

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS Y CUMPLIMIENTO DEL CTE. AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS

Estudiante	Nativel Santiago Cabrera Fajardo
Director/Directora	Ziortza Egiluz y Leire Garmendia
Departamento	Ingeniería Mecánica
Curso académico	2021-2022

Bilbao, 16, 09, 2022

CONTENIDO

1 RESUMEN	1
2 introducción	2
2.1 Motivación	2
2.2 Objetivos	3
3 CONTEXTO	4
3.1 Estado del parque de edificios en España	4
3.2 Estado del parque de edificios de la CAV (Comunidad Autónoma Vasca).	7
3.3 Descripción de las fachadas del parque antiguo de la CAPV	8
4 Beneficios que aporta el trabajo	11
4.1 Desarrollo sostenible:	11
5 METODOLOGÍA	12
5.1 Descripción del caso de estudio	12
5.1.1 Emplazamiento:	12
5.1.2 Antecedentes:	13
5.1.3 Tipología constructiva y descripción:	13
5.1.4 Instalaciones:	14
5.2 Características de las Fachadas a simular	15
Fa.1. Aislamiento insuflado o inyectado:	15
Fa.2. Trasdoso de lana mineral:	16
Fa.3. Fachada SATE:	16
Fa.4. Fachada ventilada	16
Fa.5. Fachada verde:	17
5.3 Descripción del Software utilizado	19
5.4 Datos meteorológicos para la simulación	20
5.5 Descripción del Modelo paramétrico	21
5.6 Criterios de la sostenibilidad para evaluar las soluciones constructivas.	27
5.6.1 Análisis energético:	27
5.6.2 Confort interior:	27
5.6.3 Análisis económico:	28
5.7 Cumplimiento CTE DB HE: Ahorro de Energía	29
5.7.1 CTE DB-HE 1: Limitación de la demanda energética:	30
6 ANÁLISIS Y RESULTADOS	36
6.1 Balance energético anual del edificio	36
6.2 Demanda energética mensual de calefacción y refrigeración	38
6.3 Modelos de confort	40

6.4 Verificación cumplimiento CTE DB HE para las soluciones propuestas. -----	43
6.5 Análisis económico: -----	52
6.5.1 Presupuesto: -----	52
6.5.2 Cálculo de ahorros y Payback-----	55
7 Conclusiones: -----	58
8 Agradecimientos -----	59
9 Referencias -----	60
10 ANEXOS -----	61
10.1 Programación visual ladybug tools: -----	62

Lista de tablas

Tabla 1: Tipologías de fachadas del parque antiguo de la CAPV.....	10
Tabla 2: Cubierta y fachada del caso de estudio	14
Tabla 3: Características instalaciones de climatización.....	14
Tabla 4: Alternativas de fachadas	19
Tabla 5: Resumen aplicación de exigencias básicas CTE DB HE	29
Tabla 6: Tipo y longitud de puentes térmicos	33
Tabla 7: Balances de energía	37
Tabla 8: gráficos de color horarios de calefacción y refrigeración.....	39
Tabla 9: Demanda de calefacción y refrigeración	40
Tabla 10: Visualización de confort térmico en el interior del edificio.....	41
Tabla 11: Gráficos de color de datos horarios de confort.....	43
Tabla 12: Transmitancia límite de los cerramientos	44
Tabla 13: Comparativa de transmitancias de los cerramientos	45
Tabla 14: Puentes térmicos fachada original	46
Tabla 15: Puentes térmicos fachada con Aislamiento insuflado o inyectado.....	47
Tabla 16: Puentes térmicos fachada con Trasdoso de lana mineral	48
Tabla 17: Puentes térmicos fachada SATE	49
Tabla 18: Puentes térmicos fachada ventilada	50
Tabla 19: Puentes térmicos fachada vegetal.....	51
Tabla 20: Coeficiente global de transmisión de calor	52
Tabla 21: Presupuesto medidas de reforma	54
Tabla 22: Consumo de energía primaria en electricidad	55
Tabla 23: Consumo de energía primaria en gas natural	55
Tabla 24: Resultados de ahorro de energía y payback.....	56

Lista de gráficos

Gráfico 1: Porcentaje de calificaciones energéticas por comunidades.....	5
Gráfico 2: Porcentaje del parque antiguo en España.....	6
Gráfico 3: Porcentaje de edificios a rehabilitar por CCAA.....	7
Gráfico 4: Número de viviendas construidas por periodo en Euskadi	8
Gráfico 5: Valor [K] caso de estudio	35

Lista de figuras

Figura 1: Localización caso de estudio	12
Figura 2: Fachada este edificio de estudio	13
Figura 3: Fachada oeste edificio de estudio	13
Figura 4: Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC)-Bilbao	20
Figura 5: Flujo de trabajo del proceso mediante el cual se realizó la optimización	21
Figura 6: Geometría Rhinoceros.....	22
Figura 7: Modelo Honeybee	23
Figura 8: Modelo particiones interiores	23
Figura 9: Zonas acondicionadas	23
Figura 10: Elemento de construcción de materiales.....	23
Figura 11: Modelo cámara de aire ventilada	24
Figura 12: Elemento de construcción de material vegetal.....	24
Figura 13: Diseño paramétrico de la geometría.....	26
Figura 14: configuración de la simulación.....	26
Figura 15: Análisis y visualización de resultados	26
Figura 16: Esquema general de la envolvente térmica	31
Figura 17: Valores límite de transmitancia CTE DB HE.....	32
Figura 18: Valor límite del coeficiente global de transmisión de calor	35

1 RESUMEN

En los últimos años, la eficiencia energética de las viviendas ha tomado gran importancia como medida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y abordar la creciente demanda de energía. La rehabilitación y modernización de los edificios se considera un paso vital para lograr los objetivos energéticos y climáticos, así mismo, el diseño de alto rendimiento y las herramientas de análisis ambiental se vuelven más indispensables en el campo de la ingeniería y la arquitectura. Este trabajo presenta los resultados obtenidos en el estudio de rehabilitación energética sostenible de las fachadas de los edificios mediante la automatización de una herramienta informática. Con el objetivo de evaluar el comportamiento energético del caso de estudio, se ha seleccionado un edificio a rehabilitar energéticamente. Se han simulado soluciones convencionales de rehabilitación de fachadas y soluciones innovadoras, teniendo en cuenta criterios de la sostenibilidad tales como, el consumo energía, la transmitancia térmica de los elementos, el confort térmico interior y el análisis económico de la rehabilitación, todo ello considerando los parámetros fijados por el CTE (Código Técnico de Edificación). Los resultados obtenidos demuestran los beneficios en el ahorro energético y aprueban el uso de algunos sistemas de fachadas propuestos para la rehabilitación de edificios existentes.

Palabras clave: Rehabilitación, energía, confort, transmitancia, parametrización, fachada, consumo, eficiencia.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Motivación

El creciente consumo de recursos naturales, energía primaria y las emisiones de gases de efecto invernadero han inspirado la necesidad de crear e investigar sistemas innovadores que tengan un desempeño energético satisfactorio y sean amigables con el medio ambiente. En 2020, en el marco del Pacto Verde Europeo, con el fin de acelerar la reducción global de las emisiones de CO₂, la Unión Europea reforzó su compromiso incrementando el objetivo de mejora de la eficiencia energética del 20% al 32,5% respecto a los niveles de 1990 (CE, 2019). La renovación de los edificios ya en uso podría reducir el consumo total de energía de la UE en un 5-6% y rebajar un 5%, aproximadamente, las emisiones de dióxido de carbono, convirtiéndose así la rehabilitación en un aspecto clave (UE, 2020). Por otro lado, El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 del gobierno de España, adopta el objetivo de mejora de la eficiencia energética del 32,5% en 2030 aprobado por la Unión Europea, si bien con las medidas puestas en marcha y de acuerdo con el ejercicio de modelización realizado, se espera alcanzar un 39,5%²⁸ de mejora en 2030, lo que se traducirá en un consumo de energía primaria de 98,5 Mtep en ese año (PNIEC, 2021).

En España la edad media de los inmuebles supera los cuarenta años, con un 42% de ellos construidos entre 1950 y 1980 (10,4 millones) de los cuales el 53% de viviendas de este periodo se encuentran ubicadas en la CAV (Comunidad Autónoma Vasca), según datos del INE y el Ministerio de Fomento. Se trata de viviendas con estructuras de hormigón a base de cemento aluminoso y, en muchas ocasiones, de poca calidad en los materiales que actualmente no pueden estar en condiciones óptimas. Además, no se tiene en cuenta ningún criterio de eficiencia ni sostenibilidad. Por lo tanto, cualquier acción encaminada a mejorar la eficiencia energética mediante diferentes soluciones de rehabilitación, atendiendo a criterios de sostenibilidad, puede considerarse de gran importancia.

En ese sentido, la necesidad de rehabilitar los edificios existentes desde un enfoque más sostenible y acorde con la realidad ha incentivado el desarrollo de estrategias pasivas que buscan convertir los edificios antiguos y en desuso en nuevos espacios que garanticen por sí solos una temperatura ideal en el interior, reduciendo el consumo energético que genera la climatización y el uso del edificio. Sin embargo, en cuanto a rehabilitación se refiere, hasta el momento poco se ha investigado sobre el potencial de eficiencia energética de los edificios antiguos y se sigue optando por sistemas de envolvente no muy efectivos. A este respecto, la integración del diseño paramétrico cobra una gran importancia en virtud de que facilitan a través del modelado de la información, realizar simulaciones energéticas implementando métodos de optimización que permiten la transformación de los problemas de diseño, en un problema de optimización para explorar diferentes estrategias teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad.

En este trabajo se plantea el diseño paramétrico como vía de optimización, con el fin de lograr una mayor eficiencia energética en el caso de estudio y así contribuir a los objetivos que limitan la demanda energética de los edificios. Siendo conscientes de la cantidad de factores que se necesitan tener en cuenta para un diseño energético riguroso, este trabajo sólo se centra en el estudio de los sistemas de fachadas desde el punto de vista energético y como éstos pueden ser modificados según las necesidades del edificio y el confort del usuario. Puesto que, la fachada es uno de los elementos constructivos de mejora del comportamiento térmico, con el que se consigue reducir el impacto energético generado por los edificios.

2.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es Identificar y evaluar los parámetros más relevantes en la rehabilitación energética sostenible de los edificios, desarrollando una herramienta digital para evaluar y automatizar el cumplimiento del CTE. Finalmente, la aplicación y validación de los desarrollos en un caso de estudio.

De acuerdo con esta idea principal, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el estado del parque de edificios de la CAV (Comunidad Autónoma Vasca) y la necesidad de una rehabilitación energética del mismo.
- Identificar los indicadores de sostenibilidad más relevantes a considerar en una rehabilitación energética. En esta revisión también, se tendrá en cuenta los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) en la edificación.
- Efectuar una revisión bibliográfica de las diferentes soluciones de rehabilitación, atendiendo a criterios de sostenibilidad (medioambiental, social, económico). Esta revisión recogerá también las soluciones de fachada NBS (Nature-Based Solutions).
- Definición de los parámetros y magnitudes a medir para valorar la sostenibilidad de las soluciones de rehabilitación. Según los tres pilares de la sostenibilidad (medioambiental, social, económico).
- Identificar los parámetros necesarios para evaluar el cumplimiento del CTE.
- Evaluar los parámetros establecidos mediante el programa informático Grasshopper/LadyBug
- Elaborar una herramienta digital para poder evaluar y automatizar el cumplimiento del CTE a través de software Grasshopper/LadyBug.
- Aplicar y validar los desarrollos en un caso de estudio.
- Análisis de resultados y conclusiones

3 CONTEXTO

3.1 Estado del parque de edificios en España

Actualmente se estima que el consumo energético del sector de la construcción supera el 40% del consumo total de energía final en la Unión Europea y los edificios suponen un 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero, generadas principalmente durante su construcción, utilización, renovación y demolición (UE, 2020). Así, la situación energética y medioambiental exige mejorar el rendimiento energético de los edificios.

Según el departamento de energía de la comisión europea, en la actualidad, aproximadamente el 75% del parque inmobiliario de la UE es ineficiente desde el punto de vista energético. Eso significa que gran parte de la energía consumida se malgasta, por otro lado, los datos del Instituto Nacional de Estadística muestran que alrededor del 54% del parque de viviendas español se construyó antes de 1980. Dicha fecha es significativa porque es el momento en el que resultan obligatorias las primeras medidas de aislamiento térmico en los edificios, al entrar en vigor la primera regulación térmica española (NBE-CT 79).

En ese sentido, al analizar el parque edificatorio desde el punto de vista de la potencialidad de la actividad de rehabilitación, es importante destacar que en España más de la mitad de los inmuebles de uso residencial son anteriores a 1980 y, según los datos del último Censo de Población y Viviendas, existen más de 950.000 edificios destinados a vivienda en un estado deficiente, malo o ruinoso.

Al analizar la calidad del parque edificado a partir de las calificaciones energéticas, de acuerdo con los datos del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), más del 81,0% de los edificios existentes se sitúan en las letras E, F o G (Gráfico 1), en términos de emisiones, aumentando dicho porcentaje hasta el 84,5% de los edificios, en el caso del consumo energético, siendo la letra A para los edificios más eficientes y G para los menos eficientes. Lo que pone de manifiesto el importante potencial de la rehabilitación energética. Además, los datos publicados ponen en evidencia que los edificios que alcanzan la mejor calificación, la letra A, no alcanzan el 0,3% del total en el caso de las emisiones, y se sitúan en el 0,2% en el caso de consumo energético.

En el Gráfico 1, observamos que el número de certificaciones energéticas de edificios existentes con las letras A, B y C, consideradas eficientes, suponen tan sólo el 5%; las de letras D y E, consideradas poco eficientes y susceptibles de mejora, son del 66%; mientras que las de letras F y G, entendidas como muy deficientes energéticamente, siendo necesaria una intervención para su mejora, son del 29%.

CALIFICACIONES EN CONSUMO DE LOS EDIFICIOS EXISTENTES

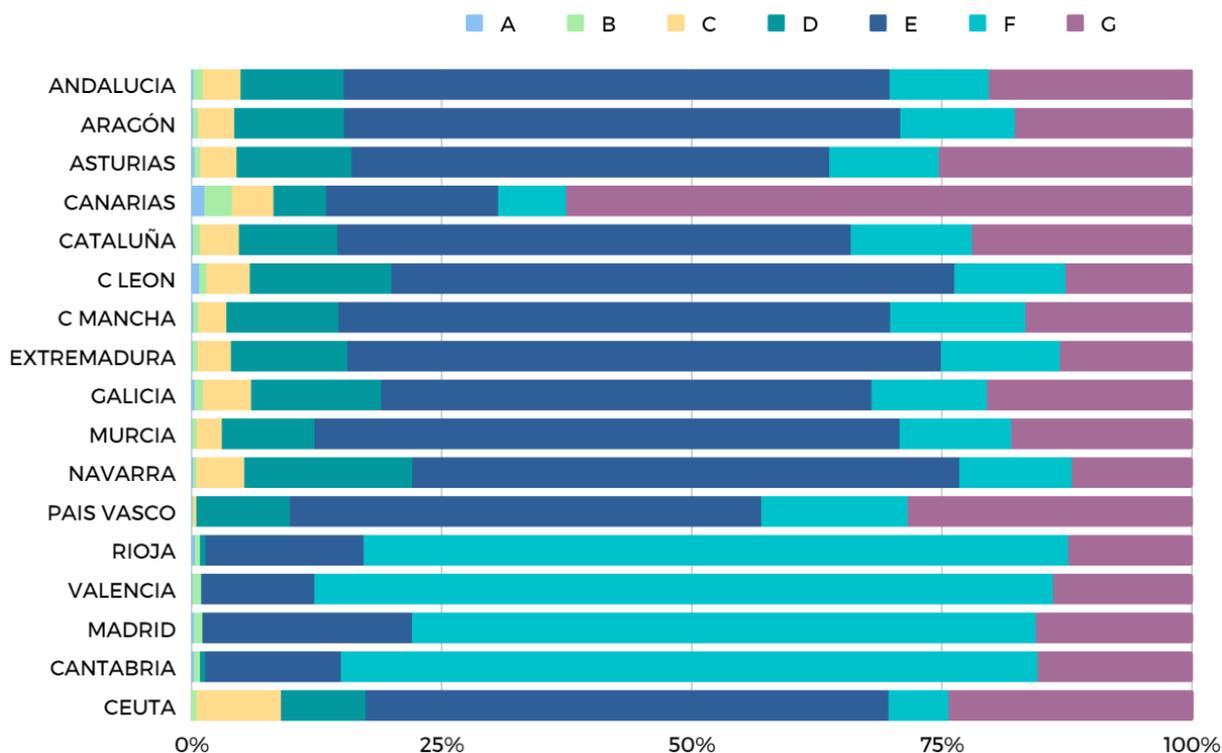


Gráfico 1: Porcentaje de calificaciones energéticas por comunidades

Fuente: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) y elaboración propia

Por consiguiente, a la vista de los datos analizados, se pueden extraer conclusiones muy significativas acerca de las necesidades de actuación sobre el parque edificatorio existente en España, en lo que a su rehabilitación y necesaria mejora de la eficiencia energética se refiere, especialmente, en el ámbito residencial. El porcentaje de edificios existentes con una buena calificación energética es muy bajo y las medidas que se toman para mejorar dicho valor, mayoritariamente no logran el objetivo de obtener la calificación más alta (>letra C).

Según la agencia estatal BOE, a pesar de este importante potencial de mejora del parque edificatorio, el sector de la actividad de rehabilitación residencial en España se caracteriza por un menor ritmo que en los principales países de la UE, estando situada la tasa media de rehabilitación efectiva del parque de vivienda aproximadamente entre 8 y 10 veces por debajo de las medias de los principales países del entorno, un ritmo claramente insuficiente para responder a los retos marcados por las estrategias y planes nacionales, y las exigencias que establece la Unión Europea (BOE, 2021)

Ahora bien, si analizamos la antigüedad del parque residencial en España por provincia a partir de los datos extraídos del Instituto Nacional de Estadística (Gráfico 2), se puede observar que la CAV (Comunidad Autónoma Vasca) es una de las comunidades que más concentran parque

inmobiliario envejecido, superando la media estatal. Además, el 63,5% de su parque de viviendas edificado hace más de 40 años seguida por Cataluña y Aragón.

ANTIGUEDAD DEL PARQUE RESIDENCIAL POR COMUNIDADES

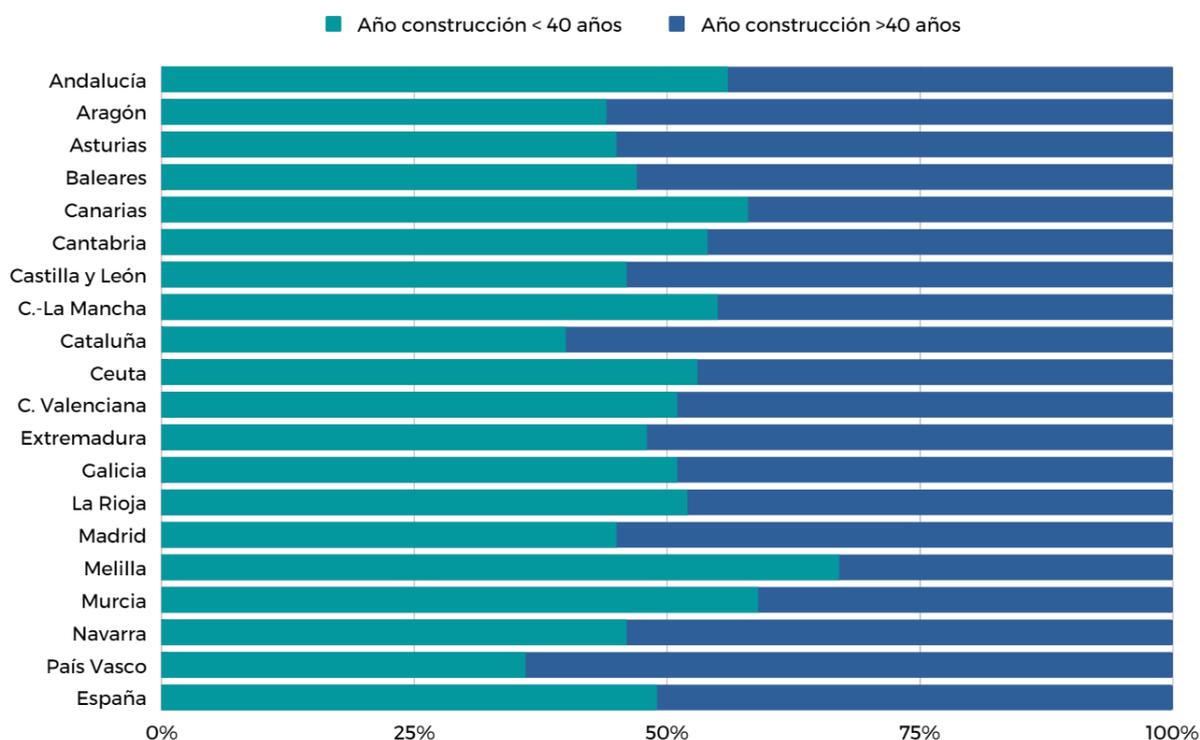


Gráfico 2: Porcentaje del parque antiguo en España

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE) y elaboración propia

Entre estos planes y estrategias España cuenta con la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE), marca las vías de apoyo a la renovación de los parques de edificios residenciales y no residenciales, tanto públicos como privados, el objetivo es transformarlos en parques inmobiliarios con alta eficiencia energética y descarbonizados antes de 2050, facilitando la transformación económicamente rentable de los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo (BOE, 2021).

En cuanto al tipo de edificios a rehabilitar (Gráfico 3), en 2019, en el conjunto de España, el 83,2% de los edificios objeto de rehabilitación han sido de uso residencial, con un total de 21.128 edificios rehabilitados (Ministerio de Transportes, 2021), esto demuestra que, frente a otros usos, el residencial es uno de los que presenta mayor necesidad en ese ámbito. Por otro lado, las regiones en las que se ha registrado un mayor porcentaje de rehabilitación residencial en 2019 han sido Cantabria (94,3% de los edificios residenciales rehabilitados) y Navarra (91,9%), seguidas de Baleares (88,5%) y del País Vasco (87,6%).

NÚMERO DE EDIFICIOS A REHABILITAR, POR CCAA, EN 2019

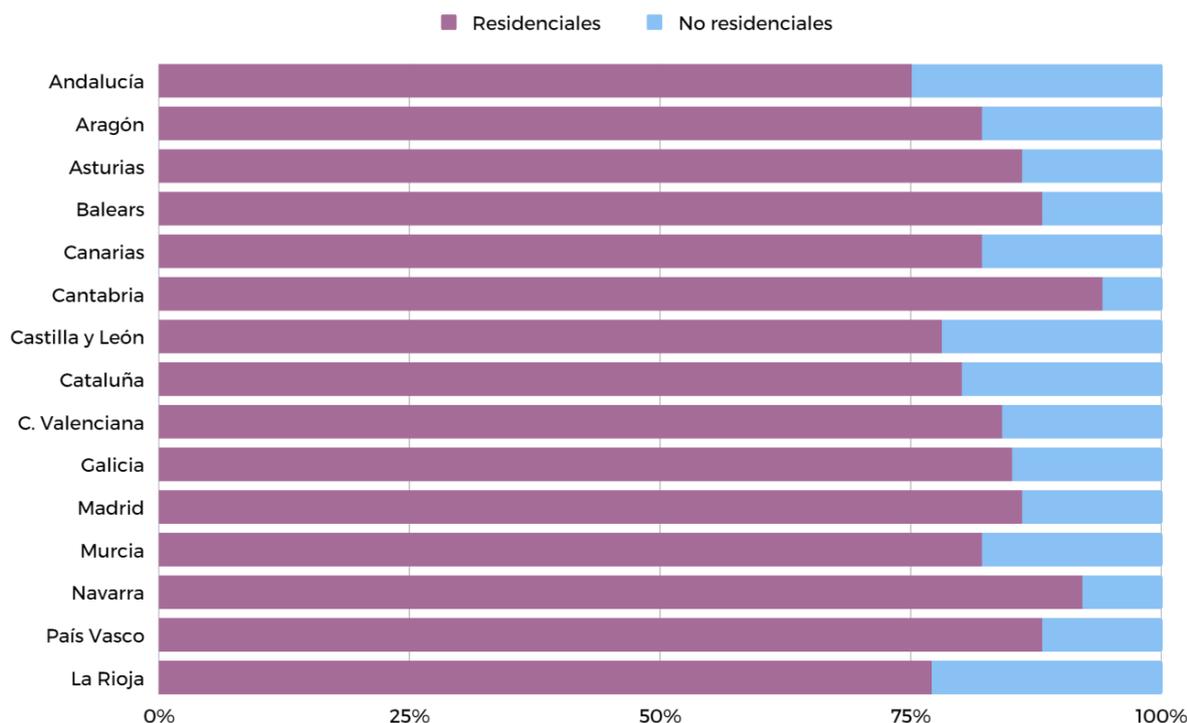


Gráfico 3: Porcentaje de edificios a rehabilitar por CCAA

Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y elaboración propia

3.2 Estado del parque de edificios de la CAV (Comunidad Autónoma Vasca).

En el siglo XX debido al incremento de la población como consecuencia de los altos flujos migratorios, las altas tasas de natalidad y la necesidad de un rápido crecimiento, especialmente en muchas áreas industriales y urbanas, llevó a que se produjera un aumento en el parque residencial y a su vez la alta velocidad de crecimiento provocó una construcción homogénea. Es por ello que el parque de viviendas del País Vasco se caracteriza tanto por su elevada antigüedad (45,4 años de media), como por las características constructivas similares en muchos de los edificios de aquella época y un parque antiguo con esa tipología requiere de mayores necesidades de rehabilitación y eficiencia energética.

El Gráfico 4 ilustra el número de viviendas familiares construidas cada periodo en el País Vasco. Por territorio histórico se puede observar que el parque de Bizkaia tiene una mayor antigüedad media y, por tanto, una mayor necesidad de rehabilitación frente a otras provincias. Asimismo, vemos un incremento en el periodo de 1960 a 1980 para las tres provincias, dando a entender que el mayor porcentaje del parque antiguo del País Vasco cuenta con las características de las viviendas que fueron construidas durante esos años.

Evolución del número de viviendas familiares en la Comunidad Autónoma de Euskadi

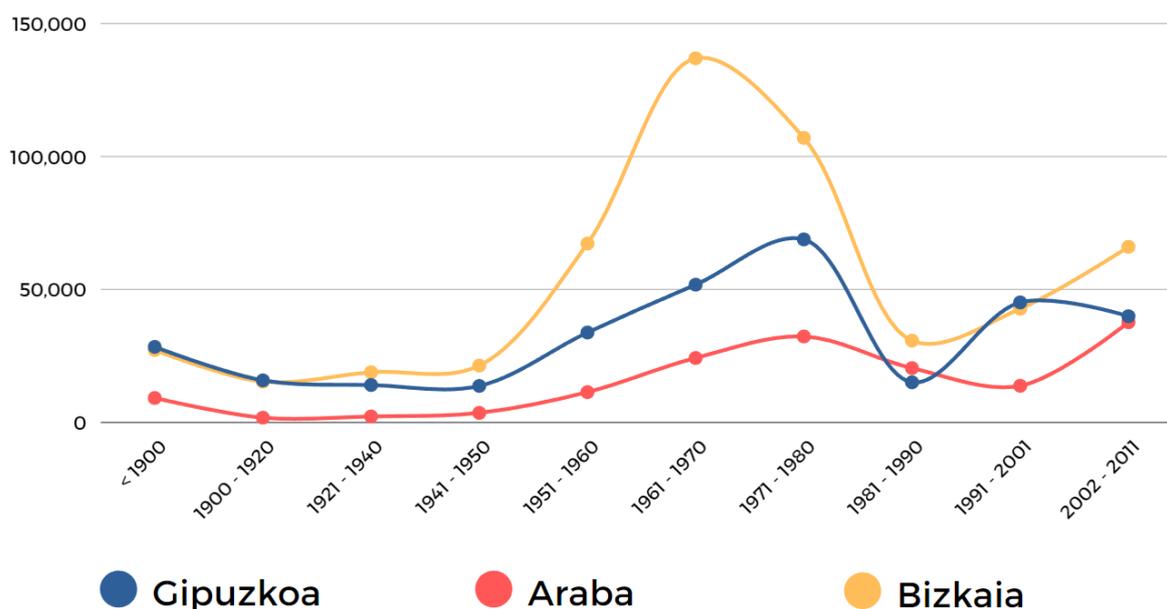


Gráfico 4: Número de viviendas construidas por periodo en Euskadi

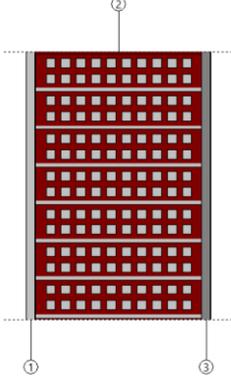
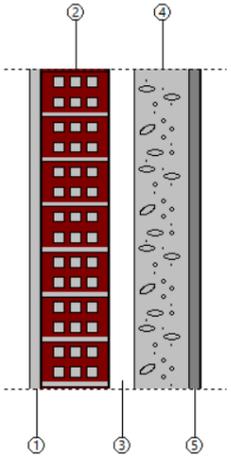
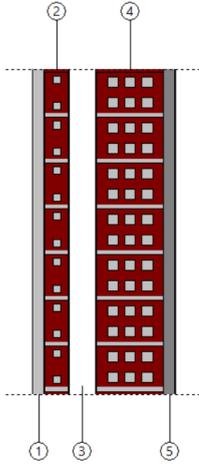
Fuente: Instituto Nacional de Estadística (NIE) y elaboración propia

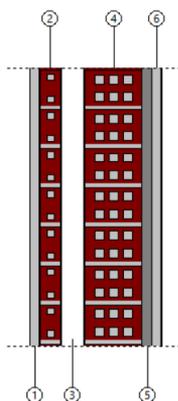
Adicionalmente, tal como establece la normativa, todos los edificios con una antigüedad superior a los 50 años, así como aquellos que deseen optar a ayudas públicas para la rehabilitación, deben pasar una inspección técnica del edificio (ITE). De acuerdo con el informe de evaluación de la rehabilitación en el País vasco, nueve de cada diez edificios que ha pasado la ITE ha sido construido con anterioridad al año 1980 (Vivienda, 2020). Adicionalmente, de las 44.891 ITEs registradas, tan sólo 591 han obtenido una calificación entre A y C, esto es, que pueden considerarse como “buena” eficiencia energética. En ese sentido, se puede concluir que la mayor parte de los edificios obtienen una calificación energética de nivel D o inferior y las actuaciones que se están realizando para mejorar la eficiencia energética de los edificios no están siendo lo suficientemente eficaces para obtener una calificación energética adecuada.

3.3 Descripción de las fachadas del parque antiguo de la CAPV

En el estudio realizado por el grupo de Investigación ENEDI, Departamento de Ingeniería Térmica, Facultad de Ingeniería de Bilbao, se describen las secciones constructivas de fachadas más comunes en el País Vasco durante el siglo XX (Tabla 1). En dicho estudio se concluye que los valores de transmitancia térmica de las viviendas se recogen claramente en dos rangos definidos. Uno es el grupo relacionado con los edificios construidos después de la primera normativa térmica (NBE-CT-79) o renovados energéticamente, que tienen un valor U entre

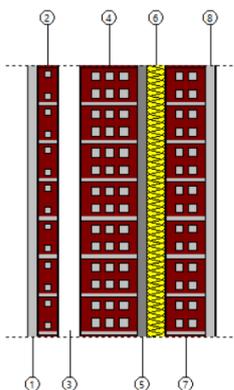
0.40W/m²K y 0,50 W/m²K. El otro grupo se refiere a edificios construidos antes de dicha norma (NBE-CT-79) con un valor U entre 1.10W/m²K y 1,30 W/m²k (Terés-Zubiagaa, Campos-Celadorb, González-Pinoa, & Escudero-Revilla, 2015). El detalle de las secciones se describe a continuación:

Descripción	Materiales	Periodo
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Yeso 2. Ladrillo perforado (37 cm) 3. Mortero de cemento <p>U: 1.11 [W/m² K]</p>	<p>1900-1939 (antes del NBE-CT-79)</p>
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Yeso 2. Ladrillo hueco (12,5 cm) 3. Cámara de aire 4. Muro de hormigón (10 cm) 5. Mortero de cemento (2 cm) <p>U: 1.16 [W/m² K]</p>	<p>1939-1957 (antes del NBE-CT-79)</p>
	<ol style="list-style-type: none"> 6. Yeso 7. Ladrillo hueco (4,5 cm) 8. Cámara de aire 9. Ladrillo hueco (12,5 cm) 10. Mortero de cemento (2 cm) <p>U: 1.44 [W/m² K]</p>	<p>1957-1980 (antes del NBE-CT-79)</p>



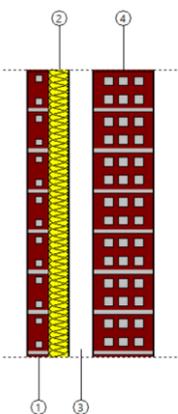
1. Yeso
 2. Ladrillo hueco (4,5 cm)
 3. Cámara de aire
 4. Ladrillo hueco (12,5 cm)
 5. Mortero de cemento (2 cm)
 6. Mortero de cemento aligerado (2cm)
- U: 1.27 [W/m² K]**

1957-1980
(antes del NBE-CT-79)



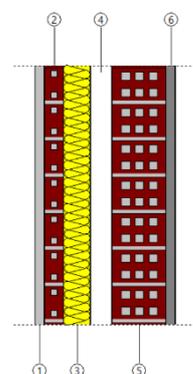
1. Yeso
 2. Ladrillo hueco (4,5 cm)
 3. Cámara de aire
 4. Ladrillo hueco (12,5 cm)
 5. Mortero de cemento (2 cm)
 6. Aislamiento térmico (4 cm)
 7. Ladrillo hueco (9 cm)
 8. Mortero de cemento aligerado (2cm)
- U: 0.43 [W/m² K]**

1957-1980
(antes del NBE-CT-79)



1. Ladrillo hueco (4,5 cm)
 2. Aislamiento térmico (3 cm)
 3. Cámara de aire
 4. Ladrillo hueco (12,5 cm)
- U: 0.48 [W/m² K]**

1980-2006
(NBE-CT-79)



1. Yeso
 2. Ladrillo hueco (4,5 cm)
 3. Aislamiento térmico (6 cm)
 4. Cámara de aire
 5. Ladrillo hueco (12,5 cm)
 6. Mortero de cemento (2 cm)
- U: 0.41 [W/m² K]**

2006...
(CTE)

Tabla 1: Tipologías de fachadas del parque antiguo de la CAPV

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Para precisar los beneficios que aporta el trabajo, es necesario definir el concepto de desarrollo sostenible.

4.1 Desarrollo sostenible:

El concepto fue introducido por el Informe Brundtland, firmado en Oslo el 20 de marzo de 1987 y liderado por la ex primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland, definía el desarrollo sostenible como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (DGNB & GBCE, 2021).

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible junto con 17 objetivos (ODS). Son una llamada a la acción a todos los países para erradicar la pobreza y proteger el planeta, así como garantizar la paz y la prosperidad. Todo ello bajo el principio rector de que nadie se quede atrás.

Los 17 objetivos abordan los tres pilares principales del desarrollo sostenible: el medioambiental, el social y el económico:

- **Sostenibilidad social:** Tiene en cuenta a las personas y sus condiciones de vida en términos de educación, salud, violencia o entretenimiento. Intenta mantener la cohesión entre sus habitantes y la estabilidad y está en manos de cada uno de nosotros.
- **Sostenibilidad ambiental:** Se trata de los recursos naturales del planeta y de cómo son utilizados por la sociedad, las comunidades o las empresas. Para la sostenibilidad ambiental, el uso de energías renovables es fundamental, ya que las energías convencionales como el petróleo dañan el medio ambiente.
- **Sostenibilidad económica:** Implica la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Promover el bienestar social con un consumo responsable a través de un sistema financiero corporativo verde. Esta sostenibilidad asegura el uso racional de los recursos naturales y el respeto por el medio ambiente, satisfaciendo las necesidades actuales sin comprometer las necesidades futuras.

El presente trabajo pretende contribuir con la mitigación de las consecuencias medioambientales negativas generadas por el sector de la construcción, a tal efecto se puede vincular con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- **ODS 3 (salud y bienestar):** Garantizar una vida sana y promover el bienestar en el interior de los edificios mediante la búsqueda de soluciones de rehabilitación que atiendan con

5.1.2 Antecedentes:

El edificio fue construido en 1967 según el Catastro Urbano de Bizkaia, antes de la entrada en vigor de la primera normativa térmica (NBE-CT-79). No se le han realizado tareas de rehabilitación o mantenimiento desde su construcción.

5.1.3 Tipología constructiva y descripción:

Consiste en dos bloques de viviendas adosados con características similares, están compuestos cada uno de una planta de semisótano, el cual, debido a la pendiente del terreno, se encuentra parcialmente enterrada en la zona sur, planta baja, cuatro plantas altas y una planta de altillo bajo la cubierta del edificio.

Todas las plantas tienen en la actualidad uso de vivienda, tal y como queda recogido en la información catastral consultada. El edificio se compone de 20 viviendas que se desarrollan a razón de dos viviendas por planta, cada vivienda se compone de dos habitaciones, cocina, baño, hall y una sala.

En cuanto a las fachadas, cabe destacar que tiene cuatro fachadas exteriores, con orientaciones norte, sur, este y oeste. La fachada principal (este) da a la calle del Grupo Marqués de la Fidelidad (Figura 2), la fachada sur da a la calle Txabarri (Figura 3), la fachada norte da a la calle Sotera de la Mier Kalea y la fachada oeste da a un jardín comunitario. A continuación, se detalla la tipología constructiva de cada uno de los elementos del edificio y los materiales que lo componen:



Figura 2: Fachada ESTE -NORTE edificio de estudio



Figura 3: Fachada SUR edificio de estudio

1. El techo es una cubierta inclinada a dos aguas (Tabla 2) con una pendiente aproximada de 30°, resuelta mediante una losa maciza de hormigón armado (18 cm de espesor) y acabado de teja cerámica.
2. La fachada (Tabla 2) se compone principalmente de un soporte de ladrillo hueco,

cámara de aire sin ventilar y bloque de ladrillo caravista sencillo. Las particiones interiores están constituidas por bloque de ladrillo revestido de yeso.

3. El suelo está colocado directamente sobre el terreno en la planta de semisótano. Los forjados de los pisos están compuestos principalmente de losa maciza de hormigón armado con acabado de madera
4. La carpintería exterior está compuesta por ventanas de doble vidrio sencillo y marcos de aluminio anodizado.

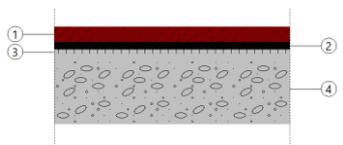
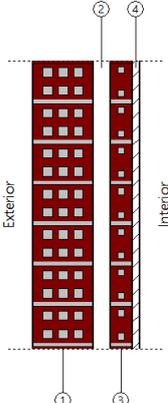
Ref.	Sección	Espesor [cm]	Material	Conductividad [W/mK]
C.0		3,80	1. Teja cerámica	1,00
		2,00	2. Asfalto/betún	0,70
		1,00	3. Subcapa de fieltro	0,05
		18,00	4. Hormigón armado	2,50
		24,80		Transmitancia [W/m² K]:
Fa.0		12,5	1. Caravista sencillo	1,02
		3,50	2. Cámara de aire	0,19
		4,50	3. Ladrillo hueco	0,46
		1,50	4. Yeso	0,40
		21,50		Transmitancia [W/m² K]:

Tabla 2: Cubierta y fachada del caso de estudio

5.1.4 Instalaciones:

El edificio dispone de las instalaciones térmicas apropiadas destinadas a proporcionar el bienestar térmico de sus ocupantes. Cuenta con calderas estándar que satisfacen la demanda de calefacción y producción de ACS del 70% de las viviendas y el resto de las viviendas (30%) cuenta con termos eléctricos para la producción de ACS y calefacción. Las características de los equipos se describen en la Tabla 3.

	Calefacción y ACS	ACS	Calefacción
Equipo:	Caldera estándar	Caldera estándar	Efecto Joule
Combustible:	Gas natural	Electricidad	Electricidad
Rendimiento medio estacional [%]:	79,2	95	95
Demanda cubierta [%]:	70	30	30

Tabla 3: Características instalaciones de climatización

5.2 Características de las Fachadas a simular

De acuerdo con la información presentada y considerando la antigüedad del edificio es importante señalar que el caso de estudio está compuesto por una fachada sencilla sin aislamiento térmico y por ende poco eficiente energéticamente. Para corregir esta deficiencia, dotar al edificio de aislamiento térmico y reducir el consumo energético se propone plantear una rehabilitación completa de la fachada.

Para llevar a cabo el estudio, se seleccionan aquellas tipologías constructivas más utilizadas en la zona climática donde está situada la vivienda, intentando que haya diferencias significativas en su composición y así realizar una comparación más adecuada, adicionalmente se propone simular una fachada vegetal con el fin de comparar una solución basada en la naturaleza con sistemas convencionales. A tal efecto, se han escogido dos sistemas de aislamiento térmico por el interior (Fa.1y Fa.2) y tres sistemas de aislamiento por el exterior (Fa.4, Fa.5 y Fa.6), de esta manera también es posible comparar la influencia de los puentes térmicos entre estas dos tipologías.

Se han escogido desde sistemas sencillos como el trasdosado y aislamiento inyectado, hasta sistemas más complejos como el sistema SATE, la fachada ventilada y la fachada vegetal, a fin de evaluar que tan rentable es utilizar un tipo de sistema u otro en rehabilitación.

Por otro lado, se ha procurado utilizar espesores y materiales aislantes de características térmicas similares con el propósito de comparar realmente los diferentes sistemas y no la cantidad o calidad de material aislante empleado.

Fa.1. Aislamiento insuflado o inyectado:

Se trata de una forma muy sencilla y económica de aislar viviendas, es ampliamente utilizada en rehabilitación, su instalación no causa molestias a los ocupantes, mejora el confort térmico y la eficiencia energética. Se ha escogido este sistema puesto que permite aprovechar la cámara de aire no ventilada existente, mejorando sus propiedades térmicas.

Se plantea rellenar la cámara de aire con nódulos de lana de roca ($0,037 \text{ W/mK}$), la cual se inyecta en la cavidad por el interior hasta expandirse y alcanzar así su efecto aislante. Se destaca su adaptabilidad a cualquier geometría permitiendo llegar a zonas de difícil acceso.

Características:

- No evita los puentes térmicos
- Instalación menos costosa
- Ejecución compleja

Fa.2. Trasdosado de lana mineral:

Es un sistema muy utilizado en rehabilitación por su facilidad en aplicación y bajo costo en comparación con otros sistemas, consiste en un trasdosado autoportante por el interior del cerramiento. Seguido a la hoja de la fachada existente se dispone adherida una capa de lana mineral (0,034 W/mK) y una placa de yeso laminado como cara interna más superficial, no existe ningún tipo de separación entre los componentes.

Características:

- No evita todos los puentes térmicos
- Instalación menos costosa
- Pérdida de espacio en el interior

Fa.3. Fachada SATE:

Es un sistema de aislamiento térmico por el exterior que en los últimos años ha cobrado una gran importancia debido a que se viene observando una tendencia en la utilización de este tipo de fachada, consigue reducir gran parte de la demanda energética del edificio y es fácil de adaptar a cualquier tipo de edificio.

Consistente en un panel aislante prefabricado de lana mineral (0,034 W/mK), adherido al muro, cuya fijación habitual es con adhesivo y fijación mecánica, el revestimiento exterior se realizará con mortero acrílico.

Características:

- Evita todos los puentes térmicos
- Altos costos de instalación
- Alto ahorro de energía

Fa.4. Fachada ventilada:

Sistema de cerramiento por el exterior que ha ido consolidándose en los últimos años, el factor más importante en esta estructura es que existe una cámara de aire entre el aislante y la capa de revestimiento. Esto produce el efecto chimenea, es decir, la tendencia del aire cálido a subir por el conducto creado. De esta forma natural se consigue un aislamiento seco y un ahorro en consumo energético.

El sistema estará compuesto por la hoja interior de fábrica de ladrillo a la cual se le añade una capa aislante de lana mineral (0,034 W/mK) y una hoja exterior que estará compuesta por Placa de yeso revestida y reforzada con material de fibra de vidrio, el acabado será de mortero

acrílico y dicha placa estará fijado con una estructura de anclajes. Entre el aislamiento y el revestimiento exterior se crea una cámara de aire ventilada, no estanca.

Características:

- Evita todos los puentes térmicos
- Evita problemas de condensación
- Altos costos de instalación
- Alto ahorro de energía

Fa.5. Fachada verde:

Las fachadas verdes son también conocidas como jardines verticales, muros vivos o verdes. Son un sistema sostenible que permite ubicar plantas de diferentes especies sobre las paredes, mejorando el paisajismo urbano y la infraestructura. El rasgo distintivo que aportan las fachadas verdes en los edificios es su particular capa protectora, la cual sombrea los elementos de la envolvente frente a la radiación solar. La capa vegetal protege el edificio de la radiación y reduce las tensiones térmicas de la estructura.

Se propone una vegetal de doble piel que tiene como objetivo crear una cortina vegetal separada de la pared de la fachada. La separación con la pared de fachada del edificio se puede realizar utilizando diferentes sistemas de apoyo como: enrejados modulares, entramados metálicos, paneles rígidos, sistemas de cable o mallas. Adicionalmente contará con una capa de aislamiento de lana mineral (0,034 W/mK) adherida al muro existente.

Características:

- Evita todos los puentes térmicos
- Evita problemas de condensación
- Mejora calidad del aire.
- Altos costos de instalación
- Alto ahorro de energía
- Solución basada en la naturaleza

En la Tabla 4 se ilustra de una forma más detallada la composición de cada una de las propuestas de rehabilitación, teniendo en cuenta el espesor del material, la conductividad y la transmitancia total:

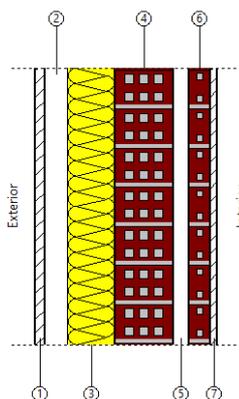
Ref.	Sección	Espesor [cm]	Material	Conductividad [W/mK]
------	---------	--------------	----------	----------------------

Fa.1		4,50	1. Caravista sencillo	0,455	
		3,50	2. Lana de roca	0,037	
		12,5	3. Ladrillo hueco	0,455	
		1,50	4. Yeso	0,400	
		22,00			

Fa.2		12,5	1. Caravista sencillo	0,455	
		3,50	2. Cámara de aire	0,160	
		4,50	3. Ladrillo hueco	0,455	
		6,00	4. Lana Mineral	0,034	
		1,50	5. Placa de yeso	0,400	
		28,00			

Fa.3		2,00	1. Revestimiento de mortero	0,800	
		10,0	2. Lana Mineral	0,034	
		12,5	3. Caravista sencillo	0,455	
		3,50	4. Cámara de aire	0,160	
		4,50	5. Ladrillo hueco	0,455	
		1,50	6. Yeso	0,400	
		34,00			

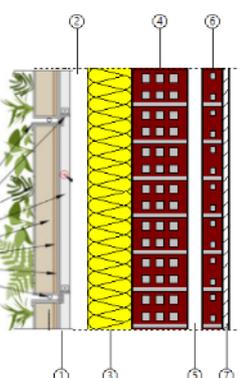
Fa.4



2,00	1. PLY, mortero acrílico	0,800
5,00	2. Cámara de aire ventilada	0,550
6,00	3. Lana Mineral	0,034
12,5	4. Caravista sencillo	0,455
3,50	5. Cámara de aire	0,160
4,50	6. Ladrillo hueco	0,455
1,50	7. Yeso	0,400

35,00 Transmitancia [W/m² K]: 0,26

Fa.5



----	1. Material vegetal	0,400
5,00	2. Cámara de aire ventilada	0,800
10,0	3. Lana Mineral	0,034
12,5	4. Caravista sencillo	0,455
3,50	5. Cámara de aire	0,160
4,50	6. Ladrillo hueco	0,455
1,50	7. Yeso	0,400

---- Transmitancia [W/m² K]: 0,23

Tabla 4: Alternativas de fachadas

5.3 Descripción del Software utilizado

Rinconeros 3D es una herramienta de modelado de geometrías que pueden llegar a tener altos niveles de complejidad mediante la creación, edición, documentación, renderización y análisis de superficies, sólidos, nubes de puntos y mallas poligonales. Fue desarrollado por Robert McNeel y Associates como un software agregado de AutoCAD de Autodesk, sin embargo, debido a sus grandes ventajas fue desarrollado como un programa aparte (McNeel & Associates, 2013).

Por otro lado, *Grasshopper* es un lenguaje de programación visual desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates. Es una herramienta que opera como plug-in dentro de la aplicación CAD *Rhinoceros 3D*. Es utilizado principalmente para programar algoritmos generativos. Muchos de los componentes de *Grasshopper* crean geometría 3D. Los programas pueden también contener otro tipo de algoritmos, tales como los numéricos y textuales, audiovisuales y aplicaciones hápticas.

Dentro de los componentes que se pueden usar en *Grasshopper* se encuentra *Ladybug Tools* que consiste en una colección de aplicaciones informáticas gratuitas que ayuda a los

ingenieros y arquitectos a crear diseños respetuosos con el medio ambiente. *Ladybug* importa archivos estándar de *EnergyPlus Weather* (.EPW) a *Grasshopper* y proporciona una variedad de gráficos interactivos en 3D para respaldar el proceso de toma de decisiones durante las etapas iniciales del diseño (Ladybug_Tools, 2022).

Cabe destacar que de todas las herramientas que ofrece *Ladybug Tools*, la más utilizada en este trabajo ha sido *Honeybee*, la cual permite realizar simulaciones de energía usando *EnergyPlus/OpenStudio*. También es importante aclarar que *Honeybee* en realidad no ejecuta simulaciones. *Honeybee* es una interfaz que crea instrucciones para otros programas ('motores') que ejecutan las simulaciones. Para la simulación realizada en este trabajo, técnicamente, se usará *OpenStudio* para enviar la información a través de *EnergyPlus* el cual crea un modelo de energía que rastrea el movimiento de calor dentro y fuera del edificio.

5.4 Datos meteorológicos para la simulación

Se han utilizado los datos meteorológicos de *EnergyPlus Weather* (.EPW), cuya base de datos contiene información para 3030 ubicaciones. Los datos meteorológicos están ordenados por región y país de la Organización Meteorológica Mundial.

Para este trabajo se ha utilizado *epwmap* (Figura 4), el cual se ha desarrollado como parte de *Ladybug tools* de manera que se pueda acceder a los archivos meteorológicos gratuitos mediante una interfaz única.

Para el caso de estudio se la información meteorológica se ha tomado de la base de datos Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC), desarrollada originalmente para su uso con *Calener*, un nuevo programa para el etiquetado energético de edificios en España, estos archivos meteorológicos cubren las 52 capitales de provincia españolas. *Calener* fue desarrollado por el Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla para el Gobierno de España. Los archivos meteorológicos se generaron sintéticamente utilizando *Climed* (software portugués desarrollado por Ricardo Aguiar) a partir de datos mensuales medios provenientes del Instituto Nacional de Meteorología de España (Big_Ladder_Software_LLC, 2022).

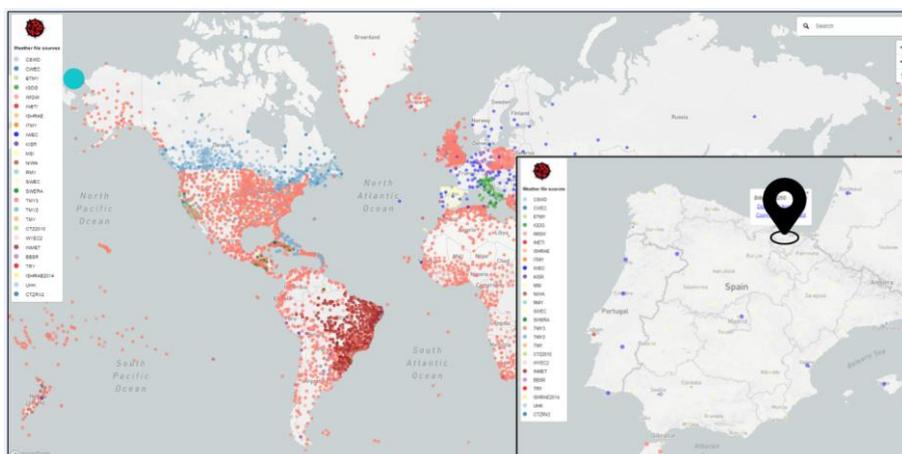


Figura 4: Spanish Weather for Energy Calculations (SWEC)-Bilbao

5.5 Descripción del Modelo paramétrico

El enfoque sistemático para lograr los objetivos del trabajo se ilustra en la Figura 5. Mediante los insumos definidos anteriormente se construye el algoritmo de simulación como un lenguaje visual de programación y modelado paramétrico para realizar un proceso de optimización y verificación del cumplimiento del CTE.

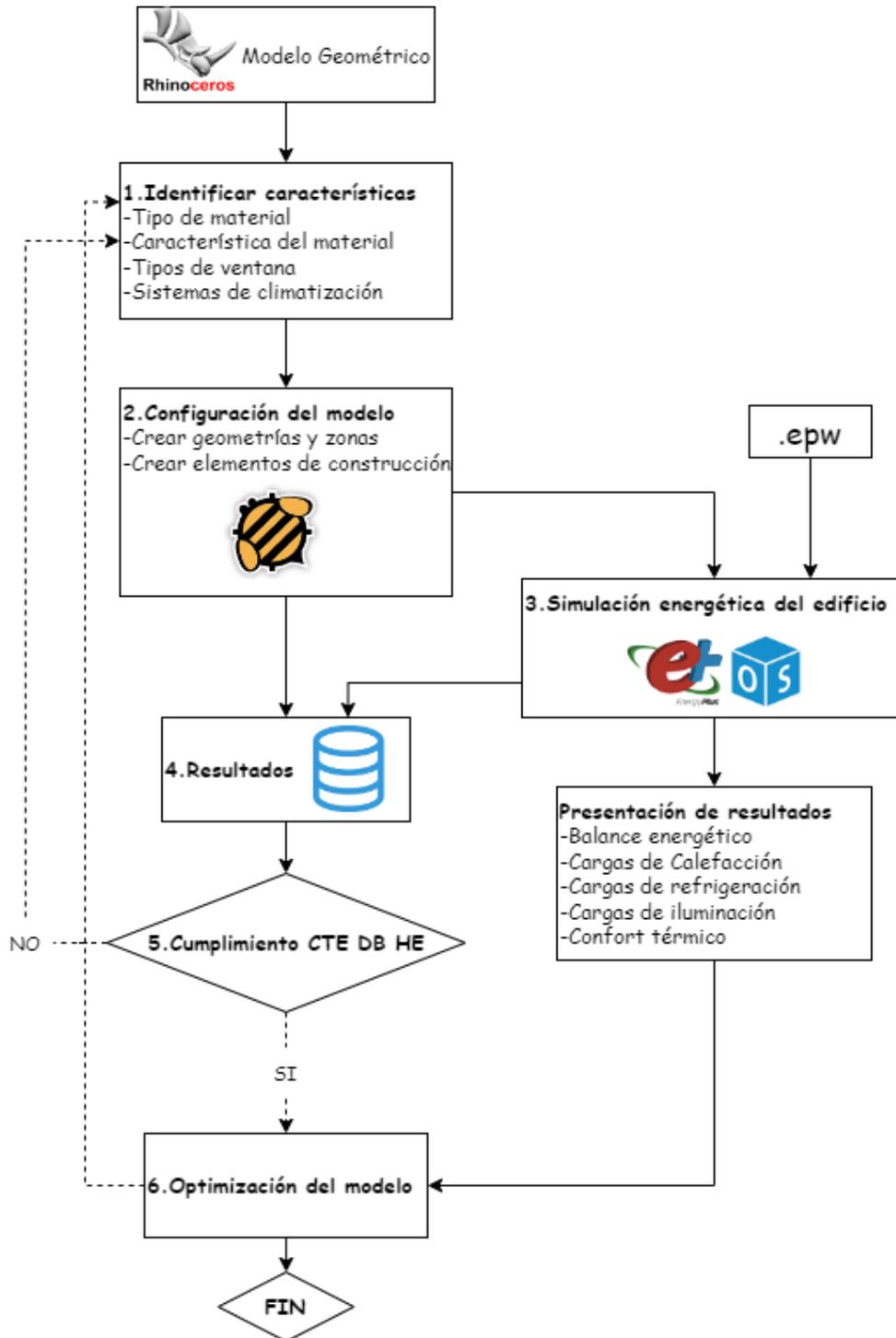


Figura 5: Flujo de trabajo del proceso mediante el cual se realizó la optimización
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los pasos seguidos para obtener el modelo paramétrico:

- I. **Geometría de zona de modelado:** El primer paso del flujo de trabajo consiste en crear una representación geométrica apropiada (Figura 6). Mediante sólidos 3D se ha modelado la distribución arquitectónica y el entorno que rodea el edificio incluida la topografía del suelo buscando que el modelo sea lo más representativo posible.

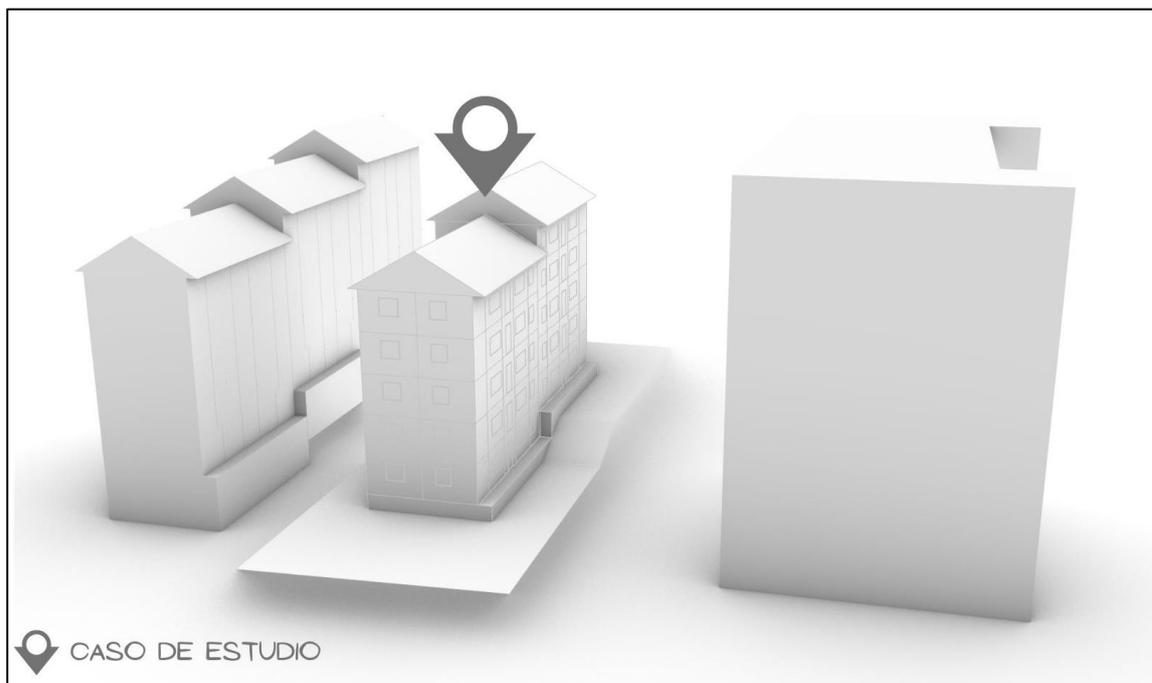


Figura 6: Geometría Rhinoceros

- II. **Asignar propiedades a las zonas:** A partir de las geometrías se definen zonas térmicas, es decir, convertir los sólidos que se han modelado en el software Rhinoceros en elementos que se puedan importar a *Energyplus*. Es posible tratar el edificio como una sola zona térmica, pero para lograr un mayor detalle se ha tratado cada habitación como una zona separada a través del componente "HB Room from Solid" (Figura 7). Posteriormente es posible definir las características de las zonas térmicas, tales como como elegir los espacios que van a estar climatizados (Figura 9), las sombras, las construcciones de fachadas, cubiertas, particiones interiores (Figura 8), ventana y suelo, todo el proceso se ha automatizado de manera que se pueda modificar cualquier característica de forma sencilla.

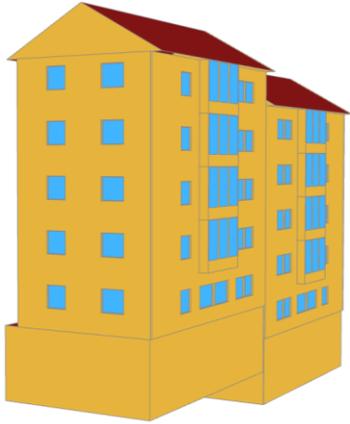


Figura 7: Modelo Honeybee



Figura 8: Modelo particiones interiores

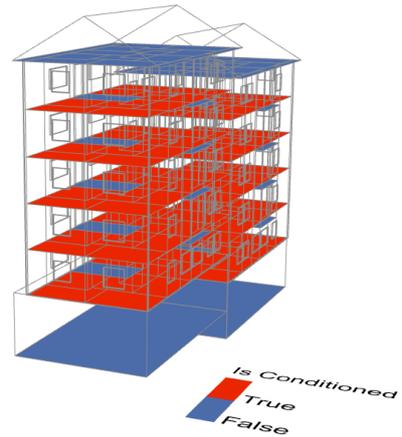


Figura 9: Zonas acondicionadas

III. **Diseño de la envolvente:** Para la definición de los cerramientos que se pretende simular se han definido las características físicas del material tales como su espesor, conductividad, calor específico, densidad... y se han dispuesto capa por capa en una sola construcción mediante el componente "HB Opaque Construction" (Figura 10).

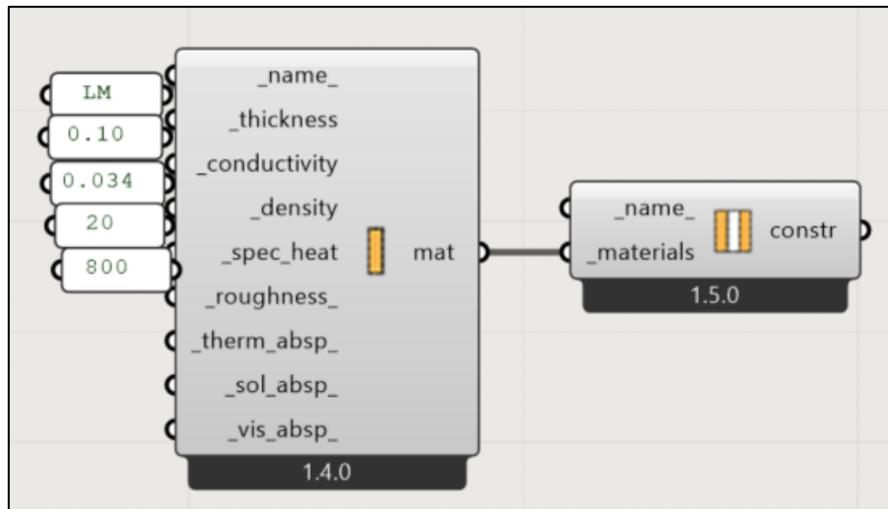


Figura 10: Elemento de construcción de materiales

En los cerramientos que presentan cámara de aire ventilada (Fa.4 y Fa.5), se ha diseñado dicha cavidad como una habitación separada (Figura 11) y se ha configurado de modo que no tenga cargas excepto la tasa de infiltración. Esto incluye retirar a todas las personas, la iluminación, el equipo, el agua caliente y la ventilación mecánica. De igual forma, el sistema de calefacción/refrigeración y los puntos de ajuste también se eliminan. Se han considerado espacios con mucha infiltración dado que el intercambio de aire es continuo a lo largo del año, de esta manera se asegura la dinámica de

convección de la fachada ventilada haciendo que el aire de dicha cavidad no esté a la misma temperatura del aire exterior.

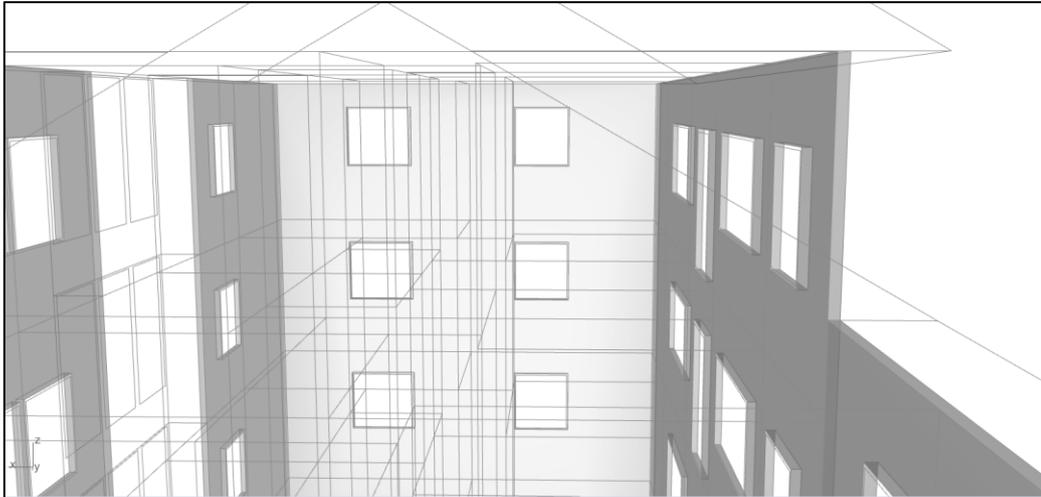


Figura 11: Modelo cámara de aire ventilada

Para la simulación de la fachada vegetal (Fa.5), se ha creado un material de vegetación que representa tanto a las plantas como al suelo por medio del componente "HB Opaque Construction" (Figura 12), para construir el modelo se ha tenido en cuenta parámetros como: la altura de las plantas, el índice de área foliar, la reflectividad de la hoja, la emisividad de la hoja, el espesor, la conductividad del suelo, densidad, calor específico, absorción térmica, entre otros.

A pesar de que el componente no está diseñado para modelar fachadas verticales, es posible utilizarlo para obtener una estimación de los beneficios de una fachada verde, dado que este trabajo se centra en el concepto de energía y transferencia de calor.

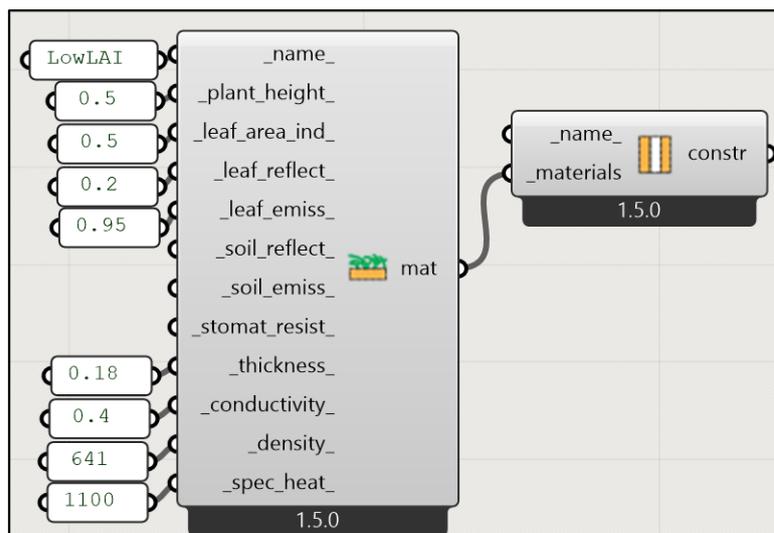


Figura 12: Elemento de construcción de material vegetal.

IV. **Configuración de la simulación:** Después de definir las características geométricas de las zonas térmicas, la demanda de energía del edificio caso de estudio se calcula ejecutando simulaciones de EnergyPlus (Figura 14) a través de la interfaz OpenStudio, para ello se exportan los siguientes componentes de Honeybee:

- i) “HB ProgramType” para asignar valores de diseño para cargas internas, debido a ocupantes, iluminación y equipo;
- ii) “Schedules” para definir horarios adecuados para tasas de infiltración, temperaturas de consigna y cargas internas;
- iii) Sistema de climatización para vincular la información de la zona con las especificaciones de HVAC.

Posteriormente, el resultado “HB Model” está vinculado a “HB Model to OSM”: este último también está conectado con el “epw_file” y es el componente clave para la simulación del modelo dado que compila todas las entradas que preparamos, completa los espacios en blanco con valores predeterminados y prepara un conjunto de instrucciones para el motor de simulación de OpenStudio. Este conjunto de instrucciones se guarda en formato de archivo OSM.

OpenStudio actúa como un centro entre Honeybee y Energyplus, lo que amplía el conjunto de funciones y características de las disponibles solo en Energyplus.

V. **Resultados:** Finalmente se obtienen los resultados en diferentes formatos de los que el usuario puede disponer. Para el caso de estudio, se han tomado en formato de archivo SQL y Honeybee proporciona algunos componentes de visualización únicos que permiten a los usuarios explorar los resultados de varias maneras diferentes (Figura 15). Los usuarios pueden personalizar varios parámetros, como las horas de trabajo, el umbral mínimo y máximo y el período del estudio. También, es posible importar y visualizar los valores horarios del estudio anual para que los usuarios puedan acceder a valores en tiempo real para cualquier hora del año, y potencialmente identificar las horas problemáticas del año para generar soluciones de diseño apropiadas.

En las siguientes figuras se ilustra de forma general la programación del algoritmo visual para llevar a cabo la simulación.

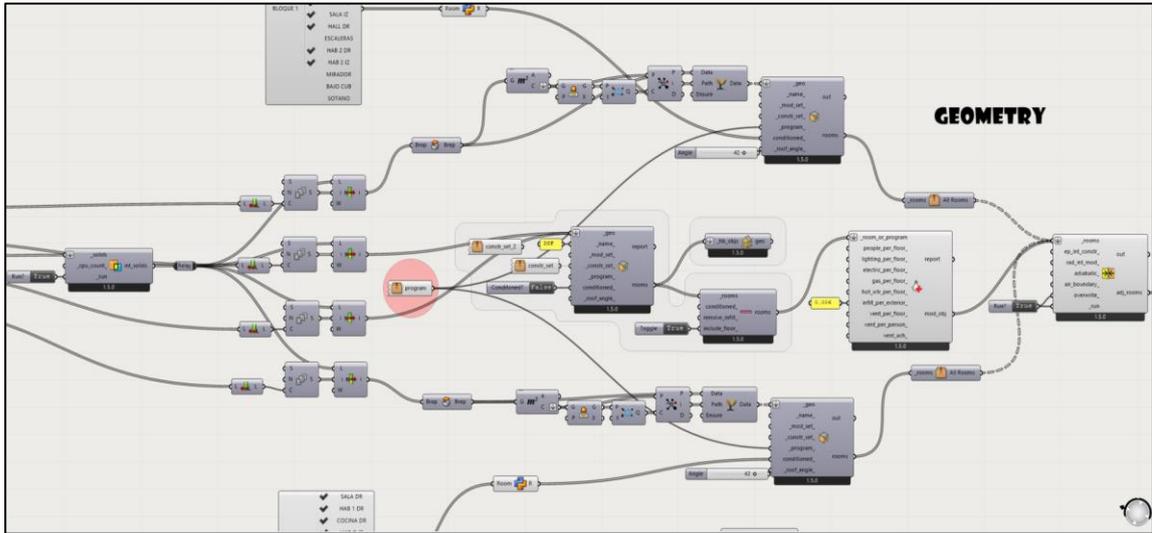


Figura 13: Diseño paramétrico de la geometría

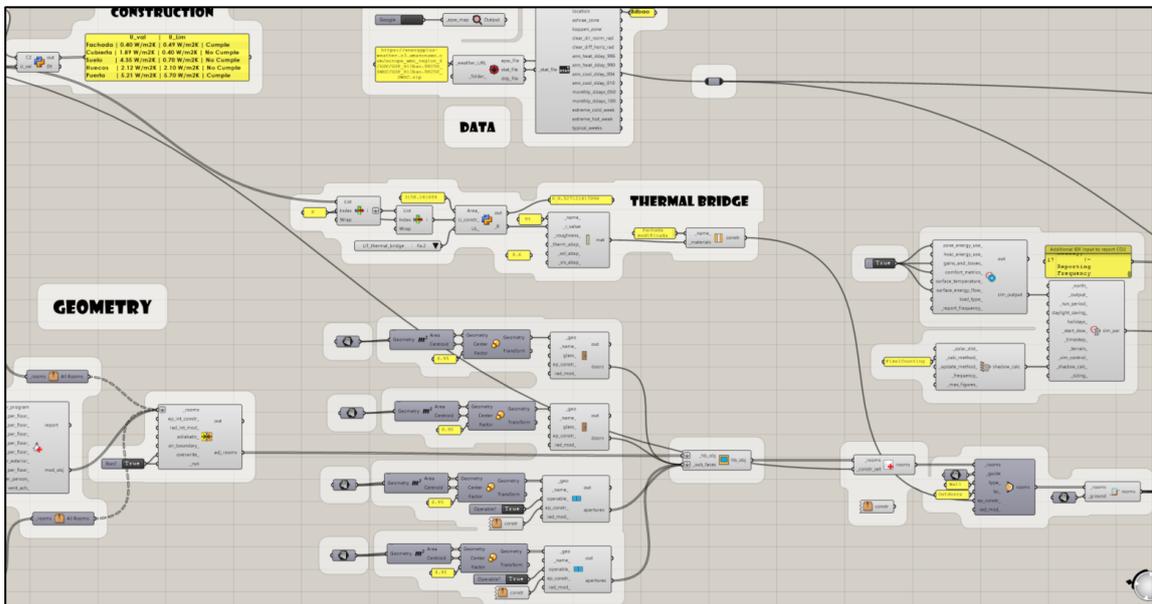


Figura 14: configuración de la simulación

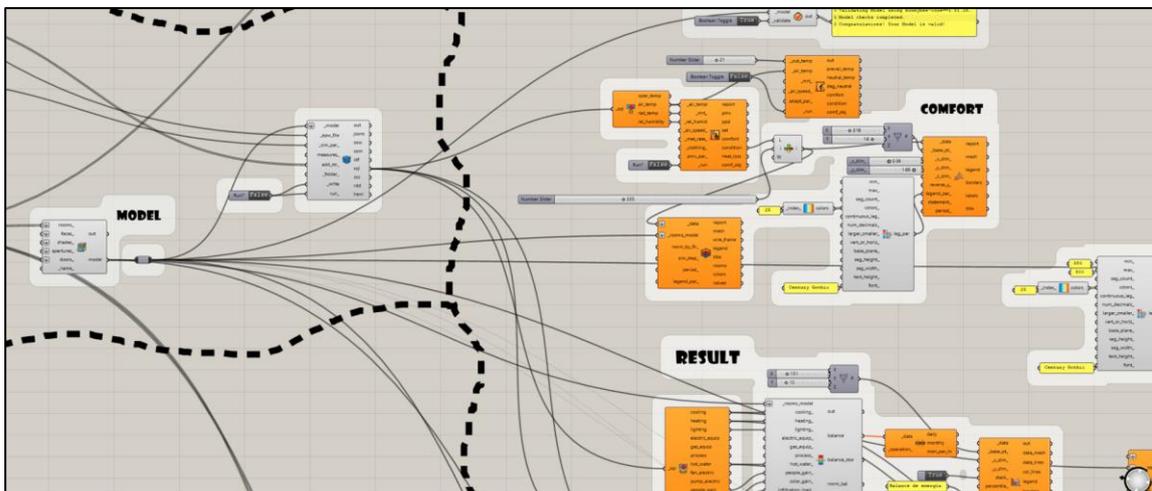


Figura 15: Análisis y visualización de resultados

5.6 Criterios de la sostenibilidad para evaluar las soluciones constructivas.

En base a los pilares del desarrollo sostenible definidos en el apartado 4.1, los criterios de sostenibilidad que se pretende evaluar en este trabajo con el fin de determinar los beneficios de las soluciones constructivas son los siguientes:

5.6.1 Análisis energético:

Desde el punto de vista ambiental, el objetivo de la eficiencia energética es reducir la cantidad de energía requerida para proporcionar productos y servicios. Para el caso, aislar una vivienda permite que un edificio use menos energía de calefacción y refrigeración con el fin de lograr y mantener una temperatura agradable.

En ese sentido y una vez caracterizada energéticamente la vivienda se analizará el consumo energético de las distintas medidas de mejora mediante la influencia en la demanda de energía de la vivienda tras la implementación de las mismas. Se calculará el ahorro energético que cada medida tendrá de manera individual sobre la vivienda para definir distintos escenarios de ahorro energético.

El estudio se llevará a cabo con el análisis del balance de energía y el consumo total de calefacción y refrigeración de cada una de las medidas, dado que son los parámetros más influenciados en rehabilitación de fachadas.

5.6.2 Confort interior:

A diferencia de las dimensiones ambientales y económicas, la mayoría de los criterios asociados a la dimensión social son cualitativos y, por tanto, su cuantificación en el contexto del sistema de evaluación estará sujeta a decisiones menos objetivas. A este respecto se evaluará el confort interior mediante modelos de confort. Un modelo de confort es una definición estándar para condiciones ambientales aceptables con los sistemas de calefacción y refrigeración activos, por lo tanto, es una variable que afecta la cantidad de energía que requiere un edificio para mantener condiciones confortables. Sirven de medida para evaluar la efectividad de cualquier estrategia de diseño pasiva, es decir, tácticas que mejoran la comodidad humana sin sistemas mecánicos. Esto podía incluir los dispositivos de control solar, la ventilación natural, las características de las ventanas y para el caso de estudio es de interés la composición de la fachada. Todos los modelos de confort evalúan el impacto de calor fisiológico, que es el equilibrio de calor que entra y sale del cuerpo humano. La parte más importante es seleccionar el modelo de confort más apropiado para las estrategias de diseño que se pretende probar, para el caso de estudio se optado por el modelo PMV que se describe a continuación:

Voto medio previsto (PMV):

El modelo de Voto Promedio Pronosticado (PMV) es un modelo ampliamente reconocido

para determinar el confort de los edificios cuando los dispositivos de calefacción y refrigeración se encuentran activos. El modelo fue desarrollado por Povl Ole Fange en la década de 1970. Se basa en un balance de calor fisiológico del cuerpo humano e intenta predecir un voto promedio de un gran grupo de personas en una escala de sensación térmica de 7 puntos donde: +3=calor, +2=calor, +1=ligeramente cálido, 0=neutro, -1=ligeramente frío, -2=fresco, -3=frio (McGraw-Hill, 1973).

El balance de calor depende de muchos factores, siendo de gran influencia las condiciones ambientales. Si existen altas diferencias de temperatura se producirá una mayor ganancia o pérdida de calor y la alta humedad hace que sea más difícil refrescarse. El balance fisiológico también depende de la composición corporal y el metabolismo de las personas.

En este trabajo se evaluará el confort interior con ayuda de las herramientas de ladybug tools, mediante el componente (LB PMV Comfort), que calcula el valor del PMV siguiendo la siguiente ecuación ((1).

$$PMV = (0,303 * exp^{-0,036*M} + 0,028) * [(M - W) - H - E_c + C_{res} + E_{res}] \quad (1)$$

Donde:

M: masa metabólica [W/m²]

W: Potencia mecánica efectiva [W/m²]

H: Pérdida de calor por convección, radiación y conducción [W/m²]

E: Pérdida de calor por evaporación en la piel [W/m²]

Cres: Intercambio de calor por convección a través de la respiración [W/m²]

Eres: Pérdida de calor por evaporación a través de la respiración [W/m²]

5.6.3 Análisis económico:

Se tomarán los escenarios de medidas de mejora planteados en el apartado 5.1.3 y se calcularán los ahorros económicos asociados a cada medida para poder considerar la sostenibilidad desde el punto de vista económico. Se estimarán los costes de inversión necesarios para implementar cada medida y con los ahorros se calcularán los periodos de retorno de cada inversión en años. Se utilizarán estos resultados para decidir la viabilidad económica de cada medida, suponiendo una medida económicamente viable aquella que cuya inversión se pueda recuperar en un periodo de tiempo relativamente corto.

Se calculará el “Payback” o plazo de recuperación de cada medida de mejora, el cual es un criterio para evaluar inversiones que se define como el periodo de tiempo (años) requerido para recuperar el capital inicial de una inversión. Es un método estático para la evaluación de

inversiones y ayudará a decidir si una medida es rentable o viable desde el punto de vista económico. El valor del Payback se calcula con la ecuación (2).

$$Payback \text{ (años)} = \frac{I_0}{F} \quad (2)$$

Donde:

- I_0 : Inversión inicial del proyecto
- F : Valor de los flujos de caja

Para el caso de rehabilitación energética, los valores de inversión inicial y flujo de caja se corresponden con lo siguiente:

- El valor de los flujos de caja: Ahorro de energía [kWh] * Precio de la energía [€/kWh]
- Inversión inicial de proyecto: Presupuesto de rehabilitación de fachada [€]

5.7 Cumplimiento CTE DB HE: Ahorro de Energía

El Documento Básico (DB) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir el requisito básico de ahorro de energía. Las secciones del DB se corresponden con las exigencias básicas HE 0 a HE 6. La correcta aplicación de cada sección supone el cumplimiento de la exigencia básica correspondiente (CTE, 2019).

Al realizar la comprobación de las exigencias básicas (Tabla 5), para el caso de reforma de más del 25% de la envolvente térmica para un edificio existente y considerando que las actuaciones de reforma que se plantean en el caso de estudio no incluyen modificaciones sobre las instalaciones, se excluyen de la aplicación las exigencias HE.0, HE.2, HE.3, HE.4 y HE.5.

HE 0: Limitación del consumo energético	No es de aplicación para el caso de estudio
HE 1: Limitación de la demanda energética	Si es de aplicación para el caso de estudio
HE 2: Rendimiento de las instalaciones térmicas	No es de aplicación para el caso de estudio
HE 3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación	No es de aplicación para el caso de estudio
HE 4: Contribución solar mínima de agua caliente	No es de aplicación para el caso de estudio
HE 5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica	No es de aplicación para el caso de estudio

Tabla 5: Resumen aplicación de exigencias básicas CTE DB HE

5.7.1 CTE DB-HE 1: Limitación de la demanda energética:

Para el cumplimiento del DB-HE 1 solo se tendrán en cuenta aquellos elementos constructivos que vayan a ser modificados, así como el valor límite máximo del coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica establecido para rehabilitaciones. Para ello, es necesario definir los siguientes parámetros:

A. Zonificación climática:

El edificio objeto del proyecto se sitúa en el municipio de Sestao (provincia de Bizkaia), con una altura sobre el nivel del mar de 68 m. Le corresponde, conforme al Apéndice B de CTE DB HE 1, la zona climática **C1**. La pertenencia a dicha zona climática define las solicitaciones exteriores para el cálculo de demanda energética, mediante la determinación del clima de referencia asociado.

B. Compacidad (V/A):

Relación entre el volumen encerrado por la envolvente térmica (V) del edificio (o parte del edificio) y la suma de las superficies de intercambio térmico de dicha envolvente ($A = \sum A_i$). Se expresa en m^3/m^2 (3). La compacidad del edificio será un insumo para determinar el valor límite del coeficiente global de transmisión de calor K a través de la envolvente térmica del edificio (CTE, 2019).

$$V/A = \frac{V}{\sum A_i} = 2,28 \text{ m}^3/\text{m}^2 \quad (3)$$

C. Definición de la envolvente térmica:

El concepto de envolvente térmica se define en el Anejo C. Consideraciones para la definición de la envolvente térmica de la siguiente forma:

“La envolvente térmica está compuesta por todos los cerramientos y particiones interiores, incluyendo sus puentes térmicos, que delimitan todos los espacios habitables del edificio o parte del edificio. No obstante, a criterio del proyectista:

a) podrá incluirse alguno o la totalidad de los espacios no habitables.

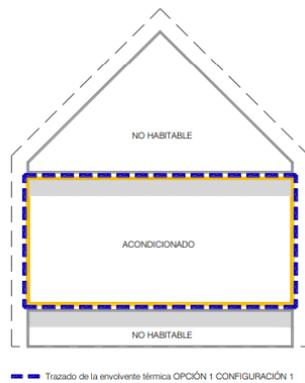
b) podrán excluirse espacios tales como:

i) espacios habitables que vayan a permanecer no acondicionados durante toda la vida del edificio, tales como escaleras, ascensores o, pasillos no acondicionados,

ii) espacios muy ventilados, con una ventilación permanente de, al menos, 10 dm^3/s por m^2 de área útil de dicho espacio,

iii) espacios con grandes aberturas permanentes al exterior, de al menos 0,003 m² por m² de área útil de dicho espacio.”

Para el caso de estudio se ha considerado como envolvente térmica aquellos espacios que estarán acondicionados (Figura 16), excluyendo espacios tales como el sótano, la planta bajo cubierta y los miradores. Sin embargo, se han incluido las escalas a pesar de no estar acondicionadas, pero se encuentran dentro de la superficie de cada planta.



GEOMETRIA E.T

Configuración:

Acondicionados: PB, P1, P2, P3 Y P4

N.H: Planta de sótano + planta bajo cubierta

Envolvente térmica según esquema

Figura 16: Esquema general de la envolvente térmica

Fuente: CTE-DB HE 2019

D. Caracterización de los elementos que componen la envolvente térmica, y valores límite:

Según el CTE Para evitar descompensaciones entre la calidad térmica de diferentes espacios, cada uno de los cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica tendrán una transmitancia no superior a los valores indicados en la Figura 17 en función de la zona climática en la que se ubique el edificio (CTE, 2019).

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U_{lim} [W/m²K]

Elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_s, U_M)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_c)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_T) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U_{MD})	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_H)*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%				5,7		

*Los huecos con uso de escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de U_H en un 50%.

Figura 17: Valores límite de transmitancia CTE DB HE
Fuente: CTE-DB HE 2019

El valor de la transmitancia de las soluciones propuestas se ha calculado a través de las herramientas de Ladybug tools, que calcula la transmitancia de la fachada U [W/m²•K] haciendo uso de las propiedades térmicas de los materiales definidos y mediante la expresión (4):

$$U = \frac{1}{R_t} \tag{4}$$

Siendo:

- R_t : La resistencia térmica de todo el componente constructivo. [m²•K/W]

Se calcula mediante la suma de las resistencias de cada capa homogénea que lo compone mediante la expresión:

- $R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$

Siendo:

- $R_1, R_2 \dots R_n$: La resistencia térmica de cada capa [m²•K/W]
- R_{si}, R_{se} : La resistencia térmica superficial referente al aire interior y exterior [m²•K/W].

E. Puentes térmicos:

En el presente apartado se recoge el procedimiento de cálculo para los diferentes puentes térmicos existentes actualmente, en el edificio de referencia según normativa CTE y en el edificio reformado. Adicionalmente dicho valor de transmitancia es necesario para realizar el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor.

Dado que el motor de cálculo “*Energy plus*” no está diseñado para realizar el cálculo de puentes térmicos, se plantea una solución alternativa que permita incluirlos dentro de la simulación.

Se propone utilizar el valor de la transmitancia total del cerramiento ((5) como la sumatoria del producto de la transmitancia lineal y la longitud de los puentes térmicos dividido entre el área del cerramiento más la transmitancia media de la fachada correspondiente.

$$U_T = \frac{\sum \psi * L + A_T * U_o}{A_T} \quad (5)$$

Donde:

- U_T : Transmitancia total [$W/m^2 \cdot K$]
- Ψ : Transmitancia lineal del puente térmico [$W/m^2 \cdot K$]
- L : Longitud del puente térmico [m]
- A_T : Área total del cerramiento [m^2]
- U_o : Transmitancia media del cerramiento [$W/m^2 \cdot K$]

En la Tabla 6 se recogen los diferentes puentes térmicos que se han encontrado para el caso de estudio:

PUENTE TÉRMICO	LONGITUD [m]
Frente de forjado:	230,6
Frente de cubierta:	46,12
Pilar integrado:	91,92
Pilar de esquina:	61,28
Jamba - alféizar:	109,2
Dintel:	64,8

Tabla 6: Tipo y longitud de puentes térmicos

Los cálculos de flujo de calor y la transmitancia lineal del puente térmico se ha realizado mediante THERM, un programa informático para el análisis de la transmisión de calor bidimensional a través de elementos constructivos. Con la transmitancia lineal y la

longitud de cada puente térmico se ha adaptado la transmitancia total del cerramiento en el modelo de cálculo.

F. Cumplimiento del coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica (k) del edificio o parte del mismo, con uso residencial:

El coeficiente global de transmisión de calor (K global) se puede entender cómo la media ponderada de la transmitancia térmica de cada elemento de la envolvente térmica según su área ((6). Esta área de intercambio de la envolvente excluye las medianerías y cualquier cerramiento en el que se considere que no se produce un intercambio de calor. A la transmitancia térmica media se le añade la presencia de puentes térmicos, cuya contribución será menor cuanto mayor sea el área de intercambio envolvente.

$$K = \sum x Hx / A_{int} \quad (6)$$

donde:

- Hx [W/K]: Corresponde al coeficiente de transferencia de calor del elemento x perteneciente a la envolvente térmica (incluyendo sus puentes térmicos). Se incluyen aquellos elementos en contacto con el terreno, con el ambiente exterior, y aquellos en contacto con otros edificios u otros espacios adyacentes (Rodríguez Pérez & Rodríguez González, 2021).
- A_{int} [m²]: Es el área de intercambio de la envolvente térmica obtenida como suma de los distintos componentes considerados en la transmisión de calor. Excluye, por tanto, las áreas de elementos de la envolvente térmica en contacto con edificios o espacios adyacentes exteriores a la envolvente térmica (Rodríguez Pérez & Rodríguez González, 2021).

El HE1 del CTE DB HE limita el coeficiente global de transmisión de calor (K) a través de la envolvente térmica según la zona climática de invierno y la compacidad del edificio (Figura 18).

Tabla 3.1.1.b - HE1 Valor límite K_{lim} [W/m²K] para uso residencial privado

	Compacidad V/A [m ³ /m ²]	Zona climática de invierno					
		α	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	V/A ≤ 1	0,67	0,60	0,58	0,53	0,48	0,43
	V/A ≥ 4	0,86	0,80	0,77	0,72	0,67	0,62
Cambios de uso. Reformas en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio	V/A ≤ 1	1,00	0,87	0,83	0,73	0,63	0,54
	V/A ≥ 4	1,07	0,94	0,90	0,81	0,70	0,62

Los valores límite de las compacidades intermedias ($1 < V/A < 4$) se obtienen por interpolación.

En el caso de ampliaciones los valores límite se aplicarán sólo en caso de que la superficie o el volumen construido se incrementen más del 10%.

Figura 18: Valor límite del coeficiente global de transmisión de calor

Fuente: CTE-DB HE 2019

El edificio de estudio se encuentra situado en la zona climática de invierno “C” y su compacidad es de 2,28, tal y como se ha explicado en el apartado A y B respectivamente. Para cambios de uso o reformas en edificios con una compacidad entre 1 y 4, es necesario interpolar el valor límite entre 0,73 y 0,81 W/m²·K proporcionalmente a la compacidad. Se trata de una proporción lineal y además de analíticamente, se puede obtener una aproximación del valor de forma gráfica como se ilustra a continuación (Gráfico 5):

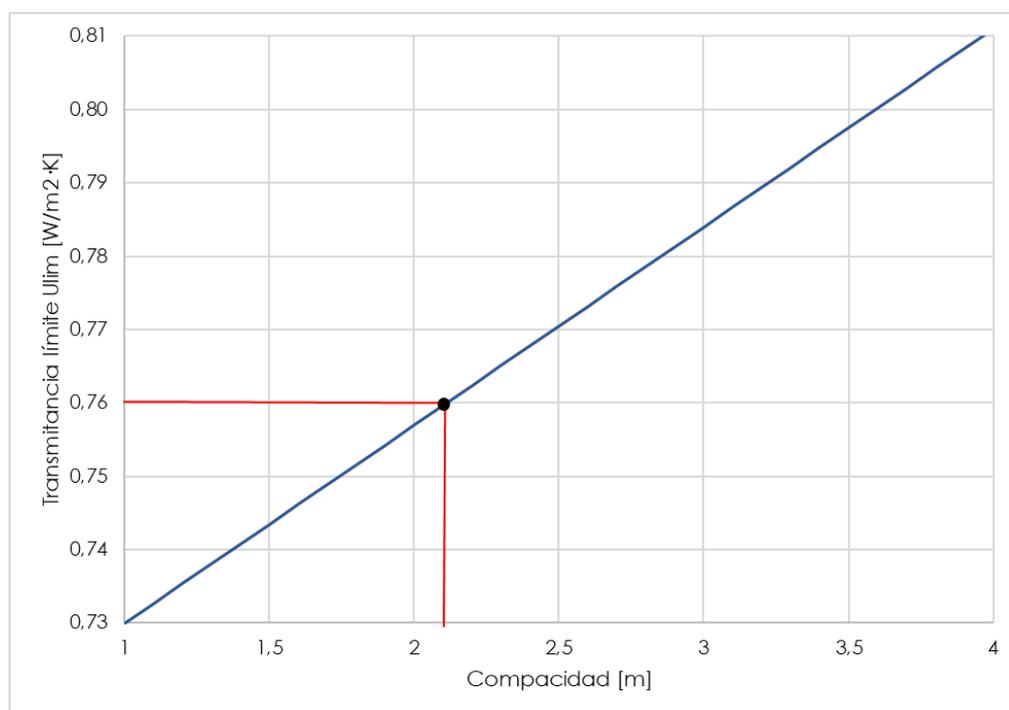


Gráfico 5: Valor [K] caso de estudio

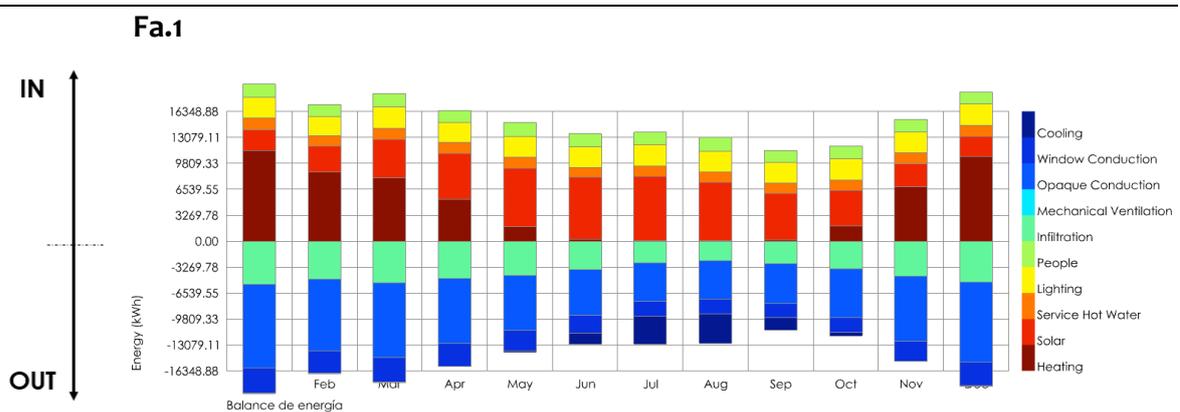
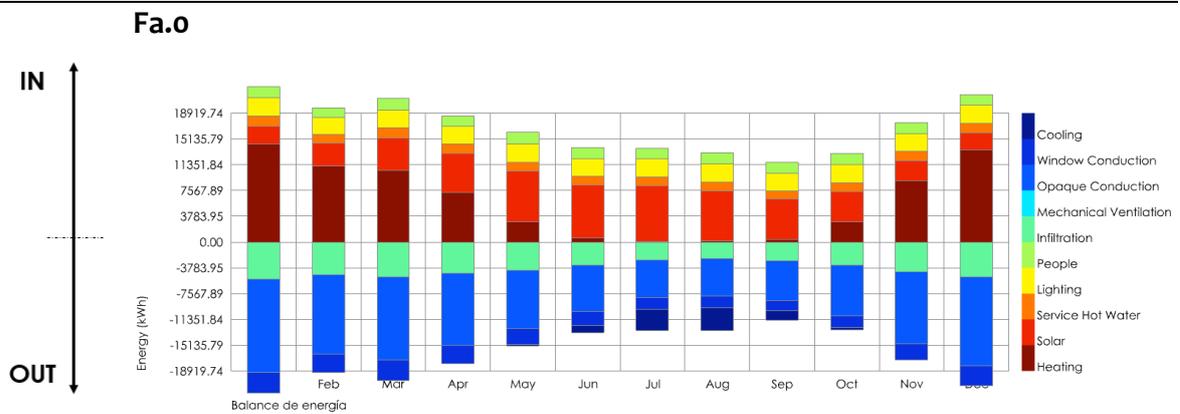
El valor límite obtenido redondeando el segundo decimal es de 0,76 W/m² ·K.

6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada alternativa atendiendo a los criterios de sostenibilidad mencionados.

6.1 Balance energético anual del edificio

La Tabla 7 contiene los balances energéticos del edificio mes a mes, contabilizando la energía perdida o ganada por transmisión térmica al exterior a través de los elementos que conforman la envolvente del edificio para cada cerramiento simulado.



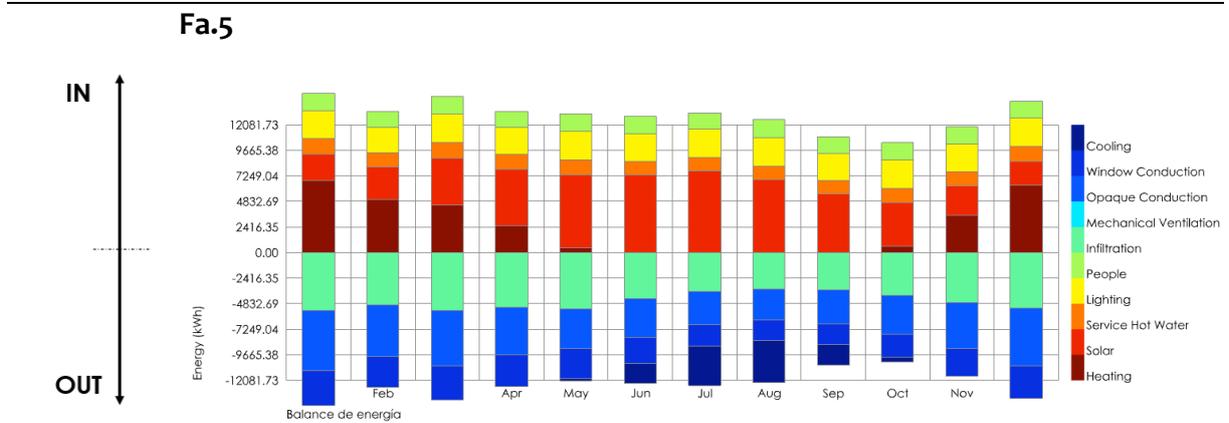
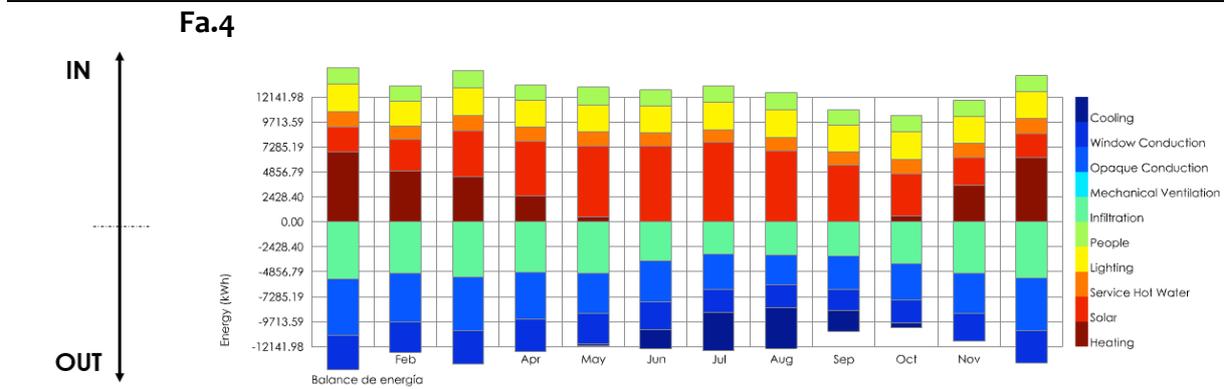
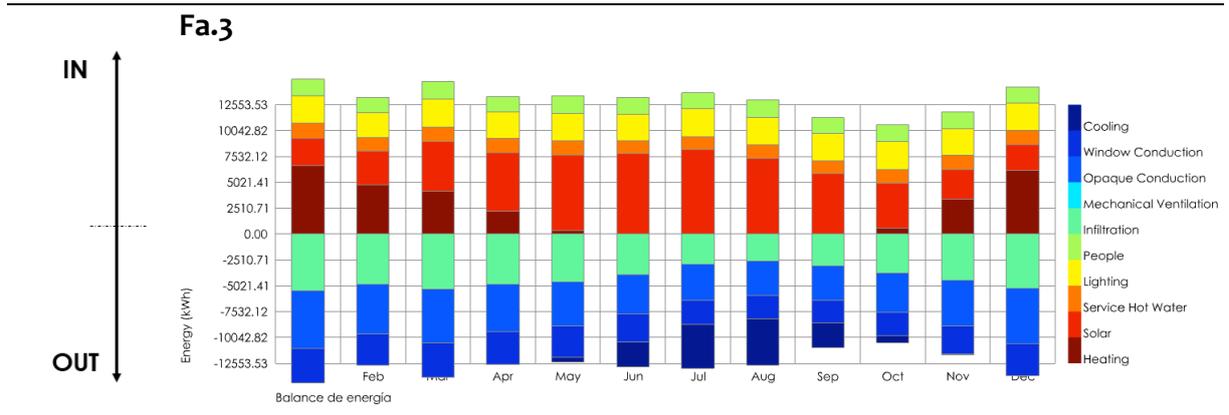
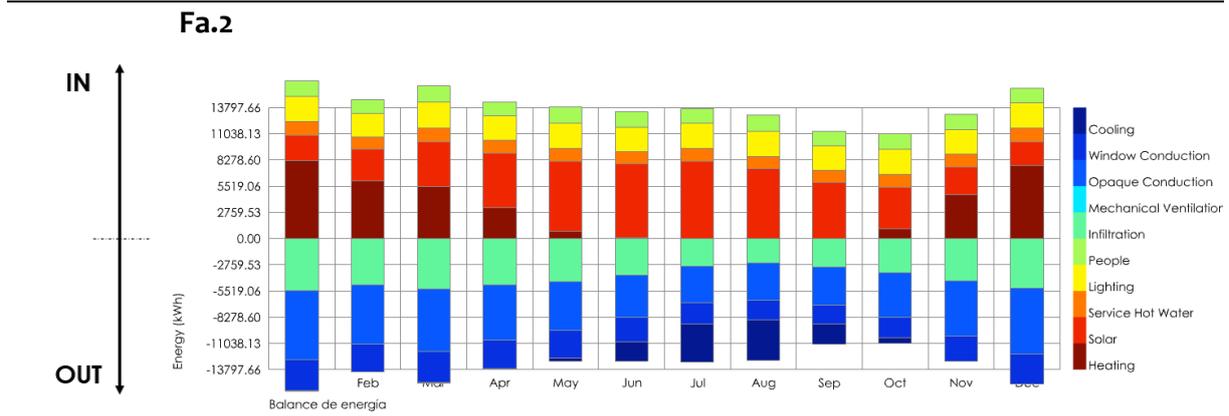


Tabla 7: Balances de energía

El balance de energía se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no se crea ni se destruye. Los anteriores gráficos (Tabla 7) resumen las fuentes de calor que entran y salen de la zona. El calor que entra al edificio, puede ser el calor de las personas, la radiación solar a través de las ventanas y el calor del sistema de calefacción, por otro lado, las pérdidas de calor del edificio pueden ser el resultado de la conducción a través de la envolvente, la infiltración o la ventilación. Todo lo que está por encima de cero se refiere a la energía que entra al edificio y lo que está por debajo de cero se refiere a la energía que sale de la zona.

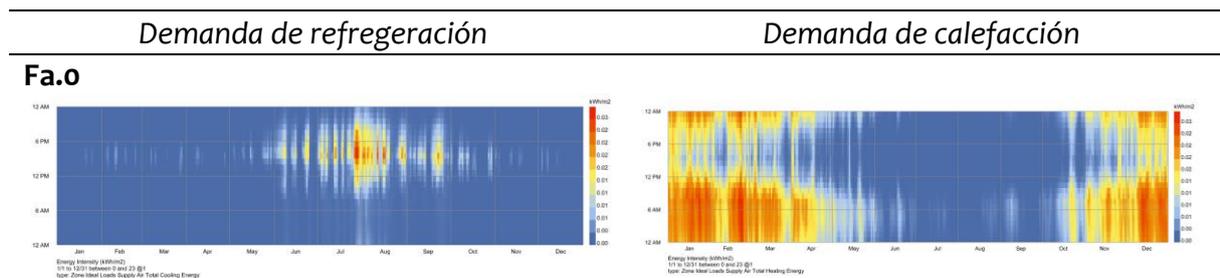
En el balance de la fachada original (Fa.0) se observa que uno de los elementos por los que se produce una mayor pérdida de energía es a través de la envolvente (huecos y fachada), haciendo que la demanda de calefacción sea elevada. En los meses invernales, noviembre hasta abril, los elementos opacos o cerramientos (Opaque conduction), influyen mucho sobre la demanda de energía. Sin embargo, a medida que se mejora el tipo de cerramiento, el balance empieza a ser más constante o a igualarse en todos los meses y la demanda de calefacción disminuye considerablemente al reducir la pérdida de energía a través de la envolvente.

Para el cerramiento Fa.0 se puede apreciar en el balance de energía que los elementos opacos (particiones y fachada) son los responsables del 75% de las pérdidas de energía y el resto es debido a la infiltración y las ventanas, lo que claramente justifica la intervención sobre la fachada. Por otro lado, los cerramientos Fa.3, Fa.4 y Fa.5 consiguen reducir estas pérdidas por debajo del 51% de las pérdidas totales a lo largo de todo el año.

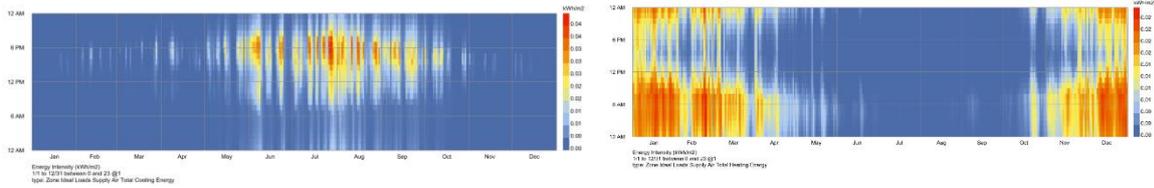
Los mejores resultados se han obtenido en la fachada vegetal (Fa.5), donde la mayor pérdida de energía no se da por el cerramiento sino por infiltraciones, por otra parte, los peores resultados se han obtenido de la adición de aislamiento por inyección en la cámara de aire, donde las pérdidas de energía por el cerramiento siguen siendo superior al 70%.

6.2 Demanda energética mensual de calefacción y refrigeración

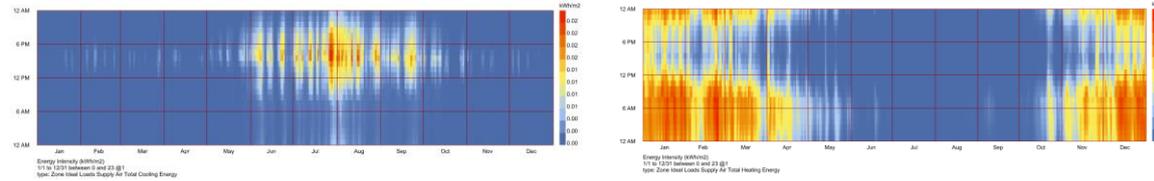
Atendiendo únicamente a la demanda energética a cubrir por los sistemas de calefacción y refrigeración, las necesidades energéticas y de potencia útil instantánea a lo largo de la simulación anual se muestran en los siguientes gráficos (Tabla 8):



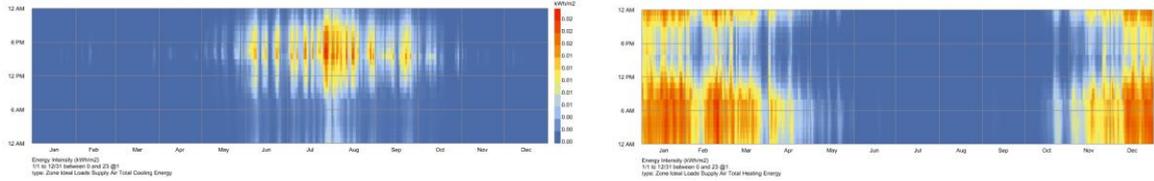
Fa.1



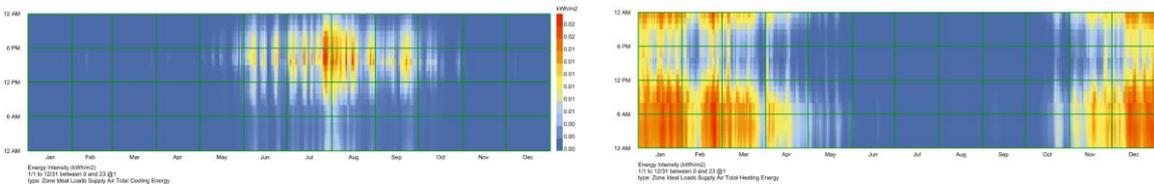
Fa.2



Fa.3



Fa.4



Fa.5

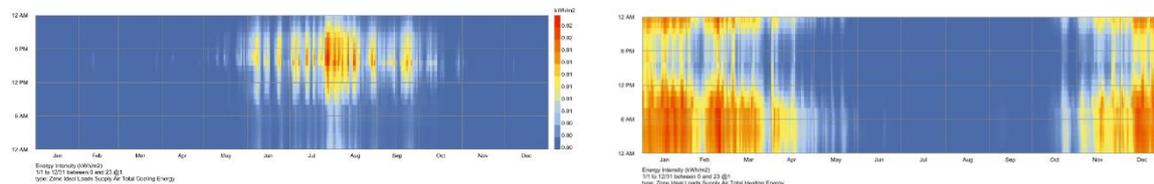


Tabla 8: gráficos de color horarios de calefacción y refrigeración

En la Tabla 8 los gráficos de color que representan los meses y las horas en lo que se requiere mayor energía de calefacción y refrigeración, el cambio de tipo de cerramiento no afecta a la demanda en ese sentido, pero si la cantidad de energía necesaria. Esto se puede apreciar que los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre se genera una alta demanda de calefacción y entre los meses de junio, julio y agosto se genera demanda de refrigeración especialmente a medio día. Además, podemos observar una gran diferencia entre la demanda de calefacción y refrigeración, la segunda es mucho menor como consecuencia de la zona climática donde se encuentra ubicado el edificio.

Ref.	Demanda anual de calefacción [kWh/m ²]	Demanda anual de refrigeración [kWh/m ²]	Demanda total [kWh/m ²]
Fa.0	32,54	16,81	49,35
Fa.1	23,61	18,05	41,66
Fa.2	17,45	19,44	36,89
Fa.3	10,53	21,17	31,70
Fa.4	10,90	19,30	30,20
Fa.5	9,84	19,65	29,49

Tabla 9: Demanda de calefacción y refrigeración

Si analizamos la demanda total de energía (Tabla 9), observamos una clara reducción, especialmente influenciada por la reducción de la demanda de calefacción. La diferencia entre la demanda de energía total entre la fachada actual y cerramientos como el SATE (Fa.3), la fachada ventilada (Fa.4) y la fachada vegetal (Fa.5), es superior al 35%.

De los diferentes sistemas analizados, el sistema que más consigue reducir la demanda de calefacción es la fachada vegetal (Fa.5) con una media de reducción de la demanda de calefacción del 70 %. Muy de cerca le sigue el sistema SATE (Fa.3) con una media de reducción de la demanda de calefacción del 68% y la fachada ventilada (Fa.4) con un 67 %. Aunque son sistemas distintos, la diferencia en cuanto a demanda de calefacción es muy pequeña. Por otro lado, los sistemas de fachada ventilada y fachada vegetal presentan una mayor reducción de la demanda de refrigeración, cuya causa se le atribuye a la presencia de la cámara de aire ventilada en los dos cerramientos.

Los sistemas de inyección de cámara de aire (Fa.2) y el trasdosado (Fa.3) presentan una reducción de la demanda de calefacción del 27% y 46% respectivamente.

6.3 Modelos de confort

El modelo de confort para el caso de estudio se ha realizado siguiendo el modelo del Voto Media Previsto (PMV) descrito en el apartado 5.6.2 y teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Temperatura del aire
- Humedad
- Velocidad del aire
- Temperatura radiante
- Ropa
- Metabolismo de la persona

Los valores de temperatura del aire, temperatura radiante y humedad fueron extraídos del modelo de energía, mientras que el resto de variable se han definido en base a la ocupación y las necesidades que podría tener un edificio de viviendas común, datos que se pueden

extraer directamente de la base de datos de “honeybee”. El rango de temperatura dentro del cual se puede estar confortable se ha definido entre los 21°C y 23°C.

La Tabla 10 contiene la visualización de los resultados de simulación a lo largo de todo el año y a nivel de zona térmicas como geometría de habitación coloreada de cada tipo de fachada. Muestra una representación booleana de números enteros que indican si las condiciones de entrada son aceptables de acuerdo con el parámetro de comodidad asignado.

Los valores son uno de los siguientes:

- 0 = incómodo
- 1 = cómodo

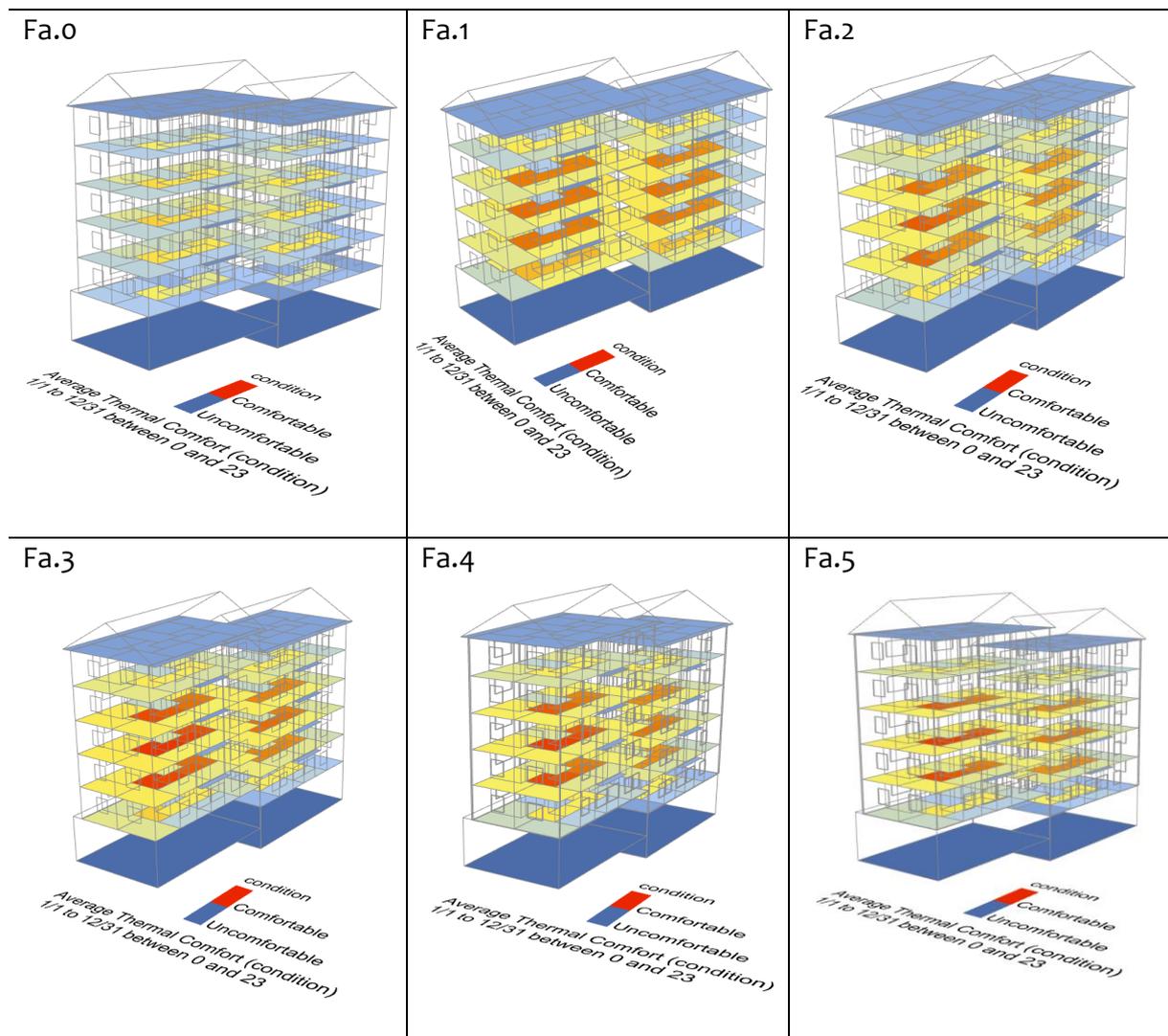
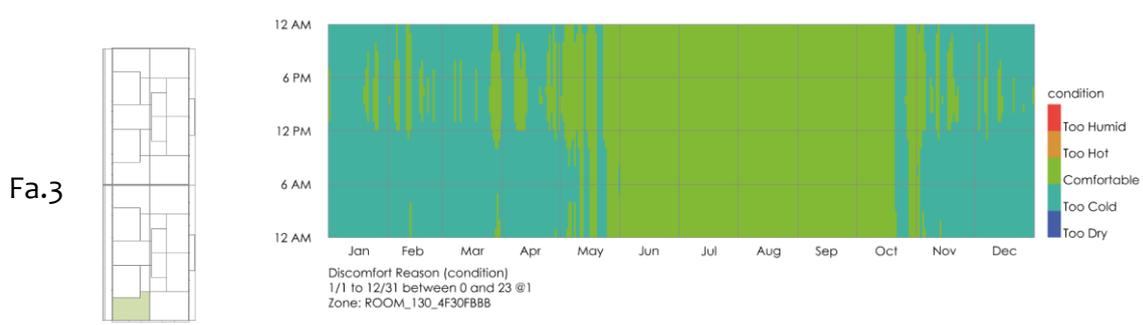
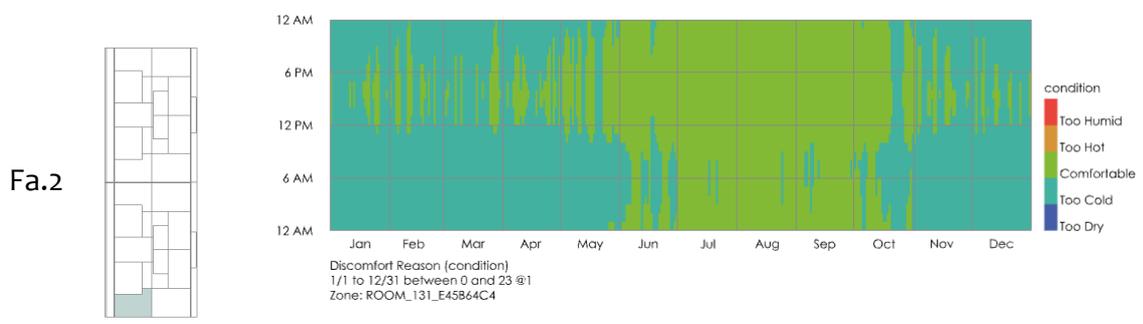
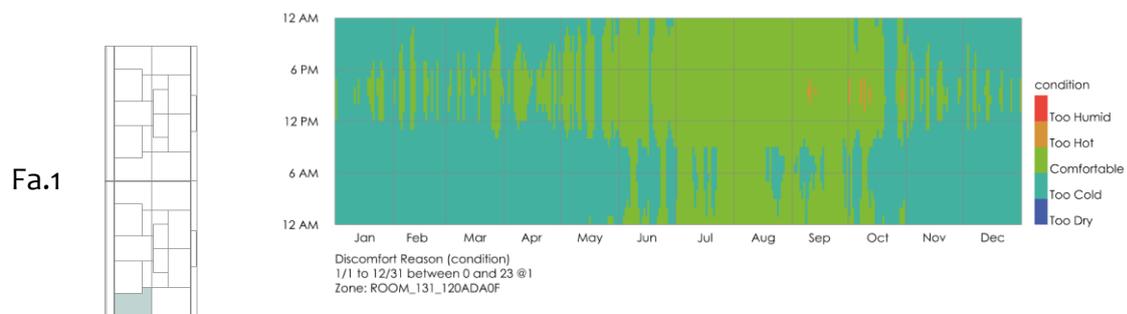
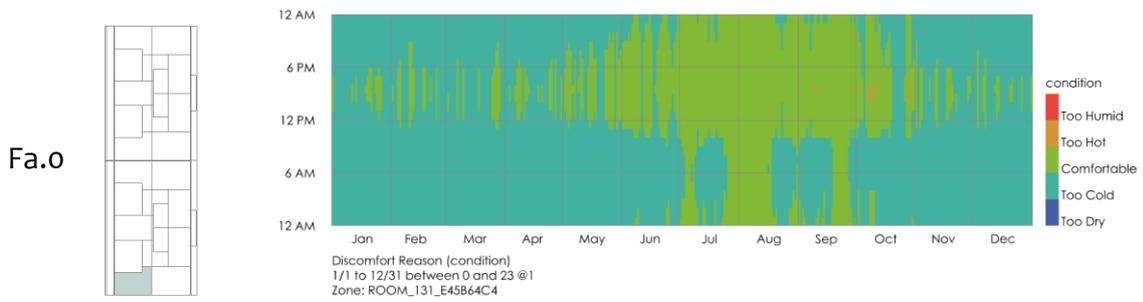


Tabla 10: Visualización de confort térmico en el interior del edificio

Los resultados (Tabla 10) muestran una situación de disconfort general en la situación actual del edificio, pero a medida que se mejora el tipo de fachada y por ende la transmitancia del

cerramiento, se puede apreciar la mejora del confort interior, en las habitaciones más centrales se logra alcanzar una situación confortable a lo largo de todo el año.

Ahora bien, si analizamos el bienestar térmico en un espacio más pequeño como puede ser una habitación del edificio simulado, vemos lo siguiente (Tabla 11):



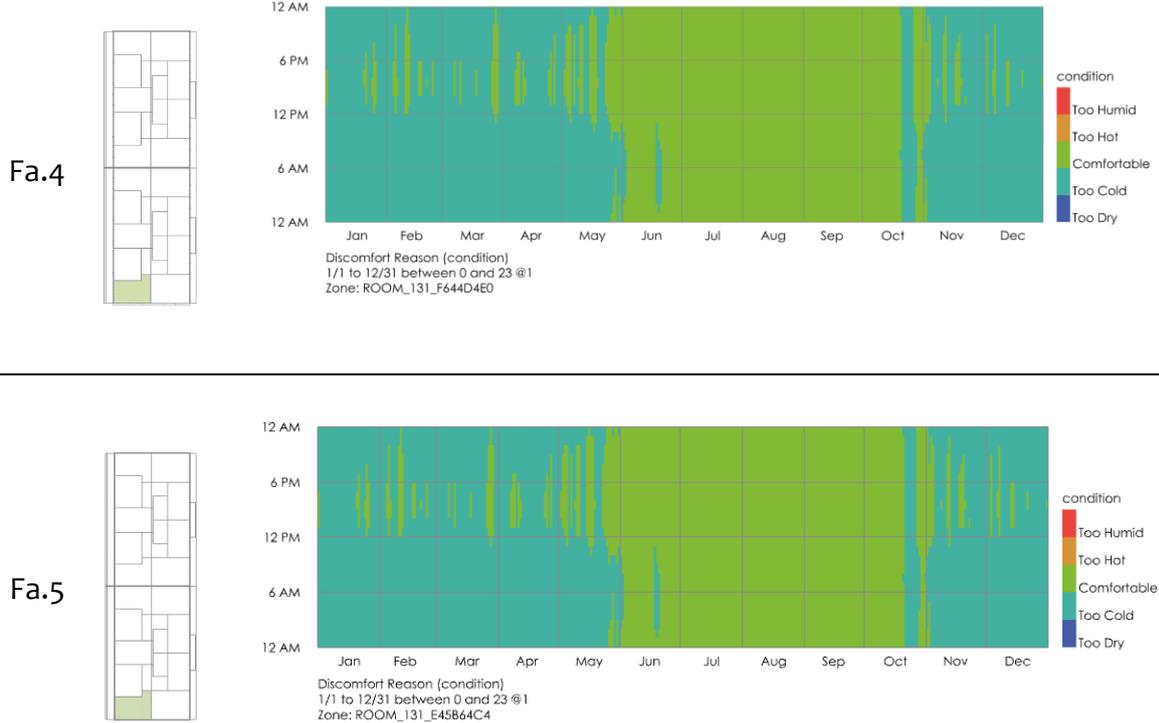


Tabla 11: Gráficos de color de datos horarios de confort

La Tabla 11 muestra el comportamiento del nivel de confort de la zona del edificio estudiada a lo largo de todo el año y de forma horaria. Se observa que, en las condiciones actuales (edificio sin rehabilitar) y para una habitación exterior, el edificio solo garantiza confort térmico entre los meses de julio, agosto y septiembre, entre las 12:00 pm y las 6:00 pm. Para los cerramientos propuestos, dicho intervalo crece garantizando confort térmico entre los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre a lo largo de todo el día.

Para los cerramientos realizados por el exterior, es decir, el sistema SATE (Fa.3), la fachada ventilada (Fa.4) y la fachada verde (Fa.5), la situación de confort total abarca mayor cantidad de meses y a lo largo de todo el día, nótese que la fachada SATE es la que presenta mejores resultados. Solamente con los cerramientos no ha sido posible garantizar una situación confortable para todo el año, esto debido a que también depende de las instalaciones y de los demás componentes de la envolvente térmica.

6.4 Verificación cumplimiento CTE DB HE para las soluciones propuestas.

Como se menciona en el apartado 5.7 para cumplir con las condiciones de la sección DB HE1, la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente no debe superar unos valores límite (Figura 17), en la Tabla 12 se presentan los valores de transmitancia de los cerramientos propuestos y el valor límite.

Transmitancia de los cerramientos					
Ref.	Nombre	U [W/m ² k]	U.lim [W/m ² k]	Aislamiento	Espesor [cm]
Fa.0	Fachada original	1,42	0,49	-	-
Fa.1	Fachada con aislamiento insuflado o inyectado	0,67	0,49	LM	3,5
Fa.2	Fachada con Trasdosado de lana mineral	0,40	0,49	LM	6,0
Fa.3	Fachada SATE	0,27	0,49	LM	10,0
Fa.4	Fachada ventilada	0,26	0,49	LM	10,0
Fa.5	Fachada verde	0,23	0,49	LM	10,0

Tabla 12: Transmitancia límite de los cerramientos

Se hace hincapié en que las soluciones Fa.2, Fa.3, Fa.4 y Fa.5, cumplen con U_{lim} establecida por el CTE DB HE para una zona climática C1. El valor de transmitancia térmica de un muro de fachada se obtiene con base a la composición de capas de materiales que la componen, a su espesor y propiedades térmicas, siendo el material aislante uno de los factores más influyentes. Es por ello que en las actuaciones Fa.3, Fa.4 y Fa.5 se nota una mayor reducción de la transmitancia. El cumplimiento de anterior valor límite no garantiza que se cumpla con todas las condiciones de la sección DB HE1, principalmente porque en el valor de transmitancia no se está considerando la influencia de los puentes térmicos.

En la Tabla 13 se observa una representación visual de la transmitancia térmica de las distintas soluciones y los demás elementos que conforman la envolvente del edificio, nótese que el cerramiento de fachada es el elemento con menor transmitancia comparado con el resto de los elementos. Se puede generar una gran pérdida de calor por elementos como puertas y ventanas, y es por ello que el CTE limita el valor medio del coeficiente de transmisión de calor para la superficie de intercambio térmico de la envolvente [K].

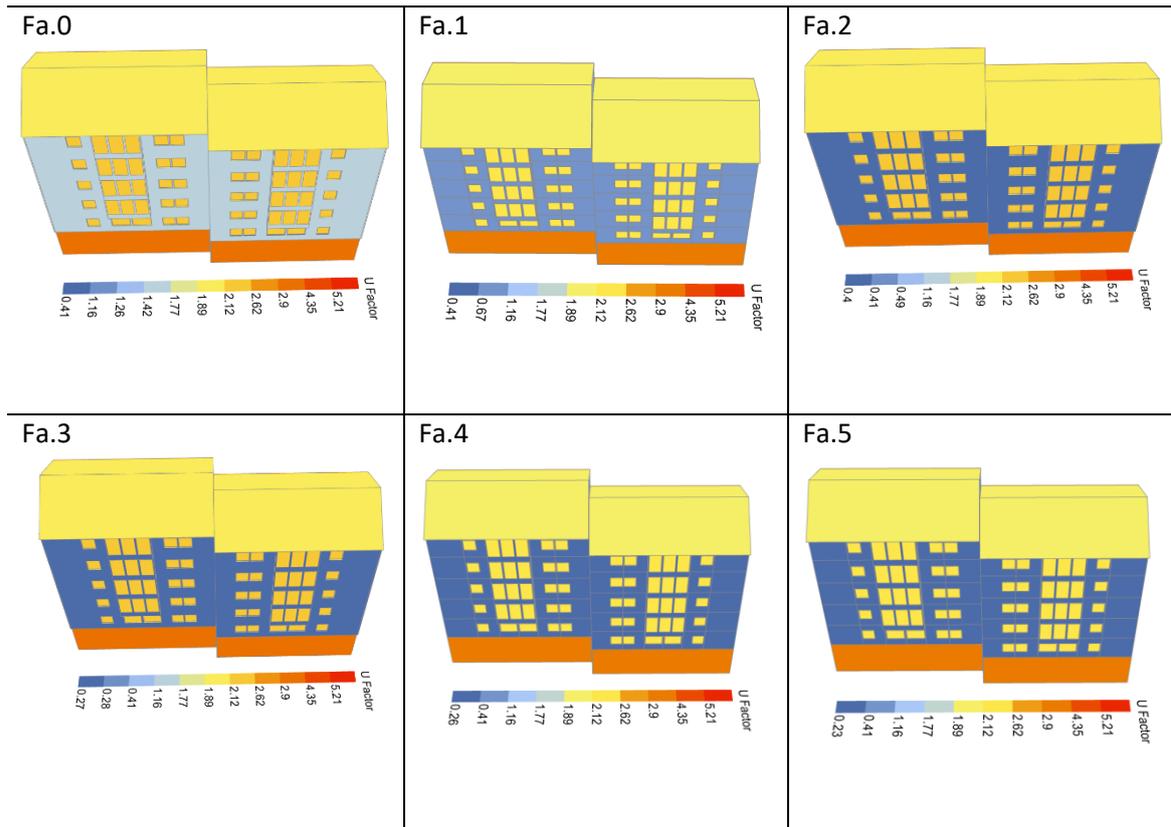


Tabla 13: Comparativa de transmitancias de los cerramientos

Para realizar el cumplimiento del coeficiente global de transmisión de calor es necesario conocer la transmitancia de todos los elementos que componen la envolvente térmica, a este respecto es preciso calcular la transmitancia lineal de los puentes térmicos tal y como se describe en el apartado 5.7. Los resultados se muestran a continuación:

Fa.o

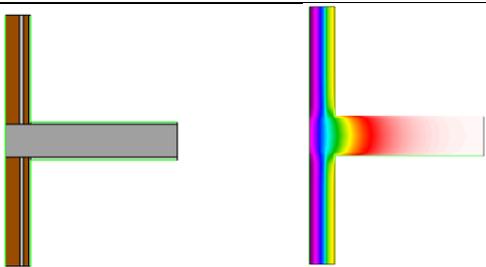
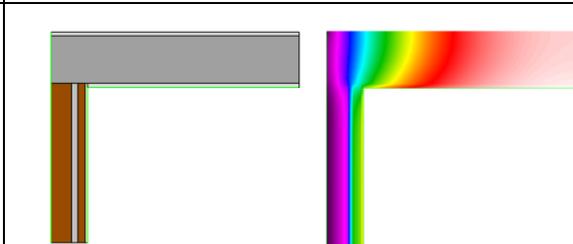
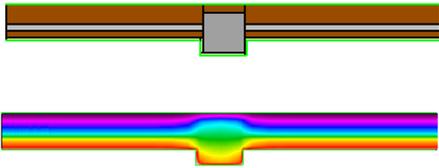
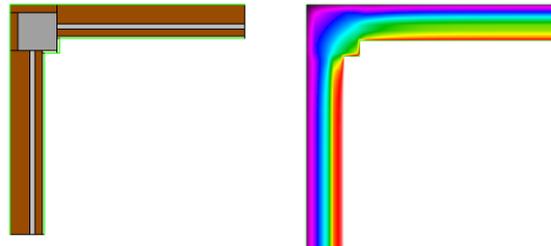
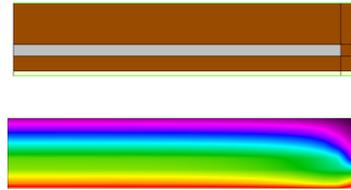
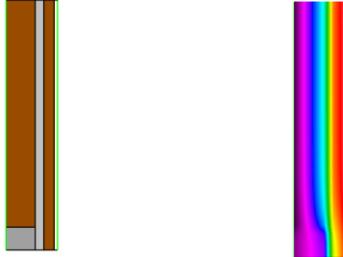
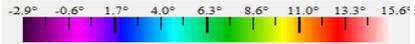
FRETE DE FORJADO	FRETE DE CUBIERTA
 <p data-bbox="459 640 754 792"> Flujo de calor [W] 97,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,31 </p>	 <p data-bbox="798 640 1372 792"> Flujo de calor [W] 59,1 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,08 </p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p data-bbox="191 1099 758 1252"> Flujo de calor [W] 101,1 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,85 </p>	 <p data-bbox="798 1099 1372 1252"> Flujo de calor [W] 110,6 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,24 </p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p data-bbox="191 1559 758 1711"> Flujo de calor [W] 37,5 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,14 </p>	 <p data-bbox="798 1559 1364 1711"> Flujo de calor [W] 38,1 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 1,42 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,17 </p>
	

Tabla 14: Puentes térmicos fachada original

Fa.1

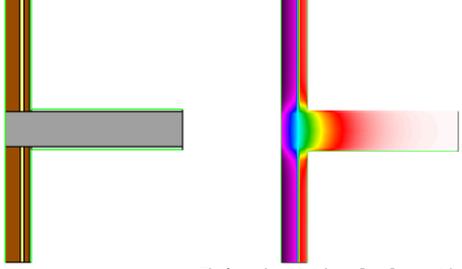
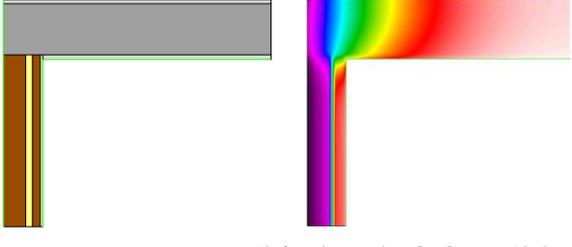
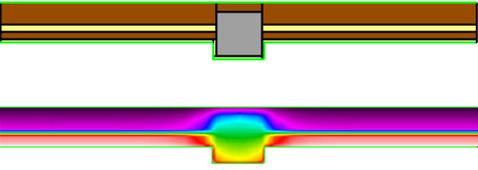
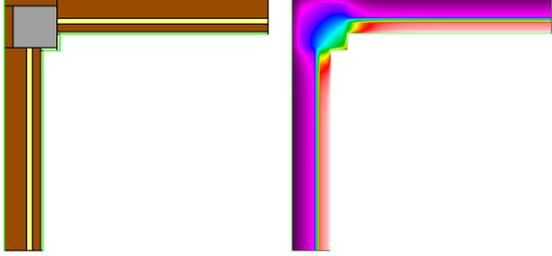
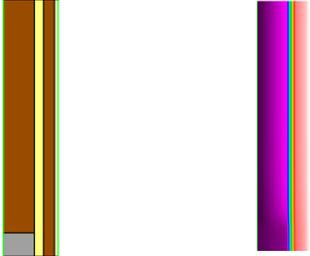
FRETE DE FORJADO	FRETE DE CUBIERTA
 <p>Flujo de calor [W] 68,94 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,57</p>	 <p>Flujo de calor [W] 42,2 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,11</p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p>Flujo de calor [W] 61,26 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,96</p>	 <p>Flujo de calor [W] 57,7 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,82</p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p>Flujo de calor [W] 25,07 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,37</p>	 <p>Flujo de calor [W] 18,31 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,67 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,09</p>
	

Tabla 15: Puentes térmicos fachada con Aislamiento insuflado o inyectado

Fa.2

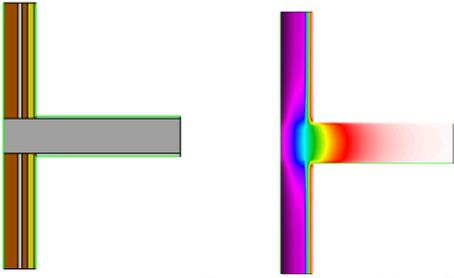
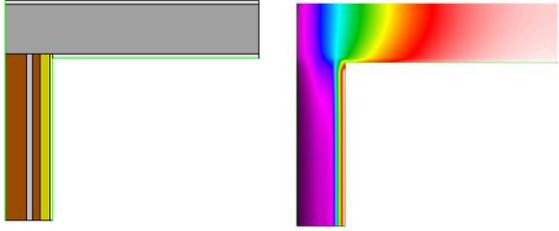
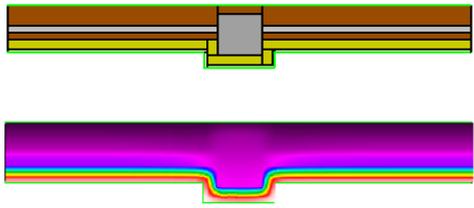
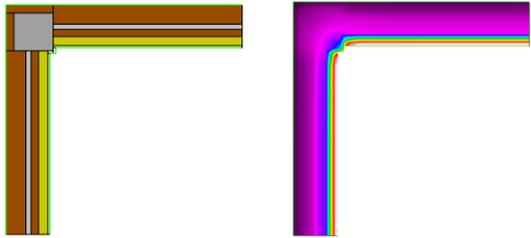
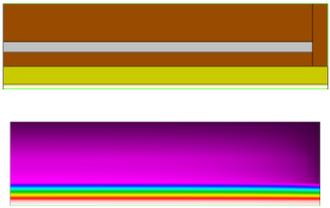
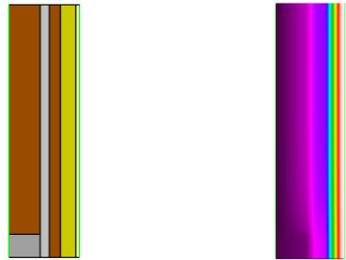
FRETE DE FORJADO	FRETE DE CUBIERTA
 <p>Flujo de calor [W] 50,26 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,31</p>	 <p>Flujo de calor [W] 33,9 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 1,02</p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p>Flujo de calor [W] 26,69 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,16</p>	 <p>Flujo de calor [W] 31,99 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,38</p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p>Flujo de calor [W] 10,54 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04</p>	 <p>Flujo de calor [W] 10,66 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,4 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04</p>
	

Tabla 16: Puentes térmicos fachada con Trasdosado de lana mineral

Fa.3

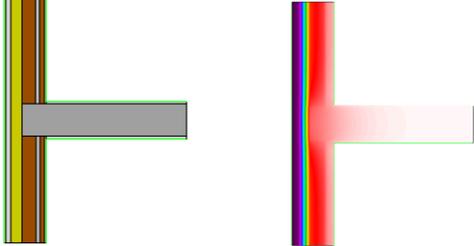
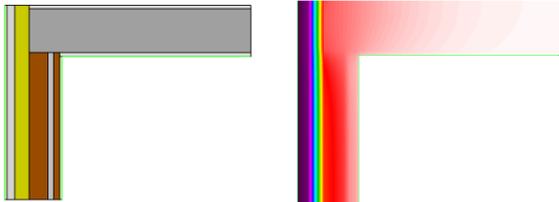
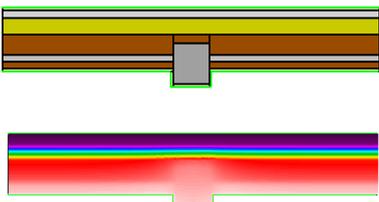
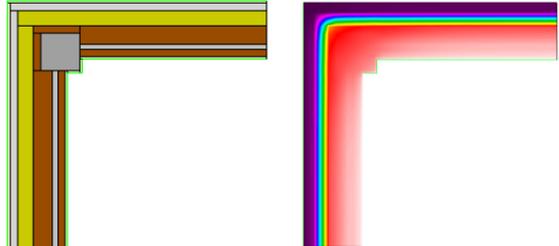
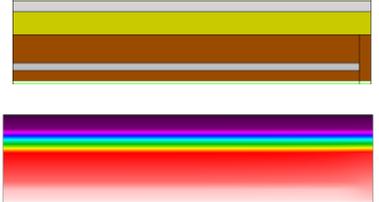
FRENTE DE FORJADO	FRENTE DE CUBIERTA
 <p data-bbox="464 645 762 795"> Flujo de calor [W] 13,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,13 </p>	 <p data-bbox="831 645 1378 795"> Flujo de calor [W] 8,2 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,12 </p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p data-bbox="193 1115 762 1265"> Flujo de calor [W] 15,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,11 </p>	 <p data-bbox="831 1115 1378 1265"> Flujo de calor [W] 19 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,25 </p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p data-bbox="193 1585 762 1736"> Flujo de calor [W] 6 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,02 </p>	 <p data-bbox="831 1585 1378 1736"> Flujo de calor [W] 6,4 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04 </p>
	

Tabla 17: Puentes térmicos fachada SATE

Fa.4

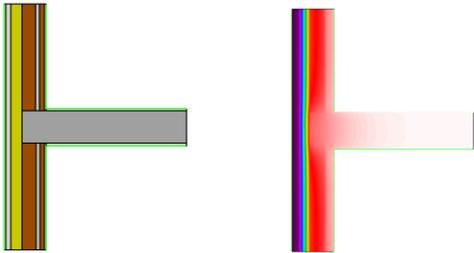
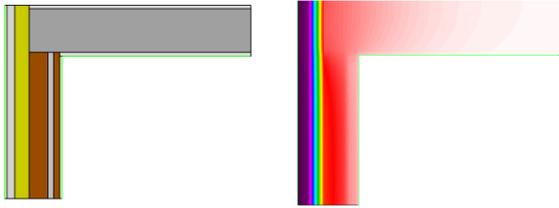
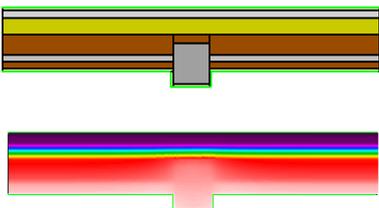
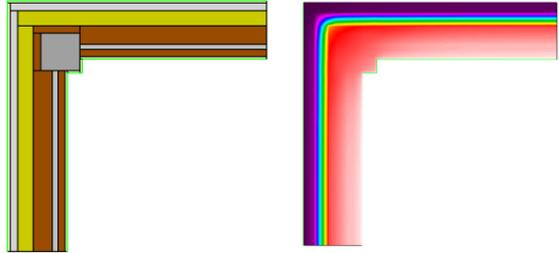
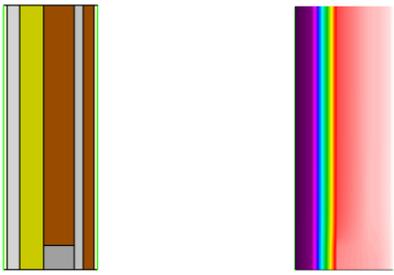
FRENTE DE FORJADO	FRENTE DE CUBIERTA
 <p data-bbox="464 645 762 795"> Flujo de calor [W] 14,7 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,11 </p>	 <p data-bbox="831 645 1378 795"> Flujo de calor [W] 8,7 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,11 </p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p data-bbox="464 1115 762 1265"> Flujo de calor [W] 16,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,08 </p>	 <p data-bbox="831 1115 1378 1265"> Flujo de calor [W] 19 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,18 </p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p data-bbox="464 1585 762 1736"> Flujo de calor [W] 7,1 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04 </p>	 <p data-bbox="831 1585 1378 1736"> Flujo de calor [W] 7,2 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,26 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04 </p>
	

Tabla 18: Puentes térmicos fachada ventilada

Fa.5

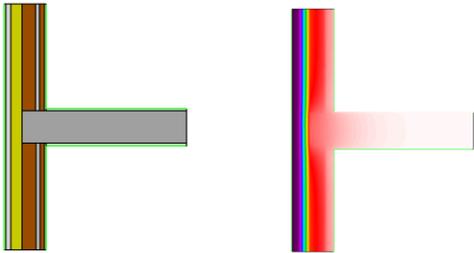
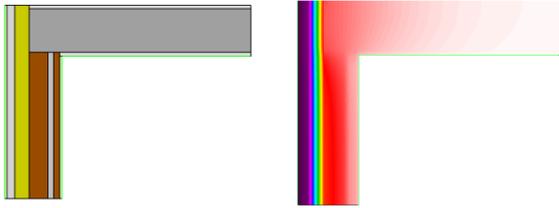
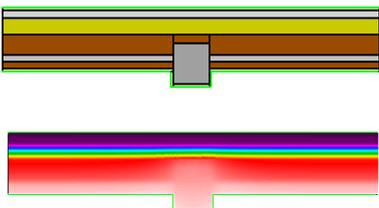
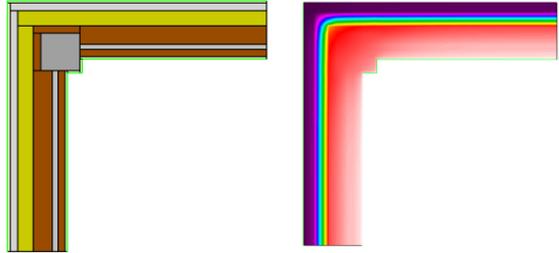
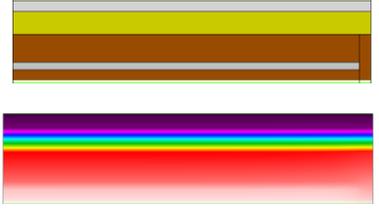
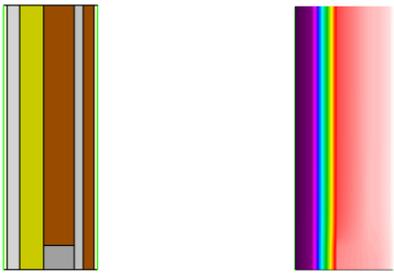
FRENTE DE FORJADO	FRENTE DE CUBIERTA
 <p data-bbox="464 645 762 795"> Flujo de calor [W] 13,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1,95 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,13 </p>	 <p data-bbox="831 645 1378 795"> Flujo de calor [W] 8,2 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 0,975 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,12 </p>
PILAR INTEGRADO	PILAR DE ESQUINA
 <p data-bbox="464 1115 762 1265"> Flujo de calor [W] 15,8 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,11 </p>	 <p data-bbox="831 1115 1378 1265"> Flujo de calor [W] 19 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 2,37 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,25 </p>
JAMBA - ALFÉIZAR	DINTEL
 <p data-bbox="464 1585 762 1736"> Flujo de calor [W] 6 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,02 </p>	 <p data-bbox="831 1585 1378 1736"> Flujo de calor [W] 6,4 Salto térmico [°C] 24 U: Transmitancia térmica [w/m2K] 0,23 L: Longitud dibujada cerramiento [m] 1 ψ: Transmitancia puente térmico [W/mk] 0,04 </p>
	

Tabla 19: Puentes térmicos fachada vegetal

El coeficiente global de transmisión de calor se ha calculado para cada cerramiento conforme al procedimiento que se describe en el apartado 5.7.1. La superficie computable en el cálculo del valor de [k] afecta exclusivamente a la que está en contacto con el aire exterior o el terreno. En la configuración que se ha propuesto solo se produce contacto con el exterior a través de la fachada, los huecos y algunas particiones interiores. Quedan fuera del cálculo la cubierta y el suelo en contacto con el terreno puesto que el sótano y la zona bajo cubierta son espacios no habitables, por ende, se ha considerado que están fuera de la envolvente térmica.

Ref.	Fachada U*A [W/k]	Huecos U*A [W/k]	PT U*L [W/k]	P.interior U*A [W/k]	K_global [W/m2k]	K_lim [W/m2k]	Kg < Klim
Fa.0	4484,70	493,96	531,33	1278,9	1,84	0,76	X
Fa.1	1768,61	493,96	539,49	1278,9	1,11	0,76	X
Fa.2	1263,30	493,96	396,01	1278,9	0,93	0,76	X
Fa.3	852,73	493,96	53,61	1278,9	0,73	0,76	Ok
Fa.4	821,14	493,96	54,32	1278,9	0,72	0,76	Ok
Fa.5	726,40	493,96	61,09	1278,9	0,69	0,76	Ok

Tabla 20: Coeficiente global de transmisión de calor

Los resultados comparativos entre las diferentes composiciones de fachada (Tabla 20) nos muestran que, a pesar de mejorar el tipo de cerramiento con unas mejores características térmicas, no todos los cerramientos son capaces de cumplir con este requisito, los cerramientos Fa.1 y Fa.2 no cumplen con el [K] que establece la norma y los cerramientos Fa.3, Fa.4 y Fa.5 están muy cerca del límite. También es importante señalar que este valor no solo depende del cerramiento de fachada, pero es un resultado positivo que esta limitación se cumpla solamente modificando el tipo de cerramiento.

6.5 Análisis económico:

6.5.1 Presupuesto:

En este apartado se realiza la valoración económica de las soluciones de las fachadas propuestas. Los costes se han estimado considerando el precio unitario (€/m²) proporcionados por la base de precios de la construcción (CYPE Ingenieros, 2022).

	Ud	Cantidad	€/m2	Importe €
Medidas de mejora				
Envolvente térmica				
Fa.1				
	m ²	1387,14	23,83	\$33.055,55
Rehabilitación energética de fachada de doble hoja de fábrica, rellenando el interior de la cámara de aire de 35 mm de espesor medio, por insuflación, desde el interior, de aislamiento termoacústico de nódulos de lana de roca, Rockin S "ROCKWOOL", densidad 70 kg/m ³ y conductividad térmica 0,037 W/(mK); tapado de los taladros ejecutados en el paramento, mediante mortero de cemento con posterior sellado con masilla y lijado; y dos manos de pintura plástica, color blanco, acabado mate, textura lisa, (rendimiento: 0,1 l/m ² cada mano); previa aplicación de una mano de imprimación a base de copolímeros acrílicos en suspensión acuosa.				

Fa.2	<p>Rehabilitación energética de fachadas y particiones mediante el sistema "ISOVER" de aislamiento termoacústico y trasdosado autoportante, colocado en particiones interiores y por el interior de cerramientos verticales, formado por placa de yeso laminado reforzada con tejido de fibra UNE-EN 15283-1 GM-F / 1200 / longitud / 15 / con los bordes longitudinales afinados, revestido en cara y dorso por tejido de fibra de vidrio no combustible, atornillada directamente a una estructura autoportante arriostrada, y aislamiento de panel rígido de lana mineral, Geowall 34 "ISOVER", según UNE-EN 13162, no revestido, de 60 mm de espesor, colocado en el espacio entre el paramento y las maestras; barrera de vapor; y dos manos de pintura plástica, color blanco, acabado mate, textura lisa, (rendimiento: 0,1 l/m² cada mano); previa aplicación de una mano de imprimación a base de copolímeros acrílicos en suspensión acuosa. El precio incluye la resolución de encuentros y puntos singulares y las ayudas de albañilería para instalaciones.</p>	m ²	1387,14	60,35	\$83.713,90
Fa.3	<p>Rehabilitación energética de fachada, mediante aislamiento térmico por el exterior, con el sistema Ecosate "ISOVER", con ETA - 20/0722, compuesto por: panel rígido de lana de vidrio de alta densidad, no revestido, hidrófobo, modelo Clima 34 "ISOVER", de 100 mm de espesor, fijado al soporte con mortero polimérico Ecosate® Base "ISOVER" y fijaciones mecánicas con taco de expansión con clavo, Ecosate® H1 Eco "ISOVER"; capa de regularización de mortero polimérico Ecosate® Base "ISOVER", armado con malla de fibra de vidrio antiálcalis, Ecosate® Malla "ISOVER", de 3,5x3,8 mm de luz de malla, de 160 g/m² de masa superficial; capa de acabado de revestimiento Ecosate® Basic L "ISOVER", resistente a los rayos ultravioleta, acabado medio, color a elegir, gama Standard, sobre imprimación, Ecosate® Primer "ISOVER", color a elegir, gama Standard. Incluso perfiles de arranque de aluminio, perfiles de cierre superior de aluminio, perfiles de esquina de PVC con malla. El precio incluye la ejecución de remates en los encuentros con paramentos, revestimientos u otros elementos recibidos en su superficie, pero no incluye la preparación de la superficie soporte.</p>	m ²	1387,14	99,93	\$138.616,90
	<p>Rehabilitación energética de fachada. AISLAMIENTO TÉRMICO: panel semirrígido de lana mineral, Ecovent® VN 035, según UNE-EN 13162, de 100 mm de espesor, revestido por una de sus caras con un velo negro, resistencia térmica 2,85 m²K/W, conductividad térmica 0,035 W/(mK), colocado a tope, con fijaciones mecánicas sobre fachada existente; REVESTIMIENTO EXTERIOR DE FACHADA VENTILADA: de placas de yeso laminado GM-FH1 / UNE-EN 15283-2 - 1200 / 2800 / 12,5 / con los bordes longitudinales afinados, Glasroc X 13 "PLACO", colocación con tornillos, mediante el sistema Placotherm V Glasroc X "PLACO" con DAU n° 17/105 A, sobre subestructura soporte de aluminio extruido de montantes verticales de perfiles en T y en L, de 1,8 mm de espesor con una modulación de 600 mm;</p>				

Fa.4	<p>impermeabilización con lámina altamente transpirable impermeable al agua de lluvia, Tyvek Estándar, capa base de mortero polimérico de altas prestaciones reforzado con fibras, Placotherm Base, color blanco, compuesto de cemento blanco, cargas minerales, resinas hidrófugas redispersables, fibras y aditivos especiales armado con malla de refuerzo CMALL 160 y capa de acabado de mortero acrílico Webertene Premium M "WEBER", color a elegir, gama Estándar, acabado gota, con un tamaño máximo de partícula de 1,2 mm, a base de silicato potásico, cargas minerales, pigmentos resistentes a los rayos UV y aditivos especiales sobre imprimación Weberprim Silicato "WEBER". Incluso cinta autoadhesiva para sellado de juntas entre paneles aislantes, ménsulas de sustentación y de retención para la fijación de la subestructura soporte, tornillería para la fijación de las placas, fijaciones para el anclaje de los perfiles, mortero Placotherm Base y cinta CMALL 160 "PLACO", para el tratamiento de juntas, perfil de PVC con malla de fibra de vidrio antiálcalis, Perfil Goteo "PLACO", para remate de dinteles, y cinta adhesiva de doble cara para la fijación de la lámina altamente transpirable. El precio no incluye la preparación de la superficie soporte.</p>	m ²	1387,14	124,66	\$172.920,87
Fa.5	<p>Rehabilitación energética de fachada, mediante aislamiento térmico por el exterior, con el sistema Ecosate "ISOVER", con ETA - 20/0722, compuesto por: panel rígido de lana de vidrio de alta densidad, no revestido, hidrófobo, modelo Clima 34 "ISOVER", de 100 mm de espesor, fijado al soporte con mortero polimérico Ecosate® Base "ISOVER" y fijaciones mecánicas con taco de expansión con clavo, Ecosate® H1 Eco "ISOVER"; capa de regularización de mortero polimérico Ecosate® Base "ISOVER", armado con malla de fibra de vidrio antiálcalis, Ecosate® Malla "ISOVER", de 3,5x3,8 mm de luz de malla, de 160 g/m² de masa superficial. Ajardinamiento vertical con cultivo semihidropónico en geoproductos, para exterior, sistema Fytotextile "TERAPIA URBANA", con una superficie mayor de 120 m²; compuesto de: SUBESTRUCTURA SOPORTE: entramado metálico de perfiles de acero conformado en frío, fijado al paramento soporte con anclajes mecánicos con taco de nylon y tornillo, de 5 mm de diámetro y 50 mm de longitud, creando una cámara de aire de 40 mm de espesor medio; MEDIO DE CULTIVO: módulo Fytotextile "TERAPIA URBANA" de geoproducto impermeabilizante, drenante y transpirable, formado por tres capas de material sintético y orgánico, flexible y de espesor reducido (capa interior impermeabilizante FYT-RCF, capa intermedia drenante FYT-DRA y capa exterior transpirable FYT-AIR), resistencia a tracción 5,2 kN/m², retención de agua de entre 2 y 4 l/m², 49 bolsillos con una resistencia al desgarro superior a 0,07 kN/ud y con comportamiento de reacción al fuego B-s2, d0, según ensayo Applus, según UNE-EN 13501-1; con perfil guía horizontal FYT-VOL fijado a la subestructura soporte con tornillos autorroscantes con cabeza hexagonal de acero cincado con junta estanca, de 5,5 mm de diámetro y 25 mm de longitud; VEGETACIÓN: especies de plantas para exterior; con una densidad de plantación de 42 ud/m². El precio no incluye el mantenimiento y reposición parcial de la vegetación, la instalación de riego y evacuación, el sistema centralizado de control ni el canalón para recogida de aguas.</p>	m ²	1387,14	506,29	\$702.295,11

Tabla 21: Presupuesto medidas de reforma

6.5.2 Cálculo de ahorros y Payback

En este apartado se emplearán las inversiones iniciales para acometer cada reforma por separado, después se calcularán los ahorros económicos debido al aumento de la eficiencia energética y se aplicarán las fórmulas ya mencionadas a cada una de las medidas. Así se estudiará la rentabilidad y el periodo de retorno de cada medida.

A partir de las demandas obtenidas de la simulación se calcula el consumo de energía final como el cociente entre la demanda y la eficiencia estacional de los equipos (Tabla 3). Para el cálculo solo se han tenido en cuenta las demandas de calefacción y ACS puesto que el edificio no cuenta con instalaciones de refrigeración.

Para la conversión de energía final a primaria, se han utilizado los siguientes coeficientes de paso:

- Coeficiente de paso de electricidad peninsular, de energía final a primaria no renovable: 1,954.
- Coeficiente de paso de gas natural, de energía final a primaria no renovable peninsular: 1,190.

En la Tabla 22 y Tabla 23, se muestran los resultados del cálculo de energía primaria de electricidad y gas natural, se aprecia un consumo mayor de gas natural debido a que cubre el 70% de calefacción y ACS.

Electricidad				
Ref.	Demanda calefacción [kWh/m2]	Demanda ACS [kWh/m2]	Consumo de energía final [kWh/m2]	Consumo de energía primaria [kWh/m2]
Fa.0	32,54	8,58	12,99	34562,11
Fa.1	23,61	8,58	10,17	27056,28
Fa.2	17,45	8,58	8,22	21878,69
Fa.3	10,53	8,58	6,03	16062,30
Fa.4	10,90	8,58	6,15	16373,30
Fa.5	9,84	8,58	5,82	15482,35

Tabla 22: Consumo de energía primaria en electricidad

Gas Natural				
Ref.	Demanda calefacción [kWh/m2]	Demanda ACS [kWh/m2]	Consumo de energía final [kWh/m2]	Consumo de energía primaria [kWh/m2]
Fa.0	36,50	8,58	36,34	58911,20
Fa.1	23,61	8,58	28,45	46117,50
Fa.2	17,45	8,58	23,01	37292,28
Fa.3	21,17	8,58	16,89	27378,23
Fa.4	19,30	8,58	17,22	27908,32
Fa.5	19,65	8,58	16,28	26389,70

Tabla 23: Consumo de energía primaria en gas natural

El ahorro en energía eléctrica y gas natural se ha calculado como la diferencia entre las medidas de mejora y la fachada original. El cálculo del Payback (Tabla 24) se ha realizado como se menciona en el apartado 5.6.3, teniendo en cuenta el coste de la energía que según el Ente vasco de la Energía (EVE) para Julio de 2022, los precios de la energía son los siguientes:

- Gas natural: 0,131 €/kWh
- Electricidad: 0,142 €/kWh

Ref.	Precio [€]	Ahorro de energía eléctrica [kWh]	Ahorro de energía gas natural [kWh]	Payback [años]
Fa.1	33055,55	7505,83	12793,70	11,81
Fa.2	83713,90	12683,42	21618,92	17,69
Fa.3	138616,90	18499,81	31532,96	20,09
Fa.4	172920,87	18188,81	31002,88	25,49
Fa.5	702295,11	19079,76	32521,50	98,67

Tabla 24: Resultados de ahorro de energía y payback

Se observa una notable diferencia entre el precio de inversión de las medidas de mejora, pese a que existe un elevado contraste del ahorro de energía si comparamos las medidas más sencillas y las más complejas, debido al alto coste de las fachadas Fa.3, Fa.4 y Fa.5, presentan un periodo de retorno de la inversión más elevado.

Los cerramientos de sistema SATE (Fa.3) y fachada ventilada (Fa.4), presentan ahorros de energía similares pero la fachada ventilada tarda 5 años más en recuperar la inversión debido a que su coste es más elevado, su comportamiento en cuanto a demanda de calefacción es similar al sistema SATE mientras que en la demanda de refrigeración hay una mayor diferencia favoreciendo a la fachada ventilada. Por lo tanto, se puede concluir que para el tipo de clima de la zona estudiada donde se necesitan en menor proporción los sistemas de refrigeración, es más conveniente el sistema SATE dado que es más viable económicamente.

El cerramiento Fa.5, en vista del alto coste que conlleva realizar un ajardinamiento vertical, es la solución a la que más tiempo le lleva recuperar la inversión (98,67 años), a pesar de tener un buen comportamiento térmico y garantizar unas buenas condiciones de confort, no es económicamente viable en rehabilitación de edificios. No obstante, además del ahorro energético, ofrecen otro tipo de beneficios, no solo al interior, sino al exterior del edificio, entre ellos tenemos los siguientes: ayuda a purificar el aire, reduce la temperatura ambiente, aumenta la biodiversidad, mejora la estética del edificio, aumenta la Sensación de bienestar, entre otras. Muchos de estos beneficios no pueden ser valorados cuantitativamente, pero es necesario considerarlos para decidir la viabilidad del cerramiento.

Por otro lado, los sistemas Fa.1 y Fa.2, recuperan la inversión un poco más rápido en comparación con los otros sistemas dado que los costes no son tan elevados, sin embargo, una vez termine el periodo de amortización será más rentable un sistema que ahorre más energía como las fachadas Fa.3, Fa.4 y Fa.5. El trasdosado de lana mineral (Fa.2) solo recupera su inversión 2.3 años antes que la fachada SATE (Fa.3) por consiguiente no se considera

económica y energéticamente viable. Por último, si tenemos en cuenta que es necesario cumplir con los requisitos establecidos por el CTE, las soluciones Fa.1 y Fa.2, no cumplen con el valor mínimo del coeficiente global de transmisión de calor, en consecuencia, es necesario realizar una inversión más grande en la aplicación de otras medidas de mejora adicionales y el coste económico realmente sería mayor.

7 CONCLUSIONES:

Con el propósito de alcanzar los objetivos principales de este trabajo se realizó un estudio del estado actual del parque edificado en España y en el País Vasco. Los resultados permitieron comprender claramente la importancia de la rehabilitación de edificios y los puntos clave necesarios para evaluar la viabilidad, en este caso, en sistemas de rehabilitación de fachadas, que se han propuesto para el caso de estudio.

Se realizó una revisión de las posibles soluciones para cerramientos que se pueden aplicar en rehabilitación de edificios, incluidas las soluciones basadas en la naturaleza. Esta revisión también incluyó un resumen de las propuestas que se han utilizado para mejorar la eficiencia energética del edificio. También, se presentaron los criterios de sostenibilidad para evaluar las propuestas y se ha logrado desarrollar una herramienta digital que permite evaluar y automatizar el análisis energético y el cumplimiento del CTE.

Algunas observaciones finales sobre el estudio realizado enfocado en la rehabilitación de edificios se enumeran a continuación:

- Las simulaciones realizadas para diferentes tipos de fachada han servido para poner a prueba las aplicaciones informáticas de “*Ladybug Tools*”, se concluye que es un conjunto de herramientas muy potente y flexible para manejar parámetros de simulación y geometrías 3D a gran escala y altamente complejos. Adicionalmente, gracias a su integración con grasshopper, amplía las posibilidades a lo hora de hacer cualquier simulación y encontrar soluciones a problemas de forma paramétrica. La versatilidad y la potencia de la herramienta permiten adaptar el diseño a una gran variedad de tipos de análisis y técnicas que permiten ir más allá del análisis convencional.
- Por la tipología del edificio y la zona climática donde se encuentra, se concluye que una de las mejores alternativas para rehabilitación de fachadas es el sistema SATE. Este sistema recubre la envolvente en su totalidad reduciendo el impacto de los puentes térmicos, reduce considerablemente la demanda de energía, cumple con los requisitos establecido por el CTE y el coste de su inversión se recupera más rápido en comparación con otros sistemas. Al estar en contacto directo con la fachada, la hace más permeable a la absorción de calor en los meses más cálidos frente a la fachada ventilada, cuya cámara de aire permite que la transmisión del calor al interior sea menor, no obstante, la climatología del País Vasco, dominada mayoritariamente por la demanda de calefacción, permite que el sistema SATE proporcione una reducción de la demanda energética en relación con el sistema de fachada ventilada.
- Debido a la mayor complejidad que supone la instalación de fachadas con cámara de

aire ventilada además del coste adicional por materiales, la inversión para una rehabilitación realizada con fachadas ventiladas o fachada verdes es mayor que otros sistemas. Especialmente la fachada verde es la menos viable económicamente, sin embargo, ofrece más beneficios que los demás tipos de cerramientos.

- Se descarta el uso del sistema aislamiento térmico insuflado o inyectado de la cámara de aire para el caso de estudio, a pesar de ser la menos costosa de todas las soluciones, no cumple con las especificaciones establecidas por el CTE, es decir, no cumple con la transmitancia límite, ni con la transmitancia global límite y aún si se mejorara el tipo de aislamiento a inyectar, seguirían existiendo los puentes térmicos que dificultan el cumplimiento del coeficiente global de transmisión de calor.
- Los sistemas de aislamiento térmico por el interior son sistemas que aporta menos beneficios, puesto que no disminuye las ganancias por radiación solar, siguen existiendo los puentes térmicos por los que habrá mayores pérdidas de calor. Además de que al ser interior disminuyen el espacio disponible dentro de la vivienda, se destaca que son más económicos en comparación con otros sistemas, pero deficientes en ahorro de energía.
- En cuanto al confort térmico, el sistema SATE, la fachada ventilada y la fachada vegetal presentaron los mejores resultados, el comportamiento es similar en los tres tipos de fachada, notando una sutil mejora en la fachada vegetal. No se ha conseguido conseguir una situación confortable a lo largo de todo el año solo con el cambio de cerramiento, pero se ha conseguido ampliar el rango de meses en los que se puede estar completamente confortable.
- Finalmente se concluye que en términos de rehabilitación existe una gran variedad de posibilidades que permiten mejorar la eficiencia energética de los edificios, este trabajo se ha enfocado principalmente en las fachadas puesto que es un componente muy importante de la envolvente térmica, sin embargo, a la hora de rehabilitar, lo más conveniente es actuar sobre todo el conjunto de envolvente.

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al grupo de investigación SAREN Research Group [IT1619-22, Gobierno Vasco] de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

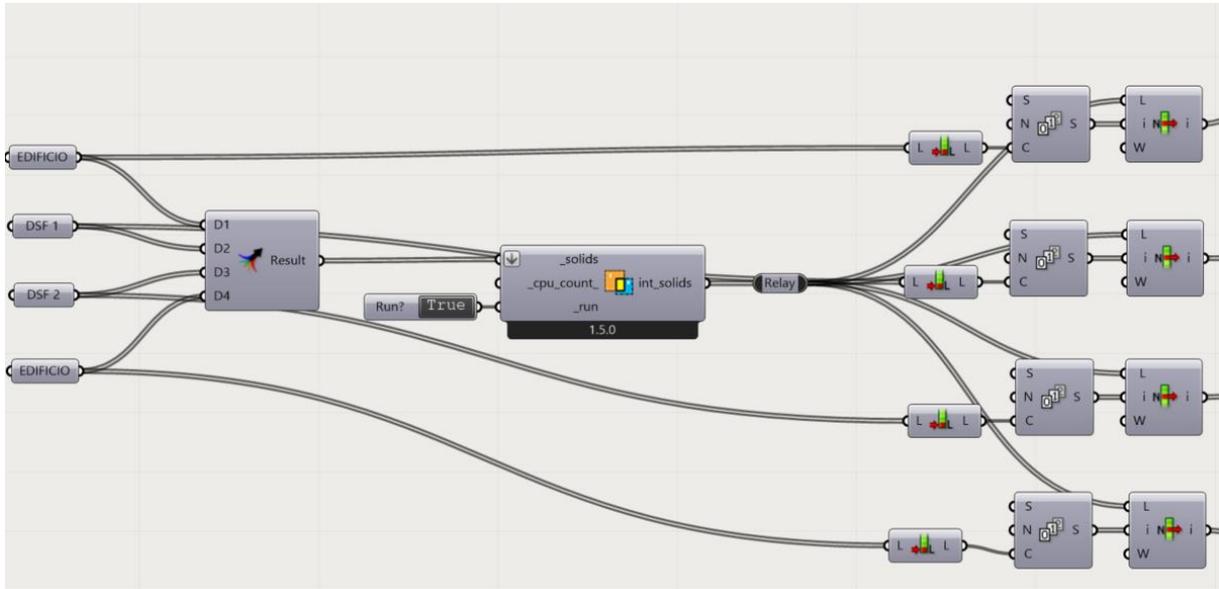
9 REFERENCIAS

- [1] Big_Ladder_Software_LLC. (2022). *Source Weather Data Formats: Auxiliary Programs — EnergyPlus 8.5*. Obtenido de <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-5/auxiliary-programs/source-weather-data-formats.html>
- [2] BOE. (2021). *BOE-A-2021-16230*.
- [3] CE. (2019). *PACTO VERDE EUROPEO*. Bruselas.
- [4] CTE. (2019). *Código Técnico de la Edificación (CTE) Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)*.
- [5] CYPE Ingenieros, S. (13 de 9 de 2022). *Generador de Precios*. Obtenido de <http://www.generadordeprecios.info/#gsc.tab=0>
- [6] DGNB, & GBCE. (2021). *INFORME CONSTRUIR UN MUNDO MEJOR*.
- [7] Ladybug_Tools. (17 de 09 de 2022). *Ladybug Tools*. Obtenido de <https://www.ladybug.tools/>
- [8] McGraw-Hill. (1973). *Thermal Comfort*.
- [9] McNeel, R., & Associates. (2013). *Rhinoceros 3D*.
- [10] Ministerio de Transportes, M. y. (2021). *Boletín especial sobre Rehabilitación 2021*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- [11] PNIEC. (2021). *PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA*.
- [12] Rodríguez Pérez, M., & Rodríguez González, V. (2021). *GUÍA DE EJEMPLOS DE APLICACION DB HE*. Secretaría General Técnica.
- [13] Terés-Zubiagaa, J., Campos-Celadorb, A., González-Pinoa, I., & Escudero-Revilla, C. (2015). Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in Northern Spain.
- [14] UE. (17 de 02 de 2020). En el punto de mira: Eficiencia energética en edificios. *Sitio web de la Comisión Europea*.
- [15] Vivienda, O. V. (2020). *Informe de Evaluación de la Política de Rehabilitación de Euskadi*. Bilbao.

ANEXOS

9.1 Programación visual ladybug tools:

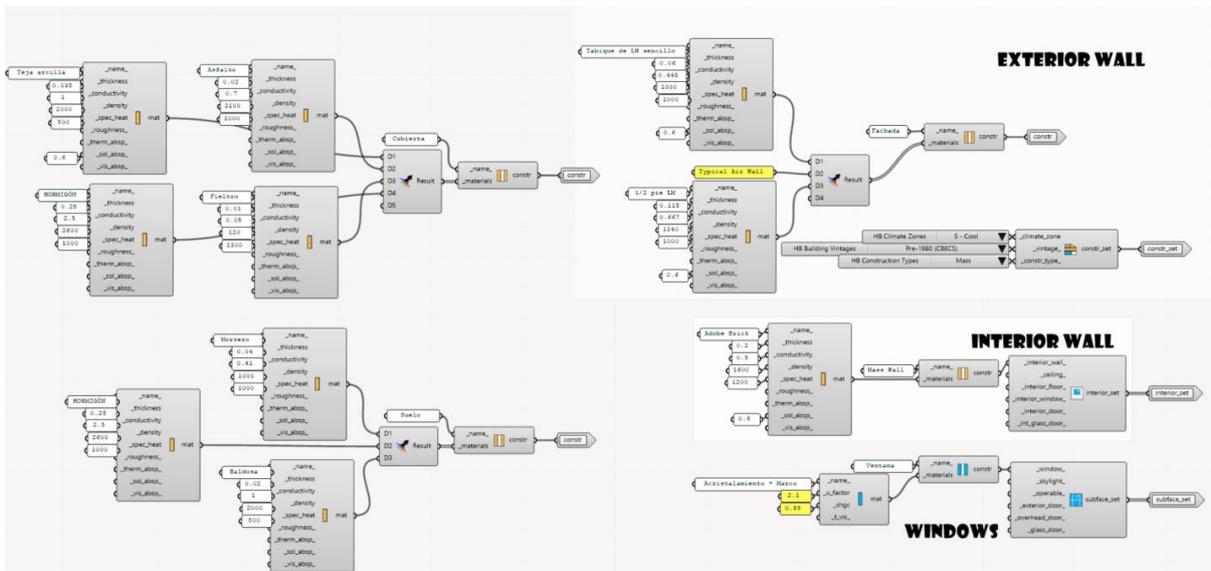
Introducción de la geometría



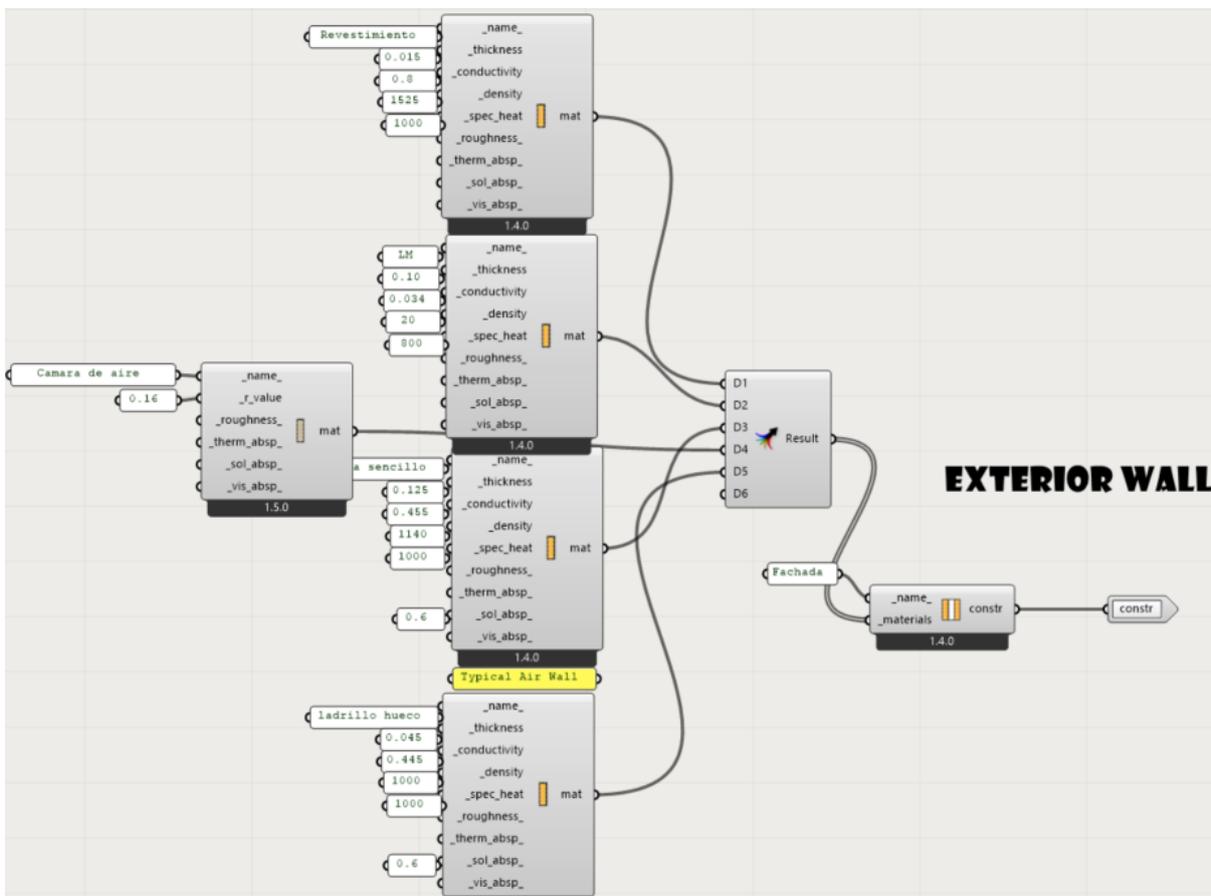
Programa del caso de estudio



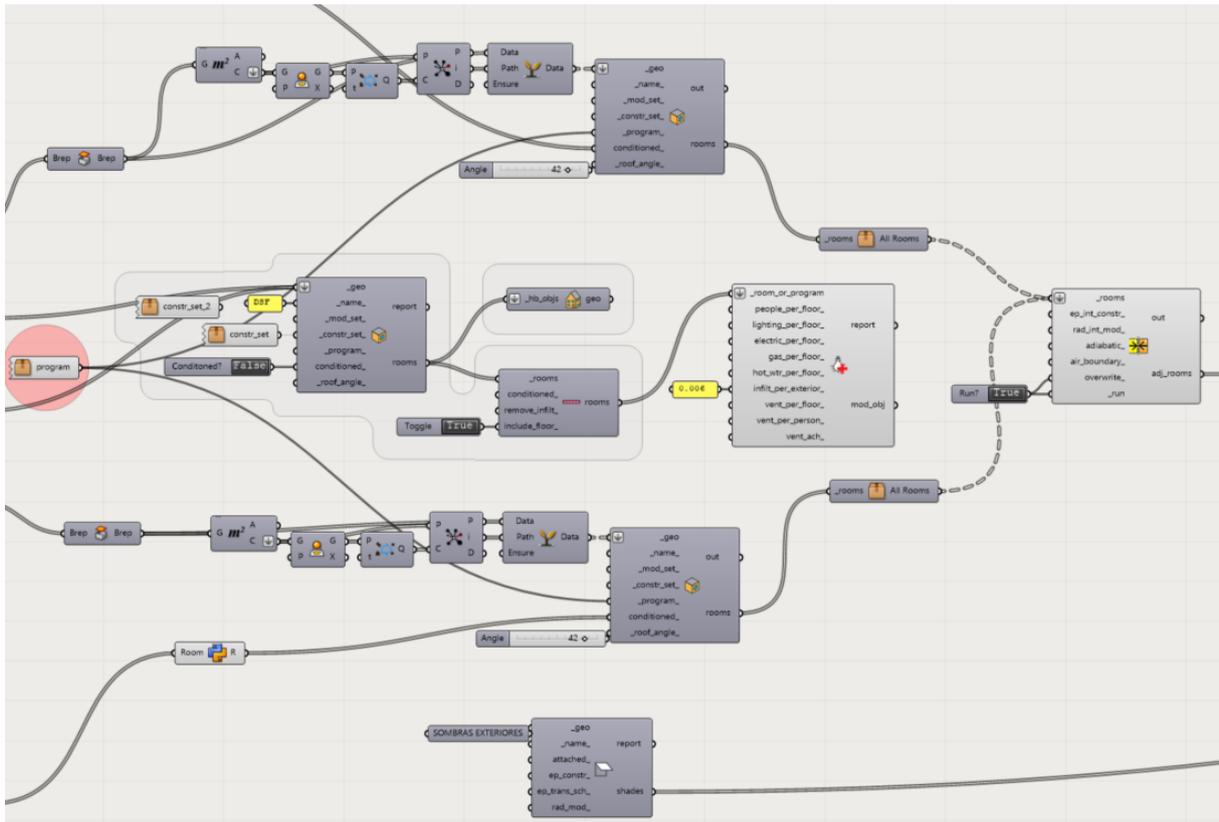
Definición de la envolvente



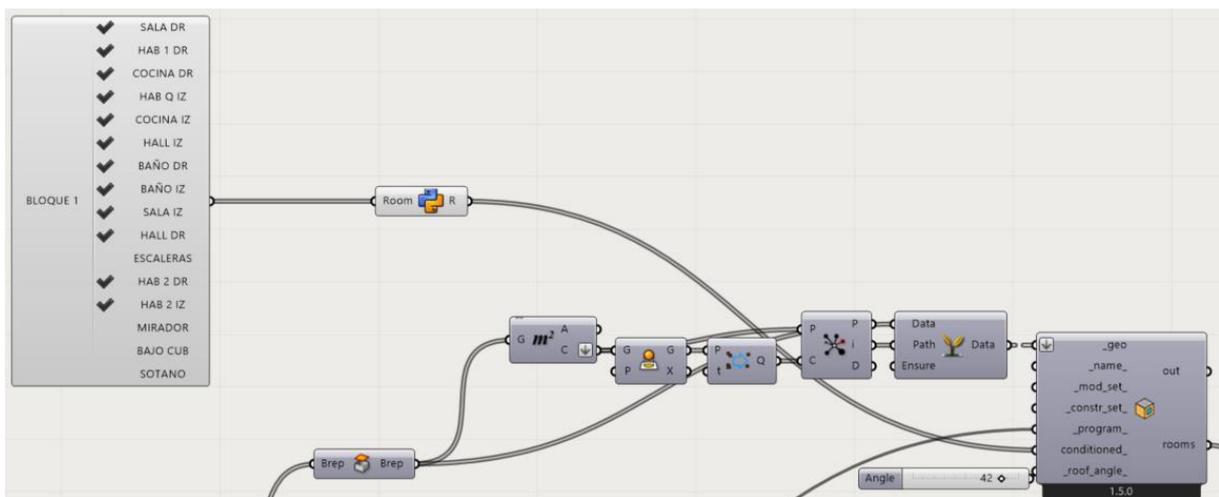
Definición de la fachada



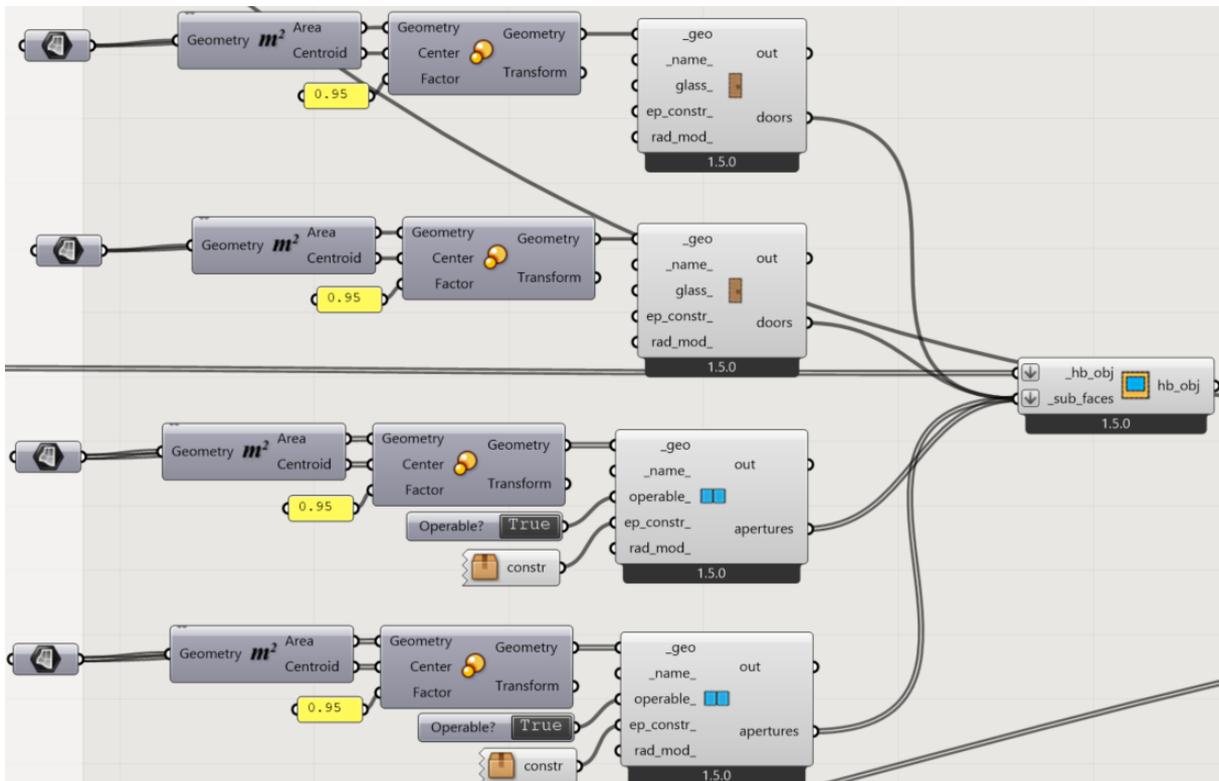
Creación de geometría honeybee



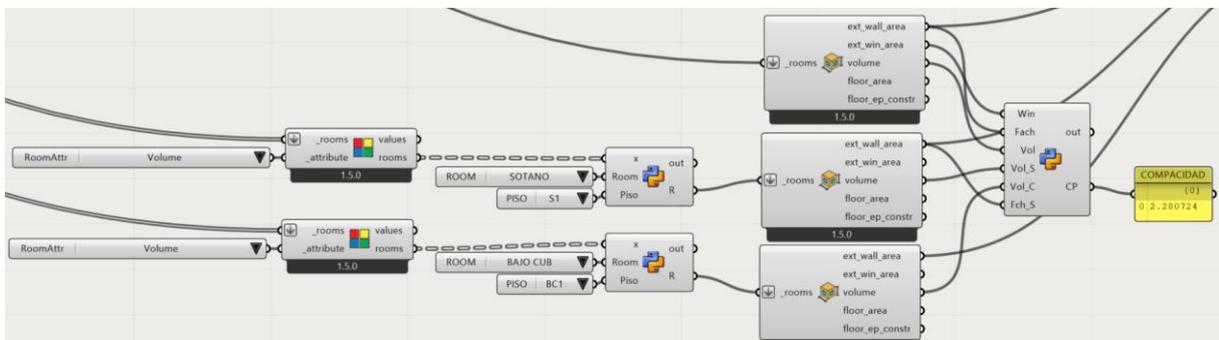
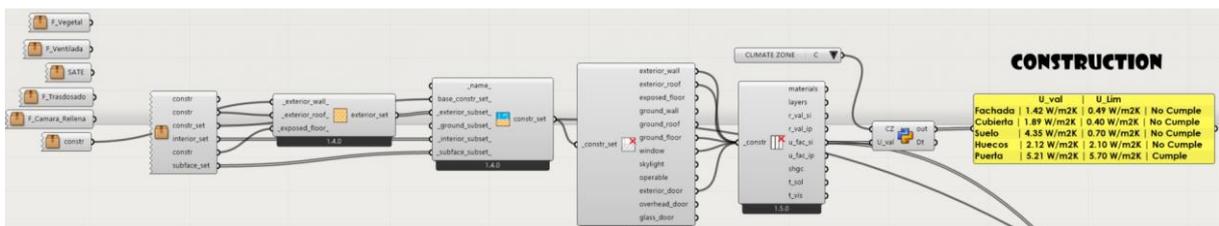
Configuración de las habitaciones



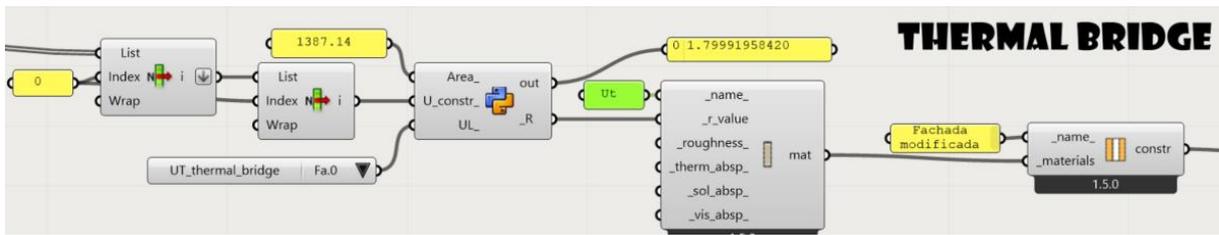
Definición de puertas y ventanas



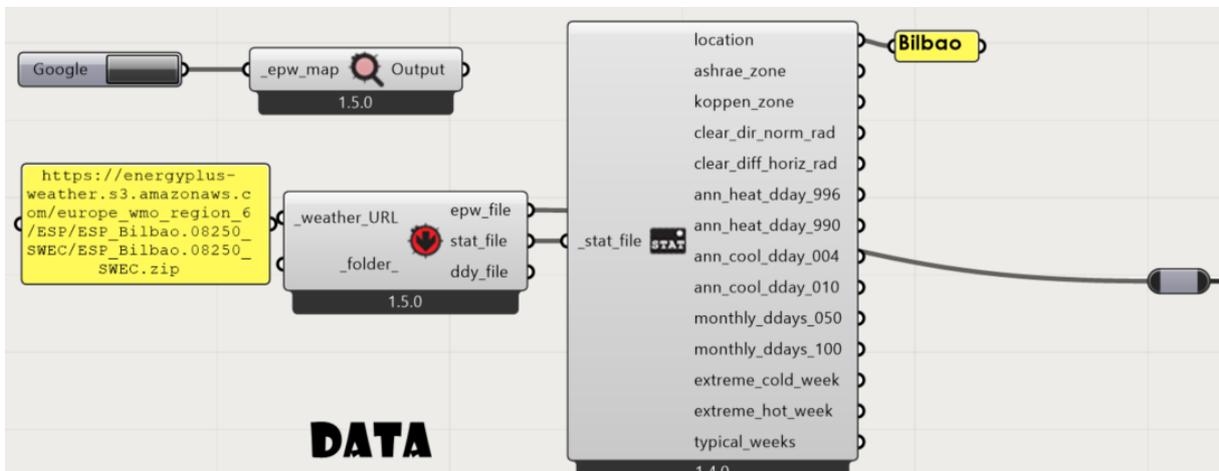
Verificación cumplimiento CTE



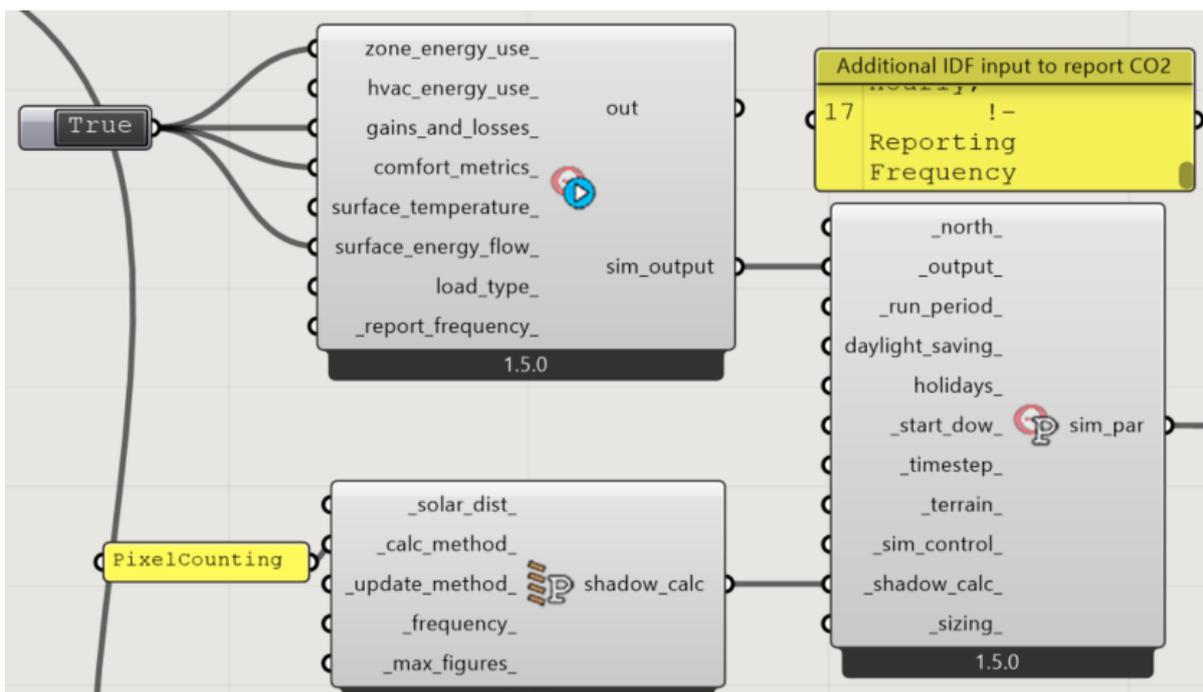
Puentes térmicos

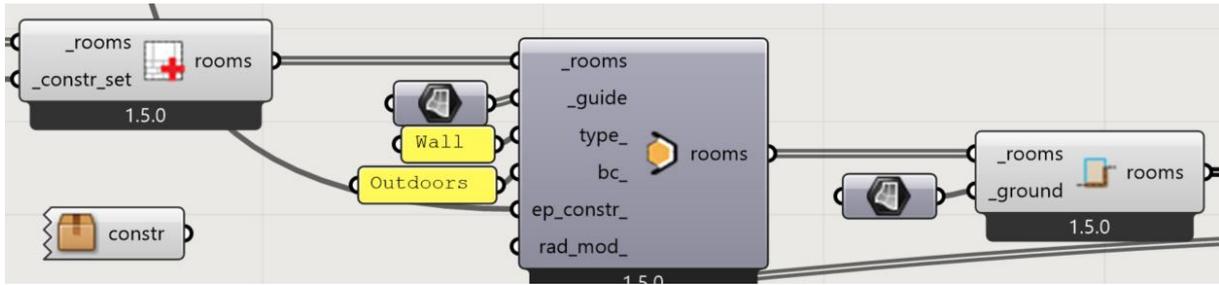


Configuración de los datos climáticos

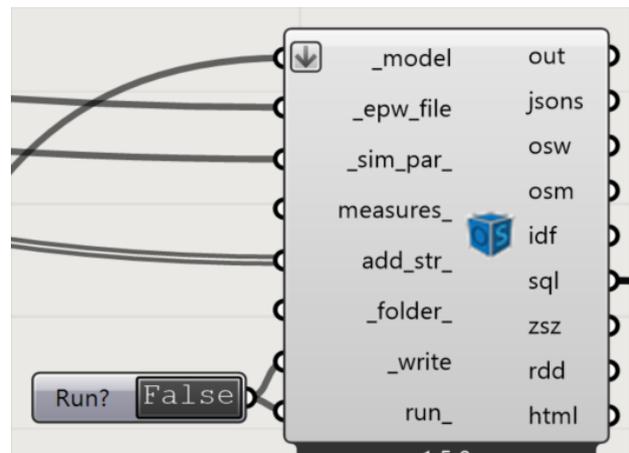
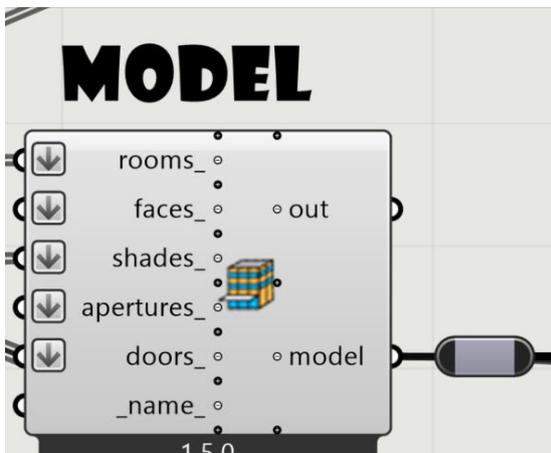


Configuración de la simulación

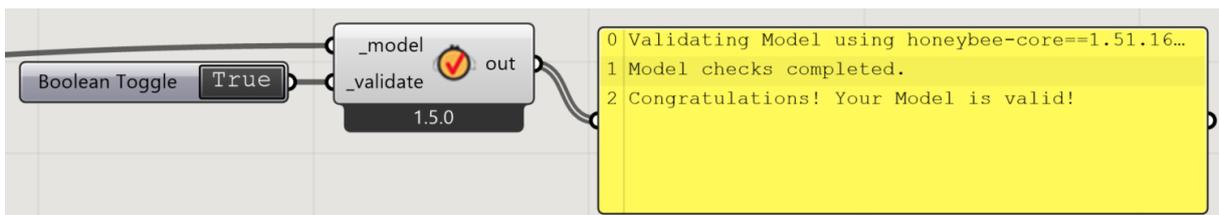




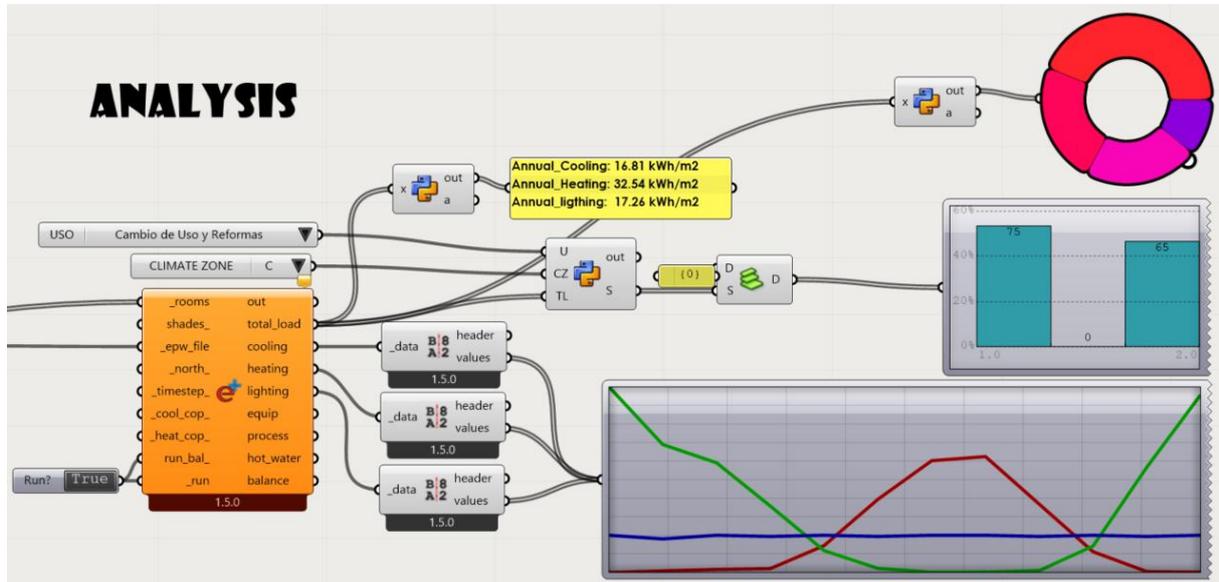
Creación del modelo y ejecución



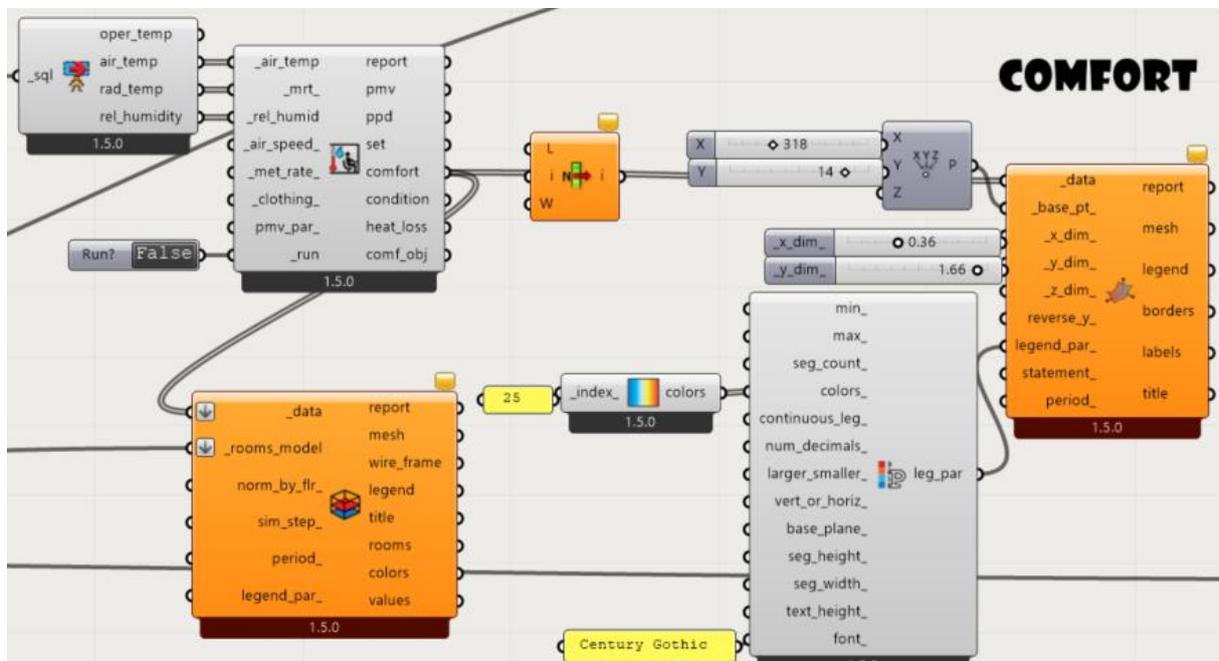
Validación del modelo



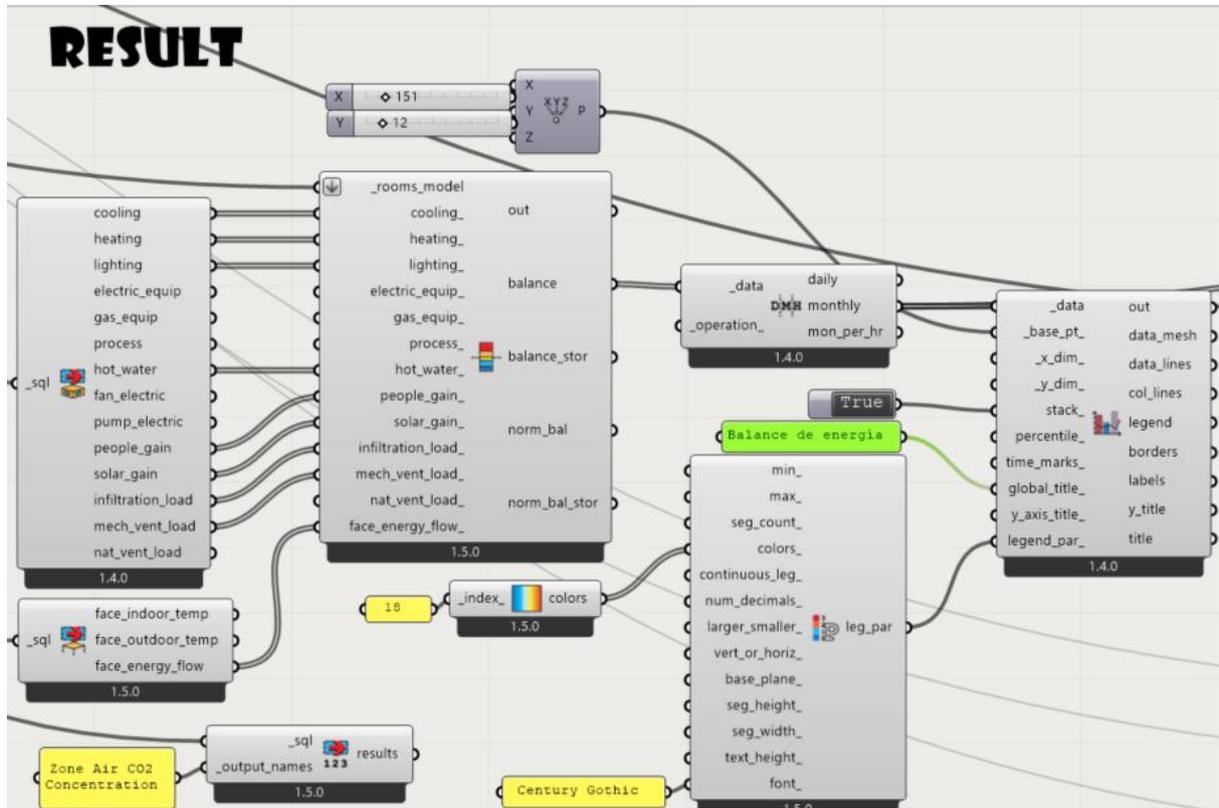
Análisis de resultados



Cálculo del confort interior



Resultados demanda y balance de energía



Visualización de resultados

