le dio forma al modelo 3D. Después, mediante OpenStudio, se especificó el tipo de edificio y su uso introduciendo determinados datos e información detallada requerida para su simulación. El resultado muestra las demandas y consumos del edificio a lo largo de un año tipo. Este software permite comparar diferentes tipologías de fachadas y comportamientos del edificio en diversas zonas climáticas. Por ello, se analizan y discuten los comportamientos del modelo simplificado en diferentes zonas climáticas, en la búsqueda de buenas prácticas y reducción de demandas.

Palabras Clave: Estudio energético de viviendas, SketchUp y OpenStudio.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
ABSTRACT	3
LABURPENA	4
RESUMEN	5
ÍNDICE	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE GRÁFICAS	10
ACRONIMOS Y SÍMBOLOS	12
MEMORIA	13
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Fachadas Activas Solares Térmicas	14
1.2 Contexto	16
2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	17
3 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	17
4 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	18
5 ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO	20
5.1 Edificio de estudio	20
5.1.1 Lugar geográfico	20
5.1.2 Clima	21
5.1.3 Uso del edificio	22
5.2 Características constructivas	22
5.2.1 Características generales	22
5.2.1.1 Fachadas orientadas al Norte, Este y Oeste	22
5.2.1.2 Fachadas orientadas al Sur	23
5.2.1.3 Forjado superior e inferior	24
5.2.2 Modelo simplificado del edificio de estudio	25
5.3 Sistemas de generación de energía	25
	6



6	Diseño simplificado y simulación del edificio de estudio	26
6.1	SketchUp	26
6.1.1	Primeros pasos	28
6.1.2	Diseño del modelo	28
6.1.3	Definición de elementos y sombras	30
6.2	OpenStudio	32
6.2.1	Opción Site	32
6.2.2	Opción Schedules	33
6.2.3	Opción Constructions	34
6.2.4	Opción Loads	36
6.2.5	Opción Space Types	37
6.2.6	Opción Geometry	38
6.2.7	Opción Facility	39
6.2.8	Opción Spaces	40
6.2.9	Opción Thermal Zones	41
6.2.10	Opción HVAC Systems	42
6.2.11	Opción Output Variables	43
6.2.12	Opción Simulation Settings	43
6.2.13	Opción Measures	44
6.2.14	Opción Run Simulation	44
6.2.15	Opción Results	45
7	Calculo de demandas ACS	45
7.1	Demanda de ACS del edificio	45
7.2	Demanda de ACS del modelo simplificado	46
8	Resultados de la simulación	46
8.1	Análisis de las diferentes fachadas	46
8.1.1	Fachada Panel Sandwich	46
8.1.2	Fachada Muro Trombe	48
8.2	Análisis de diferentes zonas climáticas	49
8.2.1	Portugalete	50
8.2.2	Santa Cruz de Tenerife	51
8.2.3	Murcia	52
8.2.4	Barcelona	54
8.2.5	Madrid	55
9	Re-definición del modelo de Sketchup Pro	57
	CONCLUSIONES	59
	METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	61
10	Diagrama de Gantt	61
	ASPECTOS ECONÓMICOS	62
11	Descripción del presupuesto	62
11.1	Costes del personal	62
11.2	Costes del equipo	62



11.3	Costes de movilidad	62
	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	63
12	Mejora de las hipótesis	63
	BIBLIOGRAFÍA	64
	ANEXO I:	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema y fotografía del muro Trombe	15
Figura 2 Fotografía del edificio de estudio.	21
Figura 3 Climograma de la localidad de Portugalete.....	21
Figura 4 Media de horas de sol al mes en Portugalete.	21
Figura 5 Ventana de selección de plantilla de trabajo.....	26
Figura 6 Pantalla principal de SketchUp	27
Figura 7 Barra de herramientas de SketchUp.....	27
Figura 8 Barra de herramientas de OpenStudio	27
Figura 9 Información introducida en la ventana nuevo modelo de OpenStudio	28
Figura 10 Estructura en 3D del edificio de estudio	28
Figura 11 Ventana de atributos de un piso de vivienda.....	29
Figura 12 Igualar superficie	29
Figura 13 Opciones de renderizado utilizadas	30
Figura 14 Definición de puertas y ventanas	30
Figura 15 Definición de sombras.....	31
Figura 16 Modelo simplificado del edificio de estudio	31
Figura 17 Archivos creados al guardar el proyecto.....	31
Figura 18 Interfaz de OpenStudio detallada	32
Figura 19 Opción Site de OpenStudio.....	33
Figura 20 Ventana de selección de unidades para crear nuevo horario.....	34
Figura 21 Edición de horarios creados	34
Figura 22 Pestaña Materials de la opción Constructions	35
Figura 23 Pestaña Construction de la opción Constructions	35
Figura 24 Pestaña Construction Sets de la opción Constructions	36
Figura 25 Definición de ganancias térmicas internas	36
Figura 26 Definición de ganancias internas producidas por la luminaria.....	37
Figura 27 Definición de ganancias internas producidas por los equipos eléctricos	37
Figura 28 Características introducidas en cada tipo de espacio creado.....	38
Figura 29 Características introducidas en la pestaña Load	38
Figura 30 Observación del modelo simplificado del caso de estudio	39
Figura 31 Información a introducir en la pestaña Building	39
Figura 32 Información a introducir en la pestaña Stories	40
Figura 33 Pestaña Propiedades de la opción Spaces.....	40
Figura 34 Pestaña HVAC system de la opción Thermal Zones	42
Figura 35 Definición del sistema HVAC.....	42
Figura 36 Variables para la simulación	43
Figura 37 Configuraciones de simulación.....	43
Figura 38 Modelos de representación de los resultados	44
Figura 39 Simulación	44
Figura 40 Informe de los resultados obtenidos	45
Figura 41 Localidades seleccionadas y sus climas.....	49
Figura 42 Vista frontal del edificio de estudio en SketchUp Pro	57
Figura 43 Vista trasera del edificio de estudio en SketchUp Pro	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Característica constructiva del aislamiento tipo Panel Sandwich	23
Tabla 2 Características constructivas del sistema SolarWall.....	24
Tabla 3 Características constructivas del sistema de Muro Trombe	24
Tabla 4 Características constructivas del forjado superior	24
Tabla 5 Características constructivas del forjado inferior	25
Tabla 6 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado.....	45
Tabla 7 Valor del factor de centralización en viviendas multifamiliares.....	46
Tabla 8 Resumen de los resultados obtenidos.....	60
Tabla 9 Costes del personal.	62
Tabla 10 Costes del equipo.	62
Tabla 11 Costes de movilidad.	62

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Portugalete	47
Gráfica 2 Demanda energía eléctrica mensual en Portugalete.....	47
Gráfica 3 Demanda de calefacción mensual en Portugalete	48
Gráfica 4 Demanda de calefacción, refrigeración y temperatura ambiente mensual en Portugalete.....	48
Gráfica 5 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Portugalete.....	50
Gráfica 6 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Bilbao (kWh/m ² año)	51
Gráfica 7 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Tenerife.....	51
Gráfica 8 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Tenerife (kWh/m ² año).....	52
Gráfica 9 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Tenerife	52
Gráfica 10 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Murcia.....	53
Gráfica 11 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Murcia	53
Gráfica 12 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Murcia (kWh/m ² año).....	54
Gráfica 13 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Barcelona	54
Gráfica 14 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Barcelona (kWh/m ² año).....	55
Gráfica 15 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Barcelona.....	55
Gráfica 16 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Madrid	56



Gráfica 17 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Madrid	56
Gráfica 18 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Madrid (kWh/m ² año)	57
Gráfica 20 Diagrama de Gantt	61



ACRONIMOS Y SÍMBOLOS

ACRONIMOS	
HVAC	Sistema de Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado
ASTF	Fachadas Activas Solares Térmicas
PCM	Materiales de Cambio de Fase
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Comité Intergubernamental sobre el Cambio Climático
UE	Unión Europea
COP15	Decimoquinta edición de la Conferencia sobre la Diversidad Biológica
MOP5	Quinta Conferencia de las Partes en calidad de Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
AP	Acuerdo de París
ONU	Organización de las Naciones Unidas
VPO	Vivienda de Protección Oficial
ACS	Agua Caliente Sanitaria
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
SI	Sistema de unidades Internacional
IP	Sistema de unidades Imperial
CTE	Código Técnico de la Edificación

MATEMÁTICAS Y FÍSICA	
k [W/mK]	Conductividad térmica
D [kg/m³]	Densidad
Cp [J/kgK]	Calor específico
e [m]	Espesor
U [W/m²K]	Transmitancia térmica
N_{per} [pers]	Número total de personas
F_c [-]	Factor de centralización
D_{ACS} [l/día]	Demanda de agua caliente sanitaria

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de los tiempos el ser humano ha tenido la necesidad de buscar un lugar en el que protegerse de las inclemencias del tiempo y de los ataques de los depredadores para poder sobrevivir. Con el paso de los años, las necesidades han ido evolucionando, y hoy en día, se busca una mayor privacidad, seguridad, y confort en aspectos visuales, acústicos, térmicos y respiratorios.

La valoración del confort por parte de un conjunto de población no es homogénea en cuanto a aspectos térmicos y respiratorios se refiere, por lo que resulta imprescindible establecer unos parámetros de equilibrio concretos que puedan abastecer dichos niveles mediante estrategias que se incorporen al diseño arquitectónico. En general, el confort se produce cuando la temperatura corporal se mantiene dentro de unos márgenes estrechos, la humedad de la piel es baja y el esfuerzo fisiológico de regulación es mínimo. El confort también depende de acciones de comportamiento como modificar la ropa, alterar la actividad, cambiar la postura o la ubicación, cambiar el ajuste del termostato o abrir una ventana. En 1962, R. K. Macpherson [1] definió los siguientes seis factores como los máximos influyentes en la sensación térmica individual:

- dos variables personales (aislamiento de la ropa y nivel de actividad, es decir, tasa metabólica)
- y cuatro variables físicas (temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura radiante media).

Los estándares de confort térmico determinan el consumo de energía de los sistemas ambientales de un edificio; por lo tanto, desempeñan un papel importante en la sostenibilidad del mismo. Esta energía suele implicar la combustión de recursos fósiles, lo que contribuye a las emisiones de dióxido de carbono y al cambio climático. El confort térmico es también un parámetro clave para un lugar de trabajo saludable y productivo [2].

Para garantizar las necesidades de confort mencionadas anteriormente, el parque de edificios existente requiere de un uso de energía que, según datos obtenidos del Departamento de Rendimiento Energético de los Edificios de la Comisión Europea, representa actualmente alrededor del 40% del consumo total de energía y el 36% de las emisiones de CO₂ de la propia unión [3]. Es por tanto de vital importancia aumentar la eficiencia energética del sector de la construcción, ya que se calcula que el 75% de los edificios no es eficiente en términos de uso de energía [3]. De este modo, se podrán reducir el consumo total de energía y las emisiones de CO₂ de forma significativa y, a su vez, alcanzar los objetivos de los acuerdos climáticos realizados a nivel mundial.

Existen diferentes estrategias que se pueden adoptar para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Tales estrategias se dividen en dos grupos principales:

- los sistemas activos, que son aquellos dispositivos o conjunto de dispositivos mecánicos que necesitan de un consumo de energía para su correcto funcionamiento,

- y los sistemas pasivos que se caracterizan por ser unas estrategias que tienen un consumo de energía insignificante o nulo.

Por un lado, entre los sistemas activos, podemos encontrar todo tipo de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que tienen el objetivo de proporcionar confort térmico y una calidad de aire óptima en el interior de las edificaciones. Dichos sistemas deben ser complementarios a los sistemas pasivos para poder reducir el consumo energético de los edificios.

Por otro lado, las estrategias de diseño pasivo están relacionadas con varios aspectos de un edificio como lo son la forma, el tamaño, la orientación, el emplazamiento, la disposición, etc. Su impacto puede verse fácilmente en el rendimiento energético de la construcción. Esto se debe a que la masa y la disposición de los edificios pueden generar efectos de sombreado y dificultar la ventilación y la iluminación natural. Sin apenas coste adicional en la adaptación de las estrategias de diseño, como la orientación del edificio, se puede conseguir un efecto significativo en el rendimiento térmico del mismo.

1.1 Fachadas Activas Solares Térmicas

Las Fachadas Activas Solares Térmicas (ASTF) [4] son estrategias incorporadas en el diseño arquitectónico que mejoran la eficiencia energética de las edificaciones y garantizan el confort en el interior. Un ASTF es una fachada de edificio especial que incorpora un absorbedor térmico solar en su estructura. Esta combinación es la causante de la doble función de la fachada, es decir, la función estructural y la función de captación de energía solar. Para un ASTF común, los procesos de absorción, conversión y transferencia de energía implican la absorción solar y la ganancia de calor por parte del absorbedor térmico, la transferencia de calor conductiva y convectiva entre el absorbedor térmico y el aire circundante u otro medio y la transferencia de radiación térmica entre la fachada y su entorno. En resumen, un ASTF no sólo aumenta el aislamiento térmico de un edificio, sino que también recoge cierta cantidad de calor de la radiación solar que incide sobre su superficie.

Debido a la prefabricación predominante en el sector de la construcción, la producción industrializada de losas prefabricadas y de módulos de fachada prefabricados se hace cada vez más popular, lo que ofrece la oportunidad de una producción e implementación masiva de los módulos ASTF [4]. Además de las funciones básicas como ventana, pared, balcón o techo, el ASTF debe tener también las funciones de calefacción, ventilación y sombreado, que permiten tanto la captación como la distribución de energía para el edificio en cuestión. En los últimos años, los ASTF se han vuelto cada vez más atractivos, debido a las siguientes ventajas [4]:

1. Permiten recoger, transferir y almacenar una gran cantidad de energía solar en forma de calor que se utiliza para diversos fines en los edificios.
2. Permiten eliminar las ganancias solares de la envolvente del edificio, reduciendo así la carga de refrigeración de las construcciones.
3. Permiten realizar múltiples funciones, como la estructural, la obtención de energía térmica, la conexión de tuberías y la mitigación de las condiciones climáticas extremas, etc.

4. Permiten ahorrar espacio de ocupación de los servicios del edificio y permiten crear una doble piel climática, mejorando así el aislamiento térmico del edificio.

Desde el punto de vista de la función del edificio, los ASTF pueden clasificarse de la siguiente manera: de pared, de ventana, de balcón y de tejado. Estos dispositivos ASTF pueden sustituir de forma natural a los componentes tradicionales del edificio y, al mismo tiempo, seguir desempeñando la función de colector de energía solar [5]. En cuanto a la transparencia de la fachada, los ASTF se clasifican como transparentes, translúcidos, opacos y de transparencia selectiva [6]. Mientras que, en lo que respecta al medio de transferencia de calor, los ASTF pueden diferenciarse entre los de aire, los hidráulicos y los basados en las tecnologías de Materiales de Cambio de Fase (PCM).

La tipología basada en la transferencia de calor por el aire tiene la característica de ser de bajo coste, pero a su vez es poco eficiente en lo que a la captación de energía solar se refiere debido a la relativamente baja densidad del aire. Este sistema suele utilizar el calor solar recogido para precalentar el aire de entrada con el fin de ventilar la edificación o calentar un espacio [4].

Un tipo de ASTF de fachada es el sistema de muro Trombe, que fue desarrollado por primera vez por el estadounidense Edward Morse en 1881 y recientemente recuperado por el inventor francés Felix Trombe, de ahí el nombre con el que es conocido el sistema hoy en día [7]. El muro Trombe consiste en una estructura de un material macizo capaz de absorber una gran cantidad de calor, que se coloca dejando un hueco, detrás de un vidrio orientado al sur (en el hemisferio norte) con el objetivo de recibir grandes cantidades de ganancia solar, ver Figura 1. De este modo, el calor absorbido del sol es conducido lentamente hacia la superficie interior del muro.



Figura 1 Esquema y fotografía del muro Trombe

Durante el periodo nocturno o invernal en el que las ganancias solares son escasas, el calor almacenado en el muro de masa térmica se irradia y se transmite por convección al espacio a calentar. La energía térmica puede ser transferida a la habitación por el aire que circula y ha sido calentado a través del hueco entre el muro y el acristalamiento mediante las aberturas en la parte superior e inferior del muro. La circulación de dicho aire puede ser por convección natural controlada por compuertas en las aberturas de ventilación o por circulación forzada con el uso de ventiladores [7].

1.2 Contexto

Múltiples décadas de estudios científicos demuestran que las actividades humanas inducen el cambio climático global al emitir gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la combustión de combustibles, de las acciones de ciertas industrias, de la deforestación y de otras muchas prácticas. Los científicos investigaron y evaluaron la evidencia científica del cambio climático inducido por los GEI durante más de 150 años antes de que los responsables políticos de todo el mundo acordaran cooperar para estudiar cómo abordar los riesgos que dicho fenómeno genera a los seres humanos y a los ecosistemas globales [8].

Tras varias reuniones científicas internacionales celebradas entre los años 1985 y 1987, los gobiernos decidieron crear el Comité Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), bajo los auspicios del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial, con la finalidad de que les proporcionara valoraciones sobre el cambio climático, los impactos sociales y económicos previstos y las posibles estrategias de respuesta a seguir [9].

En este contexto, en el año 1997 se celebró en Japón el Protocolo de Kioto, que, aunque entró en vigor en 2005, estableció objetivos jurídicamente vinculantes para que 37 países de renta alta y la Unión Europea (UE) redujeran sus emisiones de gases de efecto invernadero una media del 5% por debajo de los niveles de 1990 durante los años 2009 y 2012. En este protocolo no se incluyeron las obligaciones de mitigación de GEI para los países en desarrollo. Uno de los países más polémicos fue Estados Unidos, que, aunque firmó dicho acuerdo, no lo ratificó, por lo que quedó excluido de él [10].

En el año 2009 se celebraron en Copenhague (Dinamarca) las reuniones correspondientes a la 15.ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP15) y la 5.ª Conferencia de las Partes en calidad de Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto (MOP5). El Acuerdo de Copenhague que se alcanzó finalmente es el primer documento que cuenta con el apoyo de todos los países industrializados que son grandes emisores de gases de efecto invernadero. Por primera vez, los países que no firmaron o ratificaron el Protocolo de Kioto reconocen el cambio climático como un problema universal. Los países industrializados aceptan que deben fijarse objetivos de reducción, y los emergentes que deben diseñarse acciones para atenuar su ritmo de crecimiento de emisiones. En consecuencia, se acepta un aumento de la temperatura global de 2°C como un objetivo a medio plazo [11].

Debido a una mayor conciencia social respecto al cambio climático en el año 2015 se celebró la Cumbre Climática de París. En dicha cumbre se aprobó el segundo gran acuerdo subsidiario de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) conocido como el Acuerdo de París (AP), que sustituyó al Protocolo de Kioto como principal mecanismo jurídico para el proceso y las acciones en el marco de la CMNUCC. El Acuerdo establece objetivos a largo plazo para guiar a todas las naciones. Estos objetivos se pueden resumir en: la reducción sustancial de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2°C, al tiempo que se persiguen los esfuerzos para limitar el aumento aún más a 1,5 grados, la revisión de los compromisos de los países cada cinco años y proporcionar herramientas de financiación a los países en desarrollo para mitigar el cambio climático y reforzar la resiliencia y mejorar la capacidad de adaptación a los impactos climáticos. El Acuerdo es un tratado internacional

jurídicamente vinculante que, entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 y en la actualidad, 192 partes (191 países más la Unión Europea) se han adherido a ella [12]. A raíz del Acuerdo de París, en 2015 todos los estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobaron conjuntamente 17 objetivos como parte de la Agenda 2030 que fomentan el desarrollo sostenible en ámbitos sociales, económicos y ambientales [13].

En este contexto de necesidad de reducción de los gases de efecto invernadero y mitigación del cambio climático, han surgido o han cogido fuerza diferentes técnicas de construcción bioclimática dentro del sector de la construcción.

2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

En los últimos años, debido a la necesidad de reducción de gases de efecto invernadero, la mitigación del cambio climático y el aumento del ahorro energético en las edificaciones, el interés por los sistemas solares pasivos ha ido aumentando. En sistema de muro Trombe, es uno de estos sistemas pasivos que ayuda a alcanzar el confort, en cuanto a climatización y renovaciones de aire de un espacio se refiere, sin necesidad de un aporte de energía adicional para su correcto funcionamiento. Por lo que se considera una buena estrategia arquitectónica que ayuda a reducir la demanda energética de los edificios.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es analizar el comportamiento de un bloque de viviendas real de Portugalete, Vizcaya, para poder optimizar su control y adecuarlo a las condiciones climáticas de la zona. En este TFM se modela uno de los edificios con la fachada más sencilla y se analizan los consumos en base a los datos extraídos del proyecto de ejecución de la obra. Una vez modelado el edificio el objetivo futuro será incorporar el muro Trombe en la fachada sur para comprobar las mejoras energéticas.

En cuanto a los objetivos específicos se refiere, caben destacar:

- Analizar las características de las viviendas de VPO de Portugalete.
- Modelar la envolvente del edificio y los perfiles de uso según los datos del proyecto.
- Simular el comportamiento del edificio en OpenStudio para verificar su consumo.
 - Crear un guía para facilitar la aplicación del programa
 - Simular modelos simplificados con fachadas con panel sándwich y muro Trombe.
- Redefinir la envolvente incluyendo detalles constructivos en Sketch up pro.
- Analizar el comportamiento en diferentes zonas climáticas.
- Obtención de resultados y comparativa.

3 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

El modelado simplificado del edificio de Viviendas de Protección Oficial (VPO) de Portugalete permitirá crear analizar los perfiles de uso para futuras mejoras y optimización de los sistemas térmicos. Esto ayudará a integrar los elementos pasivos con la correspondiente instalación activa adaptando el uso y reduciendo los costes de consumo energético y de emisiones de CO₂. Por otro lado, el análisis del funcionamiento de diferentes fachadas puede ayudar a

implementar dichos sistemas en las edificaciones ya existentes o por construir, contribuyendo de esta manera a alcanzar los acuerdos climáticos realizados.

4 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Antes de comenzar con el trabajo descrito, es recomendable analizar el estado actual de los diferentes sistemas a analizar, en este caso, se estudiará la solución más novedosa que corresponde al sistema de fachada activa Trombe. El muro Trombe se usa para la climatización y las renovaciones de aire de viviendas, y por ello se realiza una revisión de artículos con el objetivo de ampliar el conocimiento y describir el estado de desarrollo actual de dicho sistema.

En el artículo escrito por Sergei Kostikov et al. [14] se lleva a cabo una revisión del potencial actual del muro Trombe para climas fríos, junto con una breve evaluación técnica y económica en condiciones climáticas frías para determinar el potencial económico de la construcción de este tipo de sistemas. En la revisión se identifican las principales lagunas y problemas que tiene el muro Trombe en dichas condiciones climáticas, y se plantea una solución constructiva más adecuada para solventarlos.

Koyunbaba Basak Kundakci y Yilmaz Zerrin [15] compararon el rendimiento energético de un módulo fotovoltaico semitransparente de vidrio simple, de vidrio doble y de a-Si integrado en la fachada del muro Trombe construido en Izmir, Turquía mediante un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD). Los resultados obtenidos muestran que, en los tres casos de estudio, el calor almacenado en la pared durante el día se transfiere a la habitación en distinta medida durante la noche cuando no hay radiación. Por otro lado, este estudio ha demostrado la capacidad de un código CFD para predecir la radiación, la conducción y la convección natural en el sistema de muros Trombe y por ello, se utilizará para la optimización de estos sistemas de climatización antes de aplicarlos a un edificio.

En la investigación realizada por Li Chao et al. [16] se establecieron dos salas de pruebas comparativas, una con el sistema de muro Trombe instalado en la fachada sur, y la otra utilizada como contraste con el objetivo de estudiar el rendimiento del sistema de muro Trombe en condiciones climáticas diferentes. El resultado demostró que el sistema de muro Trombe puede aprovechar al máximo el calor de la radiación solar absorbida para inducir la ventilación interior, con un caudal de aire circulante máximo de 140 m³/h, reduciendo eficazmente la temperatura interior hasta 4,1 °C durante el día en comparación con la habitación de referencia.

Bojić Milorad et al. [17] comparan el rendimiento energético y medioambiental de los edificios con y sin muros Trombe. En su estudio, se utilizan dos muros Trombe en el lado sur de una casa situada en Lyon, Francia. El análisis de ciclo de vida realizado muestra que en el caso del edificio con muros Trombe, el ahorro de energía final anual durante la calefacción se sitúa en torno al 20% frente al edificio que consume gas como energía primaria para calefacción.

Por otro lado, diversos estudios [18, 19, 20, 21] analizan el potencial del sistema de muro Trombe modificado con novedosas tecnologías (componentes absorbentes de silicio y titanio y sistemas de oxidación catalítica), para utilizarlos a modo de generación de aporte térmico junto con la capacidad de purificar el aire para diferentes espacios sin la necesidad de un aporte de energía extra.

Un mecanismo prometedor que aumenta la eficiencia del sistema del muro Trombe se aborda en el estudio realizado por Hong Xiaoqiang et al. [22]. Dicho estudio analiza el rendimiento térmico del muro Trombe con persiana veneciana en las estaciones de verano y de transición mediante un modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD). Los resultados muestran que una mayor separación entre la lama y la pared interior y un mayor ángulo de las propias lamas contribuyen a mejorar el flujo convectivo natural y a reducir la temperatura del aire tanto en verano como en las estaciones de transición, lo que conduce a un mejor efecto de refrigeración y a una menor ganancia de calor por radiación solar de la pared exterior.

Por su parte, en 2021 Islam Nazrul, et al. [23] observaron que la integración de un sistema fotovoltaico con el sistema de muro Trombe (PVTW) es eficaz para regular la carga térmica de los edificios y producir energía eléctrica. Por ello realizaron un estudio en el que se comparaban los resultados experimentales y de simulación numérica obtenidos entre el nuevo sistema de muro Trombe fotovoltaico con persiana veneciana (PVTW_Ven) y el sistema de muro Trombe convencional con persiana veneciana (TW_Ven). Los experimentos se realizaron en Abha, provincia de Asir de Arabia Saudí, con condiciones climáticas semiáridas y con el objetivo de refrigerar la estancia a estudiar. Los resultados obtenidos mediante simulación numérica se validaron comparándolos con los resultados experimentales y concluyeron su análisis indicando que la ganancia de calor media de la configuración TW_Ven es 1,33 veces mayor que la de la configuración PVTW_Ven, con una temperatura de la superficie de la pared exterior 5,2 °C superior. Siguiendo la integración de paneles fotovoltaicos en el sistema de muro Trombe, diversos artículos [24, 25, 26, 27] realizan estudios experimentales y teóricos con el objetivo de optimizar el sistema y mejorar su rendimiento a la vez que se analiza la posibilidad de obtener parte de la demanda eléctrica de la edificación mediante dicho sistema.

Hu Zhongting, et al. [28] propone un novedoso muro Trombe que utiliza persianas como sombreado y simultáneamente un canal de flujo de agua (denominado WBTW), que ofrece la posibilidad de satisfacer las demandas de los ocupantes en diferentes estaciones, como la calefacción de espacios, la ventilación y el agua caliente sanitaria. Los resultados simulados sugieren que la eficiencia térmica media mensual del sistema WBTW oscila entre el 20% y el 60% durante la temporada que no requiere de calefacción y entre el 30% y el 50% durante los meses que sí requieren calefacción.

Con el fin de ahorrar energía en los edificios de una manera sencilla y eficaz, en varios artículos [29-33] se presenta un muro Trombe compuesto con una capa porosa que almacena calor, cuya matriz está formada principalmente por cápsulas granulares encapsuladas de materiales de cambio de fase (PCM). Debido a la característica constructiva del muro, el calor acumulado se puede liberar por la noche o en un día nublado cuando la temperatura está por debajo de la temperatura de solidificación del PCM, por lo que se evita el sobrecalentamiento en la habitación y el aprovechamiento del calor se maximiza.

Como se puede observar, existen diversos estudios y artículos que examinan el comportamiento mediante análisis numéricos y experimentales del sistema pasivo de acondicionamiento térmico conocido como, sistema de muro Trombe. Incluso se han mencionado varios estudios que hibridan dicho sistema con diferentes estrategias activas o pasivas con el objetivo de maximizar su rendimiento. Pero, no se ha encontrado ningún artículo que estudie el comportamiento del sistema pasivo de muro Trombe en el clima

oceánico templado que afecta a las viviendas de protección oficial situadas en la ciudad vizcaína de Portugalete.

A pesar de la deficiencia del estudio de muro Trombe en Portugalete, este TFM se centra exclusivamente en el modelado simplificado del edificio mediante Open Studio, incluyendo una fachada convencional. Sin embargo, un futuro trabajo se dedicará a estudiar las mejoras del muro Trombe respecto a esta fachada para resaltar su utilidad y beneficio.

5 ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describen el clima del emplazamiento y las características constructivas del edificio de estudio y del edificio modelo simplificado.

5.1 Edificio de estudio

El edificio de este TFM participó, junto con el asesoramiento técnico de la entidad Tecalia, como edificio piloto en el proyecto Europeo BuildSmart - *Energy efficient solutions ready for market*, cofinanciado por la Comisión Europea bajo el Séptimo Programa Marco, cuyo objetivo final era difundir el uso en el sector residencial de estrategias y tecnologías energéticamente eficientes, comercialmente disponibles, pero de uso todavía poco frecuente. Con tal fin, en el proyecto original se contempla la instalación de tres sistemas diferentes de fachada sur para cada uno de los 3 bloques que conforman el edificio, con el objetivo de poder estudiar el comportamiento de dichos sistemas en las mismas condiciones climáticas y de entorno.

5.1.1 Lugar geográfico

El conjunto de edificios de estudio se encuentra en Portugalete (País Vasco, España), concretamente en una parcela con un 10% de pendiente de la calle Juan de la Cosa del barrio de Repélega. El conjunto de edificios con una volumetría rotunda y compacta se forma con tres prismas escalonados, con el fin de adaptarse al fuerte desnivel existente en el emplazamiento (en torno a 6 metros), y consta de tres bloques de viviendas adyacentes de cinco plantas con una superficie total de 2.154 m², junto con dos niveles subterráneos de plazas de aparcamiento. Su aspecto superficial está conformado con materiales ligeros, acristalamientos, paneles metálicos y forjados voladizos sobre la planta baja.

En los alrededores de la parcela edificada se pueden encontrar diferentes tipologías urbanas. La fachada noreste alberga una plaza encerrada casi por completo por edificios de distintas alturas, la fachada sureste y noroeste se comunican con dos pequeños espacios públicos ajardinados, mientras que la suroeste da a un amplio parque verde flanqueado a lo lejos por un bloque de viviendas de seis plantas.

Estos edificios forman parte del parque inmobiliario de viviendas sociales del Gobierno Vasco, donde se proporcionan casas a personas con bajos ingresos durante cinco años con un alquiler reducido. El principal problema a la hora de alquilar inmuebles a personas de rentas bajas sucede cuando los usuarios no pueden costearse los gastos de la comunidad, problema que sucede en la mayoría de los casos. Por lo tanto, los edificios fueron diseñados para reducir el consumo de energía al mínimo mediante la incorporación de sistemas pasivos, energías renovables y cogeneración.



Figura 2 Fotografía del edificio de estudio.

5.1.2 Clima

El clima en la ciudad de Portugalete según la clasificación climática de Köppen-Geiger se categoriza como Cfb, esto es, clima oceánico al igual que en la mayor parte del continente europeo.

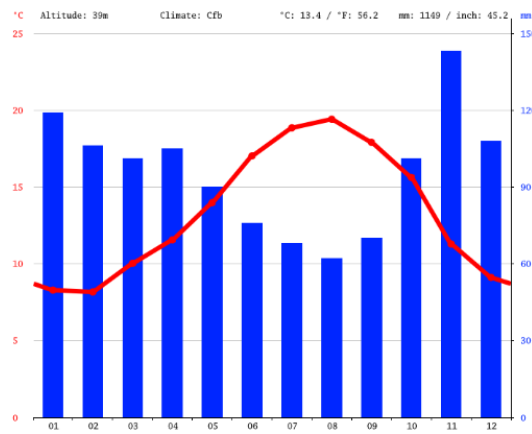


Figura 3 Climograma de la localidad de Portugalete.

El clima oceánico se caracteriza por tener unas temperaturas suaves y templadas a lo largo de todo el año, considerándose como un régimen mesotermal, esto es, un clima con inviernos frescos y veranos templados. El mes de agosto es el mes más caluroso con una temperatura

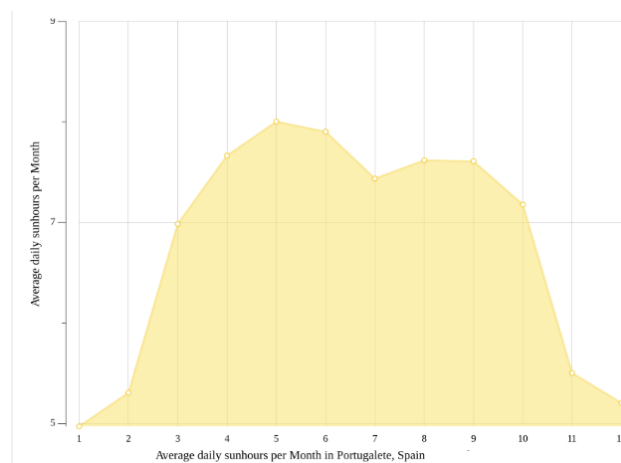


Figura 4 Media de horas de sol al mes en Portugalete.

media de 19,4°C mientras que el mes más frío es febrero con una temperatura media de 8,2°C de modo que la temperatura promedio en la ciudad de Portugalete es de 13,4°C, ver Figura 3.

En cuanto a las precipitaciones se refiere, la cercanía e influencia del océano atlántico se aprecia notablemente, puesto que anualmente se miden alrededor de 1150mm de precipitaciones. Siendo el mes de noviembre el más lluvioso con un promedio de 143 mm y el mes de agosto el más seco con apenas 62mm.

Por otro lado, Portugalete consta de 2478,34 horas de sol durante todo el año, con un promedio mensual de 81,39 horas repartidas principalmente en los meses de primavera y verano, siendo los meses invernales los que menos horas de luz solar albergan, Figura 4.

5.1.3 Uso del edificio

Cada uno de los tres prismas que forman los edificios albergan 10 viviendas, 2 por planta, con un total de 30 viviendas, por lo que se consideran de uso residencial exclusivamente.

La demanda energética de un edificio residencial viene definida por las necesidades de sus ocupantes para conseguir un estado de confort. Estas necesidades, se puede dividir en tres grupos principales:

- Necesidades térmicas: hacen referencia a la cantidad de energía necesaria que hay que aportar en una vivienda para mantener la temperatura ambiente del interior entre los parámetros de confort (18-20°C). Dependiendo de la temperatura exterior, dichas necesidades pueden ser de calefacción ($T_{ext} < T_{conf}$) o de refrigeración ($T_{ext} > T_{conf}$).
- Necesidades de ACS: se refieren a la cantidad de energía utilizada para garantizar el suministro y regulación de temperatura del agua potable para uso humano, principalmente para uso sanitario, limpieza y alimentación.
- Necesidades de iluminación: hacen referencia a la cantidad de energía necesaria para garantizar el confort lumínico y visual dentro de la vivienda.

5.2 Características constructivas

En el siguiente apartado se expondrán las características constructivas de las fachadas y forjados del edificio de estudio y del modelo simplificado del edificio.

5.2.1 Características generales

El edificio de estudio al estar compuesto por tres prismas unidos entre sí formando un rectángulo, consta de cuatro fachadas expuestas al exterior y dos forjados, superior e inferior. Dichas fachadas se pueden dividir en dos grupos principales según su arquitectura.

5.2.1.1 Fachadas orientadas al Norte, Este y Oeste

Las fachadas orientadas al Norte, Este y Oeste son convencionales, compuestas principalmente por un aislamiento de tipo Panel Sándwich. Dicho tipo de aislamiento mostrado en la Tabla 1, está formado por una plancha de espuma de poliuretano (PUR) con hidrofluorocarbonos (HFC) o pentano de 0,05m de espesor con un revestimiento impermeable de caucho para protegerlo de las inclemencias meteorológicas y de las

condensaciones que pueden producirse, una capa de lana mineral de 0,05m de espesor, una capa de hormigón celular curado en autoclave de 0,1m de espesor que se encarga de soportar y darle rigidez al conjunto y una placa de yeso laminado de 0,013m de espesor.

Con todo esto, los elementos opacos de las fachadas adquieren una transmitancia térmica de 0,22 W/m²K, mientras que las ventanas con vidrios de baja emisividad (6/12/4) tienen una transmitancia de 2.2 W/m²K.

MATERIAL	ESPESOR (m)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Plancha de PUR	0,05	0,025	45	1000
Lana mineral	0,05	0,031	40	1000
Hormigón celular	0,1	0,14	500	1000
Placa de yeso	0,013	0,25	825	1000

Tabla 1 Característica constructiva del aislamiento tipo Panel Sandwich

5.2.1.2 Fachadas orientadas al Sur

Debido a que el edificio está destinado a personas de bajos recursos económicos, se propuso una arquitectura bioclimática de consumo energético reducido, en el que la configuración constructiva de los cerramientos del edificio fue fundamental para alcanzar los objetivos de eficiencia energética predeterminados. Se propusieron tres estrategias en el diseño de los bloques de viviendas en las que la orientación tuvo una gran influencia.

Las fachadas con orientación sur-suroeste de los tres bloques, frente a la calle Juan de la Cosa, se plantearon como elementos dinámicos de captación energética, en el que cada bloque tuviese una solución energética diferente con el fin de monitorizar el comportamiento de cada solución adoptada para compararlas entre sí durante los primeros años de uso. Dichas estrategias son:

- Fachada bloque 1: sistema de captación de energía SolarWall que proporciona aire caliente a una bomba de calor colocada en el tejado.
- Fachada bloque 2: sistema de cerramiento pasivo conformado por panel sándwich.
- Fachada bloque 3: sistema muro Trombe encargado de la ventilación junto con un sistema de recuperación de calor.

Por un lado, el sistema de panel Solar-Wall que, constructivamente, consiste en un revestimiento de paneles perforados, crea una cámara de aire entre el cerramiento existente y el nuevo revestimiento. El cerramiento base de la fachada se compone de panel sándwich tipo Robertson de similares características al utilizado en las otras fachadas. La composición del SolarWall se puede observar en la Tabla 2, con una transmitancia térmica de 0,26 W/m²K.

MATERIAL	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Acero	0,003	50	7800	450
Cámara de aire	0,17	0,02	1,2	1
Lana mineral	0,06	0,031	40	1000
Hormigón celular	0,01	0,14	500	1000
Lana mineral	0,04	0,031	40	1000
Placa de yeso	0,013	0,25	825	1000

Tabla 2 Características constructivas del sistema SolarWall

Por otro lado, el corazón del sistema de Muro Trombe está constituido por una pared de ladrillo cara vista prensado de color tabaco, cuyas características constructivas se resumen en la Tabla 3. En su conjunto el sistema de Muro Trombe posee una transmitancia térmica de 0,33 W/m²K.

MATERIAL	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Vidrio prensado	0,01	1,2	2000	750
Cámara de aire	0,12	0,02	1,2	1
Hormigón celular	0,01	0,14	500	1000
Lana mineral	0,08	0,031	40	1000
Placa de yeso	0,013	0,25	825	1000

Tabla 3 Características constructivas del sistema de Muro Trombe

5.2.1.3 Forjado superior e inferior

El forjado superior obtiene una transmitancia térmica de 0,33 W/m²K gracias a la composición que se puede observar en la Tabla 4.

MATERIAL	ESPEJOR (m)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Arena y grava	0,1	2	1950	1045
Proyección de PUR	0,08	0,032	50	1000
Hormigón aligerado	0,35	1,207	1080	1000
Placa de yeso	0,015	0,25	850	1000

Tabla 4 Características constructivas del forjado superior

El forjado inferior tiene una transmitancia térmica de 0,52 W/m²K y su composición se muestra en la Tabla 5.

MATERIAL	ESPESOR (m)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mK)	DENSIDAD (kg/m³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kgK)
Gres calcáreo	0,02	1,9	2350	1000
Mortero de cemento	0,04	1,8	2100	1000
XPS expandido	0,05	1,842	37,5	1000

Tabla 5 Características constructivas del forjado inferior

5.2.2 Modelo simplificado del edificio de estudio

En modelo simplificado se ha realizado de dos maneras con la intención de poder comparar ambas representaciones:

- El primer modelo se creó un con todas las fachadas del tipo Panel Sandwich antes mencionado y con los mismos forjados descritos en el apartado anterior.
- En el segundo modelo, la fachada suroeste se definió como un sistema de Muro Trombe.

5.3 Sistemas de generación de energía

El edificio de estudio cuenta con diversos sistemas de generación de energía que abastecen parte de la demanda generada.

Por un lado, la demanda de calefacción y ACS de los tres bloques adyacentes que conforman el edificio de estudio se abastece mediante un sistema centralizado de caldera de condensación que como combustible usa gas natural. La capacidad nominal de la caldera es de 102 kW e impulsa el agua caliente sanitaria a una temperatura de 60°C mientras que la impulsión para el sistema de calefacción es de 40°C. El sistema de ACS consta de un acumulador con una capacidad total de 2000L que garantiza durante un tiempo limitado el suministro del agua.

Cabe mencionar que el edificio contiene una bomba de calor para abastecer la demanda de ACS y calefacción los días que haya una cantidad determinada de luz solar, puesto que el consumo eléctrico de dicho aparato se abastece mediante la instalación fotovoltaica que alberga el edificio en la cubierta superior. La instalación fotovoltaica consta de un total de 88 paneles fotovoltaicos con una potencia pico instalada de 22,4 kWp. Además, la instalación también abastece parte de la demanda eléctrica de los ascensores.

Por otro lado, la correcta ventilación eficiente del edificio se asegura mediante un sistema de recuperación de calor que está conectado al sistema pasivo de captación solar de la fachada tipo Muro Trombe.

Los dos modelos simplificados diseñados no poseen ningún sistema de autoconsumo mencionado anteriormente que reduzca la demanda energética del edificio, puesto que se ha querido obtener la demanda energética real, y en un futuro trabajo se analizará el consumo en función de las instalaciones térmicas. Además, el incluido en el programa de simulación de suministro de ACS y calefacción ha sido un sistema de district heating por su semejanza a la caldera centralizada.

6 Diseño simplificado y simulación del edificio de estudio

El diseño simplificado y la simulación del edificio de estudio se ha realizado mediante los programas SketchUp y OpenStudio. Con el programa SketchUp se ha representado el modelo en 3D y mediante OpenStudio se ha dotado al modelo simplificado de propiedades y características térmicas, climatológicas y de uso para poder llevar a cabo la simulación.

Cabe mencionar que para poder enlazar ambos programas es necesario descargar un *plugin* que permite introducir el modelo en 3D generado en el programa OpenStudio.

6.1 SketchUp

A continuación, dadas las dificultades encontradas en esta fase, se procederá a explicar paso por paso cómo ha de realizarse el modelo en 3D del edificio en el programa SketchUp, pero antes de comenzar con la explicación conviene familiarizarse con los comandos y demás opciones del programa.

Una vez iniciado SketchUp se abrirá una ventana (Figura 5) donde se tendrá que elegir una de las plantillas de trabajo disponibles. Dichas plantillas han sido creadas para facilitar la representación de construcciones puesto que permiten trabajar en sistema métrico o sistema imperial.



Figura 5 Ventana de selección de plantilla de trabajo

Después de haber elegido el tipo de plantilla que queremos utilizar, se abrirá la pantalla principal del programa donde se podrán encontrar el área de trabajo, la barra de menú, el cajetín de medidas y las herramientas de SketchUp y OpenStudio (ver Figura 6).

La barra de menú de SketchUp es similar a las barras de menú de otros programas informáticos donde se podrán encontrar las opciones de: Archivo, Edición, Ver, Cámara, Dibujo, Herramientas, Ventanas, Extensiones y Ayuda. El cajetín de medidas permite introducir las distancias y medidas necesarias para crear la representación de manera manual.

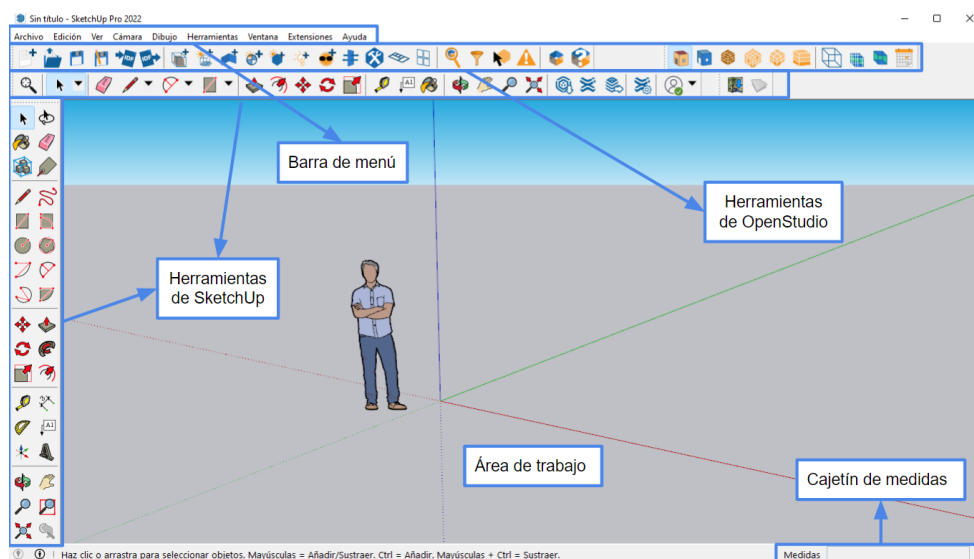


Figura 6 Pantalla principal de SketchUp

La barra de herramientas de SketchUp consta de las opciones necesarias para crear el modelo en 3D del edificio de estudio. Las herramientas más utilizadas se muestran en la Figura 7.

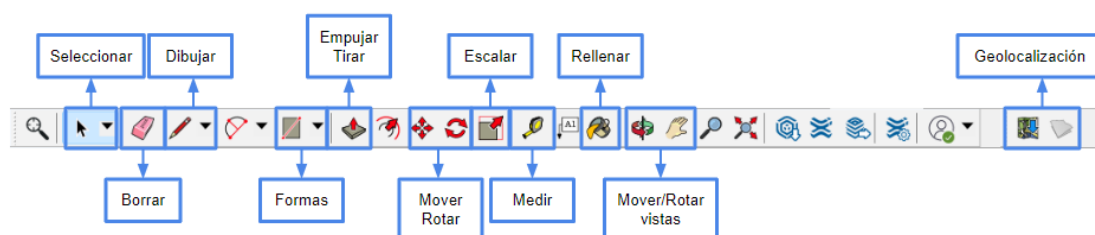


Figura 7 Barra de herramientas de SketchUp

Por otro lado, la barra de herramientas de OpenStudio (Figura 8) consta de las herramientas para proporcionar a las construcciones realizadas de las propiedades requeridas.

La barra de herramientas de OpenStudio no aparecerá en la pantalla principal si no se ha descargado y activado el *plugin* que enlaza ambos programas. Para activar el *plugin* se tendrá que acceder en la Barra de menú a la opción *Extensiones >> Administrador de extensiones*. Una vez abierta la ventana solo hay que activar el *plugin* de OpenStudio y aplicar los cambios realizados. Si no se realiza el diseño con el *plugin* instalado no se podrán enlazar los programas y no se conseguirá efectuar la simulación.

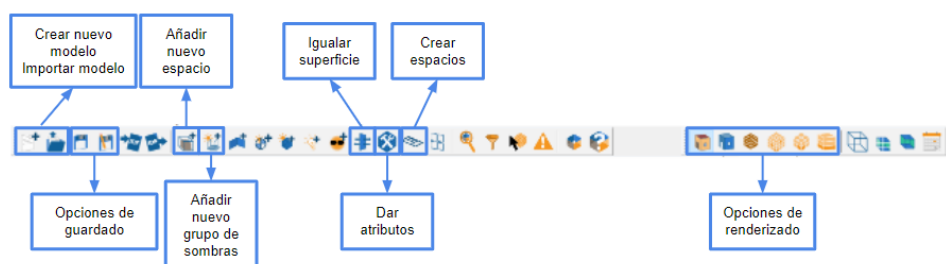


Figura 8 Barra de herramientas de OpenStudio

6.1.1 Primeros pasos

Antes de comenzar a representar el modelo del edificio se debe seleccionar la opción *Crear nuevo modelo* dentro de la barra de herramientas de OpenStudio y rellenar la ventana emergente con los datos reales del edificio (ver Figura 9). Los datos que se solicitan son: *Tipo de edificio*, *Plantilla*, *Zona climática ASHRAE* y opciones para que permita construir y modificar objetos previamente introducidos.

User input.	
Building Type	MidriseApartment
Template	90.1-2010
ASHRAE Climate Zone	ASHRAE 169-2006-4A
Create Space Types?	true
Create Construction Set?	true
Set Building Defaults Using New Objects?	true
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

Figura 9 Información introducida en la ventana nuevo modelo de OpenStudio

Seguido, se debe elegir el sistema de unidades con el que trabaja OpenStudio seleccionando en la Barra de menú *Extensiones >> OpenStudio >> Preferences* para finalmente seleccionar dentro de la ventana emergente entre el Sistema Internacional (SI) o el Sistema Imperial (IP).

6.1.2 Diseño del modelo

Una vez finalizados los anteriores apartados, se puede comenzar a diseñar el modelo simplificado del edificio. Primero, se introducen los recintos del modelo simplificado dibujando con la herramienta *Formas* de la barra de herramientas de SketchUp un rectángulo con las dimensiones deseadas. A continuación, seleccionando el rectángulo creado junto con la opción *Crear espacios* de la barra de herramientas de OpenStudio e introduciendo los datos de altura de cada piso y número de pisos se obtiene la estructura en 3D del edificio.

Para este trabajo se introdujo un recinto de 15,7m de ancho por 12,2m de largo compuesto por 6 plantas (un portal y cinco plantas compuestos de dos viviendas) de 3m de altura cada uno. La estructura en 3D del edificio se puede observar en la Figura 10.

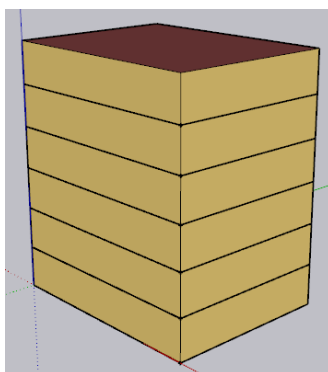


Figura 10 Estructura en 3D del edificio de estudio

Después se dota a cada piso generado de los atributos necesarios seleccionando cada planta una por una y mediante la herramienta *Dar atributos*. Un ejemplo de como se debe rellenar dicha ventana se muestra en la Figura 11.

En este trabajo a todos los pisos de viviendas se les dotó de los mismos atributos, pero el portal o piso 1 se definió como un pasillo dentro de la categoría de apartamento en la opción *Space Type*.

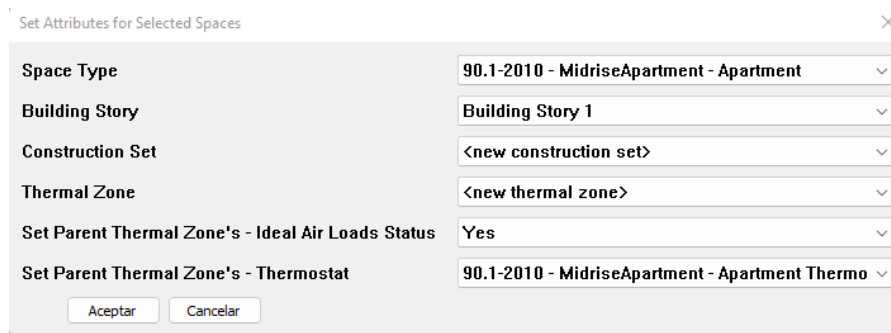


Figura 11 Ventana de atributos de un piso de vivienda

Posteriormente, se debe seleccionar la opción *Igualar superficie* de la barra de herramientas de OpenStudio y escoger las opciones *Insert in entire model* y *Match in entire model* (ver Figura 12). De esta manera, el programa unirá las superficies que son comunes para varios espacios formando una sola superficie.

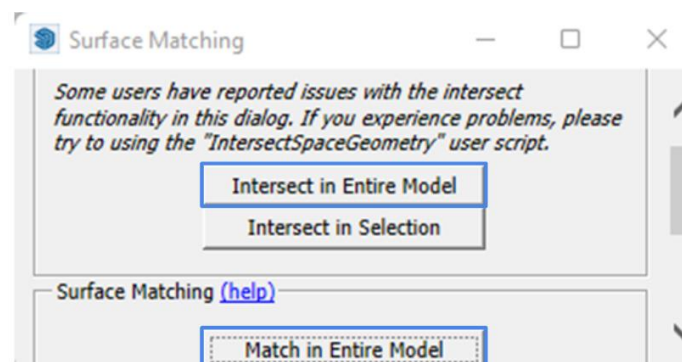


Figura 12 Igualar superficie

Finalmente, conviene ejecutar alguna de las opciones de renderizado para verificar que los se han realizado correctamente y que el programa no haya creado ningún elemento adicional.

En la Figura 13 se pueden observar las opciones de renderizado: la primera se trata de un renderizado por condición de contorno, la segunda por zona termal y la tercera un por tipo de uso.

- En el renderizado por condición de contorno, las superficies en contacto con el aire exterior se representan de color azul, mientras que las que están en contacto con el terreno se muestran en color marrón.
- En el renderizado por zona termal cada planta se muestra de un color aleatorio. Esto se debe a que en la ventana de atributos del edificio se le ha dotado a cada planta de su propia zona termal, puesto que las condiciones climáticas de una última planta y de una primera planta no son idénticas.

- En el renderizado por uso, las plantas dedicadas a viviendas se muestran de color azul mientras que el portal se muestra de color rojo.

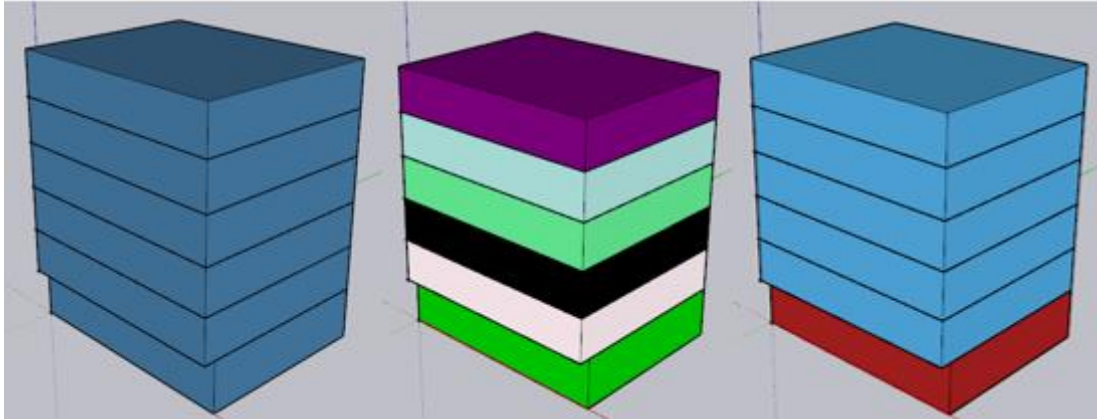


Figura 13 Opciones de renderizado utilizadas

6.1.3 Definición de elementos y sombras

Al terminar de verificar la estructura generada se procede a definir los elementos tales como ventanas, puertas y sombras.

Para colocar ventas y puertas en el edificio hay que seleccionar la planta donde se quieren colocar y dibujar la forma de dichos elementos. Al dibujar un rectángulo en contacto con el terreno el programa automáticamente lo identificará como una puerta y si el rectángulo se coloca dentro de una pared lo identifica como una ventana. De esta manera, a cada elemento se le atribuyen automáticamente sus características, las ventanas adquieren un color azul translucido y las puertas se muestran de color marrón (ver Figura 14). Se debe repetir el mismo proceso para cada elemento.

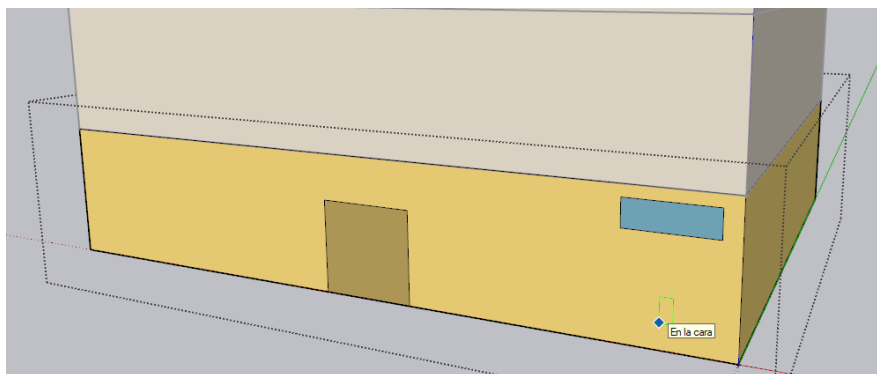


Figura 14 Definición de puertas y ventanas

Para definir las sombras se debe seleccionar la opción *Añadir nuevo grupo de sombras* en la barra de herramientas de OpenStudio y clicar en cualquier punto de la superficie del edificio. De este modo se creará un cubo en la zona, donde después de seleccionarlo, se podrán dibujar los elementos que dan sombra al edificio, ya sean elementos arquitectónicos del propio edificio como voladizos o demás estructuras de la fachada o elementos que no tengan que ver con el edificio creado, como, por ejemplo, edificios adyacentes o árboles.

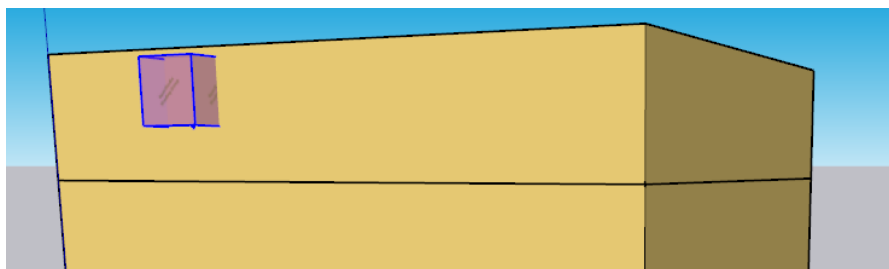


Figura 15 Definición de sombras

Finalmente, tras haber definido todos los elementos y sombras necesarios del diseño simplificado, el modelo del edificio se muestra en la Figura 16.

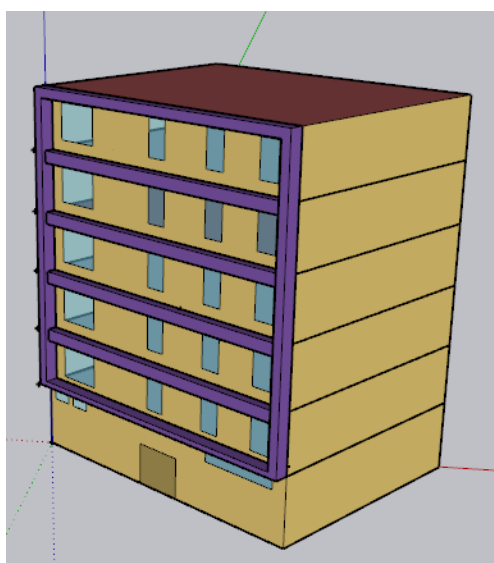


Figura 16 Modelo simplificado del edificio de estudio

Para guardar el modelo hay que seleccionar una de las dos opciones de guardado de la barra de herramientas de OpenStudio y automáticamente se guardaran dos archivos (ver Figura 17). Uno de estos archivos será una carpeta dónde se almacenan diversos datos y ficheros del modelo creado y el otro será un archivo .osm, el cual se modificará mediante el programa OpenStudio.

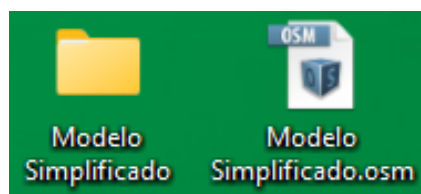


Figura 17 Archivos creados al guardar el proyecto

6.2 OpenStudio

A continuación, se explicará el proceso seguido para introducir en el programa OpenStudio las características térmicas, climatológicas y de uso definidas para el proyecto.

Al seleccionar el archivo .osm se accede a la interfaz del programa OpenStudio, Figura 18.

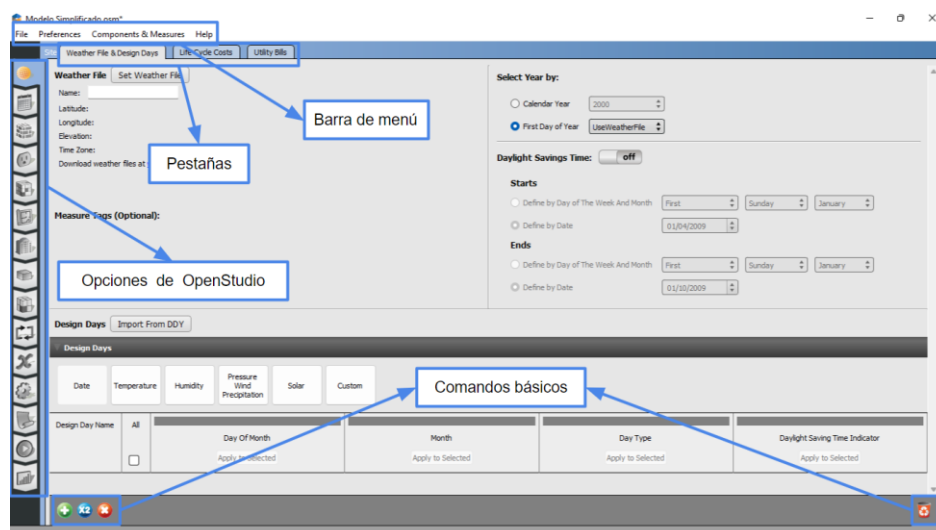


Figura 18 Interfaz de OpenStudio detallada

La barra de menú de OpenStudio es similar a las barras de menú de otros programas informáticos donde se podrán encontrar las opciones de: *File*, *Preferences*, *Components & Measures* y *Help*. La barra de opciones de OpenStudio permite acceder a las diferentes opciones que tiene el programa, donde, se definen o se modifican las características: *Site*, *Schedules*, *Constructions*, *Loads*, *Space Types*, *Geometry*, *Facility*, *Spaces*, *Thermal Zones*, *HVAC Systems*, *Output Variables*, *Simulation Settings*, *Measures*, *Run Simulation* y *Results Summary*.

Por otro lado, las pestañas posibilitan que en cada opción de la barra de opciones se mantenga un orden y la información o características a añadir se realice de manera más intuitiva.

Por último, los comandos básicos permiten crear, multiplicar y eliminar las características introducidas al modelo en la categoría seleccionada

6.2.1 Opción Site

La opción *Site* permite definir el entorno climático y características climáticas. Para ello, conviene descargarse el archivo de meteorología y localización (.epw) y el archivo climático de diseño de días (.ddy) de la página oficial de EnergyPlus, cuyo enlace se puede encontrar dentro de la opción *Site*.

Si en la página de EnergyPlus no se encuentra la localidad exacta del edificio a estudiar se recomienda escoger los archivos climáticos de la ciudad más cercana a la ubicación del edificio u otra que tenga un clima similar.

El archivo .epw se debe introducir en la sección *Weather File* de la opción *Site* junto con otros datos opcionales como la zona climática ASHRAE o CEC que servirán para que la simulación

sea más precisa. Por otro lado, el archivo **.ddy** se debe introducir en la sección *Design Days*, donde tras introducirlo, se creará automáticamente una tabla compuesta por las variables que contiene dicho archivo (ver Figura 19).

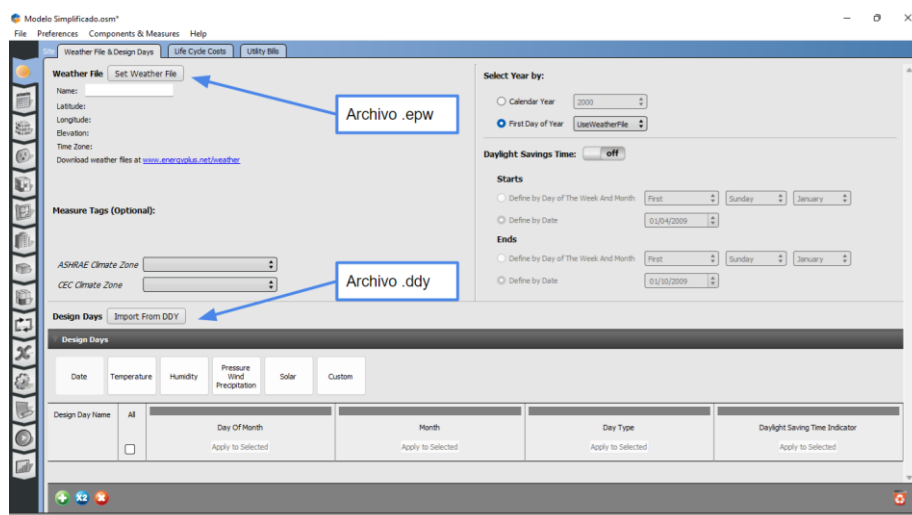


Figura 19 Opción Site de OpenStudio

En la columna de la derecha se debe seleccionar el año en el que se quiera realizar la simulación junto con el primer día en el que se quiera comenzar dicha simulación. Además, existe la posibilidad de introducir periodos en los que el edificio a estudiar no tenga ningún uso (*Daylight Saving Time*). Aunque para viviendas residenciales no tenga ningún sentido aplicar la modalidad *Daylight Saving Time*, sirve para un edificio de carácter educativo o administrativo y puede reducir el tiempo de espera de simulación notablemente.

La opción *Site* consta de dos pestañas más, *Life Cycle Cost* y *Utility Bills*, que permiten obtener información acerca de los costes, pero, debido a que las librerías del programa solo poseen datos de los Estados Unidos, no se han modificado en este trabajo.

6.2.2 Opción Schedules

La opción *Schedules* consta de dos pestañas donde se deben introducir los horarios de uso de diversas variables como, por ejemplo, capacidad, uso de agua y uso de cargas eléctricas. La definición de los horarios se puede hacer de dos maneras:

- La más sencilla se basa en seleccionar uno de los horarios predeterminados que se pueden encontrar en la librería del programa. Para ello, se debe acceder dentro de la pestaña *Schedules* a la sección *Library* que se sitúa en la columna derecha de la pantalla y arrastrar el horario escogido a la plantilla del área de trabajo. Automáticamente se abrirá el horario seleccionado y se podrá observar el contenido e incluso modificarlo si fuese necesario.
- Por otro lado, el programa permite crear nuestros propios horarios. Para ello, tras seleccionar el botón (+) de la barra de comandos básicos, se abrirá una ventana (Figura 20) donde escoge una de las opciones disponibles para definir las unidades del horario (*Adimensional*, *Temperatura*, *On/Off...*).

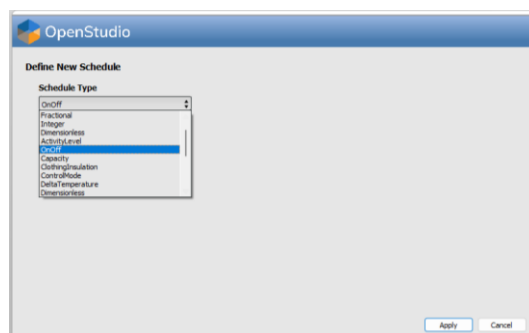


Figura 20 Ventana de selección de unidades para crear nuevo horario

Una vez introducido el tipo de unidades de horario, se procede a editar y definir el horario. Por defecto, el horario creado se aplica a todos los días del año por igual. Si se quiere diferenciar el periodo de funcionamiento, se pueden seleccionar las opciones *Summer Design Day* o *Winter Design Day* si el periodo de funcionamiento se ve claramente modificado por las estaciones, o crear un periodo de funcionamiento desde cero pudiéndose ver los cambios efectuados en la columna de Periodo de funcionamiento ver Figura 21.

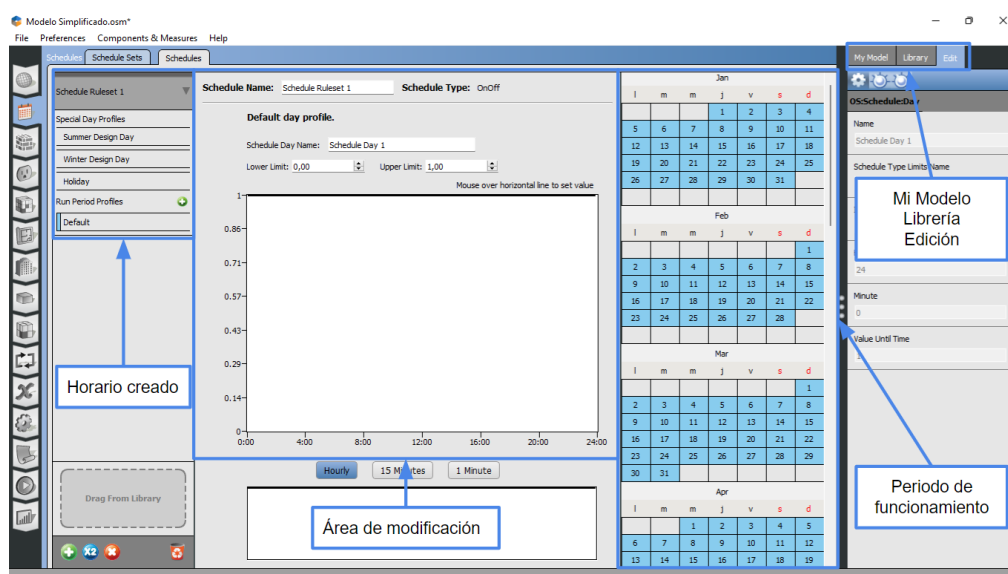


Figura 21 Edición de horarios creados

Para finalizar con la definición de horarios, en la pestaña *Schedules Sets* se deben introducir los horarios creados en la casilla correspondiente, para ello solo hay que arrastrar los horarios desde la opción *Mi Modelo* en la columna derecha a las casillas del área principal de trabajo. De esta manera se crea un bloque de horarios para la simulación con todos los horarios del edificio a estudiar.

6.2.3 Opción *Constructions*

En la opción *Constructions* se define la composición de todas las superficies y elementos del edificio de estudio.

Para ello primero se deben crear los materiales dentro de la pestaña *Materials* o bien seleccionar desde la librería que alberga OpenStudio aquel material requerido y de ser necesario modificar sus propiedades.

Para crear los materiales desde cero se debe seleccionar el botón (+) en la barra de comandos básicos e introducir en el área de creación el nombre del material y las propiedades del mismo (Figura 22). Las propiedades que OpenStudio solicita son: la rugosidad, el espesor, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico. Los materiales creados se guardan automáticamente en la columna de la izquierda y en la sección *Mi modelo*.

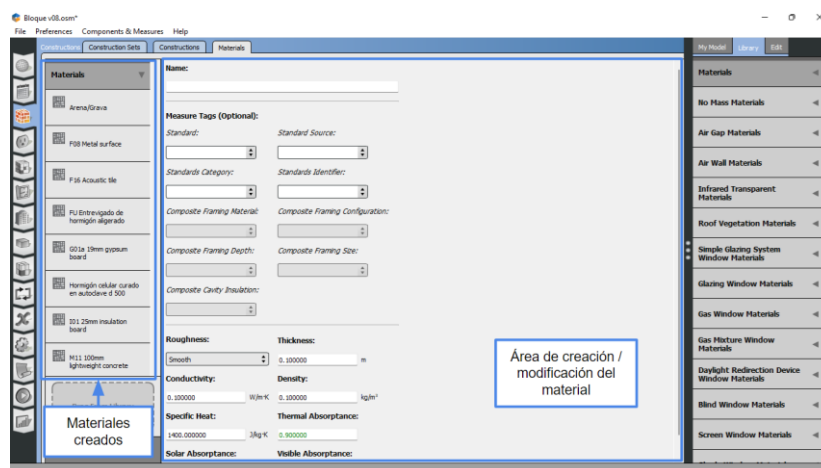


Figura 22 Pestaña *Materials* de la opción *Constructions*

Una vez definidos todos los materiales, se procede a juntar diversos materiales para representar la composición de las superficies. Para ello se deben arrastrar los materiales previamente definidos desde la sección *Mi modelo* hasta la sección *Capas* del área de trabajo (Figura 23). Existe la posibilidad de personalizar la composición recién creada añadiendo un nombre y etiquetas opcionales.

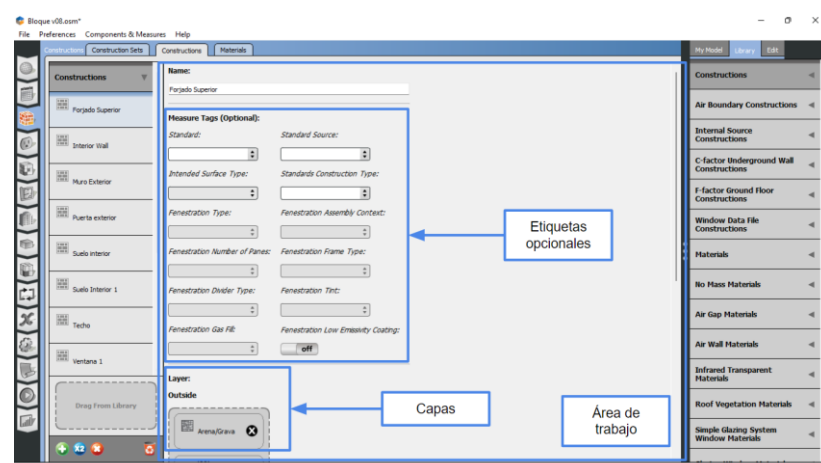


Figura 23 Pestaña *Construction* de la opción *Constructions*

Finalmente, en la última pestaña de la opción *Constructions* (ver Figura 24) se enlazan las composiciones con la superficie correspondiente arrastrándolas desde *Mi modelo* hasta la

casilla correspondiente. De esta manera quedan definidas las propiedades térmicas de cada superficie y elemento.

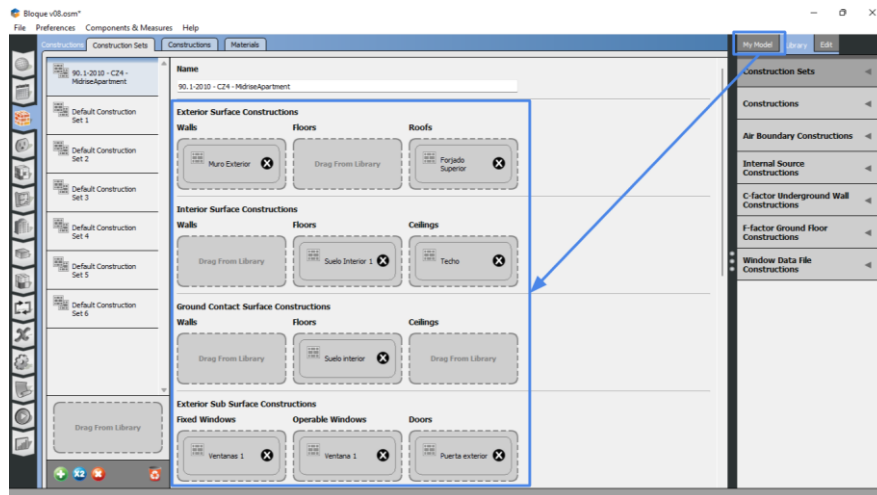


Figura 24 Pestaña Construction Sets de la opción Constructions

6.2.4 Opción Loads

En esta opción se encuentran los elementos que producen ganancias internas de calor en el modelo diseñado. Dichos elementos son las personas que habitan la vivienda, las luminarias, los equipos eléctricos y demás aparatos que pueden alterar el equilibrio térmico del entorno. Todos estos elementos se encuentran en los paneles de la izquierda del área de trabajo y una vez seleccionados se pueden modificar sus variables, que dependen en gran medida del elemento seleccionado. Los elementos seleccionados para el desarrollo de este trabajo han sido:

- People Definitions:** OpenStudio permite representar el aporte de calor de tres maneras diferentes; conociendo el número de ocupantes, conociendo el ratio de ocupantes por metro cuadrado o conociendo el ratio inverso, esto es, los metros cuadrados disponibles por ocupante (Figura 25). En el caso de estudio se utilizó la primera opción (número de ocupantes), puesto que, gracias a los planos de la vivienda facilitados se pudo calcular la cantidad de habitantes por vivienda. Se deben introducir los datos por zona térmica no por edificio.

Name:		
Definición de ganancias internas producidas por los ocupantes		
Number of People:	People per Space Floor Area:	Space Floor Area per Person:
7.000000	people/m ²	m ² /person
Fraction Radiant:	Sensible Heat Fraction:	Carbon Dioxide Generation Rate:
0.300000		0.000038 L/s*W

Figura 25 Definición de ganancias térmicas internas

- Light Definition:** OpenStudio permite introducir los datos relativos a la luminaria de tres maneras: introduciendo los wattios instalados en el edificio, mediante la cantidad de wattios por metro cuadrado o por persona (Figura 26). Para definir este elemento, por falta de datos, se utilizó una plantilla de la librería del programa OpenStudio.

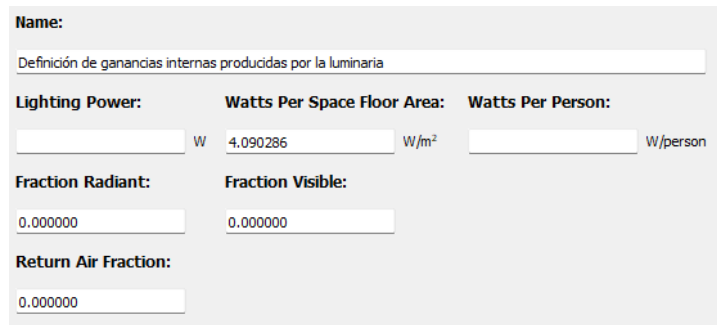


Figura 26 Definición de ganancias internas producidas por la luminaria

- Electric Equipment Definition:** Los datos se pueden introducir de la misma forma que en el apartado *Light Definition* (Figura 27). Para definir este elemento, por falta de datos, se utilizó una plantilla de la librería del programa OpenStudio.

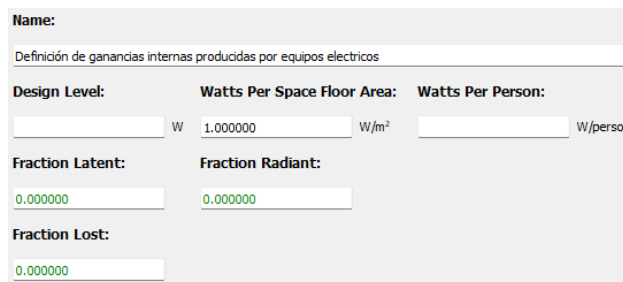


Figura 27 Definición de ganancias internas producidas por los equipos eléctricos

6.2.5 Opción Space Types

Mediante la opción *Space Types* se definen las características específicas que abarca cada espacio. Un edificio puede tener espacios que tienen diferentes usos y propiedades, como, por ejemplo, un edificio residencial se compone de viviendas y zonas comunes. Con esta opción se enlazan los espacios con las mismas características para facilitar la simulación del estudio, y si se modifica alguna propiedad el cambio se aplicará a todos los espacios enlazados. La opción consta de cuatro pestañas donde se puede introducir la información requerida.

En la pestaña General, se introducen los datos que tengan que ver con los horarios y la construcción de superficies previamente definidas en los apartados *Schedules* y *Constructions* respectivamente. Para el caso de estudio se crearon dos zonas diferentes, una de ellas refiriéndose al portal o entrada de la vivienda y la otra zona a las demás plantas de viviendas (ver Figura 28).

Si se quiere generar un nuevo espacio, se debe seleccionar el botón (+) de la barra de comandos básicos e introducir en cada columna la información requerida. Los datos se deben arrastrar desde la sección *Mi modelo* o desde la librería de OpenStudio teniendo en cuenta que a cada columna le corresponden los datos de su sección homóloga, esto es, si se quiere introducir datos en la columna *Construcción Set*, se buscará dicha información en la lista desde las secciones *Mi modelo* o *Librería*.

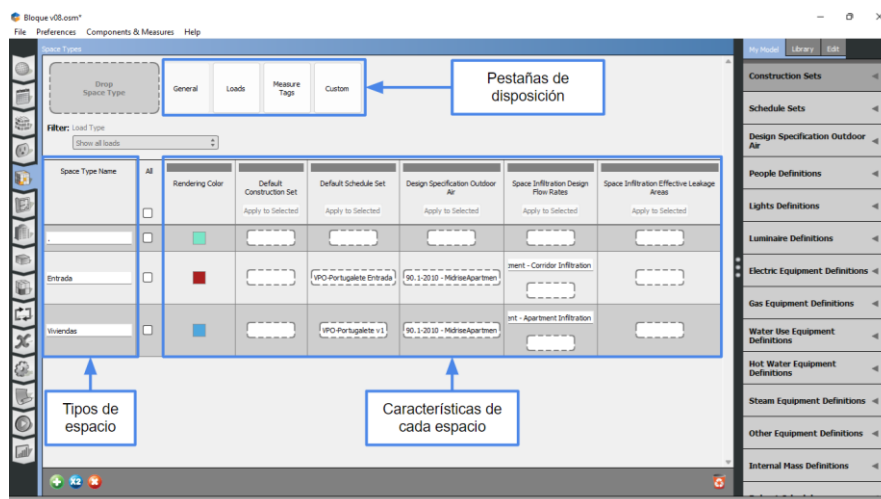


Figura 28 Características introducidas en cada tipo de espacio creado

Por otro lado, en la pestaña *Load* se debe introducir toda aquella información referente a los equipos eléctricos, luminaria y horarios de uso de ambos descritos en las opciones *Loads* y *Schedules* (Figura 29).

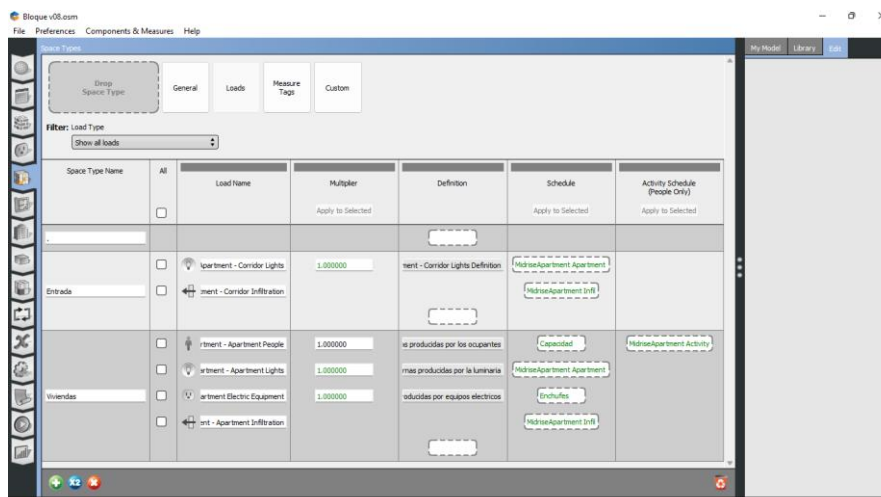


Figura 29 Características introducidas en la pestaña Load

6.2.6 Opción Geometry

En la opción *Geometry* se puede apreciar la representación del modelo 3D del edificio de estudio (ver Figura 30). Conviene revisar el modelo por si OpenStudio no ha representado correctamente el modelo creado en SketchUp y garantizar que no se han generado elementos extraños.

Si el modelo no se ha representado correctamente se debe editar desde el programa SketchUp puesto que OpenStudio no permite editar el diseño y si el modelo no se puede apreciar en la opción Geometry, puede deberse a que OpenStudio no entienda el diseño.

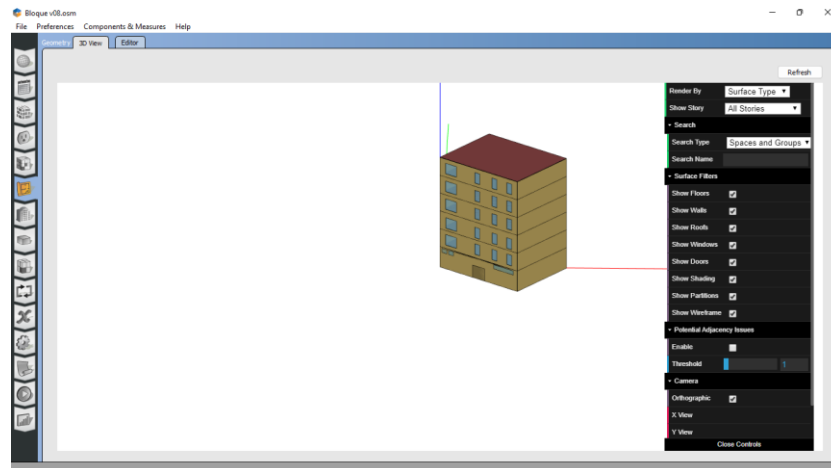


Figura 30 Observación del modelo simplificado del caso de estudio

6.2.7 Opción Facility

La opción *Facility* cuenta con cuatro pestañas para definir algunos conceptos del edificio y sus alrededores.

- En la pestaña *Building* se debe introducir la información referente a las distancias entre cada planta y los estándares de simulación junto con las plantillas creadas de horarios y tipos de espacio (Figura 31).

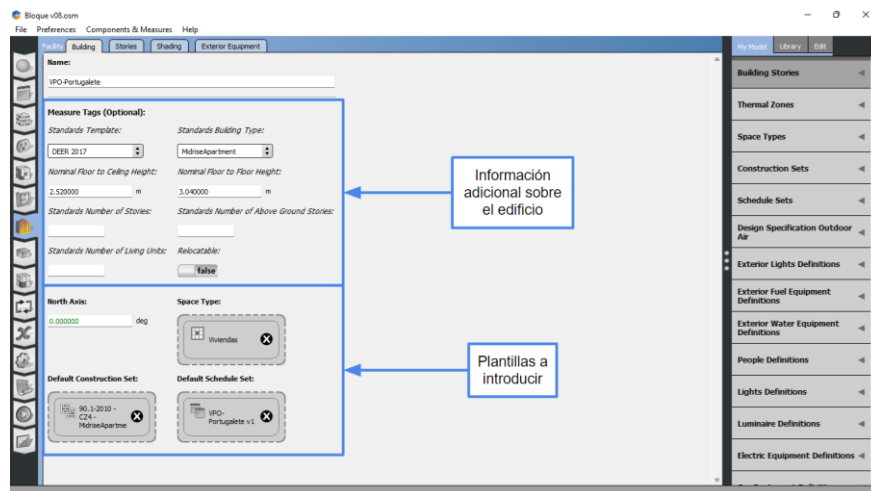


Figura 31 Información a introducir en la pestaña Building

- Por otro lado, la pestaña *Stories* muestra todas las plantas y superficies desglosadas del edificio de estudio (Figura 32). Además, permite editar dichas superficies añadiéndoles plantillas creadas previamente.

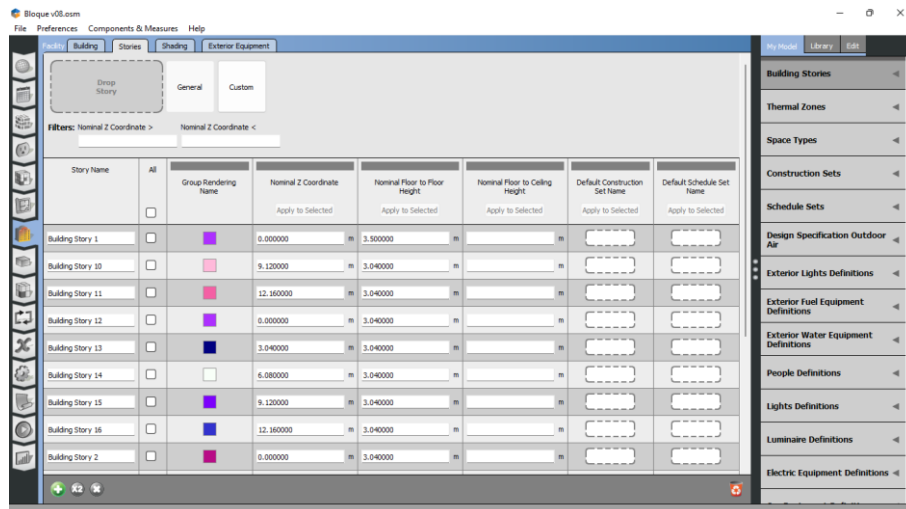


Figura 32 Información a introducir en la pestaña Stories

- Finalmente, en las pestañas *Shading* y *Exterior equipment* se pueden observar los elementos de sombreado representados en SketchUp y los equipos exteriores como luminarias o equipos electrónicos del jardín respectivamente.

6.2.8 Opción Spaces

La opción *Spaces* es una de las más completas y en ella se detallan y agrupan los diversos espacios del modelo representado. Estos espacios surgen al dibujar cualquier tipo de geometría en el programa SketchUp.

Las diferentes pestañas de la opción *Spaces* muestran los atributos de cada espacio creado clasificados por filas y columnas. Al seleccionar cualquier atributo, este se abre en la sección *Editar*, mostrando su contenido y permitiendo realizar los ajustes necesarios (Figura 33).

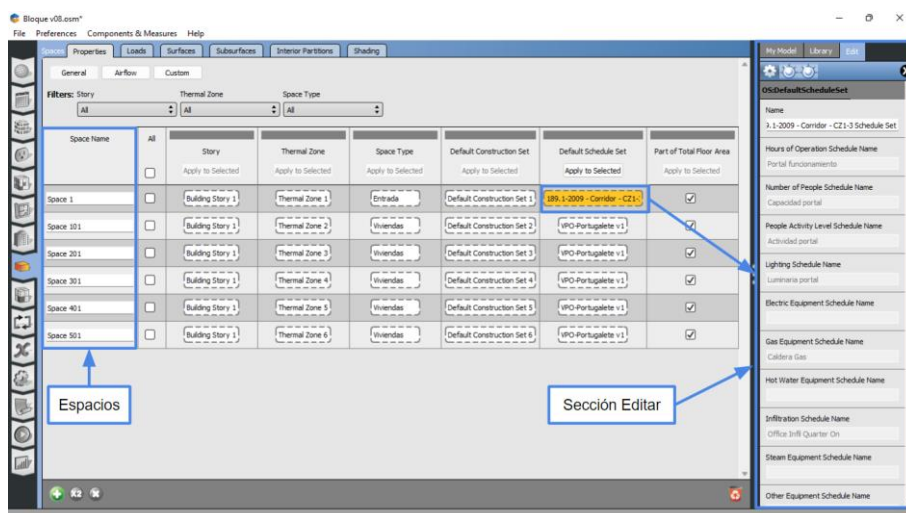


Figura 33 Pestaña Propiedades de la opción Spaces

Las pestañas de las que se compone la opción *Spaces* son:

- *Properties*: esta pestaña define los espacios por: edificio, zona térmica, tipo de espacio, construcción y conjunto de horarios.
- *Loads*: se muestran los elementos eléctricos y sus respectivos horarios de uso divididos por cada espacio.
- *Surfaces*: se encuentra toda la información acerca de las diferentes superficies que componen cada espacio.
- *Subsurfaces*: define las propiedades de las subsuperficies, esto es, de las ventanas y puertas que alberga cada espacio.
- *Interior partitions*: en esta pestaña se muestran las particiones interiores que componen cada espacio. Normalmente no se suele utilizar porque se escogen espacios donde los límites sean superficies perimetrales tal y como sucede en el caso de estudio.
- *Shadings*: los elementos de sombreado de los espacios se pueden observar y editar en esta pestaña.

La opción *Spaces* permite obtener un resumen de las características y propiedades definidas a cada elemento, puesto que en ella se sintetizan dichas características por espacios definidos.

6.2.9 Opción Thermal Zones

La opción *Thermal Zones* está compuesta por varias pestañas donde se deben introducir los datos relativos a las condiciones térmicas y los parámetros de calefacción, refrigeración y ventilación de cada zona térmica definida en el modelo del edificio. Las pestañas son:

- *HVAC system*: esta opción agrupa las diferentes zonas térmicas que puedan existir en el modelo. Para este trabajo se han definido seis diferentes zonas térmicas en el edificio de estudio, una por planta (ver Figura 34). La opción *HVAC system* consta de cinco categorías principales que se pueden añadir y modificar, que son:
 - *Zone Equipment*: En esta categoría se define el equipo HVAC que alberga cada zona térmica y aparecerá vacía si no existe ningún equipo HVAC en la zona térmica.
 - *Cooling Thermostat Schedule*: Aquí se introduce el horario del termostato de refrigeración definido en la opción *Schedules*.
 - *Heating Thermostat Schedule*: Se añade el horario del termostato de calefacción definido en la opción *Schedules*.
 - *Humidifying Setpoint Schedule*: En esta categoría se debe introducir el horario de humidificación definido en la opción *Schedules*.
 - *Dehumidifying Setpoint Schedule*: En esta categoría se debe introducir el horario de deshumidificación definido en la opción *Schedules*.
- *Cooling sizing parameters*: permite introducir los datos referentes al sistema de refrigeración como la temperatura, caudal máximo y mínimo, etc.
- *Heating sizing parameters*: esta pestaña es similar a la anterior pero esta vez permite introducir los datos de calefacción.
- *Custom*: permite modificar las zonas térmicas existentes.

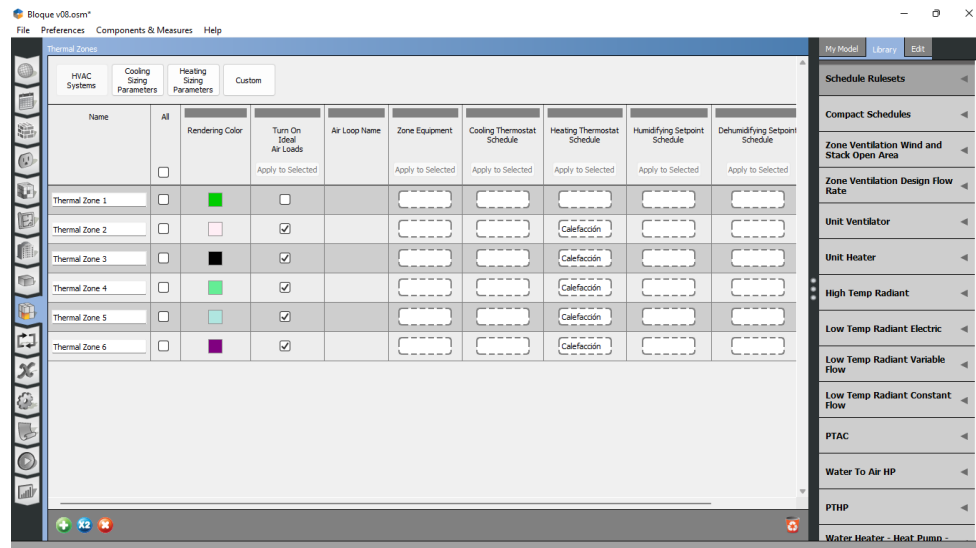


Figura 34 Pestaña HVAC system de la opción Thermal Zones

6.2.10 Opción HVAC Systems

En esta opción se crean y editan los sistemas HVAC que componen cada zona térmica. Se puede usar una de las plantillas de OpenStudio o bien crear un sistema entero desde cero.

Para crear un nuevo sistema HVAC se debe seleccionar el botón (+) de la barra de comandos básicos y elegir una de las opciones de sistema HVAC que aparecerán en la ventana emergente, seguido se abrirá la opción seleccionada en el área de trabajo y se podrán realizar las modificaciones necesarias para ajustar al sistema HVAC al sistema real (ver Figura 35). También se puede utilizar un de las plantillas predeterminadas que posee OpenStudio en sus librerías.

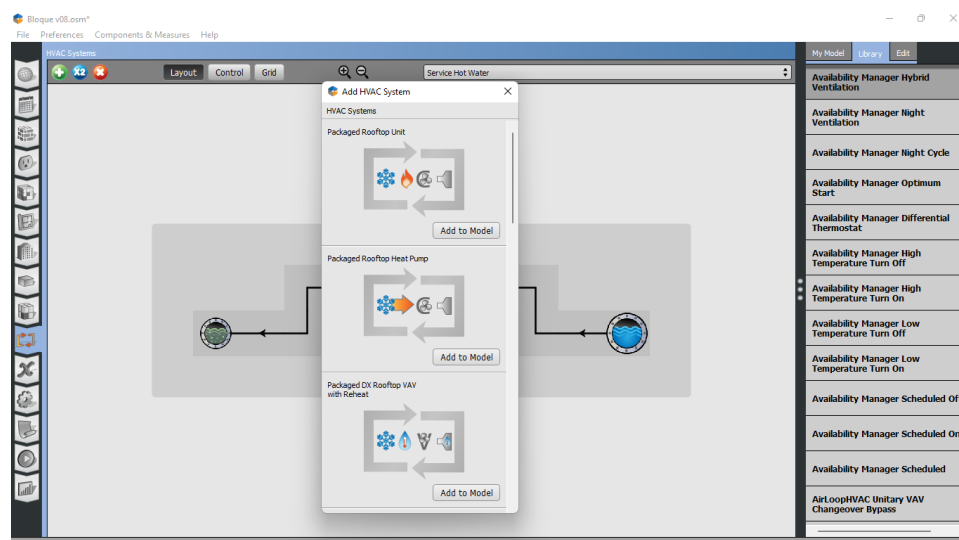


Figura 35 Definición del sistema HVAC

Si en la opción Thermal Zones se ha activado la casilla de Turn On Ideal Loads, no se debe crear ningún sistema HVAC en esta opción puesto que el programa automáticamente selecciona la mejor elección para la zona térmica.

6.2.11 Opción Output Variables

La opción *Output Variables* muestra todas las variables que permite analizar el programa OpenStudio (Figura 36). Estas variables vienen por defecto apagadas (*Off*), por lo que se tendrán que activar aquellas que se quieran analizar en la simulación cambiando el estado a encendido (*On*). Una vez activada la variable se escoge entre varias opciones de nivel, normalmente se escoge el nivel horario, el cual define la variable seleccionada en la simulación cada hora.

Cuantas más variables se activen y menor sea el nivel seleccionado, la simulación tardará más tiempo en completarse. Por este motivo se recomienda activar solamente las variables que requiera el estudio a realizar.

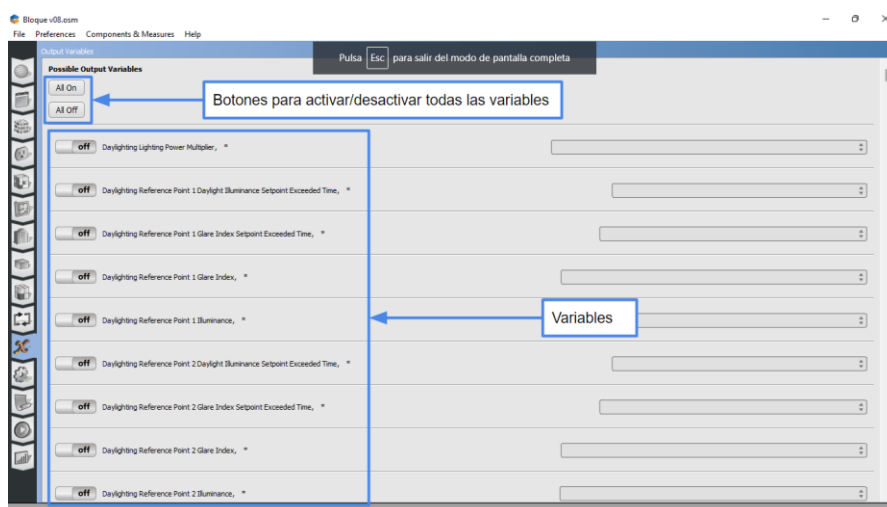


Figura 36 Variables para la simulación

6.2.12 Opción Simulation Settings

La opción *Simulation Settings* permite personalizar muchas de las configuraciones de simulación, como, por ejemplo, el periodo de simulación o los parámetros de dimensionamiento (Figura 37).

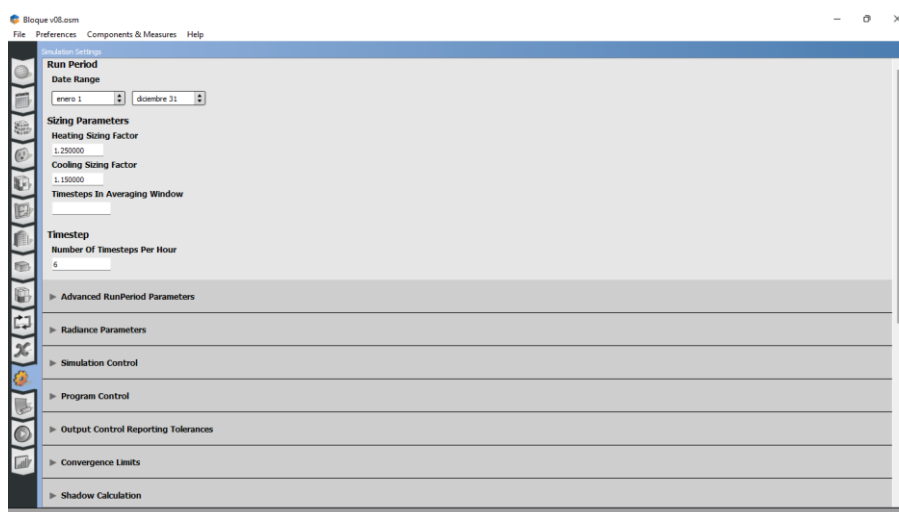


Figura 37 Configuraciones de simulación

6.2.13 Opción Measures

En esta opción se pueden seleccionar diferentes formas de representación de los resultados. Para ello, se debe arrastrar la opción seleccionada desde la librería al área principal.

Para este trabajo se utilizó la opción *BCL OpenStudio Results* puesto que representa los resultados obtenidos de la simulación mediante gráficas de barras y circulares (ver Figura 38).

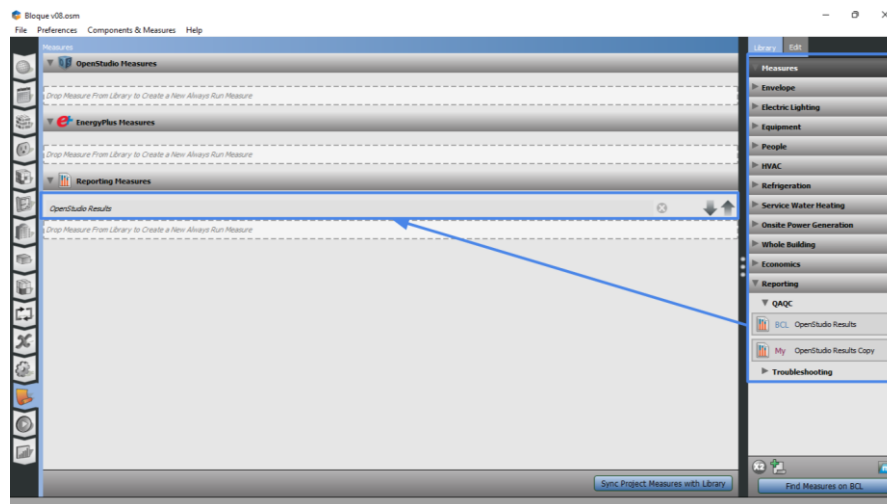


Figura 38 Modelos de representación de los resultados

6.2.14 Opción Run Simulation

En la opción *Run Simulation* se simula el edificio pulsando el botón de comienzo (ver Figura 39) y el tiempo de simulación depende en gran medida de los parámetros a calcular. Además, si algunas de las opciones no se han rellenado correctamente, la simulación no se finalizará y en la interfaz aparecerá un mensaje de *Simulation Failed* en color rojo, pero, si la simulación se efectúa correctamente, se deberá seleccionar el botón *Mostrar simulación* para obtener los resultados.

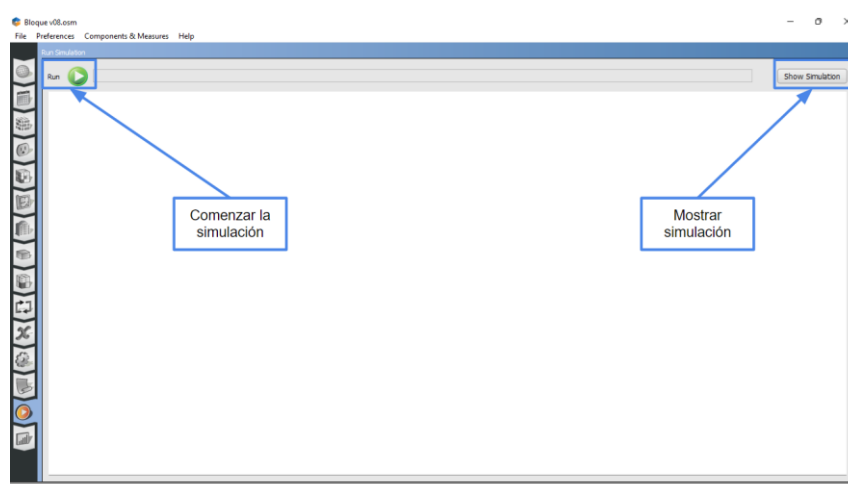


Figura 39 Simulación

6.2.15 Opción Results

La opción *Results* muestra los resultados divididos por categorías formando una lista en la parte derecha tal y como se puede apreciar en la Figura 40, mientras que los gráficos y las tablas se encuentran en la parte central. Los informes generados se guardan automáticamente en la sección *Reports* de la carpeta del archivo.

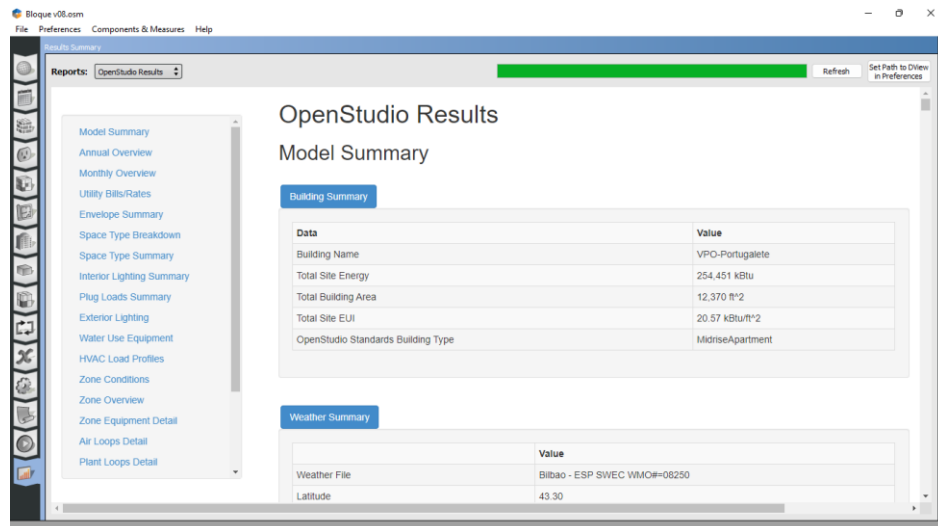


Figura 40 Informe de los resultados obtenidos

7 Calculo de demandas ACS

A continuación, se procederá a calcular la demanda de ACS del edificio de estudio y del modelo simplificado según el tipo de edificio y ocupantes tal y como dicta el Documento Básico HE Ahorro de Energía del CTE [34].

7.1 Demanda de ACS del edificio

El edificio de estudio consta de 3 bloques de 5 pisos distribuidos en dos viviendas. Dos bloques se componen de viviendas de dos habitaciones y de tres habitaciones, mientras que el bloque central se compone de viviendas de dos habitaciones. Por lo tanto, el edificio estará ocupado por un total de 100 personas.

$$N_{per} = 2 \cdot 5 \cdot (3 + 4) + 1 \cdot 5 \cdot (3 + 3) = 100 \text{ personas}$$

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	≥6
Número de Personas	1,5	3	4	5	6	6	7

Tabla 6 Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado.

Mediante la Tabla 2 se obtiene el Factor de centralización del edificio, que, en este caso, al tener un total de 30 viviendas el Factor de centralización es de 0,85.

Nº viviendas	N≤3	4≤N≤10	11≤N≤20	21≤N≤50	51≤N≤75	76≤N≤100	N≥101
Factor de centralización	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Tabla 7 Valor del factor de centralización en viviendas multifamiliares.

Una vez obtenidos todos los datos necesarios, es posible realizar el cálculo de la demanda de ACS.

$$D_{ACS} = N_{Per} \cdot 28 \frac{l}{día \cdot per} \cdot F_c = 100 \text{ per} \cdot 28 \frac{l}{día \cdot per} \cdot 0,85$$

$$= 2380 \frac{l}{día}$$

7.2 Demanda de ACS del modelo simplificado

El modelo simplificado del edificio de estudio simula un único bloque de viviendas, por lo tanto, alberga un total de 35 personas divididas en las cinco plantas habitables.

$$N_{Per} = 1 \cdot 5 \cdot (3 + 4) = 35 \text{ personas}$$

El Factor de centralización se obtiene de igual manera, en este caso, al tener un total de 10 viviendas el Factor de centralización es de 0,95. Por lo que el cálculo de la demanda de ACS del modelo simplificado del edificio sería el siguiente:

$$D_{ACS} = N_{Per} \cdot 28 \frac{l}{día \cdot per} \cdot F_c = 35 \text{ per} \cdot 28 \frac{l}{día \cdot per} \cdot 0,95 = 931 \frac{l}{día}$$

8 Resultados de la simulación

En el siguiente apartado se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos de las demandas de electricidad, calefacción y refrigeración tras simular el modelo en 3D del edificio simplificado.

8.1 Análisis de las diferentes fachadas

El modelo simplificado se ha simulado en la ciudad de Portugalete con dos tipos de fachadas diferentes: Panel Sandwich y sistema Muro Trombe.

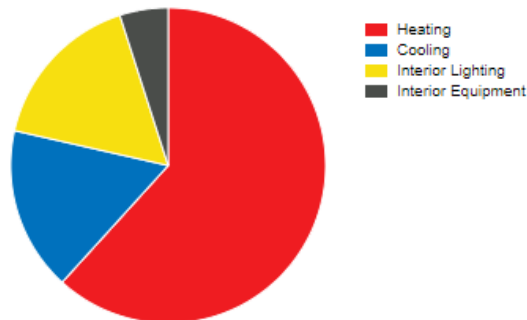
- En la primera simulación se caracterizaron las cuatro fachadas del edificio simplificado como fachadas tipo Panel Sandwich cuyas propiedades se han mencionado en el apartado 5.2.
- Por otro lado, en la segunda simulación se cambió la configuración de la fachada suroeste del edificio por el sistema pasivo Muro Trombe.

En los siguientes puntos se profundizará en mayor medida cada simulación junto con los resultados obtenidos de cada uno de ellos.

8.1.1 Fachada Panel Sandwich

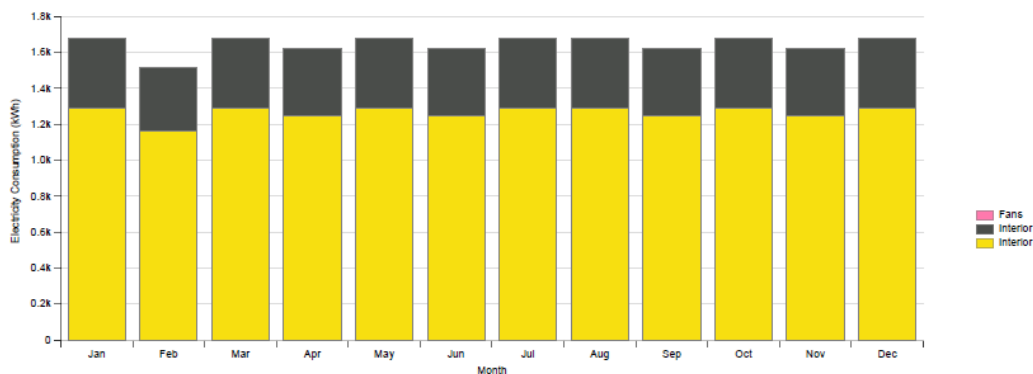
Una vez realizada la simulación, se han obtenido los siguientes resultados; la demanda de energía para calefacción supone un 62% (55.090 kWh) de la demanda de energía anual total del modelo simplificado del edificio de estudio y la demanda de refrigeración es del 17%

(15.532 kWh), mientras que la demanda eléctrica supone el 21% restante, pudiéndose diferenciar esta demanda en dos. La referente a la de las luminarias, con un 16% (14.890 kWh), y la referente a los electrodomésticos con un 5% (4.467 kWh). Los datos mencionados se pueden apreciar en la Gráfica 1.



Gráfica 1 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Portugalete

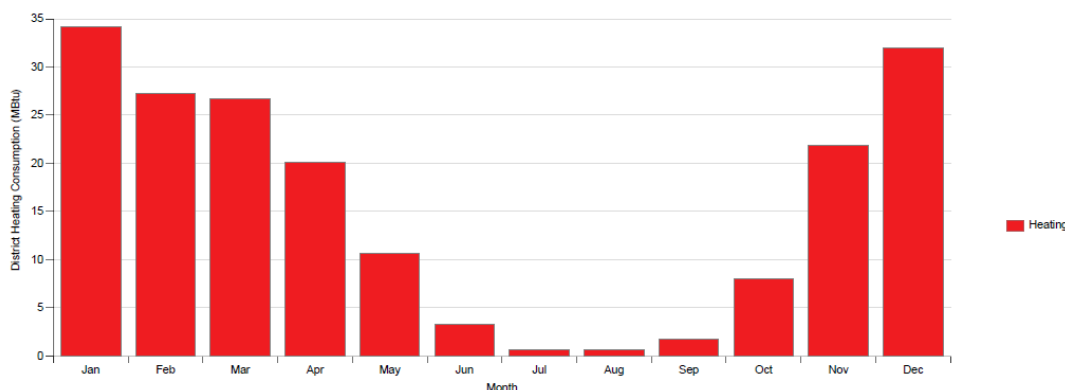
Analizando únicamente la demanda de la energía eléctrica anual por meses (Gráfica 2), se puede apreciar que todas las demandas son relativamente constantes a lo largo de todos los meses. Además, tanto la demanda de equipos externos o ventiladores de los sistemas de ventilación (*Fans*) es nula, puesto que en la simulación no se han tenido en cuenta.



Gráfica 2 Demanda energía eléctrica mensual en Portugalete

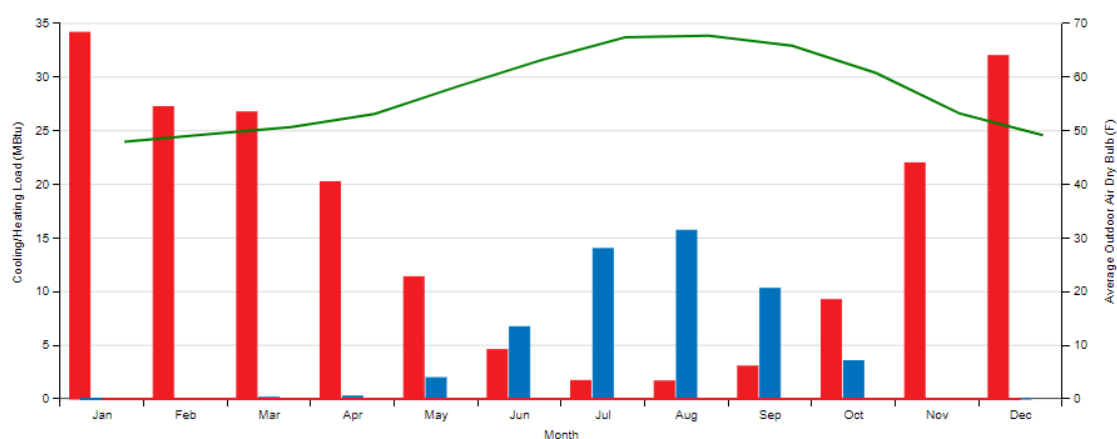
Por otro lado, la demanda mensual de calefacción del modelo simplificado obtenida se muestra en la Gráfica 3, donde, se puede observar que, tal y como se esperaba, en los meses invernales hay una mayor demanda de calefacción que en los meses estivales. Lo contrario sucede con la demanda de refrigeración, esto es, en los meses invernales la demanda de refrigeración es nula, pero, en verano se obtiene la mayor demanda.

La demanda de calefacción en los meses de verano se debe a que, en momentos puntuales (mayoritariamente nocturnos), la temperatura interior del modelo es inferior a la temperatura de consigna (21°C) definida en la simulación.



Gráfica 3 Demanda de calefacción mensual en Portugalete

Finalmente, la Gráfica 4 reafirma lo mencionado anteriormente, esto es, que cuanto mayor sea la temperatura media exterior, menor será la demanda de calefacción que requerirá el edificio, pero aumentará la demanda de refrigeración.



Gráfica 4 Demanda de calefacción, refrigeración y temperatura ambiente mensual en Portugalete

8.1.2 Fachada Muro Trombe

En cuanto a la simulación con la configuración de Muro Trombe, los resultados obtenidos han sido algo peores a los obtenidos en el apartado anterior, aunque la diferencia es prácticamente inapreciable. Hecho que destaca la necesidad de mejora del modelo.

En principio, el sistema de Muro Trombe es un sistema pasivo más eficiente que el aislamiento tradicional, por lo que así debiera de reflejarlo los resultados. Uno de los fallos del modelado puede deberse a que la simulación no tiene en cuenta la ventilación y recuperación de calor que aporta dicho sistema, considerando únicamente las características constructivas del propio Muro Trombe. Sin embargo, actualmente no existe ningún modelo de muro Trombe “por defecto” incluido en OpenStudio y se ha modelado como una fachada compuesta por capas específicas.

Por lo tanto, el sistema Muro Trombe, constructivamente hablando, posee una transmitancia térmica (U) mayor que la del aislamiento tipo Panel Sandwich, y por ello genera mayores

pérdidas de calor en el edificio. Así es más difícil mantener una temperatura de confort en el interior de la vivienda, aumentando la demanda de calefacción del edificio.

Por otra parte, la similitud de los resultados puede deberse a que la única modificación realizada en las dos simulaciones haya sido el cambio de tipo de fachada en la fachada suroeste del edificio, manteniendo las demás fachadas con las mismas propiedades constructivas y llevando a cabo la simulación con los mismos datos y horarios de uso.

8.2 Análisis de diferentes zonas climáticas

Las zonas climáticas se unen con la eficiencia energética y definen las solicitudes exteriores en términos de temperatura y radiación solar. La última actualización del Código Técnico de la Edificación del 2019 incluye los valores de transmitancia térmica máximos permitidos para cada zona climática según la división de invierno.

Sin embargo, sin considerar este aspecto, en el siguiente apartado se analizará el comportamiento del edificio de estudio en las diferentes zonas climáticas que alberga el estado español. Para ello, partiendo del modelo simplificado, y tras analizar el comportamiento de los dos tipos de fachadas estudiadas, se ha optado por simular el modelo con las cuatro fachadas tipo Panel Sandwich en diferentes localidades con el objetivo de estudiar la demanda térmica basada en las necesidades de calefacción y refrigeración y obtener su certificación energética.

La finalidad de este trabajo es conocer las demandas energéticas del edificio de estudio y no, sin embargo, los consumos energéticos. Por ello, la calificación energética solamente considera las demandas de refrigeración y calefacción y deja a un lado las calificaciones energéticas en función de las emisiones de dióxido de carbono y del consumo de energía primaria del edificio.

Las localidades se han escogido según las diferentes zonas climáticas del estado, pudiéndose apreciar dichas localidades y zonas climáticas en la Figura 41.

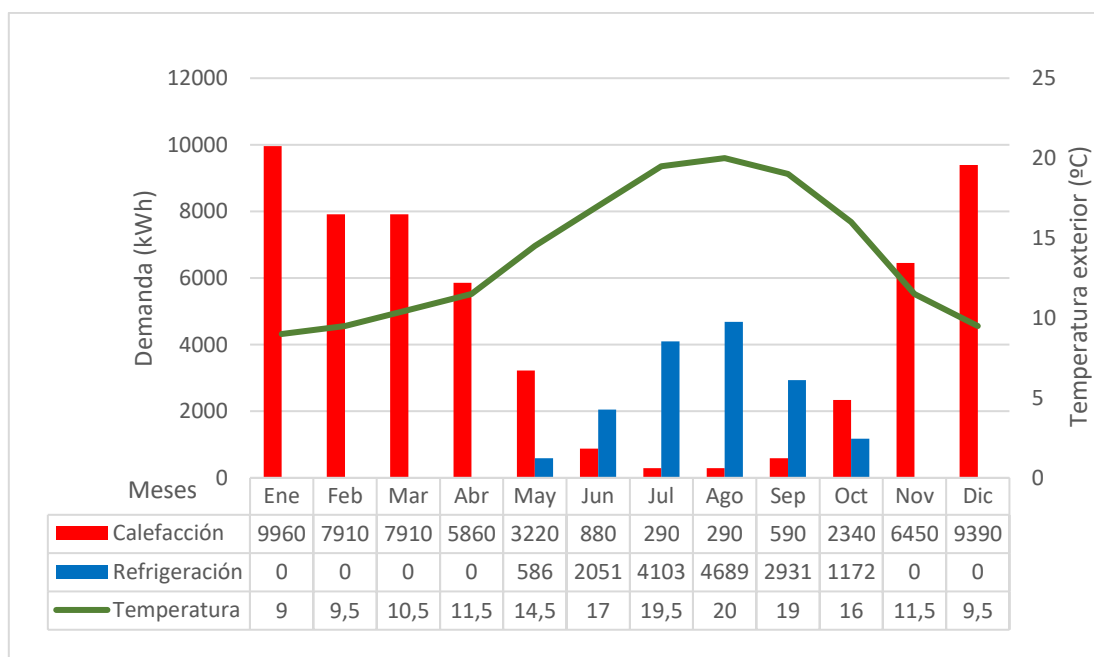


Figura 41 Localidades seleccionadas y sus climas.

8.2.1 Portugalete

En el apartado anterior se ha analizado el comportamiento del modelo del edificio simplificado en la ciudad de Portugalete. Repasando los datos obtenidos, en la Gráfica 1 se ha podido observar que un 62% de la demanda energética anual procede de las necesidades de calefacción y el 17% de las de refrigeración, mientras que el 21% restante refleja la demanda de energía eléctrica.

Observando la Gráfica 5, que se ha conseguido cambiando las unidades de la Gráfica 4 al sistema internacional, se puede apreciar la demanda de calefacción y refrigeración del modelo simplificado por meses.



Gráfica 5 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Portugalete

Una vez obtenidas las demandas de calefacción, se determina, de un modo aproximado, la calificación energética que obtendría el modelo en la zona climática en la que se ubica la ciudad de Portugalete. La Certificación Energética de los Edificios es una exigencia derivada de la Directiva 2002/91/CE y establece siete niveles de certificados en función de las emisiones de dióxido de carbono y del consumo de energía del edificio. Conforme a la normativa nacional, se parte de la "G" (la menos eficiente) a la "A" (la más eficiente).

$$Dcal_{TOT} = 9960 + 7910 + 7910 + 5860 + 3220 + 880 + 290 + 290 + 590 + 2340 + 6450 + 9390 = 55090 \text{ kWh/año}$$

Dividiendo la demanda de calefacción anual entre la superficie total del modelo creado, se obtiene el siguiente valor:

$$Dcal_{TOT_{m^2}} = \frac{55090 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 47,94 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

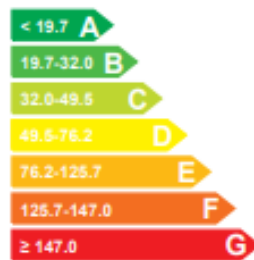
Finalmente, comparando el resultado obtenido con la Gráfica 6, se consigue la certificación energética respecto a la demanda de calefacción del edificio en la localidad de Portugalete,

que corresponde a la categoría C puesto que el valor obtenido se sitúa entre los límites de dicha categoría.

En cuanto a la demanda de refrigeración, obtenida de una manera análoga, el edificio obtendría una calificación de categoría A según la Gráfica 6.

$$Dref_{TOT} = 586 + 2051 + 4103 + 4689 + 2931 + 1172 = 15532 \text{ kWh/año}$$

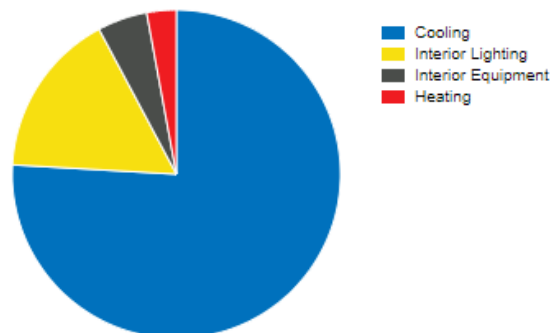
$$Dcal_{TOT m^2} = \frac{15532 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 13,52 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$



Gráfica 6 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Bilbao (kWh/m² año)

8.2.2 Santa Cruz de Tenerife

La ciudad de Santa Cruz de Tenerife que está situada fuera de la península ibérica, en las islas canarias (ver Figura 41), tiene un clima subtropical, caracterizado principalmente por unas continuas temperaturas cálidas y escasas precipitaciones. Dicho clima es totalmente diferente al de Portugalete y se ve claramente reflejado en la Gráfica 7, donde se puede apreciar que la demanda de calefacción anual es del 3% (2.787 kWh) y la demanda de refrigeración asciende al 76% (70.623 kWh), la eléctrica supone el 21% (19.729 kWh) de la demanda energética total del modelo simplificado.



Gráfica 7 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Tenerife

A continuación, se calcula la demanda de calefacción y refrigeración anual (según la Gráfica 9) y se define la certificación energética que obtendría el modelo en la zona climática en la que se ubica la ciudad de Santa Cruz de Tenerife.

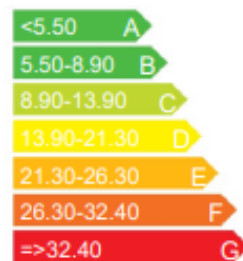
$$Dcal_{TOT} = 556 + 351 + 234 + 88 + 15 + 7 + 234 = 1485 \text{ kWh/año}$$

$$Dcal_{TOT m^2} = \frac{1485 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 1,29 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

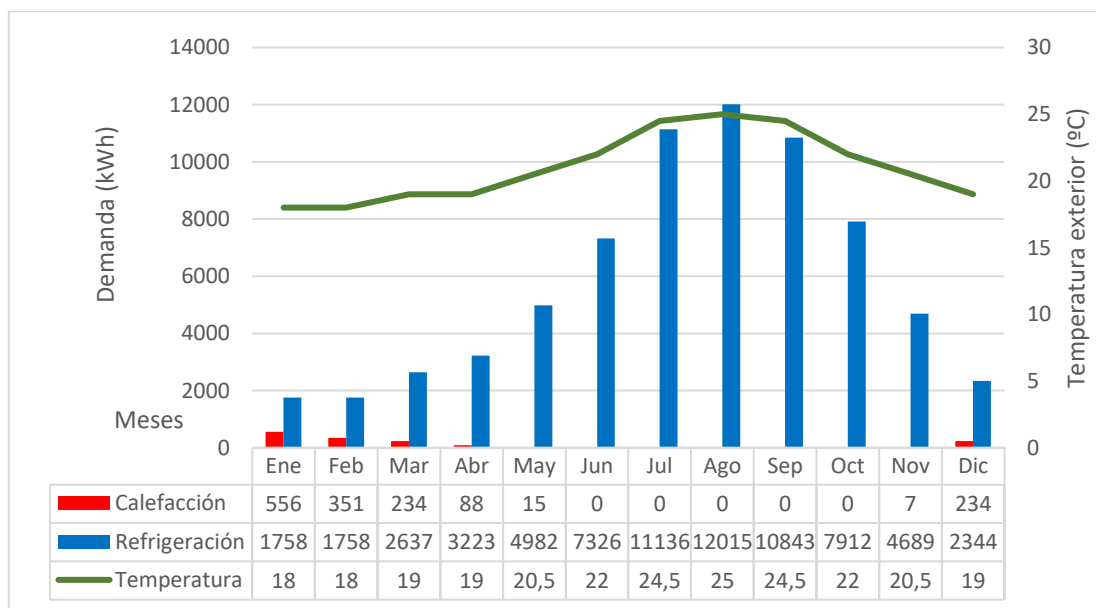
$$D_{ref_{TOT}} = 1758 + 1758 + 2637 + 3223 + 4982 + 7326 + 11136 + 12015 + 10843 + 7912 + 4689 + 2344 = 70623 \text{ kWh/año}$$

$$D_{cal_{TOT}}_{m^2} = \frac{70623 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 61,45 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

Se concluye que la certificación energética respecto a la demanda de calefacción del edificio en la localidad de Tenerife se sitúa en la categoría A comparando el resultado obtenido con la Gráfica 8, mientras que la calificación respecto a la refrigeración es de categoría G.



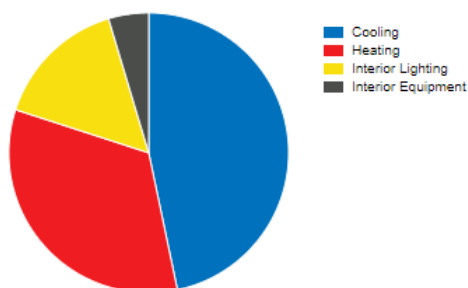
Gráfica 8 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Tenerife (kWh/m² año)



Gráfica 9 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Tenerife

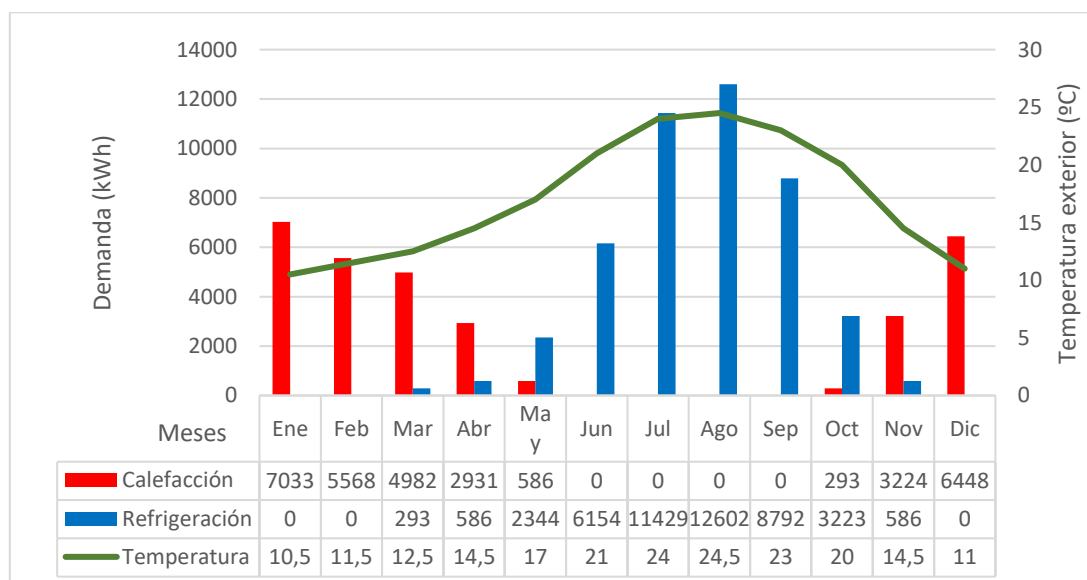
8.2.3 Murcia

La Región de Murcia junto con otras zonas de las provincias de Almería y Alicante son los únicos territorios que poseen un clima semidesértico, tal y como se muestra en la Figura 41, que se caracteriza por fuertes oscilaciones de temperatura entre las franjas diurna y nocturna que es consecuencia de la escasa humedad del ambiente. La altitud frente al nivel del mar tiene una gran influencia en este tipo de clima puesto que las áreas más elevadas actúan como islas climáticas alcanzando mayores niveles de precipitaciones.



Gráfica 10 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Murcia

Murcia al tener un clima más seco, junto con unas temperaturas más cálidas, que el de la ciudad de Portugalete, necesita una demanda algo menor de calefacción, siendo esta de un 32% (31.065 kWh) respecto a la demanda energética total y la de refrigeración es del 47% (46.009). La demanda eléctrica, en cambio, es del 21% (19.861 kWh) tal y como se puede observar en la Gráfica 10.



Gráfica 11 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Murcia

A continuación, se realizarán los cálculos para definir la calificación energética del modelo simplificado en la localidad de Murcia mediante los datos mostrados en la Gráfica 11.

$$D_{cal_{TOT}} = 7033 + 5568 + 4982 + 2931 + 586 + 293 + 3224 + 6448$$

$$= 31065 \text{ kWh/año}$$

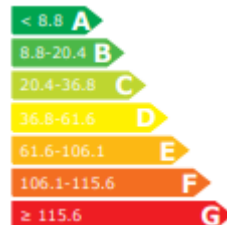
$$D_{cal_{TOT} m^2} = \frac{31065 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 27,03 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

$$D_{ref_{TOT}} = 293 + 586 + 2344 + 6154 + 11429 + 12602 + 8792 + 3223 + 586$$

$$= 46009 \text{ kWh/año}$$

$$D_{ref_{TOT} m^2} = \frac{46009 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 40,04 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

En cuanto a la calificación energética se refiere, después de haber realizado los cálculos y tras compararlos con la Gráfica 12, se puede decir que en la ciudad de Murcia el modelo simplificado obtendría una calificación energética referente a la demanda de calefacción de categoría C, mientras que obtendría una calificación D referente a la refrigeración.

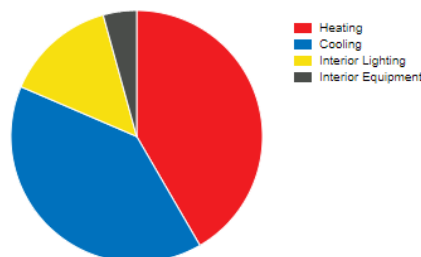


Gráfica 12 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Murcia (kWh/m² año)

8.2.4 Barcelona

Barcelona, la segunda ciudad más grande, situada a orillas del mar Mediterráneo, alberga un clima con el mismo nombre que el mar. El clima mediterráneo se caracteriza por tener pocas precipitaciones y temperaturas suaves a lo largo del año. Al estar en el litoral, la ciudad sufre el efecto temperado del Mediterráneo, que suaviza las temperaturas gélidas del invierno y humedece el ambiente.

En la Gráfica 13 se puede apreciar dicho efecto, puesto que al tener temperaturas más suaves que la ciudad de Portugalete la demanda de calefacción es menor, pero al ser un ambiente más húmedo que el de la ciudad de Murcia la demanda de Barcelona es mayor que la de Murcia. La demanda de calefacción supone un 42% (43.373 kWh) y la demanda de refrigeración un 40% (41.905 kWh) de la total mientras que la eléctrica es de un 18% (19.486 kWh).



Gráfica 13 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Barcelona

A continuación, se realizarán los cálculos para definir la calificación energética del modelo simplificado en la ciudad de Barcelona mediante los datos mostrados en la Gráfica 15.

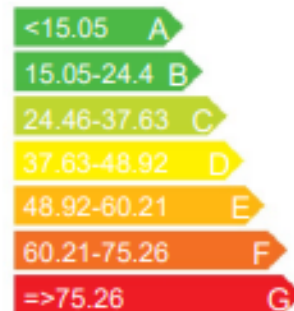
$$D_{cal_{TOT}} = 9964 + 7620 + 6154 + 3517 + 879 + 1172 + 5568 + 8499 = 43373 \text{ kWh/año}$$

$$D_{cal_{TOT_{m^2}}} = \frac{43373 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 37,74 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

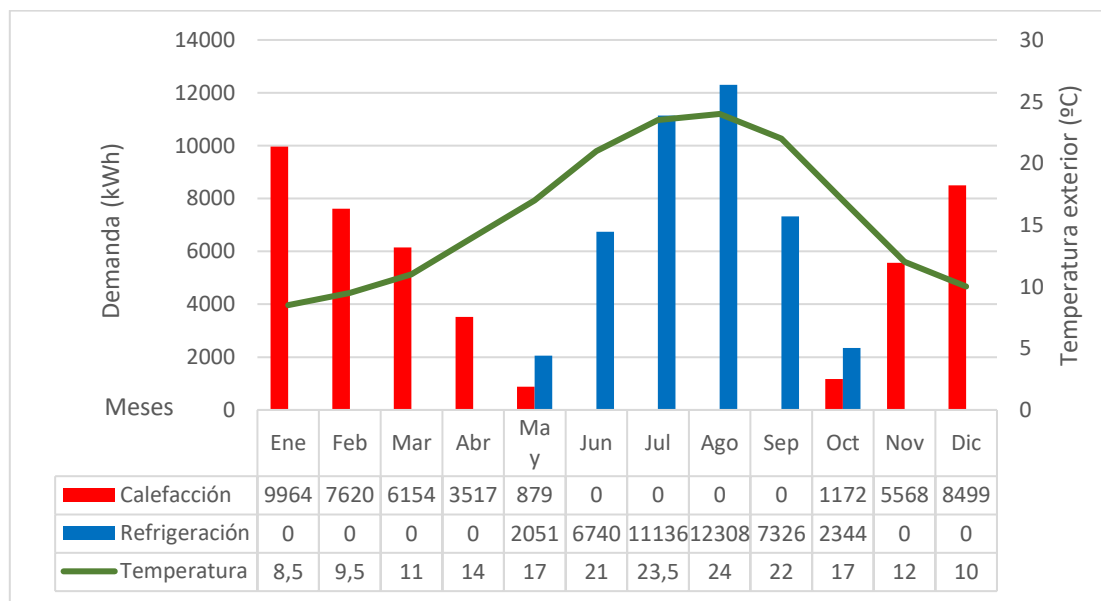
$$D_{ref_{TOT}} = 2051 + 6740 + 11136 + 12308 + 7326 + 2344 = 41905 \text{ kWh/año}$$

$$D_{ref_{TOT}m^2} = \frac{41905 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 36,46 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

Finalmente, tras comparar el resultado obtenido con los datos mostrados en la Gráfica 14, el modelo simplificado del edificio obtendría una calificación energética de categoría D, aunque el resultado obtenido se sitúa muy cerca del límite entre la categoría C y D. Por otro lado, en cuanto a la calificación energética de refrigeración se refiere, el edificio obtendría una categoría de tipo C.



Gráfica 14 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Barcelona (kWh/m² año)

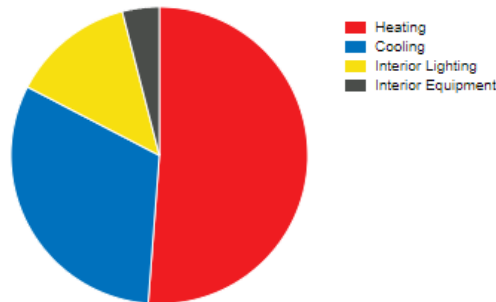


Gráfica 15 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Barcelona

8.2.5 Madrid

Madrid, la capital del estado, está situada en la meseta central y posee un clima continental con influencias del clima mediterráneo. Dicho clima se caracteriza por tener unos veranos cortos, cálidos y secos junto con inviernos muy fríos y parcialmente nublados, mientras que las estaciones de tránsito son variables tanto en temperatura como en precipitaciones.

En la Gráfica 16 se puede apreciar que la demanda de calefacción es del 51% (56.563 kWh) y la de refrigeración un 31% (35.166 kWh) mientras que la demanda eléctrica del 18% (19.873 kWh) que reflejan las características climáticas de la localidad.



Gráfica 16 Demanda anual de calefacción, refrigeración y electricidad en Madrid

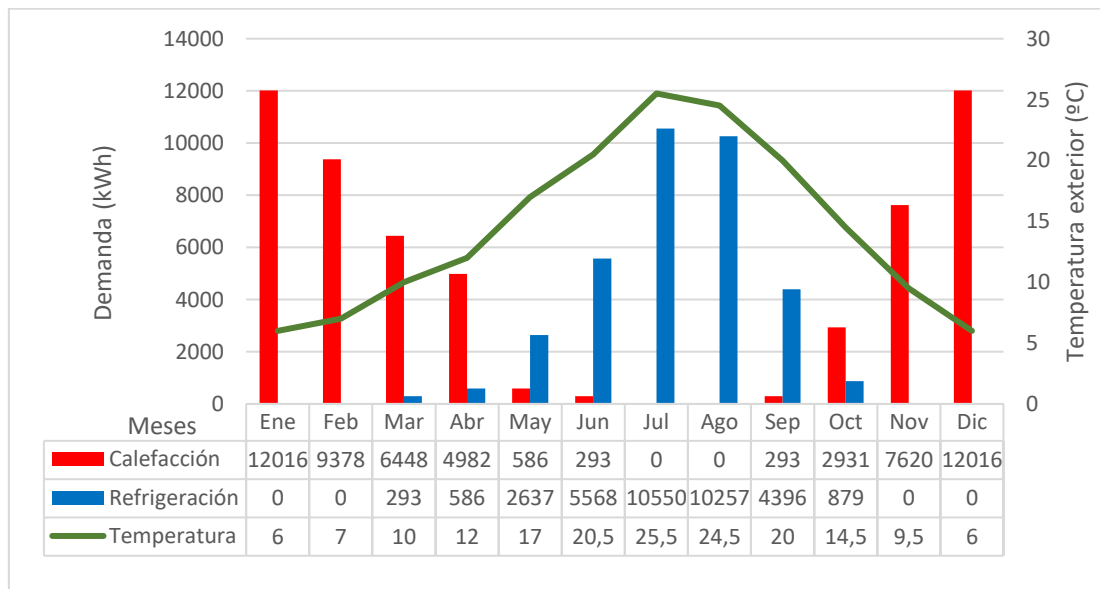
Una vez obtenidas las demandas de calefacción de la Gráfica 17, se procede a determinar la calificación energética que obtendría el modelo en la zona climática en la que se ubica Madrid.

$$D_{cal_{TOT}} = 12016 + 9378 + 6448 + 4982 + 586 + 293 + 293 + 2931 + 7620 + 12016 = 56563 \text{ kWh/año}$$

$$D_{cal_{TOT}m^2} = \frac{56563 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 49,22 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$

$$D_{ref_{TOT}} = 293 + 586 + 2637 + 5568 + 10550 + 10257 + 4396 + 879 = 35166 \text{ kWh/año}$$

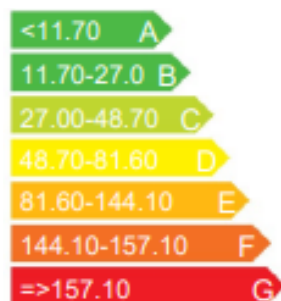
$$D_{ref_{TOT}m^2} = \frac{35166 \text{ kWh/año}}{1149,21 \text{ m}^2} = 30,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ año}}$$



Gráfica 17 Demanda mensual de calefacción, refrigeración y temperatura exterior en Madrid

Finalmente, tras calcular los valores y compararlos con la Gráfica 18, se obtiene una calificación energética en lo que respecta a la demanda de calefacción de categoría D, aunque

está muy cerca del límite con la categoría C. Por otro lado, la calificación energética de refrigeración es de categoría C.



Gráfica 18 Calificación energética dependiendo de la demanda de calefacción y refrigeración en Madrid (kWh/m² año)

9 Re-definición del modelo de Sketchup Pro

En vista a la necesidad de mejorar el modelo del edificio y adecuarlo más a la realidad, se ha re-diseñado el modelo en Sketchup Pro incluyendo detalles constructivos específicos.

La simulación del modelo detallado en OpenStudio está fuera del alcance de este TFM, pero, se ha considerado oportuno incluir los resultados de Sketchup con la finalidad de mostrar la continuidad de este trabajo (ver Figura 42 y Figura 43).



Figura 42 Vista frontal del edificio de estudio en SketchUp Pro



Figura 43 Vista trasera del edificio de estudio en SketchUp Pro

CONCLUSIONES

En el siguiente apartado se analizarán los resultados obtenidos en el presente trabajo.

En primer lugar, en cuanto a la demanda de ACS se refiere, se puede observar que la demanda del modelo simplificado es mayor que la demanda real del edificio de estudio. Esto se debe a que el modelo simplificado representa uno de los tres bloques existentes del edificio. Sin embargo, esta demanda es mayor que un tercio del total real, puesto que, el edificio simplificado tiene un factor de centralización mayor, por tener menos viviendas.

En segundo lugar, el estudio y comparación de los diferentes tipos de fachadas analizados no ha sido concluyente. Si bien es cierto que se puede apreciar una ligera diferencia entre ambos resultados, siendo la simulación con la configuración de Muro Trombe la que peores resultados da, dicha diferencia es insignificante y no refleja la realidad del sistema y la demanda de calefacción del edificio. La similitud entre los resultados obtenidos en ambos tipos de fachadas se debe principalmente a que en la simulación solo se consideran las características constructivas del sistema de Muro Trombe, sin tener en cuenta las mejoras en la ventilación ni la recuperación de calor. Además, el hecho de haber modificado únicamente la fachada suroeste, dificulta la comparación de los resultados.

Por otro lado, se puede observar que existe demanda de calefacción incluso en los meses estivales para mantener el confort térmico. Esto es porque existen momentos puntuales en verano en los cuales la temperatura interior del edificio es inferior a los 21°C de temperatura de consigna establecidos. Por falta de datos reales, para la demanda eléctrica se han utilizado perfiles eléctricos genéricos.

En cuanto al análisis en diferentes zonas climáticas la Tabla 11 resume los resultados. Se observa que la demanda de calefacción varía en gran medida dependiendo de la zona climática, obteniendo, como era de esperar, una menor demanda en las zonas cálidas como Tenerife (1.485 kWh) y una mayor demanda en las zonas frías como Madrid (56.563 kWh).

Por otro lado, los resultados del análisis de la demanda de refrigeración son totalmente opuestos a los de la demanda de calefacción, siendo los climas cálidos los que peores resultados obtienen (Tenerife 70.623 kWh) y los templados los que mejores resultados obtienen (Portugalete 15.532 kWh).

En lo referente a la demanda de electricidad, todas las localidades de estudio solicitan en torno a 19.500 kWh, porque las simulaciones se han realizado con los mismos perfiles y horarios. Las variaciones son minúsculas y se deben principalmente a un factor, la diferencia en las horas de luz solar, puesto que una mayor cantidad de horas solares reduce la demanda eléctrica de las luminarias. Debido a esta demanda casi-constante, no se ha analizado la influencia de la demanda eléctrica en la calificación energética de la vivienda.

La certificación energética respecto a la demanda de calefacción y refrigeración obtenida para el modelo simplificado es diferente según la zona climática analizada. En la Tabla 11 se observa que la calificación más alta respecto a la demanda de calefacción, se obtiene para el clima subtropical canario (A) y la más baja para el clima continental madrileño (D) y el mediterráneo de Barcelona (D). Por otro lado, en la localidad de Portugalete el modelo

simplificado obtiene una calificación de categoría C (55.090 kWh) debido a la suavidad del clima oceánico.

En lo que respecta a la certificación energética de la refrigeración, la calificación más alta la obtiene la localidad de Portugalete con una categoría A (15.532 kWh) y la peor Tenerife con una G (70.623 kWh).

Localidad	Portugalete	Tenerife	Murcia	Barcelona	Madrid
Clima	Oceánico	Subtropical	Semidesértico	Mediterráneo	Continental
Calefacción (%)	62	3	32	42	51
Calef. (kWh)	55090	1485	31065	43373	56563
Certificación Calef.	C	A	C	D	D
Refrigeración (%)	17	76	47	40	31
Refrig. (kWh)	15532	70623	46009	41905	35166
Certificación Refrig.	A	G	D	C	C
Electricidad (%)	21	21	21	18	17
Electric. (kWh)	19357	19729	19861	19486	19873

Tabla 8 Resumen de los resultados obtenidos

Aunque los límites para la calificación varíen en función de la zona climática, cabría pensar que la nota en un clima mediterráneo respecto a la demanda de calefacción sería mejor que la de un clima oceánico debido a que, en este último, los inviernos son más severos. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que, aunque sí que es cierto que la demanda es algo menor, la calificación energética es más estricta en esa zona climática por lo que se obtiene una categoría peor.

Este trabajo solo ha tenido en cuenta la certificación energética respecto a la demanda de calefacción y refrigeración, sin haberse considerado los certificados en función de las emisiones de dióxido de carbono y del consumo de energía primaria del edificio, por lo que las calificaciones obtenidas son solo una aproximación. Además, cabe recordar que los resultados se han obtenido gracias a la simulación del modelo simplificado y no del edificio de estudio, debido a la falta de datos.

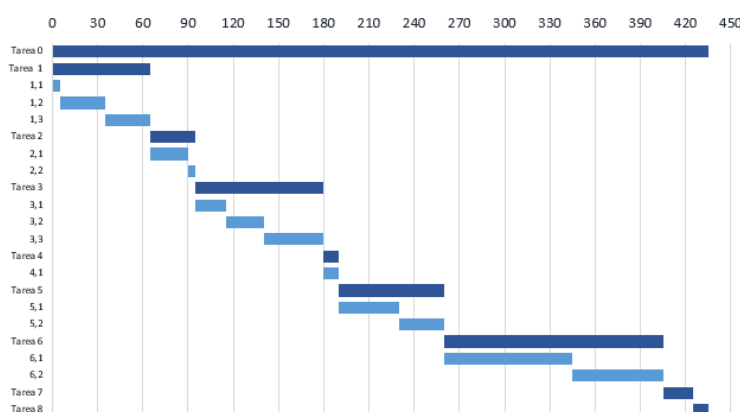
Por ello, estos resultados llevan a pensar que es de vital importancia monitorizar los equipos para obtener datos de consumo con los que crear perfiles de uso para poder realizar la simulación y obtener resultados más verídicos.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

10 Diagrama de Gantt

En el siguiente apartado se muestran las tareas que realizadas a lo largo del presente trabajo y la cantidad de horas dedicadas. En su conjunto, el trabajo ha requerido de un total de 435 horas, tal y como se puede observar en Gráfica 19.

- La primera tarea ha sido la revisión bibliográfica del sistema pasivo de captación solar Muro Trombe, dividida en tres subgrupos: la definición de los objetivos del trabajo, la búsqueda de bibliografía y por último la redacción del estado del arte.
- En segundo lugar, se analizaron los planos del edificio de estudio junto con un esquema simplificado del propio edificio basado en los planos analizados para facilitar y entender en mejor medida los programas a utilizar.
- En tercer lugar, se representó el esquema simplificado en el programa informático SketchUp para obtener un modelo en 3D con el que trabajar y realizar la simulación. Para ello se buscó información del funcionamiento del programa tanto en la página web oficial del mismo como en páginas alternativas creadas por usuarios del programa. Finalmente, se corrigieron los errores cometidos en el diseño y se obtuvo la representación en 3D necesaria para completar las siguientes tareas.
- En cuarto lugar, se vinculó el programa SketchUp con OpenStudio mediante la descarga y utilización de un plugin que enlaza ambos programas y permite efectuar la simulación para obtener los resultados requeridos.
- En quinto lugar, una vez vinculados los programas y tras estudiar el funcionamiento de OpenStudio, se introdujeron los datos necesarios y se definieron los parámetros de simulación.
- Finalmente, se ejecutó la simulación, se obtuvieron y analizaron los resultados y se redactó la memoria del proyecto.



Gráfica 19 Diagrama de Gantt

ASPECTOS ECONÓMICOS

11 Descripción del presupuesto

En este apartado se recogen todos los gastos derivados del desarrollo de este trabajo, que se dividen en tres grupos: costes del personal, costes del equipo y costes de movilidad.

11.1 Costes del personal

En esta sección se muestran los costes relacionados con las horas invertidas por las personas involucradas en este trabajo (ver Tabla 9).

	Número de horas (h)	Coste por hora (€/h)	Coste (€)
Director	65	40	2600
Estudiante	435	15	6525
Total	500		9125

Tabla 9 Costes del personal

11.2 Costes del equipo

En esta sección se muestran los costes relacionados con el equipo utilizado (ver Tabla 10).

	Coste (€/año)
Licencia SketchUp	274
Total	274

Tabla 10 Costes del equipo

El único gasto ha sido la compra de la licencia de uso del programa SketchUp Pro puesto que el programa OpenStudio es de uso gratuito.

11.3 Costes de movilidad

En esta sección se muestran los costes relacionados con la movilidad (ver Tabla 11).

	Número de viajes	Coste por viaje (€/viaje)	Coste (€)
Autobús	6	6,70	40,2
Metro	2	2	4
Total			44,2

Tabla 11 Costes de movilidad

A lo largo del trabajo se han realizado diferentes viajes, uno de ellos a la villa de Portugalete para visitar el edificio de estudio y los otros dos a la Escuela de Ingeniería de Bilbao en relación a procesos administrativos.

Futuras líneas de investigación

En el siguiente apartado se expondrán los aspectos que se han considerado interesantes durante la elaboración del presente trabajo.

12 Mejora de las hipótesis

En primer lugar, resultaría muy útil crear un modelo más detallado del edificio. De este modo, se podrían calcular las demandas con más exactitud, lo que ayudaría a difundir las estrategias y tecnologías energéticamente eficientes, comercialmente disponibles, pero de uso todavía poco frecuente en el sector residencial. Para ello, habría que precisar más el modelo de funcionamiento del sistema de Muro Trombe, en lo que a ventilación y recuperación de calor se refiere, e incluir además un modelo de fachada tipo SolarWall en la representación del edificio.

En segundo lugar, monitorizar los datos de consumo de los usuarios del edificio facilitaría la creación de perfiles reales de consumo, considerando que actualmente existen contadores individuales, ayudando a establecer de manera más precisa los horarios de uso de los equipos y elementos que alberga el edificio.

Por otro lado, una vez conocida la demanda de los edificios, se podrían definir con exactitud los equipos de la instalación térmica, ya sea la instalación de paneles fotovoltaicos o el sistema de calefacción y ACS. Esto permitiría definir un control óptimo de funcionamiento y con ello a conseguir reducir los consumos.

Con todo ello se conseguiría alcanzar el objetivo principal del proyecto Europeo BuildSmart - *Energy efficient solutions ready for market*, esto es, estudiar comportamiento de los sistemas pasivos y su vinculación con los sistemas activos de los edificios VPO de Portugalete en las mismas condiciones climáticas y de entorno.



BIBLIOGRAFÍA

1. LIN, Zhongping; DENG, Shiming. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and environment*, 2008, vol. 43, no 1, p. 70-81.
2. DJONGYANG, Noël; TCHINDA, René; NJOMO, Donatien. Thermal comfort: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, vol. 14, no 9, p. 2626-2640.
3. European Commission of Energy performance of buildings | Energy. Disponible en: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings_en
4. ZHANG, Xingxing, et al. Active Solar Thermal Facades (ASTFs): from concept, application to research questions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 50, p. 32-63.
5. PROBST, Maria Cristina Munari; ROECKER, Christian. Architectural integration and design of solar thermal systems. EPFL Press, 2011.
6. MERTIN, Stefan, et al. Reactively sputtered coatings on architectural glazing for coloured active solar thermal façades. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 68, p. 764-770.
7. JABER, Samar; AJIB, Salman. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 2011, vol. 85, no 9, p. 1891-1898.
8. LEGGETT, Jane A. Evolving Assessments of Human and Natural Contributions to Climate Change. Congressional Research Service, 2018.
9. LEGGETT, Jane A. The United Nations Framework Convention on Climate Change, the Kyoto Protocol, and the Paris Agreement: A Summary. 2020.
10. MAAMOUN, Nada. The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, vol. 95, p. 227-256.
11. QP, Annual Primary Energy Demand. Copenhagen Accord.
12. KLEIN, Daniel, et al. (ed.). The Paris Agreement on climate change: Analysis and commentary. Oxford University Press, 2017.
13. CF, O. D. D. S. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations: New York, NY, USA, 2015.
14. SERGEI, Kostikov; SHEN, Chao; JIANG, Yiqiang. A review of the current work potential of a Trombe wall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 130, p. 109947.

15. KOYUNBABA, Basak Kundakci; YILMAZ, Zerrin. The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. *Renewable Energy*, 2012, vol. 45, p. 111-118.
16. LI, Chao; YANG, Xun; PENG, Kewen. An experimental study on the performance of Trombe wall system in summer climate conditions in Hot Summer and Cold Winter zone of China. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. p. 012020.
17. BOJIĆ, Milorad; JOHANNES, Kévy; KUZNIK, Frédéric. Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 70, p. 279-286.
18. YU, Bendong, et al. Multifunctional solar wall for dehumidification, heating and removal of formaldehyde: Part 1. System description, preparation and performance of SiO₂/TiO₂ adsorbent. *Building and Environment*, 2016, vol. 100, p. 203-214.
19. YU, Bendong, et al. Experiments and kinetics of solar PCO for indoor air purification in PCO/TW system. *Building and Environment*, 2017, vol. 115, p. 130-146.
20. WU, Shuang-Ying; XU, Li; XIAO, Lan. Air purification and thermal performance of photocatalytic-Trombe wall based on multiple physical fields coupling. *Renewable Energy*, 2020, vol. 148, p. 338-348.
21. YU, Bendong, et al. The performance analysis of a novel TC-Trombe wall system in heating seasons. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 164, p. 242-261.
22. HONG, Xiaoqiang; LEUNG, Michael KH; HE, Wei. Thermal behaviour of Trombe wall with venetian blind in summer and transition seasons. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, p. 1059-1064.
23. ISLAM, Nazrul, et al. Numerical and experimental study on the performance of a Photovoltaic Trombe wall system with Venetian blinds. *Energy*, 2021, vol. 218, p. 119542.
24. AHMED, Omer K.; HAMADA, Khalaf I.; SALIH, Abdulrazzaq M. Enhancement of the performance of Photovoltaic/Trombe wall system using the porous medium: Experimental and theoretical study. *Energy*, 2019, vol. 171, p. 14-26.
25. LIN, Yuan, et al. Experimental and numerical study on the performance of a built-middle PV Trombe wall system. *Energy and Buildings*, 2019, vol. 200, p. 47-57.
26. AELENEI, Laura, et al. Thermal performance of a hybrid BIPV-PCM: modeling, design and experimental investigation. *Energy Procedia*, 2014, vol. 48, p. 474-483.
27. JIE, Ji, et al. Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, no 8-9, p. 1507-1515.



28. HU, Zhongting, et al. An experimental and numerical analysis of a novel water blind-Trombe wall system. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 205, p. 112380.
29. LI, Wei; CHEN, Wei. Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage Trombe-wall system. *Solar Energy*, 2019, vol. 188, p. 706-719.
30. ZHU, Na, et al. Numerical investigations on performance of phase change material Trombe wall in building. *Energy*, 2019, vol. 187, p. 116057.
31. LI, Shanshan, et al. Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall. *Energy procedia*, 2019, vol. 158, p. 2441-2447.
32. DE GRACIA, Alvaro, et al. Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 58, p. 324-332.
33. LUO, Chenglong, et al. Experimental study of a modified solar phase change material storage wall system. *Energy*, 2017, vol. 128, p. 224-231.
34. Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). 2019



ANEXO I:

13 Planos

La carpeta adjunta Planos contiene los planos del edificio que se han utilizado para representar tanto el modelo simplificado del edificio como el propio edificio de estudio. A continuación, se muestra un índice de los planos utilizados.

Plano 1: Fachada sur

Plano 2: Fachada Norte

Plano 3: Fachada este y oeste

Plano 4: Acabados fachada sur

Plano 5: A cavados fachada norte

Plano 6: Acabados fachada este y oeste

Plano 7: Alzado Panel Sandwich

Plano8: Alzado Muro Trombe