



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Análisis de sistemas de ventilación para viviendas
colectivas con certificación PassivHaus

Analysis of ventilation systems for collective housing
with PassivHaus certification



Autor

Ismael Razquin Plano

Director

Carlos Monné

Titulación del autor

Graduado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Año

2024

Resumen

En la actualidad, la eficiencia y ahorro energético son algunos de los pilares fundamentales en el diseño de edificios. Aplicando estos criterios a la mejora de los edificios dedicados a viviendas, surgió el concepto de PassivHaus. Este enfoque se centra en transformar el diseño y los materiales empleados en la construcción de viviendas para reducir significativamente su consumo energético.

Uno de los aspectos fundamentales para conseguir ahorros energéticos significativos respecto a viviendas estándar es la recuperación de energía en la ventilación de los edificios. En este proyecto se va a realizar el estudio del consumo térmico y eléctrico de un edificio de viviendas Passivhaus con emplazamiento en Zaragoza.

Para la realización del estudio energético se utiliza el programa CYPECAD MEP para el diseño y modelado en 3D del edificio. CYPECAD MEP ofrece la posibilidad de introducir los materiales empleados en la construcción del edificio y las condiciones en las que se quiere realizar el estudio, con el propósito de cumplir los estándares PassivHaus y la normativa española.

Definido el edificio, se analizarán tres alternativas distintas para la ventilación:

- Sistema centralizado de ventilación con recuperación de energía mediante una Unidad de tratamiento de aire (UTA en menciones posteriores)
- Sistemas de ventilación con recuperación de energía individualizada mediante recuperadores individuales instalados en cada vivienda
- Sistemas de ventilación sin recuperación de energía

Se definirán de forma detallada los tres sistemas de ventilación y su modo de funcionamiento, junto con el análisis de la selección de equipos para cada alternativa.

Finalmente se realizará el estudio energético del bloque de viviendas con las tres alternativas de ventilación implementadas mediante la importación del modelo 3D al software CYPECADTHERM HE, que permite realizar el estudio energético de modelos de viviendas 3D. Una vez obtenidos los datos energéticos, se compararán las distintas alternativas y se realizará un análisis económico a corto y largo plazo, para conocer la rentabilidad de las alternativas.

Finalmente se trasladará el estudio a otras zonas climáticas para conocer el funcionamiento de las PassivHaus y la recuperación de energía en otros climas.

A modo resumen, en el proyecto se pueden distinguir las siguientes fases:

- Recopilación de Normativa aplicable al proyecto
- Aprendizaje y utilización de los softwares de diseño
- Comparación de alternativas
- Conclusiones del proyecto

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen | 2 |
| Índice | 4 |
| Índice de figuras..... | 8 |
| Índice de Tablas | 10 |
| Índice de ecuaciones | 10 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Contexto y motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos y alcance | 1 |
| 1.3. Entornos de trabajo utilizados | 1 |
| 2. Normativa Aplicable a Proyecto | 3 |
| 2.1. PassivHaus..... | 3 |
| 2.1.1. Passive House Institute | 3 |
| 2.1.2. Requisitos Passivhaus | 3 |
| 2.2. Código Técnico de Edificación | 4 |
| 3. Alternativas de Estudio | 7 |
| 3.1. Descripción del edificio | 7 |
| 3.1.1. Diseño y emplazamiento | 7 |
| 3.1.2. Elementos constructivos..... | 9 |
| 3.2. Estrategias diseño ventilación..... | 9 |
| 3.2.1. Método de caudal constante | 9 |
| 3.2.2. Método de control por ppm | 10 |
| 3.3. Alternativas de recuperación de energía | 11 |
| 3.3.1. Ventilación con recuperación centralizada..... | 11 |
| 3.3.2. Ventilación con recuperación individual..... | 14 |
| 3.3.3. Ventilación sin recuperación | 16 |
| 4. Selección equipos de ventilación..... | 17 |
| 4.1. Selección UTA (recuperación centralizada)..... | 17 |
| 4.1.1. Cálculo del caudal de diseño | 17 |
| 4.1.2. Calculo pérdida de carga ventiladores..... | 24 |
| 4.1.3. Comparación UTAs Passiv | 27 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2. | Selección recuperadores individuales..... | 29 |
| 4.3. | Selección equipo sin recuperación | 30 |
| 5. | Comparativa Energética..... | 32 |
| 5.1. | Recuperación de energía centralizada..... | 33 |
| 5.1.1. | Demanda energética..... | 33 |
| 5.1.2. | Consumo eléctrico..... | 34 |
| 5.1.3. | Confort interior..... | 34 |
| 5.2. | Recuperación de energía individual..... | 35 |
| 5.2.1. | Demanda energética..... | 35 |
| 5.2.2. | Consumo eléctrico..... | 36 |
| 5.2.3. | Confort interior..... | 36 |
| 5.3. | Ventilación sin recuperación de energía..... | 37 |
| 5.3.1. | Demanda energética..... | 37 |
| 5.3.2. | Consumo eléctrico..... | 38 |
| 5.3.3. | Confort interior..... | 38 |
| 5.4. | Resultados..... | 39 |
| 5.4.1. | Cargas de ventilación..... | 39 |
| 5.4.2. | Demanda de refrigeración y calefacción | 41 |
| 5.4.3. | Consumo eléctrico..... | 42 |
| 5.4.4. | Máquina térmica | 43 |
| 6. | Comparativa Económica | 45 |
| 6.1. | Coste de mantenimiento y repuesto | 45 |
| 6.2. | Costes máquinas ventilación..... | 46 |
| 6.3. | Coste conductos ventilación | 46 |
| 6.4. | Coste consumo eléctrico ventiladores..... | 47 |
| 6.5. | Coste demanda de calefacción y refrigeración | 48 |
| 6.6. | Coste elementos ventilación..... | 49 |
| 6.7. | Coste total..... | 50 |
| 6.8. | Conclusiones apartado económico..... | 52 |
| 7. | Comparativa energética Zaragoza/Tenerife /Glasgow /Berlín..... | 53 |
| 8. | Conclusiones..... | 55 |
| 9. | Referencias | 56 |

| | |
|--|----|
| ANEXOS | 58 |
| Anexo I: Simulación energética | 58 |
| 1. Diseño bloque de viviendas en CAD | 58 |
| 2. Modelado en CYPECAD MEP | 60 |
| 2.1 Modelo importado | 60 |
| 2.2 Elementos constructivos | 62 |
| 2.3 Definición de la vivienda | 68 |
| 2.4 Escenario de ocupación | 69 |
| 2.5 Modelo 3D | 73 |
| 3. Diseño de instalaciones de ventilación en CYPETHEM HE | 76 |
| 3.1 Emplazamiento | 76 |
| 3.2 Horarios de ocupación | 77 |
| 3.3 Puentes térmicos | 79 |
| 3.4 Definición de viviendas | 80 |
| 3.5 Sistemas de ventilación | 81 |
| 3.5.1 Sistema de ventilación con recuperación centralizada | 81 |
| 3.5.2 Sistema de ventilación con recuperación individual | 82 |
| 3.5.3 Sistema de ventilación sin recuperación de energía | 83 |
| Anexo II: Método cálculo caudal constante | 84 |
| 1. Locales secos | 84 |
| 2. Locales húmedos | 84 |
| 3. Caudal final | 85 |
| Anexo III: Comparativa alternativa en distintos puntos de funcionamiento | 86 |
| 1. Caudal mínimo funcionamiento (4256 m³/h) | 86 |
| 2. Caudal con coeficiente de simultaneidad (8064 m³/h) | 88 |
| Anexo IV: Comparativa energética Zaragoza/Tenerife /Glasgow /Berlín | 90 |
| 1. Datos climáticos | 90 |
| 1.1 Zaragoza | 90 |
| 1.2 Tenerife | 91 |
| 1.3 Glasgow | 92 |
| 1.4 Berlín | 93 |
| 2. Comparativa energética | 95 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.1 | Comparativa recuperación-sin recuperación..... | 97 |
| 2.1.1. | Berlín..... | 97 |
| 2.1.2. | Glasgow | 98 |
| 2.1.3. | Tenerife | 98 |
| 2.1.4. | Conclusiones zonas climáticas | 99 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diseño viviendas | 7 |
| Figura 2. Diseño de la planta del edificio..... | 8 |
| Figura 3. Bloque de viviendas..... | 9 |
| Figura 4. Corte del alzado de la escalera en la zona de la azotea..... | 10 |
| Figura 5. Corte azotea conducto impulsión | 11 |
| Figura 6. Esquema ventilación recuperación centralizada azotea..... | 13 |
| Figura 7. Esquema ventilación recuperación centralizada viviendas | 14 |
| Figura 8. Esquema ventilación recuperación individual | 15 |
| Figura 9. Esquema ventilación sin recuperación | 16 |
| Figura 10. Pérdida de carga elementos finales ventilación | 26 |
| Figura 11. Comparativa eficiencia UTAs..... | 27 |
| Figura 12. Comparativa consumo eléctrico UTAs | 28 |
| Figura 13. Esquema equipo ventilación sin recuperación | 30 |
| Figura 14. Características ventilador | 31 |
| Figura 15. Perfil de temperaturas | 32 |
| Figura 16. Demanda energética recuperación centralizada | 33 |
| Figura 17. Confort interior recuperación centralizada | 34 |
| Figura 18. Demanda energética con recuperación de energía..... | 35 |
| Figura 19. Confort interior recuperación individual | 36 |
| Figura 20. Demanda energética sin recuperación | 37 |
| Figura 21. Confort interior sin recuperación | 38 |
| Figura 22. Comparativa cargas ventilación negativas | 39 |
| Figura 23. Comparativa cargas ventilación positivas | 40 |
| Figura 24. Comparativa demanda calefacción..... | 41 |
| Figura 25. Comparativa demanda refrigeración | 42 |
| Figura 26. Comparativo consumo eléctrico | 42 |
| Figura 27. Comparativa económica alternativas | 51 |
| Figura 28. Periodo de retorno recuperación centralizada | 52 |
| Figura 29. Datos climáticos Zaragoza..... | 90 |
| Figura 30. Humedad relativa Zaragoza | 91 |
| Figura 31. Datos climáticos Tenerife | 91 |
| Figura 32. Humedad relativa Tenerife..... | 92 |
| Figura 33. Datos climáticos Glasgow | 92 |
| Figura 34. Humedad relativa Glasgow | 93 |
| Figura 35. Datos climáticos Berlín..... | 93 |
| Figura 36. Humedad relativa Berlín | 94 |
| Figura 37. Cargas ventilación comparativa climática | 95 |
| Figura 38. Demandas de calefacción zonas climáticas | 96 |
| Figura 39. Comparativa con-sin recuperación Berlín..... | 97 |

| | |
|--|----|
| Figura 40.Comparativa con-sin recuperación Glasgow | 98 |
| Figura 41.Comparativa con-sin recuperación Tenerife | 98 |
| Figura 42. Pareado viviendas | 58 |
| Figura 43. Bloque de viviendas | 59 |
| Figura 44. Bloque viviendas CYPECAD MEP..... | 60 |
| Figura 45. Definición plantas bloque viviendas | 61 |
| Figura 46. Definición cerramiento exterior | 62 |
| Figura 47. Descripción tabique interior | 63 |
| Figura 48. Descripción solera..... | 63 |
| Figura 49. Descripción forjado..... | 64 |
| Figura 50. Descripción forjado..... | 65 |
| Figura 51. Descripción tejado | 66 |
| Figura 52. Descripción huecos | 67 |
| Figura 53. Descripción ventanas..... | 67 |
| Figura 54.Definición viviendas..... | 68 |
| Figura 55. Ejemplo condiciones diseño | 68 |
| Figura 56. Horarios ocupación cocina CYPECAD..... | 69 |
| Figura 57. Horarios ocupación sala de estar CYPECAD..... | 70 |
| Figura 58. Horarios ocupación baños CYPECAD | 71 |
| Figura 59.Horarios ocupación dormitorios CYPECAD | 72 |
| Figura 60. Modelo planta baja..... | 73 |
| Figura 61. Modelo arquetipo viviendas..... | 73 |
| Figura 62.Modelo 3D bloque viviendas | 74 |
| Figura 63. Modelo 3D Planta Baja-Interplanta | 75 |
| Figura 64. Modelo 3D frontal bloque viviendas | 75 |
| Figura 65.Modelo 3D parte trasera bloque viviendas | 75 |
| Figura 66. Emplazamiento CYPECAD THERM HE | 76 |
| Figura 67. Horarios ocupación CYPECAD THERM HE Lunes-Viernes..... | 77 |
| Figura 68. Horarios ocupación CYPECAD THERM HE Sábado-Domingo..... | 78 |
| Figura 69. Definición horarios ocupación | 78 |
| Figura 70.Puentes térmicos | 79 |
| Figura 71.Condiciones viviendas..... | 80 |
| Figura 72.Condiciones ventilación e infiltraciones | 80 |
| Figura 73. Definición UTAs | 82 |
| Figura 74.Definición boca impulsión | 82 |
| Figura 75.Definición recuperadores individuales | 83 |
| Figura 76. Sistema ventilación sin recuperación | 83 |
| Figura 77. Consumo eléctrico 4256 m3/h | 86 |
| Figura 78.Cargas ventilación 4256 m3/h | 87 |
| Figura 79.Consumo eléctrico 8064 m3/h | 88 |
| Figura 80. Cargas ventilación 8064 m3/h | 89 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Descripción locales viviendas | 5 |
| Tabla 2. Valores límite elementos constructivos | 5 |
| Tabla 3. Elementos constructivos | 9 |
| Tabla 4. Ocupación Lunes-Viernes | 18 |
| Tabla 5. Ocupación Sábado-Domingo | 19 |
| Tabla 6. Coeficientes actividad metabólica | 20 |
| Tabla 7. Caudales ventilación Lunes-Viernes | 20 |
| Tabla 8. Caudales ventilación Sábado-Domingo | 21 |
| Tabla 9. Cálculo ppm horarias Lunes-Viernes | 22 |
| Tabla 10. Cálculo ppm horarias Sábado-Domingo | 23 |
| Tabla 11. Pérdida de carga conductos ventilación centralizada | 25 |
| Tabla 12. Pérdida de carga accesorios | 26 |
| Tabla 13. Puntos de trabajo Siber DF EVO 1 | 29 |
| Tabla 14. Puntos de trabajo Siber DF EVO 2. | 29 |
| Tabla 15. Coste mantenimiento recuperación individual | 45 |
| Tabla 16. Coste mantenimiento sin recuperación | 45 |
| Tabla 17. Coste mantenimiento recuperación centralizada | 45 |
| Tabla 18. Coste recuperadores individuales | 46 |
| Tabla 19. Coste extractores ventilación sin recuperación | 46 |
| Tabla 20. Coste conductos ventilación recuperación individual | 46 |
| Tabla 21. Coste conductos ventilación sin recuperación | 47 |
| Tabla 22. Coste conductos ventilación recuperación centralizada | 47 |
| Tabla 23. Coste elementos ventilación recuperación individual | 49 |
| Tabla 24. Coste elementos ventilación sin recuperación | 49 |
| Tabla 25. Coste elementos ventilación recuperación centralizada | 50 |
| Tabla 26. Coste total ventilación recuperación individual | 50 |
| Tabla 27. Coste total ventilación sin recuperación | 50 |
| Tabla 28. Coste total ventilación recuperación centralizada | 51 |
| Tabla 29. Locales húmedos y secos | 84 |

Índice de ecuaciones

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Producción CO ₂ personas | 19 |
| Ecuación 2. Caudal aire exterior | 19 |
| Ecuación 3. COP | 43 |

1. Introducción

En este capítulo se expone el contexto, la motivación y los objetivos de este proyecto, así como las herramientas utilizadas durante su desarrollo. Finalmente se realiza un breve resumen de cómo se han estructurado los capítulos del proyecto.

1.1. Contexto y motivación

Desde hace unas décadas, se están realizando grandes esfuerzos para desarrollar nuevas técnicas constructivas que permitan reducir el consumo energético de las viviendas, adaptándose así a las cada vez más restrictivas normativas y crecientes exigencias de los propietarios.

En este contexto surge el concepto PassivHaus, viviendas que presentan unos niveles de aislamiento muy superiores a las viviendas convencionales. Estas viviendas permiten reducir de forma significativa su consumo energético y mejorar el nivel de confort de los propietarios. Con PassivHaus, se abre un nuevo horizonte en la construcción sostenible, ofreciendo una solución viable y efectiva para las demandas energéticas del presente y el futuro.

1.2. Objetivos y alcance

En este proyecto, se va a estudiar una posible mejora en las viviendas PassivHaus mediante la centralización del sistema de recuperación de energía en la ventilación. Se plantearán tres alternativas distintas para cubrir la demanda energética del bloque de viviendas PassivHaus: un sistema de ventilación sin recuperación de energía, un sistema de ventilación con recuperación individual (un dispositivo por vivienda) y un sistema de ventilación con recuperación centralizada (UTA). Se compararán las tres propuestas tanto energética como económicamente, obteniendo así las ventajas y desventajas de cada una.

Este objetivo se puede disgregar en objetivos más detallados como:

- Inversión inicial de las propuestas
- Coste anual de las alternativas
- Coste a largo plazo

Además, como objetivo final se desarrolla un posible diseño de las instalaciones del sistema de recuperación centralizada que se plantea como alternativa.

1.3. Entornos de trabajo utilizados

En este proyecto se han utilizado dos softwares de simulación para el diseño del bloque de viviendas en 3D. Se ha diseñado la envolvente de un edificio PassivHaus al completo para la obtención de la demanda energética durante un año completo. Además de ello, se ha utilizado Aircalc para la simulación y obtención de datos de interés de la UTA.

- CYPECAD MEP: es un programa utilizado para el diseño y dimensionamiento de la envolvente, distribución e instalaciones del edificio en un modelo 3D. Pertenecer al conjunto de aplicaciones del que dispone CYPE.
Este software se emplea para realizar el modelado en 3D del bloque de viviendas, así como la definición de las zonas de la casa. El modelo 3D creado se empleará como modelo base en CYPETHERM HE, software en el cual se realizará la simulación energética.
- CYPETHERM HE: programa diseñado para la certificación de eficiencia energética y justificación normativa, para la obtención de la certificación CTE DB HE 0 y HE 1.
Este software se emplea para la obtención de la demanda térmica del bloque de viviendas y el consumo energético de las viviendas. Además, se pueden obtener gráficas de interés como el confort térmico interior de las viviendas y certificados energéticos.
- Aircalc: software que permite el diseño de UTAs y su simulación en distintos puntos de trabajo. Se emplea para la obtención de la eficiencia y el consumo eléctrico de la UTA utilizada en el proyecto.

2. Normativa Aplicable a Proyecto

En este capítulo se recopila toda la normativa a aplicar en el proyecto, relativa tanto al diseño de la edificación como al diseño de las máquinas de recuperación de energía. Además, en el inicio se realizará una breve introducción del concepto PassivHaus y del PassivHaus Institute (Passive House Institute, 2024).

2.1. PassivHaus

El concepto Passivhaus, conocidas como casas pasivas, fue un estándar revolucionario surgido en 1988 en Alemania. Estas viviendas buscaban alcanzar una eficiencia energética mucho mayor que las viviendas de construcción estándar, mediante la utilización de altos niveles de aislamiento térmico, eliminación de puentes térmicos, hermeticidad del aire y sistemas de ventilación controlada. El objetivo principal de estas casas es reducir al máximo el consumo energético, acercándose a viviendas de consumo casi nulo.

2.1.1. Passive House Institute

En 1996 se formó el Passive House Institute (PHI), instituto de investigación independiente fundado por el Dr. Wolfgang. El PHI ha desempeñado un papel especialmente crucial en el desarrollo del concepto Passivhaus. Se encuentra en constante investigación y desarrollo de conceptos de construcción, componentes de construcción y control de calidad para edificios con gran eficiencia energética.

Con la construcción de viviendas PassivHaus, se puede ahorrar hasta el 90% del consumo energético de edificios estándar y más de un 75% con respecto a las construcciones nuevas promedio. Además, tienen un alto nivel de confort para las personas, ya que las temperaturas de las superficies tienen un gradiente térmico muy bajo respecto al aire interior.

Es por ello y otros motivos, que la irrupción de las Passivhaus, a día de hoy, es una realidad que con el paso del tiempo irá ganando mayor importancia dentro del sector de la construcción.

2.1.2. Requisitos Passivhaus

Para la obtención del certificado Passivhaus, es necesario el cumplimiento de una serie de requisitos que garanticen la eficiencia energética exigida en las edificaciones (Passipedia, 2024). De todos los requisitos para la obtención del certificado se muestran aquellos que afectan al proyecto:

-Ventilación: en las viviendas Passiv, al menos el 75% de la energía del aire de salida debe ser transferida al aire fresco mediante un intercambiador de calor. En cuanto al caudal de ventilación, se deben suministrar $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por cada persona en el interior de la vivienda.

-Envolvente: todos los componentes de la envolvente exterior deben tener un coeficiente de transferencia de calor de $0.15 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$, siendo un valor máximo de $0.8 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$ para los marcos de las ventanas. Mediante esta envolvente, se consigue un excelente aislamiento térmico, disminuyendo el efecto de la temperatura exterior en el interior del edificio.

-Demanda energética: la demanda energética para calefacción no debe sobrepasar los 15 kWh al año por metro cuadrado de espacio habitable o 10 W por metro cuadrado de demanda máxima. En climas donde se necesita enfriamiento activo, el requisito de demanda de energía para enfriamiento de espacios coincide aproximadamente con los requisitos de demanda de calor mencionados anteriormente, con un margen adicional para la deshumectación.

-Condiciones térmicas interiores: las condiciones térmicas interiores garantizan el confort térmico de las personas, por ello la temperatura interior no puede sobrepasar los $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ más del 10% de las horas del año.

-Puentes térmicos: se trata de minimizar el efecto de los puentes térmicos en la demanda energética de las viviendas.

2.2. Código Técnico de Edificación

El Código Técnico de Edificación (CTE para posteriores referencias), es el marco normativo que establece las exigencias básicas que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. En este proyecto se van a incluir aquellos requisitos relacionados con la transmisión de energía, para el diseño del bloque de viviendas y los relacionados con la ventilación del bloque de viviendas.

-Ventilación: en el CTE DB HS 3 (Gobierno de España, 2024) se indica que para la ventilación se exige un caudal de aire suficiente para asegurar que en cada local la concentración media anual de CO_2 sea menor que 900 ppm y que el acumulado anual de CO_2 que exceda 1.600 ppm sea menor que $500.000 \text{ ppm} \cdot \text{h}$. Además el caudal de aire debe ser mínimo de 1.5 l/s por local habitable en los periodos de no ocupación, para eliminar los contaminantes no relacionados con la presencia humana.

Las condiciones anteriores se cumplen con un caudal de ventilación constante acorde a la tabla 2.1(Tabla 1) del documento previamente mencionado.

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

(1) En los *locales* secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo *local* se den usos de *local* seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros *locales* pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

Tabla 1. Descripción locales viviendas

-Transmitancia térmica elementos constructivos: en el CTE DB HE 1 (Gobierno de España, 2024) se indican los valores límite de transmitancia térmica de los cerramientos internos de las viviendas.

Se tendrán en cuenta los valores de muros, suelos y cubiertas en contacto con el aire exterior y con espacios no habitables o con el terreno. Se utilizarán también los valores límite para el diseño de los huecos y puertas.

En la tabla 3.1.1.a-HE1 (Tabla 2 del documento) se muestran los valores límite de los elementos constructivos utilizados.

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) | 0,90 | 0,80 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,59 |
| Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la <i>envolvente térmica</i> (U_{MD}) | | | | | | |
| 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 | | |

Tabla 2. Valores límite elementos constructivos

-Condiciones térmicas interiores: las temperaturas de consigna se establecen según los criterios del RITE respecto a las condiciones interiores de diseño con 21°C como temperatura mínima en invierno y de 25°C como temperatura máxima de verano.

-Demanda Energética: la demanda de calefacción y refrigeración deben ser menores a $15 \frac{kWh}{m^2}$ según el CTE DB HE 1 en el punto 3 del documento.

Todos estos requisitos, se tendrán que tener en cuenta a la hora de diseñar el edificio. En caso de que el CTE y Passivhaus hagan referencia a un mismo concepto e impongan requisitos distintos, siempre se aplicará aquel que sea más restrictivo.

3. Alternativas de Estudio

En este capítulo se realiza una descripción detallada de las alternativas de estudio que se contemplan en el proyecto. Como punto de partida se va a realizar una breve descripción del edificio en el que se va a realizar el estudio. Posteriormente se van a describir las dos estrategias para el diseño de la ventilación de las viviendas y finalmente las tres alternativas de estudio relativas a la recuperación de energía en la ventilación.

3.1. Descripción del edificio

En este apartado se va a describir el diseño del edificio que se ha empleado para el estudio y el emplazamiento del mismo.

3.1.1. Diseño y emplazamiento

El edificio se ha diseñado en la ciudad de Zaragoza, lugar del que se obtendrán las condiciones climatológicas para el estudio. Las viviendas se han diseñado para 4 personas, con 3 dormitorios, 2 baños, 1 sala de estar y terraza. El diseño de la vivienda mostrado en la Figura 1 se repite a lo largo del bloque de viviendas.

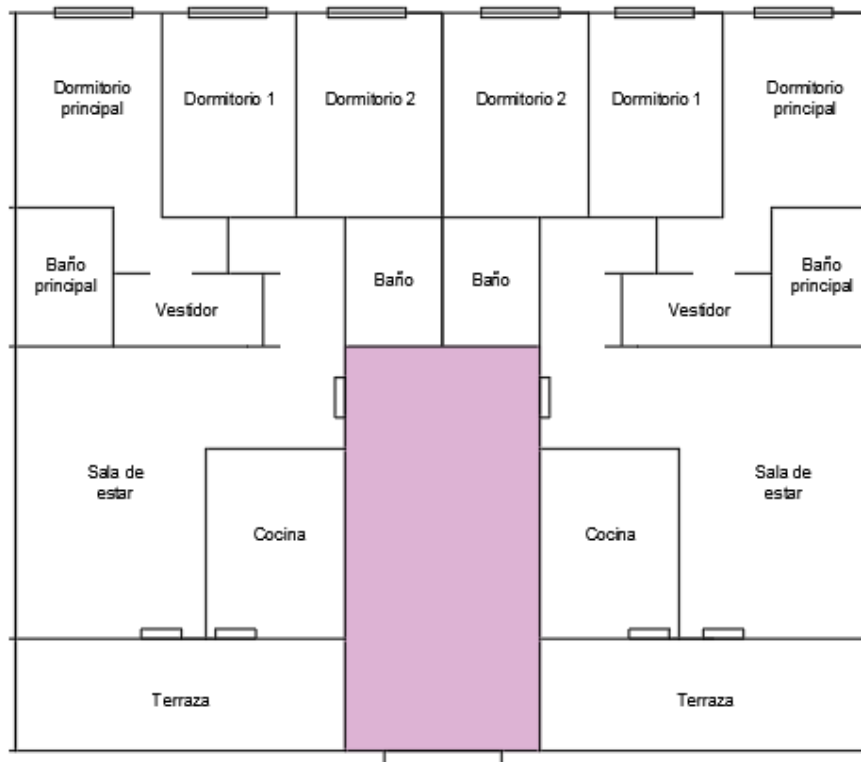


Figura 1. Diseño viviendas

El bloque de viviendas completo se ha diseñado en forma de L (Figura 2) para tener en cuenta el efecto de las distintas orientaciones durante el estudio energético. Las orientaciones afectarán al impacto del viento en las fachadas de la vivienda y al efecto que tendrá el sol en la demanda energética de la vivienda.

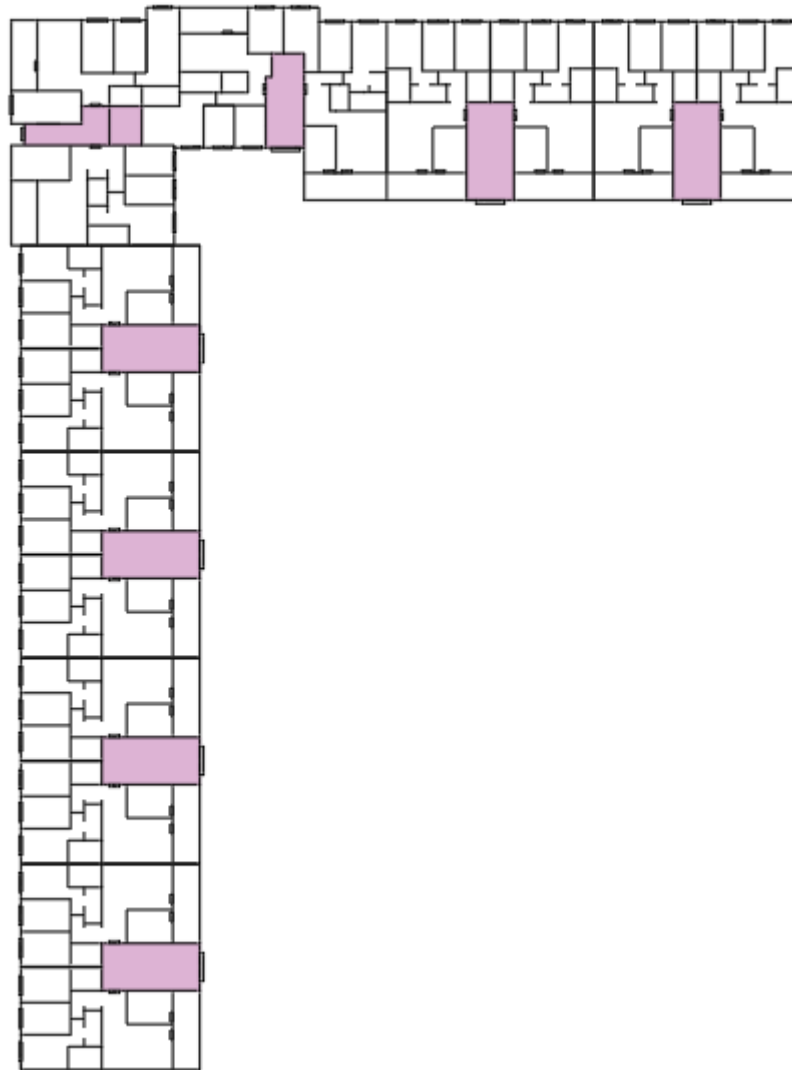


Figura 2. Diseño de la planta del edificio

Para definir el número de plantas del bloque de viviendas se ha tenido en cuenta el efecto que puede tener la solera y la cubierta en la demanda energética de las viviendas. Es por ello que se ha diseñado con 7 plantas idénticas, reduciendo el efecto de la solera y cubierta, permitiendo obtener unos valores de la demanda energética cercanos a valores promedios.

El edificio se ha diseñado con 8 escaleras (espacios rosas en la figura 2). Las escaleras permiten el acceso a 2 viviendas en cada planta, por lo que cada escalera consta de un total de 14 viviendas, teniendo en cuenta las 7 plantas del edificio.

En la Figura 3 se observa el diseño final del edificio. Figura 2. Diseño de la planta del edificio

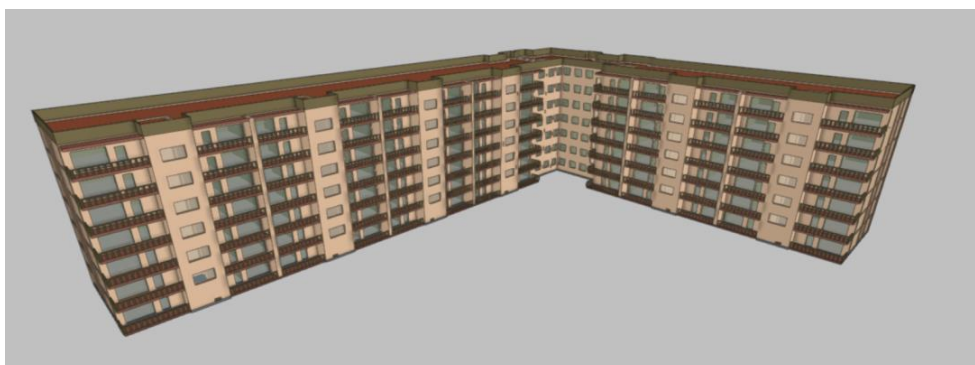


Figura 3. Bloque de viviendas

3.1.2. Elementos constructivos

En la Tabla 3 se muestran las transmitancias térmicas de los elementos constructivos empleados en el bloque de viviendas.

| Elemento constructivo | Transmitancia térmica (W/m ² *K) |
|------------------------|---|
| Cerramiento exterior | 0,15 |
| Tabique interior | 0,39 |
| Solera | 0,35 |
| Forjado unidireccional | 0,74 |
| Forjado terrazas | 0,37 |
| Cubierta | 0,15 |
| Ventanas | 0,8 |

Tabla 3. Elementos constructivos

En el **Anexo I** se muestra en detalle el proceso de diseño del bloque de viviendas y la elección de elementos constructivos.

3.2. Estrategias diseño ventilación

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el diseño de la ventilación puede realizarse mediante caudal constante o mediante el control de las ppm de CO₂.

3.2.1. Método de caudal constante

Para el cumplimiento del CTE se puede realizar la ventilación de las viviendas mediante la impulsión de 120 m³/h de aire de forma constante, calculado en función del número de locales secos y húmedos de las viviendas que se han diseñado.

El cálculo se explica en el Anexo II.

Para el cumplimiento de los criterios PassivHaus de ventilación se requieren aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{h}$ de aire de ventilación por persona que se encuentre en la vivienda.

Con el criterio dado por el instituto PassivHaus, cuando la vivienda está completa, al ser una vivienda con un dormitorio doble y dos individuales, está diseñada para 4 personas, requiriendo un caudal de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, el mismo caudal que exige el CTE de forma constante.

Por ello en caso de que se realice el estudio por el método de caudal constante, se cumplirán las exigencias del CTE al ser más restrictivas que el instituto PassivHaus.

3.2.2. Método de control por ppm

El CTE permite realizar un ajuste más fino del caudal que se suministra, adaptándose al nivel de CO_2 a través del nivel de ppm que contiene el aire de la vivienda en cada momento. Para realizar el control del CO_2 , se instalan medidores de CO_2 en los sistemas de extracción de las viviendas.

En la Figura 4 se representa la colocación del medidor de CO_2 mediante un corte del alzado de la escalera en la última planta del edificio.

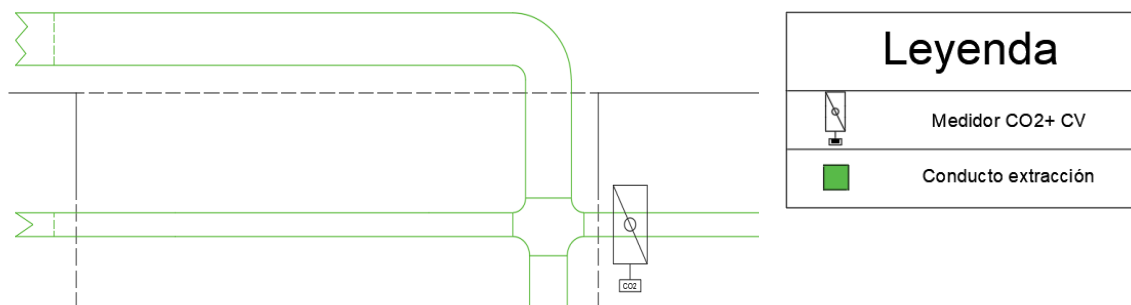


Figura 4. Corte del alzado de la escalera en la zona de la azotea

La figura 4 representa el corte del alzado en la zona de la azotea en la bajante donde sube el conducto de extracción. El conducto se divide para extraer el aire de las viviendas de la planta y baja hacia las plantas inferiores. Se puede observar donde se sitúa el medidor de CO_2 junto a la caja de caudal variable en el conducto de extracción a la salida de la vivienda. Mediante su colocación en la salida de la vivienda, se obtiene un valor promedio de las ppm extraídas en la vivienda de todos los locales húmedos en los que se extrae aire.

En la Figura 5 se representa la colocación de la caja de caudal variable en el conducto de impulsión.

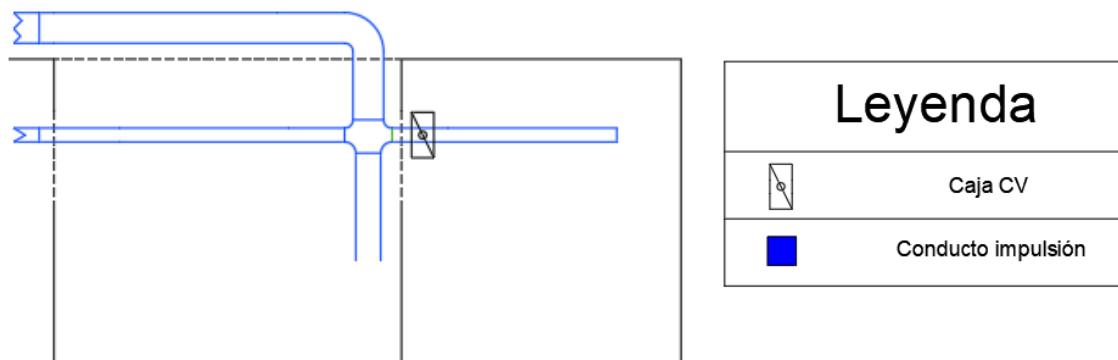


Figura 5. Corte azotea conducto impulsión

Como se puede observar la disposición es idéntica a la extracción, a excepción de la sonda de CO_2 situada únicamente en la extracción de las viviendas.

3.3. Alternativas de recuperación de energía

La recuperación de energía se ha planteado mediante tres alternativas: con recuperación de energía centralizada, con recuperación de energía individual y sin recuperación de energía. Para el diseño de los sistemas de ventilación se tendrá en cuenta el CTE DB HS donde se definen las estancias en las que se debe impulsar el aire exterior y en las que se debe realizar la extracción de aire.

3.3.1. Ventilación con recuperación centralizada

El sistema de ventilación es un sistema de caudal variable a presión constante (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2019). El sistema, como se ha comentado anteriormente, se encuentra comandado por las sondas de CO_2 de las viviendas. Estas sondas miden las partículas por millón en el aire de extracción de cada una de las viviendas y en función de este valor regulan la apertura de las cajas de caudal variable, manteniendo constante la pérdida de carga a lo largo del sistema de ventilación. Mediante la variación de la velocidad del ventilador y la apertura de las cajas de caudal variable tanto en impulsión como en retorno, se controla el caudal de aire impulsado y extraído de cada una de las viviendas.

La centralización del sistema de ventilación consiste en la instalación de una UTA que suministre el caudal necesario para la ventilación del bloque de viviendas en su conjunto. El sistema de ventilación tiene capacidad de adaptación desde un caudal máximo de diseño hasta un hipotético caudal nulo, permitiendo adaptación total al caudal que requiera el bloque de viviendas.

Las UTAs al igual que los recuperadores individuales permiten realizar free-cooling cuando las condiciones exteriores sean favorables. El free-cooling permite introducir aire exterior de forma directa al interior de la vivienda sin utilizar el recuperador de energía.

Se va a emplear cuando los beneficios obtenidos a través de la introducción de aire directa del exterior sean mayores a la introducción del aire mediante recuperación de energía.

Para que se active la función de free-cooling se tienen que cumplir tres criterios: la temperatura exterior se tiene que encontrar por debajo de la temperatura en el interior de la vivienda, el interior de la vivienda tiene que superar la temperatura interior máxima, aquella que se establezca de confort en las épocas cálidas (habitualmente 24°C) y la temperatura exterior tiene que ser superior a una temperatura mínima, para no introducir aire excesivamente frío.

El esquema de funcionamiento se representa en la Figura 6.

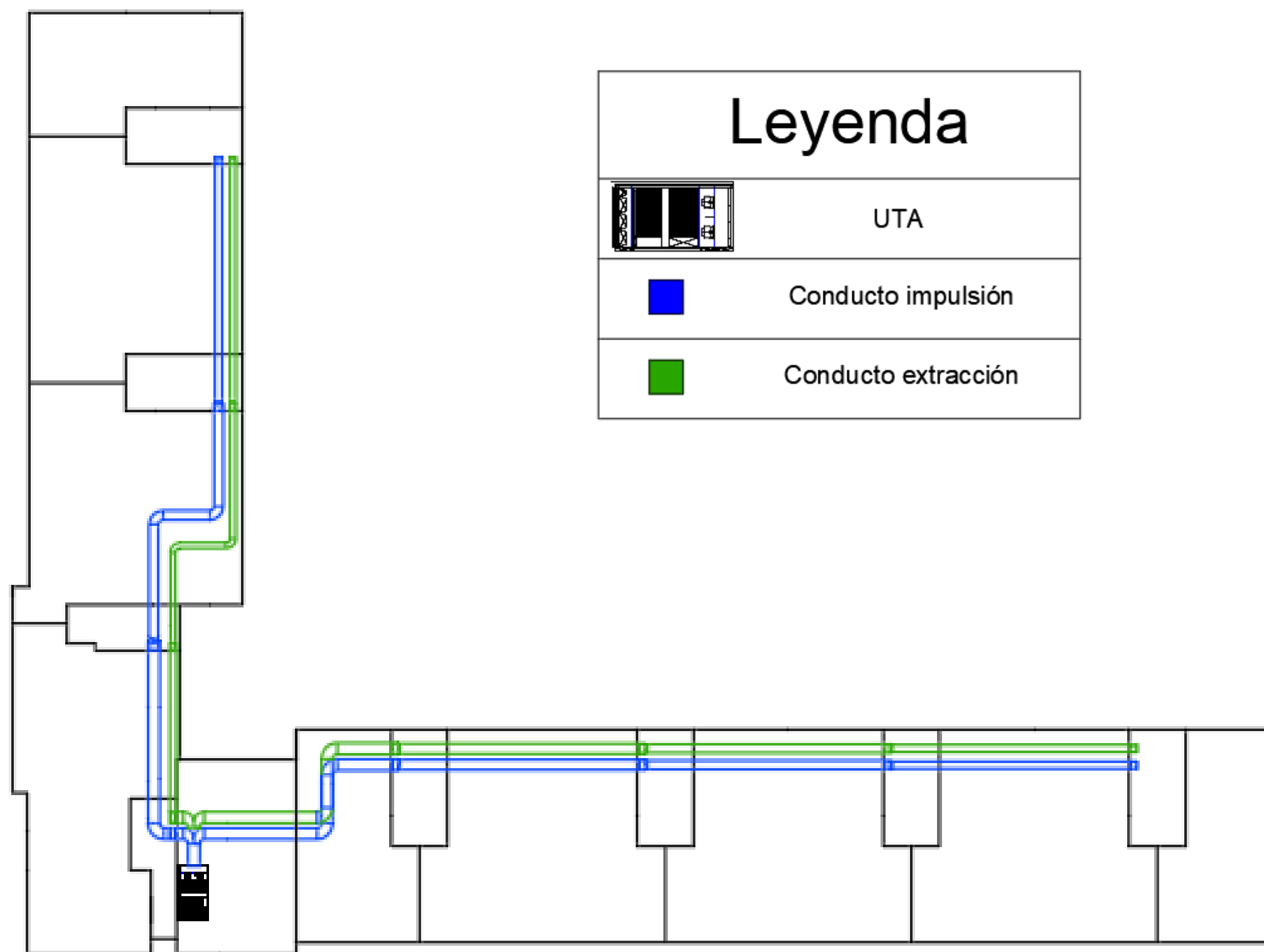


Figura 6. Esquema ventilación recuperación centralizada azotea

Como se observa en la Figura 6 se ha colocado una única UTA en una zona intermedia para optimizar tanto la longitud de conducto como la cantidad de conducto de máximas dimensiones en la intemperie (requiere mayor protección y mayor coste). Se impulsa el aire al interior de las viviendas directamente desde la UTA a través del conducto de impulsión a las 8 escaleras mediante ramificaciones del conducto. En las propias escaleras el conducto se va ramificando permitiendo la impulsión en cada una de las viviendas a través de los difusores en los locales secos. El proceso de extracción de aire es exactamente igual al de impulsión, solo que los elementos terminales en este caso son las rejillas de extracción situadas en los locales húmedos.

En la Figura 7 se representa el sistema de ventilación que se ha diseñado para las viviendas.

Esquema ventilación centralizada viviendas

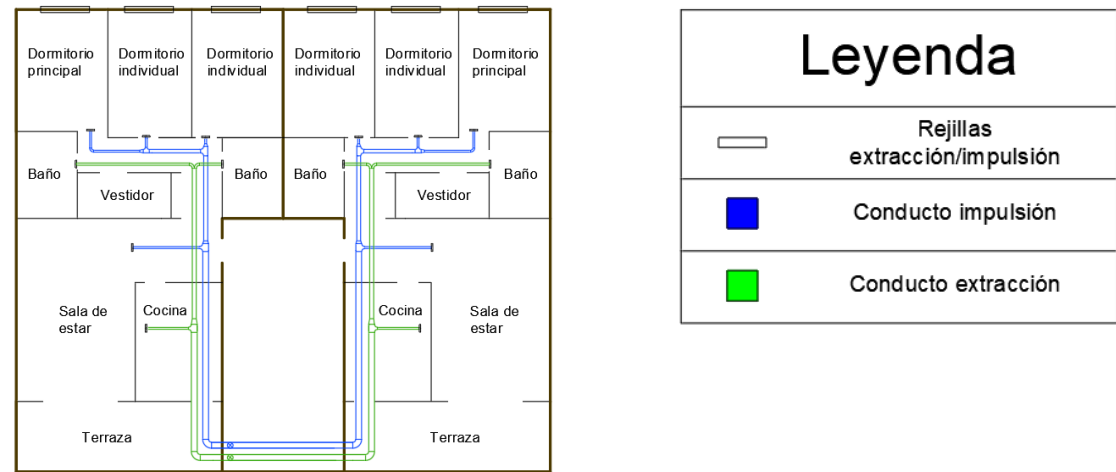


Figura 7. Esquema ventilación recuperación centralizada viviendas

Se puede observar la zona del patinillo donde baja la instalación de ventilación con el conducto de impulsión y extracción, que se distribuye a cada una de las viviendas. Se sitúan difusores de impulsión en los locales secos, es decir; salón y dormitorios. Las rejillas de extracción se sitúan en los locales húmedos; baños y cocina.

3.3.2. Ventilación con recuperación individual

El sistema de recuperación individual consiste en la instalación de un recuperador de energía en cada vivienda. Los recuperadores están diseñados para dar 3 caudales de impulsión distintos, permitiendo cierta adaptación al caudal que se requiere en la vivienda. El ventilador que se ha seleccionado para el estudio es el Siber DF EVO 1 (Siber Zone, S.L.U., 2024), recuperador con certificado PassivHaus y con posibilidad de adaptación, requerimientos que tiene que cumplir el recuperador para el caso de estudio.

El sistema de ventilación se ha diseñado con pérdida de carga constante en el sistema de conductos, de forma que, mediante la adaptación de la velocidad del ventilador de extracción e impulsión se adecúa el aire impulsado y extraído de cada vivienda.

Este sistema de ventilación extrae aire a temperatura interior e intercambia energía con el aire exterior que va a introducir al interior de la vivienda. Los recuperadores individuales además permiten realizar free-cooling en las épocas cálidas del año (enfriamiento gratuito), de la misma forma que en el caso de recuperación centralizada.

El esquema de funcionamiento con recuperadores individuales se representa en la Figura 8.

Esquema recuperadores individuales

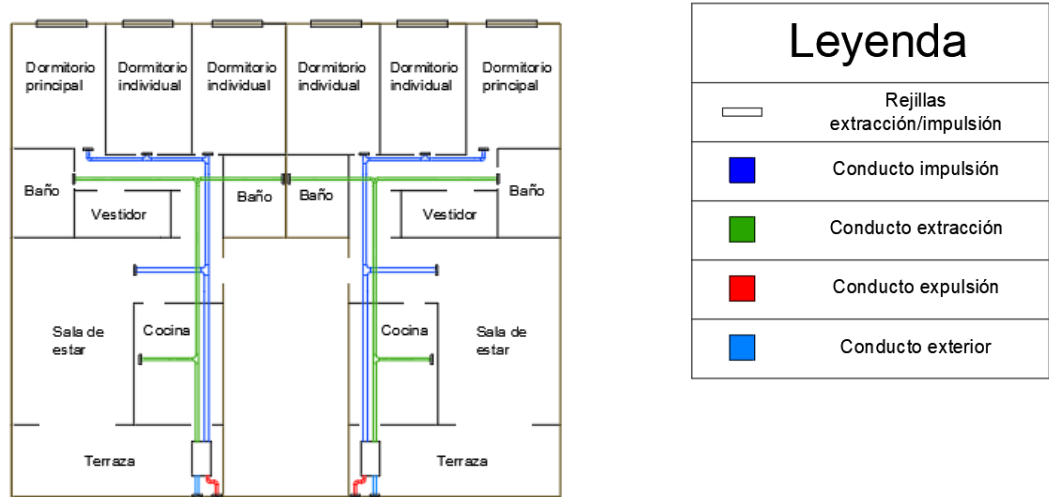


Figura 8. Esquema ventilación recuperación individual

El sistema con recuperación individual incluye un conducto de extracción de aire en los locales húmedos y un conducto de impulsión en los locales secos de la vivienda. El aire extraído de la vivienda pasa por el recuperador e intercambia energía con el aire exterior, disminuyendo las cargas térmicas introducidas respecto al sistema sin recuperación. El conducto de extracción una vez pasa por el recuperador expulsa el aire al exterior a través del conducto de extracción y el conducto exterior impulsa el aire al interior de la vivienda a través del conducto de impulsión.

3.3.3. Ventilación sin recuperación

La ventilación del edificio se realiza mediante ventilación híbrida. Este sistema de ventilación es muy similar al sistema con recuperación centralizada. Se sitúa el ventilador en la azotea, utilizando un ventilador en cada una de las escaleras del edificio. El ventilador extrae aire de todas las viviendas de la escalera, 14 en este caso, a través de cajas de caudal variable en el conducto de extracción principal de cada vivienda. La impulsión de este sistema se realiza a través de aperturas al exterior, situadas en los locales secos de la vivienda.

El mayor problema que genera esta instalación es la disminución del confort que puede generar en el interior de las viviendas. El aire, al ser introducido a temperatura exterior puede generar corrientes molestas, especialmente en las épocas frías del año donde el gradiente térmico entre la temperatura interior y exterior es muy elevado.

El esquema de funcionamiento se representa en la Figura 9.

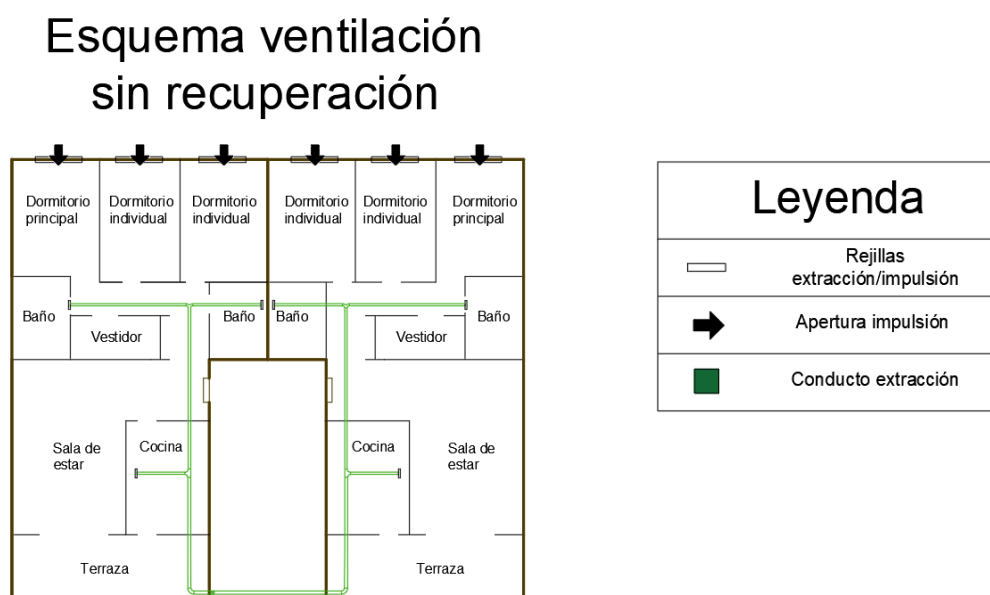


Figura 9. Esquema ventilación sin recuperación

Como se puede observar, únicamente se define el sistema de extracción, situado en los baños y en la cocina (estancias húmedas según CTE), donde se debe realizar la extracción del aire de ventilación. La expulsión del aire se realiza de forma centralizada recogiendo en un conducto de extracción la extracción de cada una de las viviendas de la escalera. Este conducto de extracción conduce el aire de expulsión que recoge a la zona de expulsión situada en la azotea del edificio, donde se encuentra la máquina con el ventilador de extracción.

4. Selección equipos de ventilación

En este apartado se van a seleccionar los equipos empleados para la ventilación en las tres alternativas de recuperación.

4.1. Selección UTA (recuperación centralizada)

Para seleccionar la UTA es imprescindible tener en cuenta el cumplimiento del CTE DB HS 3 y de los requerimientos impuestos por el instituto PassivHaus relativos a la ventilación de las viviendas. Además, habrá que tener en cuenta aspectos económicos y realizar una comparación en términos de eficiencia y consumo eléctrico.

4.1.1. Cálculo del caudal de diseño

El caudal de la UTA se va a calcular en función de las restricciones impuestas por el CTE y PassivHaus. Para el cumplimiento del CTE es necesario realizar el control de las ppm de CO_2 del interior de la vivienda, manteniendo su media por debajo de las 900 ppm y el acumulado anual situado por encima de las 1600 ppm no puede ser superior a 500.000 ppm·h. La normativa Passiv aplicable a ventilación, exige un caudal de en torno a $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por persona que se encuentre dentro de la vivienda, con capacidad de adaptación al número de personas y actividades que estén realizando.

Para calcular el caudal de la UTA, inicialmente se deben definir los horarios de ocupación de las personas. Los horarios de ocupación se definen en cumplimiento del CTE DB HS 3, que define condiciones de diseño para la determinación del caudal de ventilación de los locales habitables de las viviendas. En el documento se hace una diferenciación entre los horarios de ocupación entre semana y los fines de semana representados en la Tabla 4 y Tabla 5.

| Intervalo horario | Lunes-Viernes | | | |
|-------------------|---------------|---------------|------|------------|
| | Cocina | Sala de estar | Baño | Dormitorio |
| 0:00-1:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 1:00-2:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 2:00-3:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 3:00-4:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 4:00-5:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 5:00-6:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 6:00-7:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 7:00-8:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 8:00-9:00 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 9:00-10:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00-11:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00-12:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12:00-13:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00-14:00 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 14:00-15:00 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 15:00-16:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:00-17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00-18:00 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 20:00-21:00 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 21:00-22:00 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 22:00-23:00 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| 23:00-0:00 | 0 | 4 | 0 | 0 |

Tabla 4. Ocupación Lunes-Viernes

| Intervalo horario | Sábado-Domingo | | | |
|-------------------|----------------|---------------|------|------------|
| | Cocina | Sala de estar | Baño | Dormitorio |
| 0:00-1:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 1:00-2:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 2:00-3:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 3:00-4:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 4:00-5:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 5:00-6:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 6:00-7:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 7:00-8:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 8:00-9:00 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 9:00-10:00 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 10:00-11:00 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 11:00-12:00 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 12:00-13:00 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 13:00-14:00 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 14:00-15:00 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 15:00-16:00 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 16:00-17:00 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 17:00-18:00 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 20:00-21:00 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| 21:00-22:00 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 22:00-23:00 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 23:00-0:00 | 0 | 0 | 0 | 4 |

Tabla 5. Ocupación Sábado-Domingo

Una vez definidos los horarios de ocupación se procede a calcular la cantidad de dióxido de carbono producido por las personas en el interior de la vivienda mediante la Ecuación 1.

$$q_{CO_2} = 0,0042 * \bar{M}$$

Ecuación 1. Producción CO2 personas

Siendo q_{CO_2} la tasa de generación de dióxido de carbono en l/s por persona y \bar{M} el coeficiente de actividad media metabólica de los ocupantes.

Una vez calculada la tasa de generación de cada persona, se calcula el caudal de aire exterior necesario para mantener la concentración interior de dióxido de carbono requerida, para ello se utiliza la Ecuación 2 proporcionada por el NTP 549 (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, 2000):

$$q = \frac{0,0042 * \bar{M} * 10^6 * P}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}}$$

Ecuación 2. Caudal aire exterior

Siendo q el caudal de ventilación en l/s, P el número de ocupantes en cada una de las estancias que se vaya a calcular, $[CO_2]_{exterior}$ la concentración de dióxido de carbono

exterior de la vivienda y $[CO_2]_{interior}$ la concentración de dióxido de carbono que se quiere mantener en el interior de la vivienda.

El coeficiente de actividad metabólica se ha definido en función de los valores aportados por el CTE DB HE 0, en cumplimiento de la norma UNE-EN ISO 8996 (Asociación Española de Normalización, 2006)) y se muestran en la Tabla 6:

| | Valores MET |
|--------------------|-------------|
| Cocina | 1,3 |
| Sala de estar/baño | 1 |
| Dormitorio | 0,76 |

Tabla 6. Coeficientes actividad metabólica

Las concentraciones de dióxido de carbono se han determinado de 400 ppm para el exterior de la vivienda y de 900 ppm para el interior de la vivienda, ya que éste es el límite superior que el CTE nos permite que haya como promedio en una vivienda.

Una vez definidos los parámetros se realiza el cálculo de los caudales de ventilación necesarios entre semana y el fin de semana representados en la Tabla 7 y Tabla 8:

| Intervalo horario | Lunes-Viernes (l/s) | | | | | Q(m³/h) |
|-------------------|---------------------|---------------|------|------------|--------------|---------|
| | Cocina | Sala de estar | Baño | Dormitorio | No ocupación | |
| 0:00-1:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 1:00-2:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 2:00-3:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 3:00-4:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 4:00-5:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 5:00-6:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 6:00-7:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 7:00-8:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 25,5 |
| 8:00-9:00 | 10,9 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 27,7 |
| 9:00-10:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 10:00-11:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 11:00-12:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 12:00-13:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 13:00-14:00 | 10,9 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 27,7 |
| 14:00-15:00 | 21,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21,8 |
| 15:00-16:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 16:00-17:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 10,5 |
| 17:00-18:00 | 21,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21,8 |
| 18:00-19:00 | 0,0 | 25,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,2 |
| 19:00-20:00 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,8 |
| 20:00-21:00 | 0,0 | 25,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,2 |
| 21:00-22:00 | 32,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 32,8 |
| 22:00-23:00 | 10,9 | 25,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 36,1 |
| 23:00-0:00 | 0,0 | 33,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,6 |
| Q(l/s) | 109 | 126 | 34 | 204 | 63 | |
| Promedio | | | | | Q(l/s) | 22,3 |
| | | | | | Q(m³/h) | 80,4 |

Tabla 7. Caudales ventilación Lunes-Viernes

| Sábado-Domingo | | | | | | |
|-------------------|--------|---------------|------|---------------------------|--------------|--------|
| Intervalo horario | Cocina | Sala de estar | Baño | Dormitorio | No ocupación | Q(l/s) |
| 0:00-1:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 1:00-2:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 2:00-3:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 3:00-4:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 4:00-5:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 5:00-6:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 6:00-7:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 7:00-8:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| 8:00-9:00 | 21,8 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 139,1 |
| 9:00-10:00 | 21,8 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 139,1 |
| 10:00-11:00 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 12,8 | 0,0 | 106,4 |
| 11:00-12:00 | 0,0 | 33,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 121,0 |
| 12:00-13:00 | 0,0 | 33,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 121,0 |
| 13:00-14:00 | 0,0 | 33,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 121,0 |
| 14:00-15:00 | 16,4 | 12,6 | 8,4 | 0,0 | 0,0 | 134,6 |
| 15:00-16:00 | 21,8 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 139,1 |
| 16:00-17:00 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 12,8 | 0,0 | 106,4 |
| 17:00-18:00 | 21,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 78,6 |
| 18:00-19:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,5 | 37,8 |
| 19:00-20:00 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60,5 |
| 20:00-21:00 | 0,0 | 16,8 | 0,0 | 12,8 | 0,0 | 106,4 |
| 21:00-22:00 | 21,8 | 16,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 139,1 |
| 22:00-23:00 | 21,8 | 0,0 | 0,0 | 12,8 | 0,0 | 124,6 |
| 23:00-0:00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 25,5 | 0,0 | 91,9 |
| Q(l/s) | 147 | 231 | 25 | 281 | 1,5 | |
| Promedio | | | | Q(l/s) | 28,6 | |
| | | | | Q(m³/h) | 102,9 | |

Tabla 8. Caudales ventilación Sábado-Domingo

Obtenidos estos caudales, se procede a calcular el promedio teniendo en cuenta el número de días entre semana y los fines de semana, obteniendo un caudal promedio de $86,8 \text{ m}^3/\text{h}$. El caudal seleccionado para el funcionamiento estándar de la UTA será de $90 \text{ m}^3/\text{h}$, para asegurar que el promedio es menor a 900 ppm.

Seleccionado el caudal, se va a realizar la comprobación de los requisitos de concentración media de ppm y que no se supere el límite de ppm acumulado a lo largo del año superior a 500.000 ppm. Para ello con la ecuación 2 se calculan las PPM de dióxido de carbono por hora los días entre semana y los fines de semana.

El cálculo de las ppm entre semana se representa en la Tabla 9:

| | | | |
|-------------------|---------|----------|---------|
| Caudal (m³/h) | 90 | | |
| Caudal (l/s) | 25 | | |
| Lunes-Viernes | | | |
| Intervalo horario | Q(m³/h) | Q(l/s) | PPM CO2 |
| 0:00-1:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 1:00-2:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 2:00-3:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 3:00-4:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 4:00-5:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 5:00-6:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 6:00-7:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 7:00-8:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 8:00-9:00 | 99,8 | 27,7 | 954,4 |
| 9:00-10:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 10:00-11:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 11:00-12:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 12:00-13:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 13:00-14:00 | 99,8 | 27,7 | 954,4 |
| 14:00-15:00 | 78,6 | 21,8 | 836,8 |
| 15:00-16:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 16:00-17:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 17:00-18:00 | 78,6 | 21,8 | 836,8 |
| 18:00-19:00 | 90,7 | 25,2 | 904,0 |
| 19:00-20:00 | 60,5 | 16,8 | 736,0 |
| 20:00-21:00 | 90,7 | 25,2 | 904,0 |
| 21:00-22:00 | 117,9 | 32,8 | 1055,2 |
| 22:00-23:00 | 130,0 | 36,1 | 1122,4 |
| 23:00-0:00 | 121,0 | 33,6 | 1072,0 |
| | | Promedio | 794,2 |

Tabla 9. Cálculo ppm horarias Lunes-Viernes

El cálculo de las ppm el fin de semana se representa en la Tabla 10:

| Sábado-Domingo | | | |
|-------------------|----------------------|--------|---------|
| Intervalo horario | Q(m ³ /h) | Q(l/s) | PPM CO2 |
| 0:00-1:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 1:00-2:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 2:00-3:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 3:00-4:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 4:00-5:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 5:00-6:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 6:00-7:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 7:00-8:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| 8:00-9:00 | 139,1 | 38,6 | 1172,8 |
| 9:00-10:00 | 139,1 | 38,6 | 1172,8 |
| 10:00-11:00 | 106,4 | 29,6 | 991,4 |
| 11:00-12:00 | 121,0 | 33,6 | 1072,0 |
| 12:00-13:00 | 121,0 | 33,6 | 1072,0 |
| 13:00-14:00 | 121,0 | 33,6 | 1072,0 |
| 14:00-15:00 | 149,7 | 41,6 | 1172,8 |
| 15:00-16:00 | 139,1 | 38,6 | 1172,8 |
| 16:00-17:00 | 106,4 | 29,6 | 991,4 |
| 17:00-18:00 | 78,6 | 21,8 | 836,8 |
| 18:00-19:00 | 5,4 | 1,5 | 400,0 |
| 19:00-20:00 | 60,5 | 16,8 | 736,0 |
| 20:00-21:00 | 106,4 | 29,6 | 991,4 |
| 21:00-22:00 | 139,1 | 38,6 | 1172,8 |
| 22:00-23:00 | 124,6 | 34,6 | 1092,2 |
| 23:00-0:00 | 91,9 | 25,5 | 910,7 |
| Promedio | | | 971,5 |

Tabla 10.Cálculo ppm horarias Sábado-Domingo

Promediando las ppm entre semana y el fin de semana se obtiene un valor promedio de 844,9 ppm a lo largo de la semana, inferior al valor de 900 ppm que establece el CTE. En cuanto al valor anual acumulado, al no superar las 1600 ppm en ningún tramo horario ni entre semana ni los fines de semana se cumple directamente este requisito.

Para un caudal de 90 m³/h en cada una de las viviendas, se debe emplear como punto de funcionamiento más importante un caudal total de 10080 m³/h para suministrar al edificio al completo. Además, a la hora de seleccionar la UTA es importante tener en cuenta que sea capaz de suministrar el caudal máximo establecido por PassivHaus de 30 m³/h por persona, es decir 13440 m³/h para todo el bloque de viviendas.

4.1.2. Cálculo pérdida de carga ventiladores

Conocido el caudal, falta por determinar la pérdida de carga que tienen que vencer los ventiladores, necesaria para definir las UTAs y conocer el consumo y características de estas.

En la Tabla 11 se realiza el cálculo de la pérdida de carga del conducto.

| | | Pérdida de carga conducto lineal | | | | | | | |
|------------------|------------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | | Caudal IDAE | Caudal (m3/h) | Velocidad (m/s) | P.carga(mmca/m) | Longitud (m) | P.carga(mmca) | P.carga (Pa) | Sección (cm) |
| Bajante ascensor | Conducto exterior | 13500 | 13440 | 6 | 0,05 | 2 | 0,1 | 0,98 | 90 |
| | | 6820 | 6720 | 5,8 | 0,05 | 10 | 0,5 | 4,9 | 44x80 |
| | | 6000 | 5040 | 5,52 | 0,05 | 17,5 | 0,875 | 8,575 | 44x72 |
| | | 3530 | 3360 | 4,99 | 0,05 | 17,5 | 0,875 | 8,575 | 44x64 |
| | | 1700 | 1680 | 4,16 | 0,05 | 17,5 | 0,875 | 8,575 | 26x48 |
| | Bajante ascensor común | 1700 | 1680 | 4,16 | 0,05 | 4 | 0,2 | 1,96 | 26x48 |
| | | 1470 | 1440 | 4,01 | 0,05 | 3 | 0,15 | 1,47 | 26x42 |
| | | 1270 | 1200 | 3,89 | 0,051 | 3 | 0,153 | 1,4994 | 26x38 |
| | | 990 | 960 | 3,64 | 0,05 | 3 | 0,15 | 1,47 | 26x30 |
| | | 750 | 720 | 3,38 | 0,05 | 3 | 0,15 | 1,47 | 26x26 |
| | | 500 | 480 | 3,07 | 0,051 | 3 | 0,153 | 1,4994 | 20x24 |
| | | 270 | 240 | 2,65 | 0,052 | 3 | 0,156 | 1,5288 | 17,5 |
| | Bajante vivienda | 140 | 120 | 2,2 | 0,05 | 10 | 0,5 | 4,9 | 15 |
| | | 90 | 90 | | 0,05 | 5 | 0,25 | 2,45 | 13 |
| | | 60 | 60 | | 0,05 | 3 | 0,15 | 1,47 | 11 |
| | | 30 | 30 | | 0,051 | 10 | 0,51 | 4,998 | 6 |
| | | | | | | | P.Total (Pa) | 56.3206 | |

Tabla 11. Pérdida de carga conductos ventilación centralizada

Inicialmente se realiza el cálculo de la pérdida de carga que generan los tramos de conducto lineal. Para ello se calcula el tramo más desfavorable, es decir, el que mayor pérdida de carga genere. El tramo con mayor pérdida de carga es el situado a mayor distancia de la UTA, que al tener mayor longitud generará pérdidas mayores.

Conocido el caudal de la vivienda, se selecciona los conductos utilizados para la impulsión y extracción del aire mediante las tablas proporcionadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) donde se obtiene la pérdida de carga por unidad de longitud que generan. Mediante la aproximación de las longitudes de los conductos y las pérdidas de carga por unidad de longitud se extrae la pérdida de carga de cada tramo desde la UTA hasta la zona de impulsión o extracción.

Una vez obtenidas las pérdidas de carga de los tramos lineales se calculan las pérdidas de carga generadas por los accesorios utilizados en la instalación (Tabla 12) (Casals Fans of innovation, 2020)).

| Tramo viviendas | Accesorio | Coefficiente χ | Velocidad(m/s) | Pérdida de carga (Pa) |
|-----------------|--------------------------|---------------------|----------------|-----------------------|
| Tramo 1 | Derivación Doble Y (90°) | 1,4 | 6 | 30,24 |
| Tramo 2 | Derivación en Y (90°) | 1,3 | 5,8 | 26,2392 |
| Tramo 3 | Derivación en Y (90°) | 1,3 | 5,52 | 23,766912 |
| Tramo 4 | Derivación en Y (90°) | 1,3 | 4,99 | 19,422078 |
| Tramo 5 | Codo 90° | 0,35 | 4,16 | 3,634176 |
| P.Total | | | | 103,302366 |

Tabla 12. Pérdida de carga accesorios

Finalmente se deben tener en cuenta las pérdidas de carga que añaden los elementos finales del sistema de ventilación, es decir, la boca de impulsión y la rejilla de extracción(Figura 10).

| Elementos finales | Pérdida de carga |
|--------------------|------------------|
| Boca impulsión | 30 |
| Rejilla extracción | 10 |

Figura 10. Pérdida de carga elementos finales ventilación

La pérdida de carga de la boca de impulsión se tiene en cuenta en el ventilador de impulsión y la pérdida de carga de la rejilla de extracción en el ventilador de extracción de la UTA.

Una vez obtenidas las pérdidas de carga se realiza la suma de las tres, obteniendo una pérdida de carga total de 169,62 Pa en el ventilador de extracción y de 189,62 Pa en el ventilador de impulsión. Por sobredimensionar se han empleado ventiladores con capacidad de dar 300 Pa de presión externa. De esta forma a pesar del colmatamiento de los filtros y el aumento de la pérdida de carga de estos, el rendimiento del ventilador no se verá apenas afectado.

4.1.3. Comparación UTAs Passiv

Conocido el caudal de diseño de la UTA y la pérdida de carga de los ventiladores se van a comparar las UTAs ECOPassive 15 y 18 de la marca EVAIR, gama de UTAs con certificado PassivHaus, capaces de dar caudales de $15000 \text{ m}^3/\text{h}$ y $18000 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivamente.

El primer aspecto a comparar es la eficiencia en la recuperación de energía que tiene la UTA en función del caudal que impulsa. Para ello se simula en el programa de diseño Aircalc el funcionamiento de la UTA en distintos puntos de trabajo. En la Figura 11 se representa la evolución de la eficiencia en ambas UTAs desde caudales de $4256 \text{ m}^3/\text{h}$ equivalente al caudal mínimo que puede suministrar la UTA, en caso de que no haya personas en el edificio, hasta los $13440 \text{ m}^3/\text{h}$, máximo caudal que debe poder suministrar.

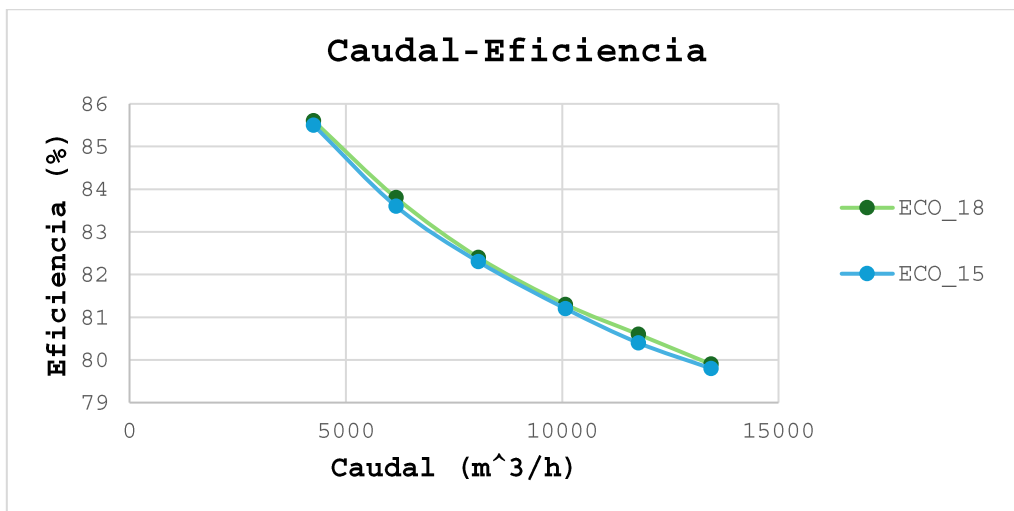


Figura 11. Comparativa eficiencia UTAs

Se puede observar que la eficiencia es superior en el caso de la UTA ECOPassive 18 en todo el rango de caudales, aunque la diferencia es muy baja en todo el rango. Esta diferencia erradica en dos aspectos fundamentalmente. El principal es que al estar diseñada para caudales mayores la sección de la UTA es mayor, disminuyendo la velocidad de paso en la UTA y aumentando el tiempo que le cuesta al fluido atravesar el recuperador, aumentando la eficiencia de este. El segundo aspecto es que al estar diseñada para un caudal mayor el recuperador es de mayor tamaño, es decir, tiene mayor cantidad de chapa y por lo tanto para mismos caudales la recuperación de energía es mayor.

Otra comparación importante es la evolución del consumo de la UTA con la variación del caudal. En la Figura 12 se representa esta comparativa mediante la evolución caudal-SFP (specific fan power).

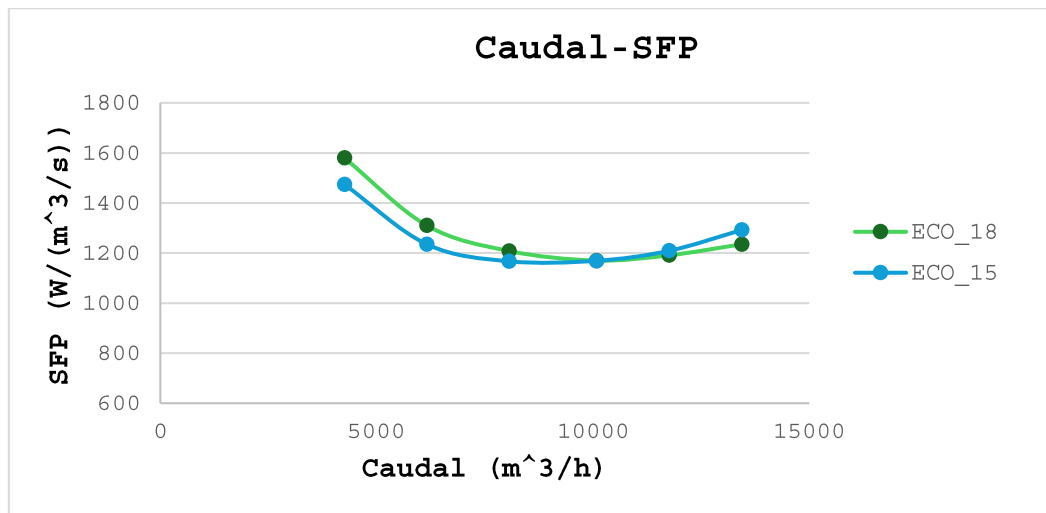


Figura 12. Comparativa consumo eléctrico UTAs

Se pueden observar distintos tramos en función del caudal que se quiera impulsar. Para caudales bajos la UTA ECOPassive 15, al estar diseñada para caudales menores presenta un consumo eléctrico más bajo, al estar más cerca de su punto de funcionamiento óptimo. Presenta su menor consumo para un caudal de $10080 m^3/h$, mientras que conforme aumenta el caudal respecto a ese punto, su consumo aumenta.

La UTA ECOPassive 18 tiene su punto de menor consumo para un caudal muy similar a la UTA ECOPassive 15. Para caudales más bajos, el consumo del ventilador es superior, ya que esta UTA está diseñada para caudales más altos, mientras que para caudales más altos el consumo de sus ventiladores es menor.

Normalmente en la vivienda se va a trabajar con caudales algo inferiores a los $90 m^3/h$ es decir $10080 m^3/h$, punto en el que el consumo eléctrico es prácticamente idéntico. Sin embargo, en muchos tramos horarios el caudal va a ser muy inferior al caudal promedio, especialmente por las mañanas cuando un gran número de viviendas se encuentran sin ocupación, donde el consumo es muy inferior en el caso de la UTA ECOPassive 15.

Como último punto de comparación, el precio de la UTA ECOPassive 15 es inferior al de la UTAECO Passive 18, por lo que teniendo en cuenta estos tres criterios se ha terminado seleccionando la UTA ECOPassive 15 para el estudio de las viviendas.

4.2. Selección recuperadores individuales

Los equipos de recuperación individual que se van a comparar son de la marca Siber, en concreto el modelo Siber DF EVO, por ser recuperadores con certificado PassivHaus.

Para realizar la comparativa hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- Caudal superior a 120 m³/h
- Presión disponible superior a 100 Pa
- Consumo específico bajo

Se van a comparar los modelos Siber DF EVO 1 y Siber DF EVO 2, sus prestaciones se muestran en la Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente.

| Puntos de trabajo | CAUDAL (m ³ /h) | PRESIÓN (Pa) | POTENCIA (W) | SFP (W/l/s) |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 50 | 25 | 9.24 | 0.67 |
| 2 | 75 | 50 | 15.37 | 0.74 |
| 3 | 100 | 50 | 20.55 | 0.74 |
| 4 | 100 | 75 | 24.52 | 0.88 |
| 5 | 100 | 100 | 28.87 | 1.04 |
| 6 | 100 | 150 | 37.62 | 1.35 |
| 7 | 125 | 100 | 37.13 | 1.07 |
| 8 | 125 | 150 | 46.07 | 1.33 |
| 9 | 150 | 100 | 48.14 | 1.16 |
| 10 | 150 | 150 | 58.25 | 1.40 |

Tabla 13. Puntos de trabajo Siber DF EVO 1

| Puntos de trabajo | CAUDAL (m ³ /h) | PRESIÓN (Pa) | POTENCIA (W) | SFP (W/l/s) |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 75 | 25 | 12.61 | 0.61 |
| 2 | 100 | 75 | 25.31 | 0.91 |
| 3 | 125 | 50 | 29.16 | 0.84 |
| 4 | 150 | 50 | 39.20 | 0.94 |
| 5 | 150 | 100 | 49.65 | 1.19 |
| 6 | 150 | 150 | 60.92 | 1.46 |
| 7 | 150 | 200 | 72.60 | 1.74 |
| 8 | 200 | 100 | 81.33 | 1.46 |
| 9 | 200 | 150 | 93.10 | 1.68 |
| 10 | 200 | 200 | 106.48 | 1.92 |

Tabla 14. Puntos de trabajo Siber DF EVO 2.

El caudal máximo que se quiere suministrar es de 120 m³/h, caudal que ambos equipos son capaces de suministrar. Para dicho caudal, la presión disponible que obtenemos con el recuperador Siber DF EVO 2 es de 50 Pa, siendo insuficiente y pudiendo generar problemas a la hora de impulsar aire al interior de la vivienda. Para esos caudales el consumo específico del Siber DF EVO 2 es inferior al Siber DF EVO 1, por lo que la

instalación del segundo conllevaría un aumento del consumo energético por parte de las viviendas.

Teniendo en cuenta estos criterios, se ha decidido seleccionar el Siber DF EVO 1, por los problemas que se puede tener con el Siber DF EVO 2 cuando la pérdida de carga en los filtros que lleva incorporados aumente con su utilización. El aumento de la pérdida de carga podría llevarnos al caso límite, en el que la máquina no sería capaz de impulsar ni extraer aire a las viviendas. Es por ello que, a pesar de su mayor consumo energético se ha terminado escogiendo el recuperador Siber DF EVO 1.

4.3. Selección equipo sin recuperación

El equipo sin recuperación debe cumplir con los siguientes criterios:

- Caudal mínimo de 1680 m³/h para suministrar a las 14 viviendas de cada escalera.
- Filtro previo al ventilador F6 (evitar suciedad ventilador y limpiar aire expulsado)

El equipo se va a seleccionar con el programa de diseño Aircalc, del cual se extraerá el consumo específico del ventilador, necesario para la obtención del consumo eléctrico durante las simulaciones.

El equipo seleccionado para la ventilación sin recuperación se representa en la Figura 13.

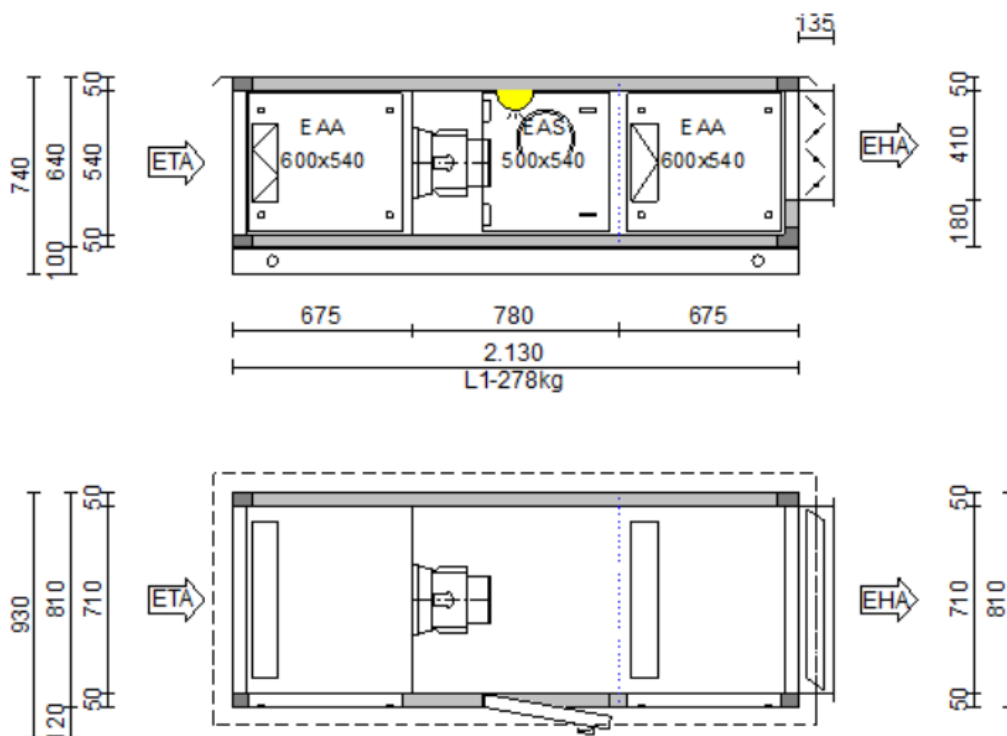


Figura 13. Esquema equipo ventilación sin recuperación

El consumo del ventilador se muestra en la Figura 14.

INFORMACIÓN DEL SISTEMA

| | | |
|---|-------|------|
| Potencia absorbida (Selección) [kW] | 0,310 | |
| Potencia específica (Selección) [w/(m3/s)] | 664 | SFP1 |
| Potencia absorbida (Validación) [kW] | 0,260 | |
| Potencia específica (Validación) [w/(m3/s)] | 553 | SFP1 |

Señal de Control (0-10V)

8,50

K factor

67

Nivel sonoro. Banda de octavas del ventilador Lw / dB

| | | | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ot. Frq. Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Aspiración | 61,0 | 59,0 | 64,0 | 61,0 | 60,0 | 56,0 | 55,0 | 53,0 |
| Salida | 63,0 | 62,0 | 69,0 | 67,0 | 71,0 | 66,0 | 62,0 | 59,0 |
| Potencia sonora [dB (A)] | 73,8 | | | | | | | |

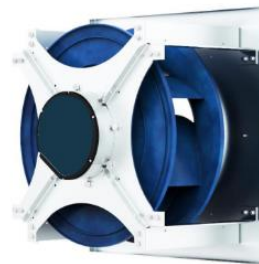


Figura 14. Características ventilador

5. Comparativa Energética

En este capítulo se va a comparar cómo afecta cada una de las instalaciones a la demanda energética del edificio en Zaragoza. De la demanda dependerá el consumo que requiere la vivienda para adecuarse a la temperatura de consigna impuesta. Esto no sólo influye en los gastos operativos de cada una de las viviendas a largo plazo, también tendrá un impacto significativo en el medio ambiente, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los datos climáticos empleados para las simulaciones son los proporcionados por CYPETHERM para la ciudad de Zaragoza, perteneciente a la zona climática D3.

El perfil de temperaturas que emplea el programa es el indicado en la Figura 15:

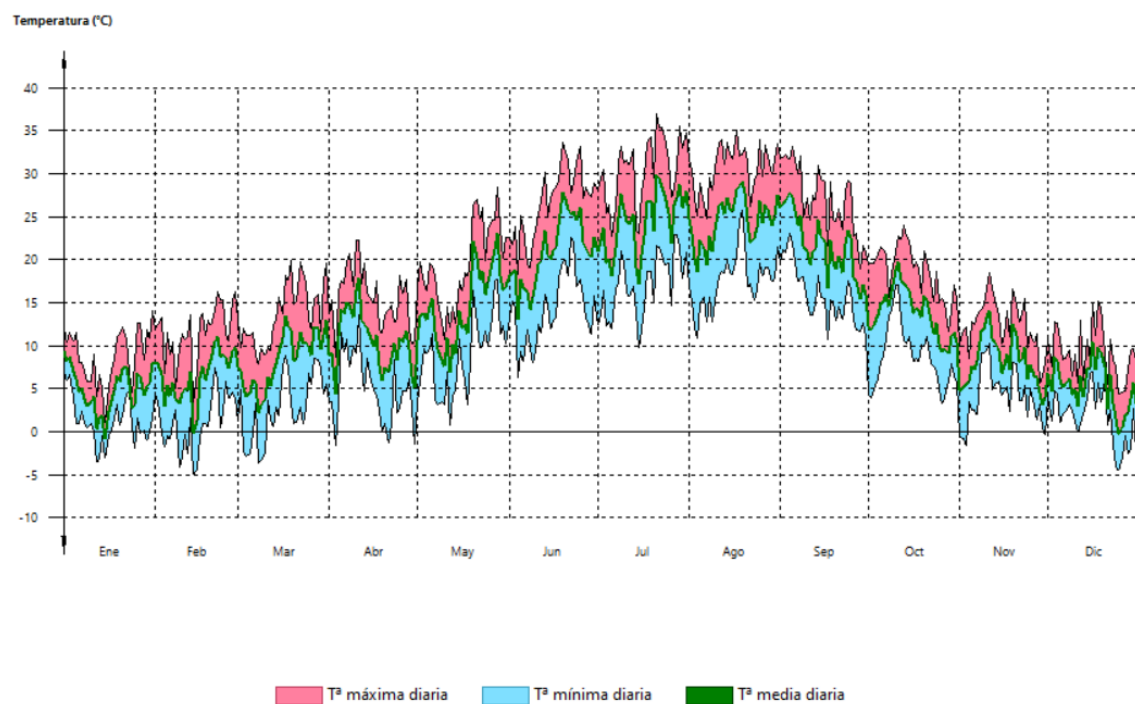


Figura 15. Perfil de temperaturas

En el Anexo III se muestran resultados con distintos consumos de los ventiladores en función del caudal. En este capítulo se ha empleado el consumo estándar de las viviendas. En el Capítulo 7 se muestran los resultados en Glasgow-Tenerife-Berlín para el caso de la UTA centralizada, realizando la comparación con la UTA centralizada en Zaragoza.

5.1. Recuperación de energía centralizada

En este punto se van a mostrar los resultados obtenidos para el bloque de viviendas con recuperación de energía centralizada en la ventilación.

5.1.1. Demanda energética

La siguiente gráfica muestra el balance energético del edificio mes a mes, contabilizando la energía perdida o ganada por transmisión térmica a través de elementos pesados y ligeros (Q_{op} y Q_w , respectivamente), la energía intercambiada por ventilación e infiltraciones (Q_{ve+inf}), la ganancia de calor interna debida a la ocupación (Q_{ocup}), a la iluminación (Q_{lum}) y al equipamiento interno (Q_{equip}), así como el aporte necesario de calefacción (Q_H) y refrigeración (Q_C).

La demanda energética del bloque de viviendas con recuperación de energía centralizada en la ventilación se muestra en la Figura 16.

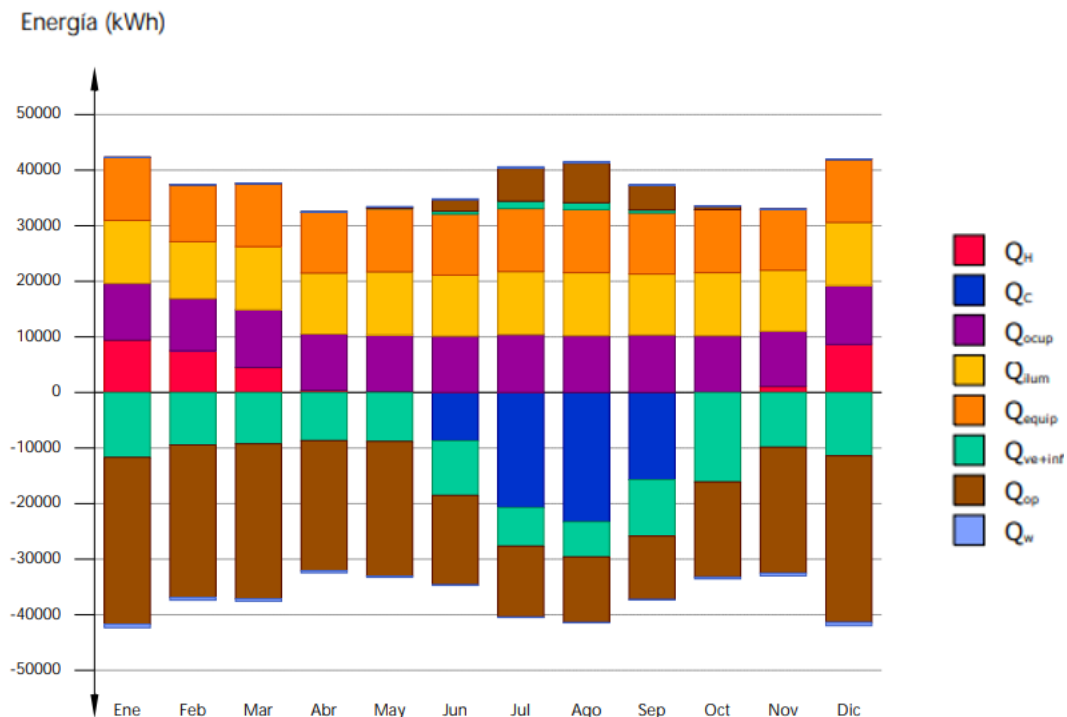


Figura 16. Demanda energética recuperación centralizada

La energía requerida para la ventilación e infiltraciones presenta un porcentaje bastante elevado de la energía total en los meses de invierno, siendo cercana al 25% de las cargas negativas que se introducen a la vivienda. Estas cargas se elevan en los meses de invierno, porque se alcanzan temperaturas próximas a los 0°C, habiendo un gradiente de temperaturas muy elevado entre el aire exterior y el interior de la vivienda. Otra de las cargas con mayor aporte es la energía que se transmite a través de los cerramientos, principalmente los muros exteriores del edificio (elementos constructivos pesados), transmitiendo por conducción energía al interior del edificio debido al gradiente térmico.

Es interesante conocer el consumo y las cargas por unidad de área, para ser capaces de comparar los datos con viviendas estándar. Las cargas de ventilación son de $-12.43 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$. El signo negativo de las cargas representa la entrada de aire frío al interior de la vivienda. Este valor se obtiene teniendo en cuenta las cargas positivas de ventilación e infiltraciones durante la época de verano y las cargas negativas introducidas durante las épocas frías del año y en las épocas cálidas debido a la posibilidad de realizar free-cooling. La demanda de calefacción es de $3.43 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$ y de refrigeración de $7.41 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.1.2. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico de la instalación con recuperación de energía centralizada es producido por los ventiladores de impulsión y extracción pertenecientes a la UTA situada en la azotea del edificio.

El consumo eléctrico total es de 24675 kWh/año , que equivale a $2.67 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.1.3. Confort interior

En la Figura 17 se representa la evolución de la temperatura interior de las viviendas. Se ha introducido en la gráfica un margen inferior y superior de 21 y 25°C respectivamente, como límites de confort térmico en una vivienda. Los límites permiten observar con recuperación de energía y sin climatización en qué momentos la vivienda se encuentra fuera de las temperaturas de confort térmico.

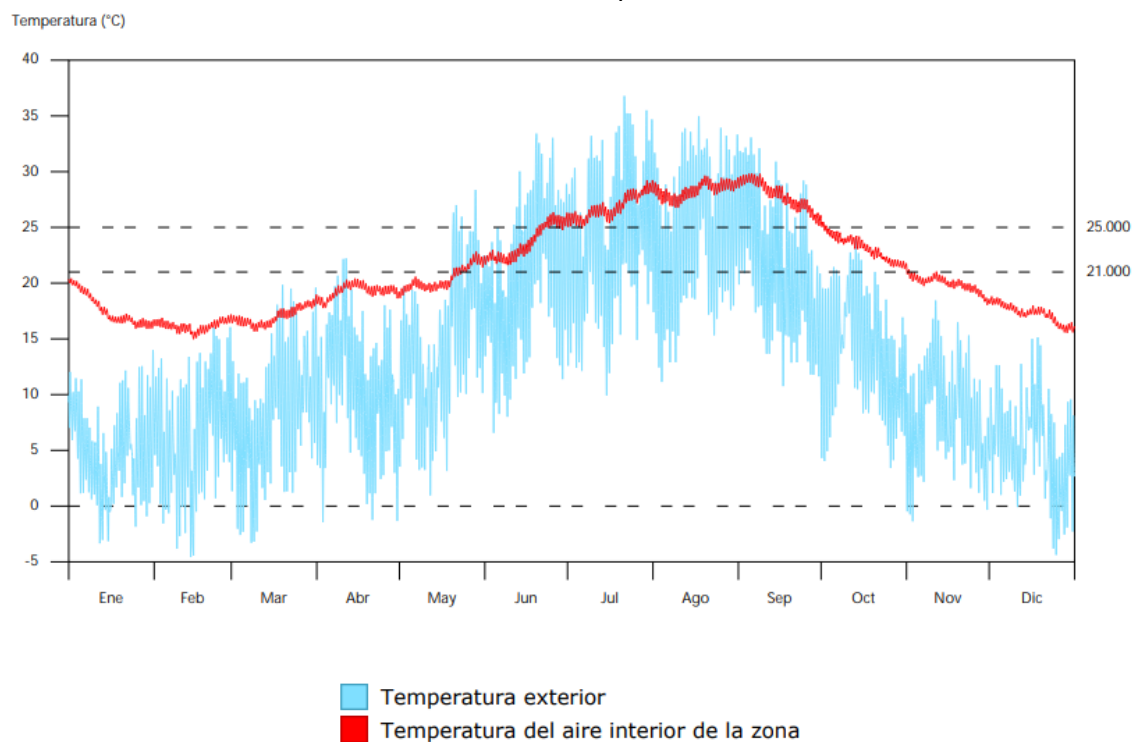


Figura 17. Confort interior recuperación centralizada

La temperatura dentro de la vivienda se encuentra cerca de las temperaturas de confort durante todo el año, gracias a la recuperación de energía y al buen aislamiento de la vivienda.

5.2. Recuperación de energía individual

En este punto se van a mostrar los resultados obtenidos para el bloque de viviendas con recuperación de energía individual.

5.2.1. Demanda energética

La demanda energética del bloque de viviendas con recuperación de energía individual se muestra en la Figura 18.

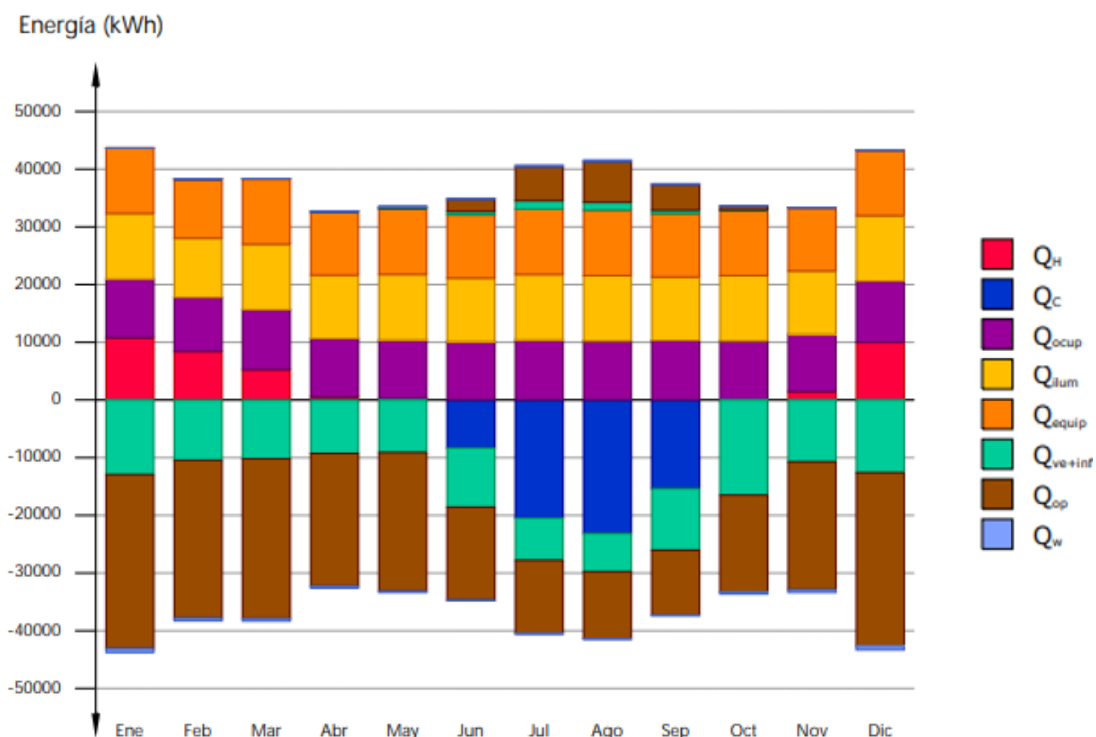


Figura 18. Demanda energética con recuperación de energía

Respecto al caso con recuperación centralizada la gráfica obtenida es prácticamente idéntica, ya que las eficiencias en la recuperación de energía en la ventilación son muy similares en ambos casos.

Las cargas de ventilación son de $-12.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$. La demanda de calefacción es de $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$ y de refrigeración de $7.3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.2.2. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico de la instalación con recuperación de energía individual es producido por los ventiladores de impulsión y extracción pertenecientes a cada uno de los recuperadores instalados en las viviendas.

El consumo eléctrico a lo largo del año es de 40081 kWh/año , que equivale a $4.34 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.2.3. Confort interior

La temperatura interior de la vivienda se representa en la Figura 19.

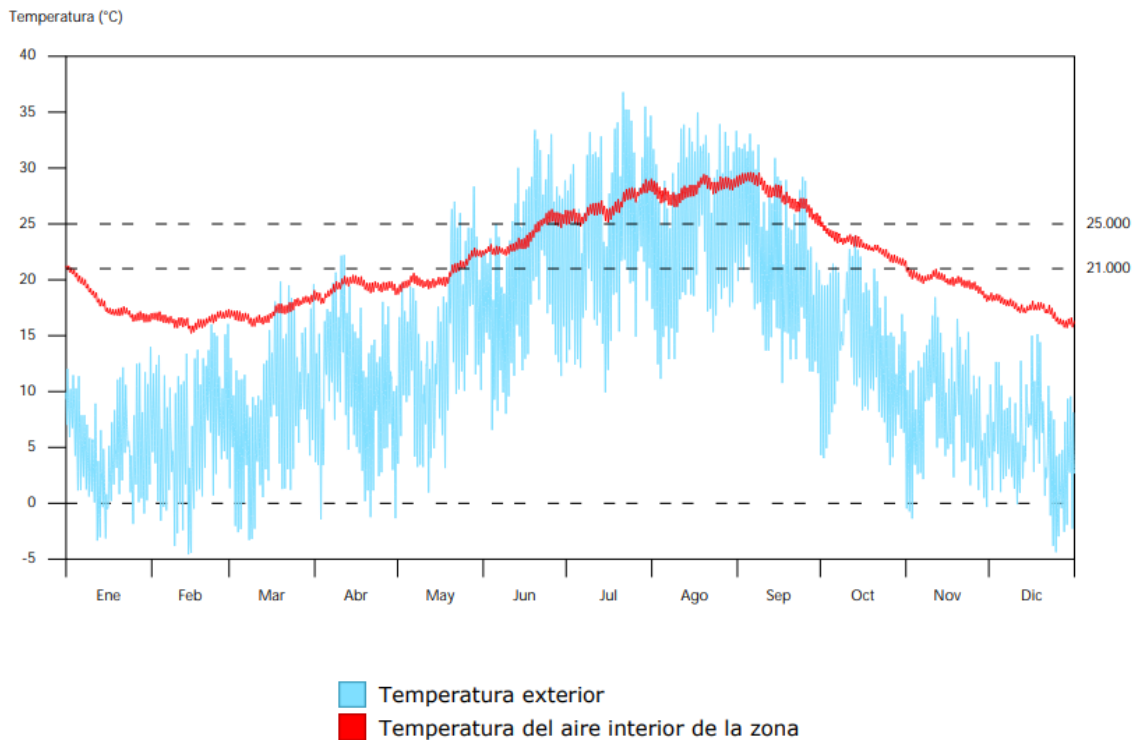


Figura 19. Confort interior recuperación individual

Se puede observar una gráfica prácticamente idéntica a la anterior por la presencia de recuperación de energía con eficiencias similares, teniendo cargas muy parecidas y por lo tanto temperaturas interiores muy similares.

5.3. Ventilación sin recuperación de energía

En este punto se van a mostrar los resultados obtenidos para el bloque de viviendas sin recuperación de energía.

5.3.1. Demanda energética

La demanda energética del bloque de viviendas con recuperación de energía centralizada en la ventilación se muestra en la Figura 20.

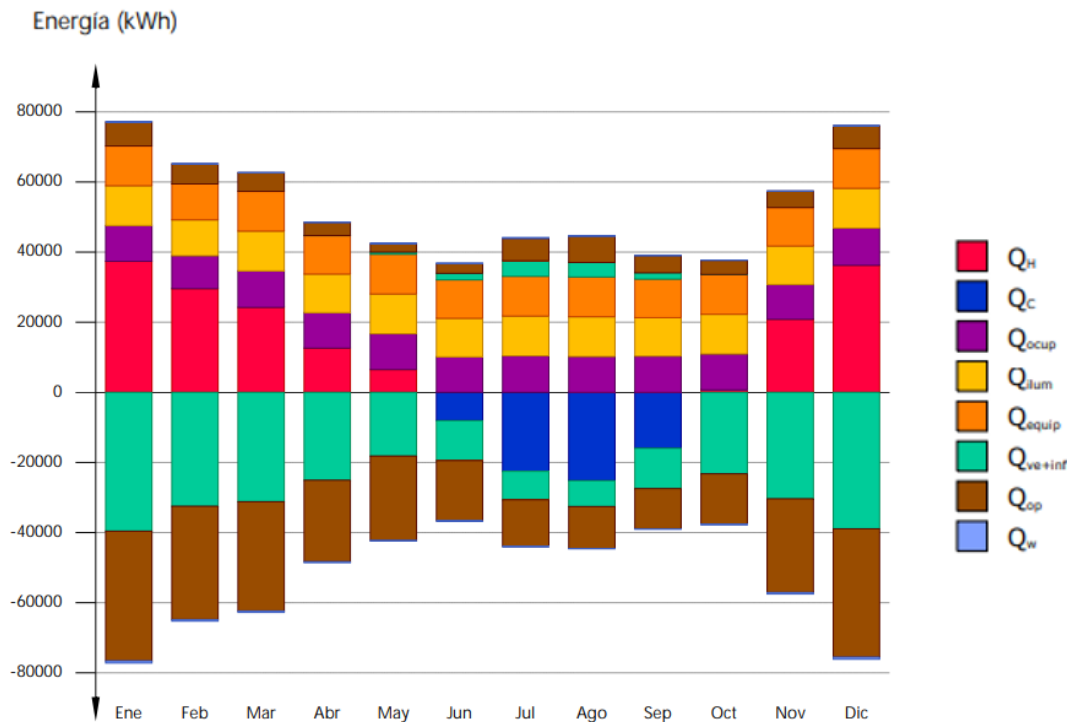


Figura 20. Demanda energética sin recuperación

Se puede observar que, exceptuando las cargas de ventilación e infiltraciones, dependientes del caudal de ventilación que se introduce y de la eficiencia en la recuperación de energía, el resto de cargas son iguales que en los casos. Esto es debido a que el resto de cargas son intrínsecas a la utilización de la vivienda o pertenecen a la envolvente del edificio, idéntica en las tres alternativas de estudio.

Las cargas de ventilación e infiltraciones son de $-28.47 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$. La demanda de calefacción requerida para equilibrar el balance energético es de $18.2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$ y de refrigeración de $7.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.3.2. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico de la instalación sin recuperación de energía es producido únicamente por el ventilador de extracción situado en la azotea. Se ha colocado un ventilador común para el conjunto de viviendas de cada escalera de 14 viviendas.

El consumo energético anual debido a la ventilación es de 12163 kWh/año , que equivale a $1.25 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$.

5.3.3. Confort interior

La temperatura interior de la vivienda se representa en la Figura 21.

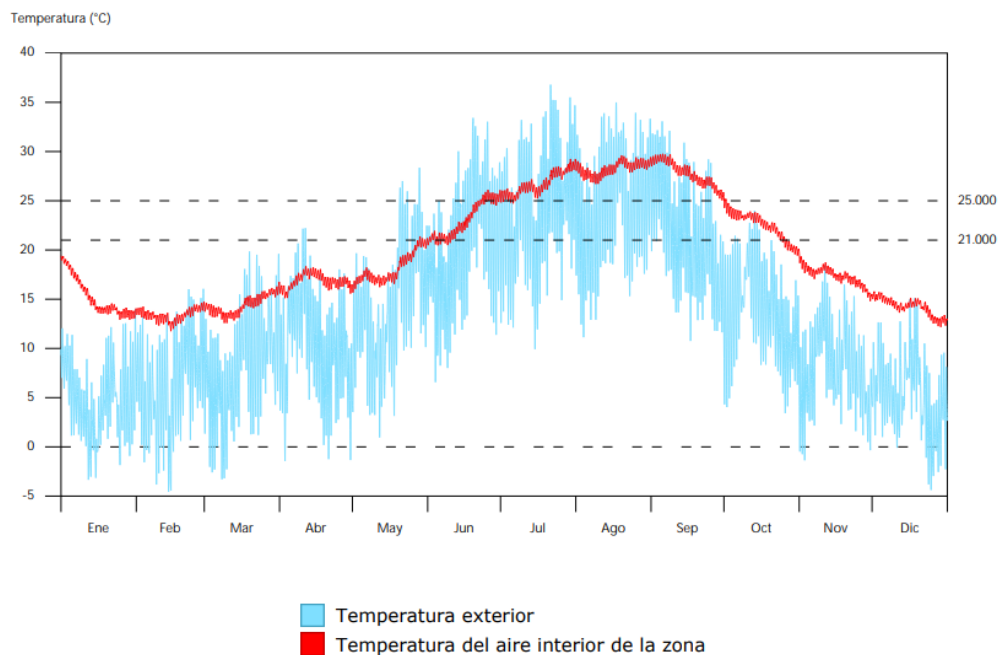


Figura 21. Confort interior sin recuperación

Como se puede observar, sin recuperación, la temperatura en el interior de la vivienda se encuentra fuera del margen definido durante la mayor parte del año y en temperaturas más alejadas a las de confort respecto a los casos con recuperación de energía. Esta mayor diferencia de temperaturas se traducirá en mayores costes energéticos para alcanzar las temperaturas de consigna en el interior de la vivienda.

5.4. Resultados

En este apartado se exponen los resultados de interés de forma conjunta para analizar de forma más precisa las diferencias y similitudes entre las tres alternativas.

5.4.1. Cargas de ventilación

El aspecto más importante a comparar son las cargas de ventilación e infiltraciones que se introducen con cada una de las alternativas. Las cargas de ventilación negativas se representan en la Figura 22.

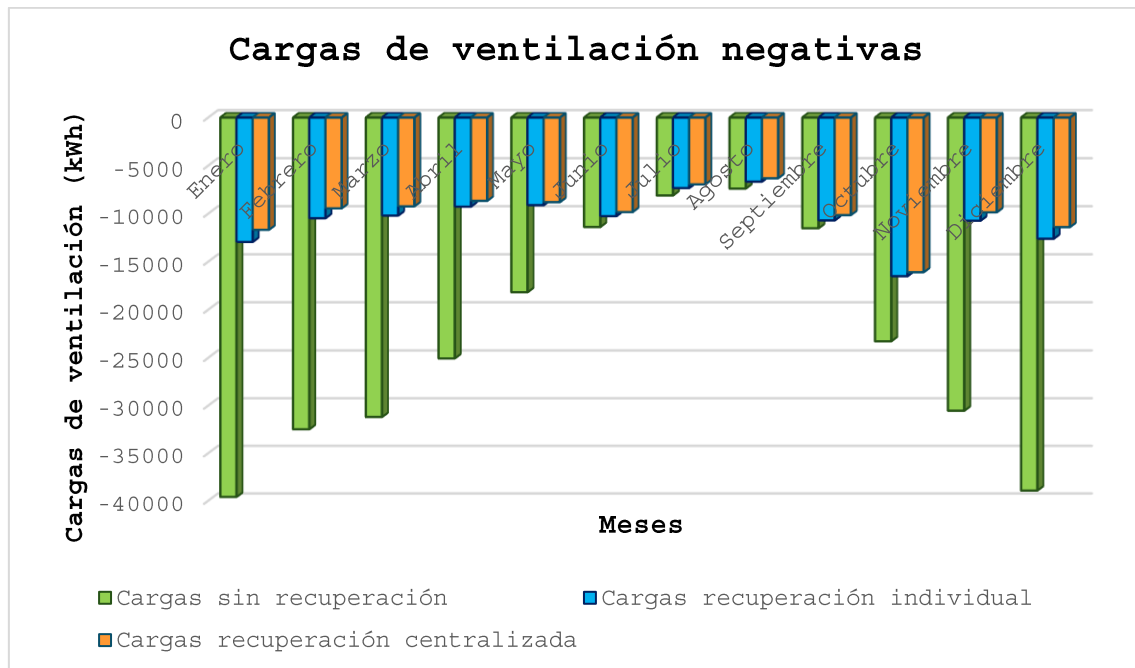


Figura 22. Comparativa cargas ventilación negativas

Las cargas de ventilación e infiltraciones negativas son aquellas que enfrían el interior del bloque de viviendas. Evidentemente, en las épocas frías del año, éstas son muy superiores que en las épocas cálidas del año. Las cargas de ventilación negativas que se introducen los meses cálidos son aquellas introducidas por la noche, cuando la temperatura exterior es inferior a la temperatura del interior de la vivienda mediante el free-cooling y a través de las infiltraciones.

Como se puede observar en la gráfica las cargas introducidas con recuperación de energía son muy inferiores a las cargas que se introducen sin recuperación de energía en los meses fríos, mientras que entre las alternativas con recuperación de energía son prácticamente iguales. La reducción entre las cargas con recuperación y sin recuperación no llega a ser del 80%, eficiencia de los recuperadores, debido a las cargas que se introducen a través de las infiltraciones, iguales en las tres alternativas al no poder realizar recuperación de energía en esas corrientes entrantes. La similitud entre las alternativas con recuperación es debido a eficiencias de recuperación muy similares que generan cargas de ventilación muy similares en ambos casos.

Si analizamos los meses cálidos del año son prácticamente iguales, ya que el sistema de ventilación sin recuperación de energía por las noches introduce aire frío, funcionamiento parecido al free-cooling, que permiten realizar los sistemas con recuperación de energía.

Analizando los meses de septiembre y octubre, se puede observar un aumento significativo de las cargas introducidas a través de la ventilación en los sistemas con recuperación. La explicación a este hecho se encuentra en el perfil de temperaturas y el free-cooling. Si observamos la Figura 15, son meses donde las temperaturas aún no han descendido como en los meses de invierno, es por ello que los sistemas aprovechan las temperaturas frías de la noche para disminuir la temperatura del interior de la vivienda mediante el free-cooling. Al no utilizar el recuperador de energía las cargas de ventilación que introduce son las mismas que sin recuperación de energía, mucho más elevadas que empleando el recuperador. De esta forma los sistemas con recuperación de energía se van adaptando a las cargas internas y externas de la vivienda y consiguen en los meses de septiembre y octubre disminuir la demanda de calefacción y refrigeración a valores nulos.

Las cargas de ventilación e infiltraciones positivas se representan en la Figura 23.

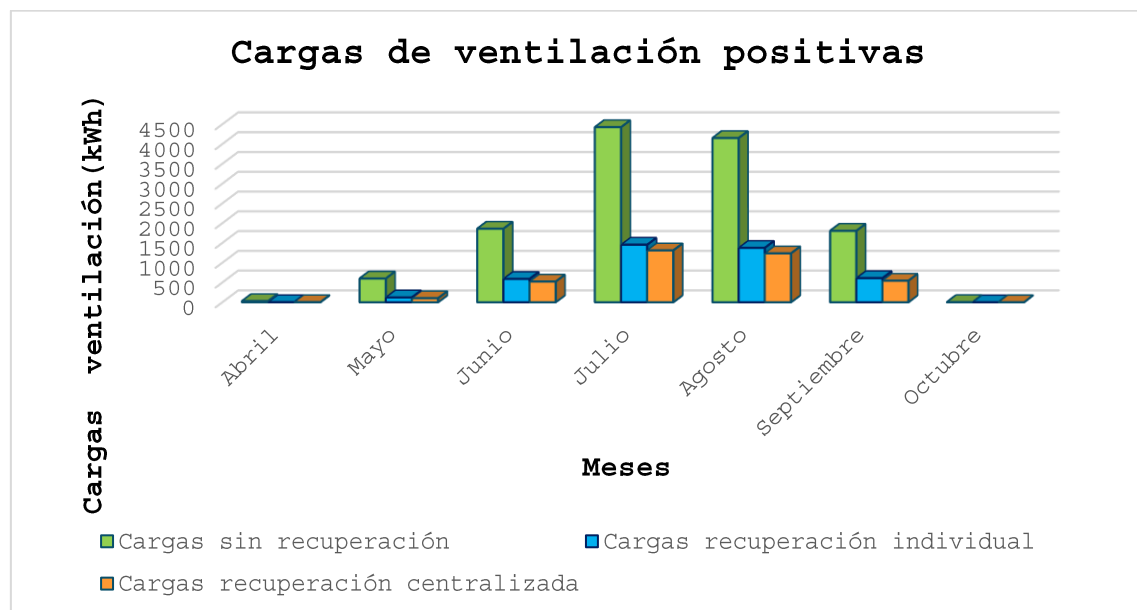


Figura 23. Comparativa cargas ventilación positivas

Como en el caso anterior, se puede observar que las cargas de ventilación se reducen prácticamente al 80% en los casos con recuperación de energía, volviendo a ser muy similares los casos con recuperación de energía por el mismo motivo que con las cargas de ventilación negativas.

5.4.2. Demanda de refrigeración y calefacción

La consecuencia principal de las diferencias en las cargas de ventilación es la diferencia en las demandas de refrigeración y calefacción que requieren las viviendas para equilibrar el balance energético. La demanda de calefacción se representa en la Figura 24.

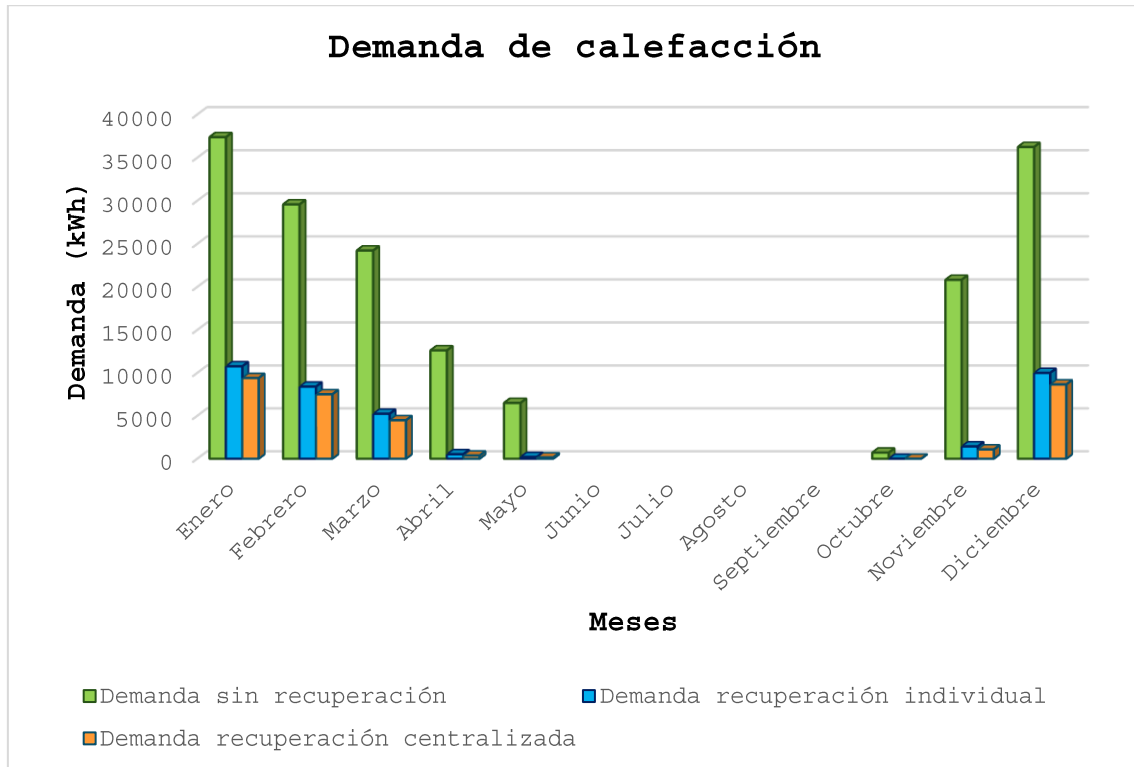


Figura 24. Comparativa demanda calefacción

La demanda de calefacción en los casos con recuperación de energía es prácticamente igual, debido a la similitud de las cargas de ventilación. La demanda del caso sin recuperación de energía duplica la demanda sin recuperación, por las cargas de ventilación introducidas que son muy superiores.

La demanda de refrigeración de los tres casos se representa en la Figura 25.

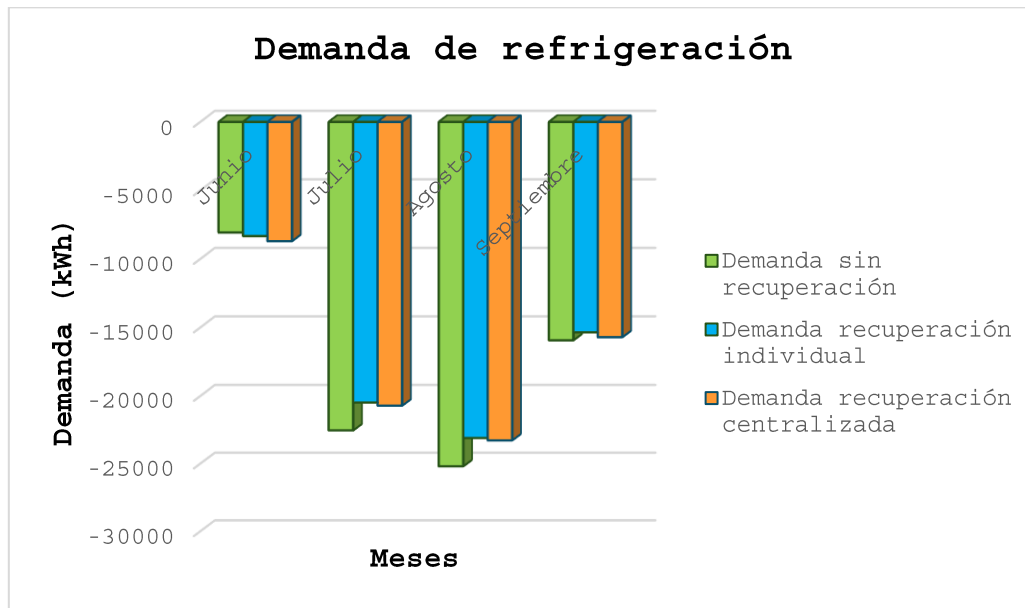


Figura 25. Comparativa demanda refrigeración

En el caso de la demanda de refrigeración, la demanda es muy similar en los tres casos, debido a la ventilación nocturna que introduce cargas de ventilación que disminuyen la demanda de refrigeración necesaria en todos los casos.

5.4.3. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico de las tres alternativas se representa en la Figura 26.

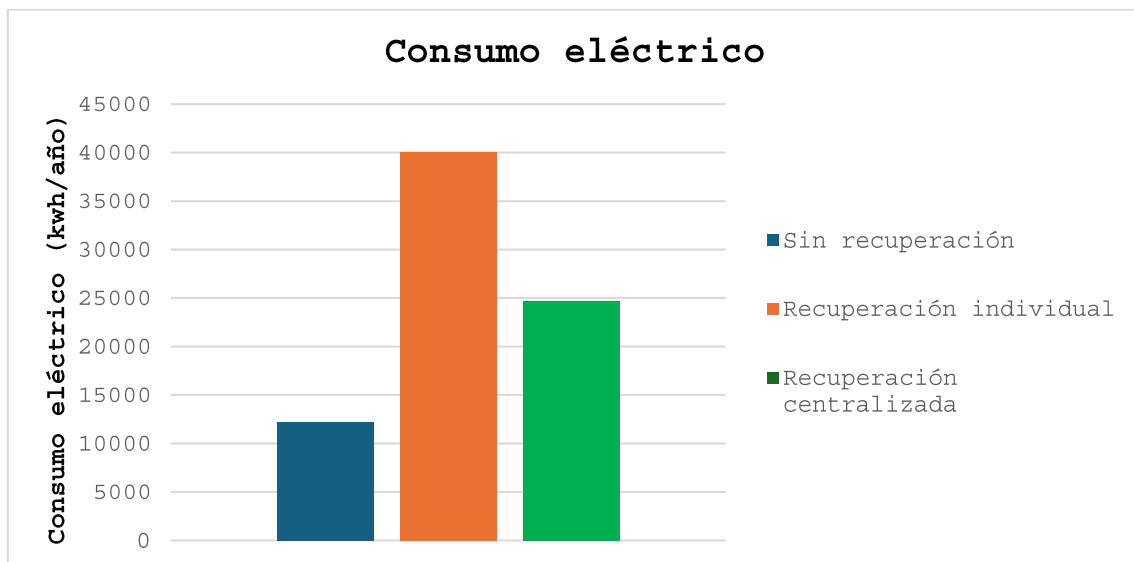


Figura 26. Comparativo consumo eléctrico

Se puede observar un consumo eléctrico muy inferior en el caso sin recuperación. Esto se debe a la ausencia de recuperador dentro del sistema de ventilación, elemento que

mayor pérdida de carga genera en los sistemas de ventilación con recuperación y que por lo tanto hace que el consumo de los ventiladores sea mucho más elevado. Hay que tener en cuenta también la presencia de un único ventilador para la extracción, no requiriendo consumo para la impulsión del aire.

La diferencia entre el sistema con recuperación centralizada y sin centralizar es el menor consumo específico del sistema centralizado. Este sistema al emplear ventiladores con mayor holgura en la presión disponible, tienen menor consumo específico en todo su rango de funcionamiento.

5.4.4. Máquina térmica

Una vez conocidos los consumos eléctricos de las tres alternativas y las cargas de ventilación que se introducen con los sistemas con y sin recuperación de energía se va a estudiar el rendimiento energético de los sistemas. Para ello, se va a tener en cuenta el ahorro energético que se obtiene a partir de la recuperación de energía y el coste eléctrico debido al aumento del consumo de los ventiladores.

Mediante la Ecuación 3 y la Ecuación 4 se obtiene el SCOP y el SEER de la hipotética máquina térmica que obtendríamos mediante los sistemas con recuperación de energía (caloryfrio.com, 2021)).

El SEER mide la eficiencia de refrigeración de productos como enfriadoras y sistemas de aire acondicionado. El SEER tiene en cuenta que la demanda de refrigeración cambiará a lo largo del año y reproduce el uso estacional. A su vez, el SCOP se utiliza para medir la eficiencia térmica en productos como las bombas de calor, reproduciendo su uso estacional. Ambos son una evolución del COP y EER, empleados para indicar la eficiencia en un punto determinado(Eurovent Certified Performance, 2024)).

$$SCOP = \frac{\text{Potencia calorífica (kWh)}}{\text{Consumo anual de energía (kWh)}}$$

Ecuación 3.COP

$$SEER = \frac{\text{Potencia calorífica (kWh)}}{\text{Consumo anual de energía (kWh)}}$$

Ecuación 4.SEER

- Recuperación de energía centralizada

Con recuperación centralizada durante los meses de invierno se obtiene un ahorro energético de 151168 kWh/año, con un incremento del consumo eléctrico de 10057 kWh/año . Aplicando la Ecuación 3, se obtiene un SCOP de 15.03.

Durante los meses de verano se obtiene un ahorro energético de 14398 kWh/año, con un incremento del consumo eléctrico de 5028 kWh/año . Aplicando la Ecuación 4, se obtiene un SEER de 2.86.

- Recuperación de energía individual

Con recuperación individual durante los meses de invierno se obtiene un ahorro energético de 154273 kWh/año , con un incremento del consumo eléctrico de 21461 kWh/año . Aplicando la Ecuación 3, se obtiene un SCOP de 7.12.

Durante los meses de verano se obtiene un ahorro energético de 13985 kWh/año , con un incremento del consumo eléctrico de 10731 kWh/año . Aplicando la Ecuación 4, se obtiene un SEER de 1.3.

El SCOP obtenido para ambas alternativas es superior al SCOP de las bombas de calor convencionales mediante las cuales se supliría la demanda energética de la vivienda sin recuperación de energía. En cuanto al SEER el caso de la recuperación de energía centralizada sigue obteniendo muy buenos resultados, siendo peores en el caso de recuperación individual, especialmente por el mayor consumo eléctrico.

Como conclusión, teniendo en cuenta ambos resultados queda demostrado que energéticamente la recuperación de energía en los sistemas de ventilación es preferible ante la no recuperación de energía y el suministro energético de la demanda mediante sistemas de bombas de calor, aunque estas sean de alto rendimiento.

6. Comparativa Económica

En este capítulo se van a comparar los costes de cada partida que suponen los tres sistemas de ventilación. Finalmente se calcularán los costes a 10 años para conocer los gastos que suponen cada sistema.

6.1. Coste de mantenimiento y repuesto

En este apartado se realiza una estimación de los costes que supone el mantenimiento de las máquinas instaladas y el cambio de los filtros.

- Recuperador individual (Tabla 15)

| | Coste | Frecuencia anual | Unidades | Coste anual |
|----------------------|----------|------------------|----------|--------------------|
| Mantenimiento | 100,00 € | 2 | 112 | 22.400,00 € |
| Filtro F7 | 60,00 € | 2 | 112 | 13.440,00 € |
| Filtro M5 | 60,00 € | 2 | 112 | 13.440,00 € |
| Total | | | | 49.280,00 € |

Tabla 15. Coste mantenimiento recuperación individual

- Ventilación sin recuperación (Tabla 16)

| | Coste | Frecuencia anual | Unidades | Coste anual |
|----------------------|----------|------------------|----------|-------------------|
| Mantenimiento | 200,00 € | 2 | 8 | 3.200,00 € |
| Filtro F7 | 60,00 € | 2 | 8 | 960,00 € |
| Total | | | | 4.160,00 € |

Tabla 16. Coste mantenimiento sin recuperación

- Ventilación Centralizada (Tabla 17)

| | Coste | Frecuencia anual | Unidades | Coste anual |
|----------------------|----------|------------------|----------|-------------------|
| Mantenimiento | 500,00 € | 2 | 1 | 1.000,00 € |
| Filtro F7 | 745,00 € | 2 | 1 | 1.490,00 € |
| Filtro M5 | 567,00 € | 2 | 1 | 1.134,00 € |
| Total | | | | 3.624,00 € |

Tabla 17. Coste mantenimiento recuperación centralizada

6.2. Costes máquinas ventilación

En este apartado se indican los gastos de las máquinas empleadas para la ventilación. En la alternativa de recuperación individual se utilizan 112 unidades, una en cada vivienda. Para la ventilación sin recuperación 8 unidades, 1 por cada ascensor de la vivienda. En el caso de la UTA, se emplea una unidad central que suministra al bloque de viviendas al completo.

- Recuperador individual (Tabla 18)

| | Precio ud | Uds | Coste total |
|----------------------------|------------|-----|--------------|
| Recuperador Siber DF EVO 1 | 1.859,89 € | 112 | 208.307,68 € |

Tabla 18. Coste recuperadores individuales

- Ventilación sin recuperación (Tabla 19)

| | Precio ud | Uds | Coste total |
|-----------------------------|------------|-----|-------------|
| Ventilador sin recuperación | 3.976,78 € | 8 | 31.814,24 € |

Tabla 19. Coste extractores ventilación sin recuperación

- Ventilación centralizada (UTA ECO PASSIV 15): **52.575€**

6.3. Coste conductos ventilación

En este apartado se calcula el coste del sistema de conductos de ventilación para cada alternativa.

- Recuperación individual (Tabla 20)

| | Caudal m3/h | Sección (mm) | Longitud | Precio unitario | Metros precio | Nºunidades | Precio |
|-----------|-------------|--------------|----------|-----------------|---------------|------------|-------------|
| Viviendas | 120 | 170x90 | 15 | 27,8 | 1,5 | 112 | 31.136,00 € |
| | 90 | 200x60 | 4 | 38,1 | 3 | 112 | 5.689,60 € |
| | 60 | 200x60 | 7 | 38,1 | 3 | 112 | 9.956,80 € |
| | 30 | 100x40 | 15 | 21,4 | 3 | 112 | 11.984,00 € |
| Total | | | | | | | 58.766,40 € |

Tabla 20. Coste conductos ventilación recuperación individual

- Ventilación sin recuperación (Tabla 21)

| | Caudal m3/h | Diámetro (cm) | Desarrollo (cm) | Desarrollo(m) | Longitud (m) | Sección (m2) | Precio unitario | Metros precio | Nºunidades | Precio |
|-----------|-------------|---------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|------------|-------------|
| Bajante | 1680 | 38 | 119,3805208 | 1,193805208 | 3 | 3,581415625 | 30 | 1 | 8 | 960,00 € |
| | 1440 | 36 | 113,0973355 | 1,130973355 | 3 | 3,392920066 | 30 | 1 | 8 | 960,00 € |
| | 1200 | 34 | 106,8141502 | 1,068141502 | 3 | 3,204424507 | 30 | 1 | 8 | 960,00 € |
| | 960 | 31 | 97,38937226 | 0,973893723 | 3 | 2,921681168 | 30 | 1 | 8 | 720,00 € |
| | 720 | 28 | 87,9645943 | 0,879645943 | 3 | 2,638937829 | 30 | 1 | 8 | 720,00 € |
| | 480 | 24 | 75,39822369 | 0,753982237 | 3 | 2,261946711 | 30 | 1 | 8 | 720,00 € |
| | 240 | 19 | 59,69026042 | 0,596902604 | 3 | 1,790707813 | 30 | 1 | 8 | 480,00 € |
| Viviendas | Caudal m3/h | Sección (mm) | - | - | Longitud (m) | - | Precio unitario | Metros precio | Nºunidades | Precio |
| | 120 | 170x90 | - | - | 8 | - | 27,8 | 1,5 | 112 | 16.605,87 € |
| | 90 | 200x60 | - | - | 2 | - | 38,1 | 3 | 112 | 2.844,80 € |
| | 60 | 200x60 | - | - | 4 | - | 38,1 | 3 | 112 | 5.689,60 € |
| | 30 | 100x40 | - | - | 8 | - | 21,4 | 3 | 112 | 6.391,47 € |
| Total | | | | | | | | | | 37.051,73 € |

Tabla 21.Coste conductos ventilación sin recuperación

- Ventilación centralizada (Tabla 22)

| | Caudal m3/h | Diámetro (cm) | Desarrollo (cm) | Desarrollo(m) | Longitud (m) | Sección (m2) | Precio unitario | Metros precio | Nºunidades | Precio |
|--------------------|-------------|---------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|------------|--------------|
| Exterior y bajante | 13440 | 90 | 282,7433388 | 2,827433388 | 5 | 14,13716694 | 70 | 1 | 1 | 1.050,00 € |
| | 6720 | 64 | 201,0619298 | 2,010619298 | 46 | 92,48848772 | 70 | 1 | 1 | 6.510,00 € |
| | 5040 | 58 | 182,2123739 | 1,822123739 | 60 | 109,3274243 | 70 | 1 | 1 | 7.700,00 € |
| | 3360 | 50 | 157,0796327 | 1,570796327 | 93 | 146,0840584 | 70 | 1 | 1 | 10.290,00 € |
| | 1680 | 38 | 119,3805208 | 1,193805208 | 68 | 81,17875417 | 50 | 1 | 1 | 4.100,00 € |
| | 1440 | 36 | 113,0973355 | 1,130973355 | 6 | 6,785840132 | 50 | 1 | 8 | 2.800,00 € |
| | 1200 | 34 | 106,8141502 | 1,068141502 | 6 | 6,408849013 | 50 | 1 | 8 | 2.800,00 € |
| | 960 | 31 | 97,38937226 | 0,973893723 | 6 | 5,843362336 | 50 | 1 | 8 | 2.400,00 € |
| | 720 | 28 | 87,9645943 | 0,879645943 | 6 | 5,277875658 | 50 | 1 | 8 | 2.400,00 € |
| | 480 | 24 | 75,39822369 | 0,753982237 | 6 | 4,523893421 | 50 | 1 | 8 | 2.000,00 € |
| | 240 | 19 | 59,69026042 | 0,596902604 | 6 | 3,581415625 | 50 | 1 | 8 | 1.600,00 € |
| Viviendas | Caudal m3/h | Sección (mm) | - | - | Longitud (m) | - | Precio unitario | Metros precio | Nºunidades | Precio |
| | 120 | 170x90 | - | - | 15 | - | 27,8 | 1,5 | 112 | 31.136,00 € |
| | 90 | 200x60 | - | - | 4 | - | 38,1 | 3 | 112 | 5.689,60 € |
| | 60 | 200x60 | - | - | 7 | - | 38,1 | 3 | 112 | 9.956,80 € |
| | 30 | 100x40 | - | - | 15 | - | 21,4 | 3 | 112 | 11.984,00 € |
| Total | | | | | | | | | | 102.416,40 € |

Tabla 22.Coste conductos ventilación recuperación centralizada

6.4. Coste consumo eléctrico ventiladores

En este apartado se va a calcular el coste del consumo eléctrico de los ventiladores. El precio de la electricidad que se va a considerar es el precio de Endesa de consumo de particulares. El valor que se va a utilizar es de 0.1152 €/kWh.

En el caso del recuperador individual y con la ventilación centralizada el consumo eléctrico es producido por los ventiladores de impulsión y extracción mientras que el consumo en el caso sin recuperación es producido únicamente por el ventilador de extracción.

- Recuperador individual

$$40081 \frac{kWh}{año} * 0,1152 \frac{€}{kWh} = 4617.33 \frac{€}{año}$$

- Ventilación sin recuperación

$$12163 \frac{kWh}{año} * 0,1152 \frac{€}{kWh} = 1403.61 \frac{€}{año}$$

- Ventilación centralizada

$$24675 \frac{kWh}{año} * 0,1152 \frac{€}{kWh} = 2842.56 \frac{€}{año}$$

6.5. Coste demanda de calefacción y refrigeración

En este apartado se calcula el coste eléctrico de la máquina empleada para suplir la demanda de calefacción y refrigeración de las viviendas. Se va a escoger un valor estándar de eficiencia energética para calefacción y un valor estándar para refrigeración. Para obtener valores más próximos a la realidad se van a emplear valores de SEER para refrigeración y de SCOP para calefacción. Estos parámetros miden la eficiencia del equipo de climatización durante una temporada completa de refrigeración y calefacción respectivamente. Empleando el SCOP y SEER se consigue el consumo eléctrico real necesario para suplir la demanda de refrigeración y calefacción.

El SCOP elegido es de 3,22 y el SEER 3,56 (Hitecsa Cool air, 2023).

1. Demanda de refrigeración

$$\text{-Recuperador individual: } \frac{67244 \frac{kWh}{año}}{3.56} = 18888 kWh/año$$

$$\text{-Ventilación sin recuperación: } \frac{71713 \frac{kWh}{año}}{3.56} = 20144 kWh/año$$

$$\text{-Ventilación centralizada: } \frac{68380 \frac{kWh}{año}}{3.56} = 19207 kWh/año$$

2. Demanda de calefacción

$$\text{-Recuperador individual: } \frac{36544 \frac{kWh}{año}}{3,22} = \frac{kWh}{año} = 11349 kWh/año$$

$$\text{-Ventilación sin recuperación: } \frac{168056 \frac{kWh}{año}}{3.22} = 52191 kWh/año$$

$$\text{-Ventilación centralizada: } \frac{31632 \frac{kWh}{año}}{3.22} = 9823 kWh/año$$

Una vez obtenida la demanda eléctrica en cada una de las alternativas se empleará el precio medio anual de electricidad utilizado en el apartado anterior para calcular el coste eléctrico que supone la demanda de refrigeración y calefacción.

1. Coste refrigeración

- Recuperador individual: $13723 \text{ kWh/año} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1580\text{€}$
- Ventilación sin recuperación: $14635 \text{ kWh/año} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1689\text{€}$
- Ventilación centralizada: $13955 \text{ kWh/año} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1607\text{€}$

2. Coste calefacción

- Recuperador individual: $9370 \text{ kWh/año} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1079\text{€}$
- Ventilación sin recuperación: $43091 \text{ kWh/año} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 4973\text{€}$
- Ventilación centralizada: $8110 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0,1152 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 934\text{€}$

6.6. Coste elementos ventilación

En este apartado se indica el coste de los elementos de ventilación de cada una de las alternativas:

- Recuperador individual (Tabla 23)

| | Precio unitario | Unidades | Coste total |
|-----------------------|-----------------|----------|-------------|
| Rejilla de extracción | 20,00 € | 336 | 6.720,00 € |
| Boca de impulsión | 40,00 € | 448 | 17920 |
| Sondas de CO2 | 150,00 € | 112 | 16800 |
| Total | | | 41.440,00 € |

Tabla 23.Coste elementos ventilación recuperación individual

- Ventilación sin recuperación (Tabla 24)

| | Precio unitario | Unidades | Coste total |
|-------------------------|-----------------|----------|-------------|
| Sondas de CO2 | 150,00 € | 112 | 16.800,00 € |
| Caja de caudal variable | 300,00 € | 112 | 33.600,00 € |
| Rejilla de extracción | 20,00 € | 1232 | 24.640,00 € |
| Control Ventiladores | 750,00 € | 8 | 6.000,00 € |
| Total | | | 81.040,00 € |

Tabla 24. Coste elementos ventilación sin recuperación

- Ventilación centralizada (Tabla 25)

| | Precio unitario | Unidades | Coste total |
|-------------------------|-----------------|----------|---------------------|
| Rejilla de extracción | 20,00 € | 336 | 6.720,00 € |
| Boca de impulsión | 40,00 € | 448 | 17.920,00 € |
| Sondas de CO2 | 150,00 € | 112 | 16.800,00 € |
| Caja de caudal variable | 300,00 € | 224 | 67.200,00 € |
| Control UTA | 3.925,00 € | 1 | 3.925,00 € |
| UTA | 52.575,00 € | 1 | 52.575,00 € |
| | Total | | 165.140,00 € |

Tabla 25. Coste elementos ventilación recuperación centralizada

6.7. Coste total

En este apartado se realizan los cálculos del coste anual de cada alternativa. Se han tenido en cuenta todas las partidas económicas expuestas previamente.

El valor de inflación empleado para el cálculo del valor actual neto de cada inversión se ha obtenido de la página Statista, como valor promedio del año 2023. (Statista, 2024).

- Recuperador individual (Tabla 26)

| | Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Recuperador individual | Gastos | 0,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € |
| | Mantenimiento | 0,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € | -36.960,00 € |
| | Demanda calefacción y refrigeración | 0,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € | -2.659,00 € |
| | Gastos de uso | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | -13.887,18 € | -13.887,18 € | -13.887,18 € | -13.887,18 € | -13.887,18 € | -13.887,18 € |
| | Consumo ventiladores | 0,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € | -4.617,00 € |
| | Resultado neto | 0,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € |
| | Inversión inicial | -308.514,08 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € |
| | Flujo libre de caja | -308.514,08 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -44.236,00 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € | -58.123,18 € |
| | Gastos anuales | -308.514,08 € | -352.750,08 € | -396.986,08 € | -441.222,08 € | -485.458,08 € | -543.581,26 € | -601.704,44 € | -659.827,62 € | -717.950,79 € | -776.073,97 € | -834.197,15 € |
| | VAN | -308.514,08 € | -354.342,58 € | -401.820,90 € | -451.008,44 € | -501.966,73 € | -571.332,97 € | -643.196,39 € | -717.646,89 € | -794.777,62 € | -874.685,05 € | -957.469,14 € |

Tabla 26. Coste total ventilación recuperación individual

- Ventilación sin recuperación (Tabla 27)

| | Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Sin recuperación | Gastos | 0,00 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € |
| | Mantenimiento | 0,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € | -3.680,00 € |
| | Demanda calefacción y refrigeración | 0,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € | -6.662,00 € |
| | Gastos de uso | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | -3.976,78 € | 0,00 € | -3.976,78 € | 0,00 € | -3.976,78 € | 0,00 € | -3.976,78 € |
| | Consumo ventiladores | 0,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € | -1.403,00 € |
| | Resultado neto | 0,00 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € |
| | Inversión inicial | -155.741,72 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € |
| | Flujo libre de caja | -155.741,72 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € | -11.745,00 € | -15.721,78 € |
| | Gastos anuales | -155.741,72 € | -167.486,72 € | -179.231,72 € | -190.976,72 € | -206.698,50 € | -218.443,50 € | -234.165,28 € | -245.910,28 € | -261.632,06 € | -273.377,06 € | -289.098,84 € |
| | VAN | -155.741,72 € | -167.909,54 € | -180.515,41 € | -193.575,08 € | -211.686,01 € | -225.702,90 € | -245.141,29 € | -260.185,57 € | -281.048,71 € | -297.195,67 € | -319.588,00 € |

Tabla 27. Coste total ventilación sin recuperación

- Ventilación centralizada (Tabla 28)

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Gastos | 0,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € |
| Mantenimiento | 0,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € | -2.112,00 € |
| Gastos de uso | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | -4.000,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | -4.000,00 € |
| Demanda calefacción y refrigeración | 0,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € | -2.541,00 € |
| Consumo ventiladores | 0,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € | -2.842,00 € |
| Resultado neto | 0,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € |
| Inversión inicial | -318.851,43 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € | 0,00 € |
| Flujo libre de caja | -318.851,43 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -7.495,00 € | -11.495,00 € |
| Gastos anuales | -318.851,43 € | -326.346,43 € | -333.841,43 € | -341.336,43 € | -348.831,43 € | -360.326,43 € | -367.821,43 € | -375.316,43 € | -382.811,43 € | -390.306,43 € | -401.801,43 € |
| VAN | -318.851,43 € | -326.616,25 € | -334.660,61 € | -342.994,56 € | -351.628,53 € | -365.347,06 € | -374.613,87 € | -384.214,28 € | -394.160,31 € | -404.464,40 € | -420.836,58 € |

Tabla 28. Coste total ventilación recuperación centralizada

En la Figura 27 se muestra una comparativa de los gastos anuales de cada una de las alternativas. La comparativa se ha realizado para un periodo de 10 años.

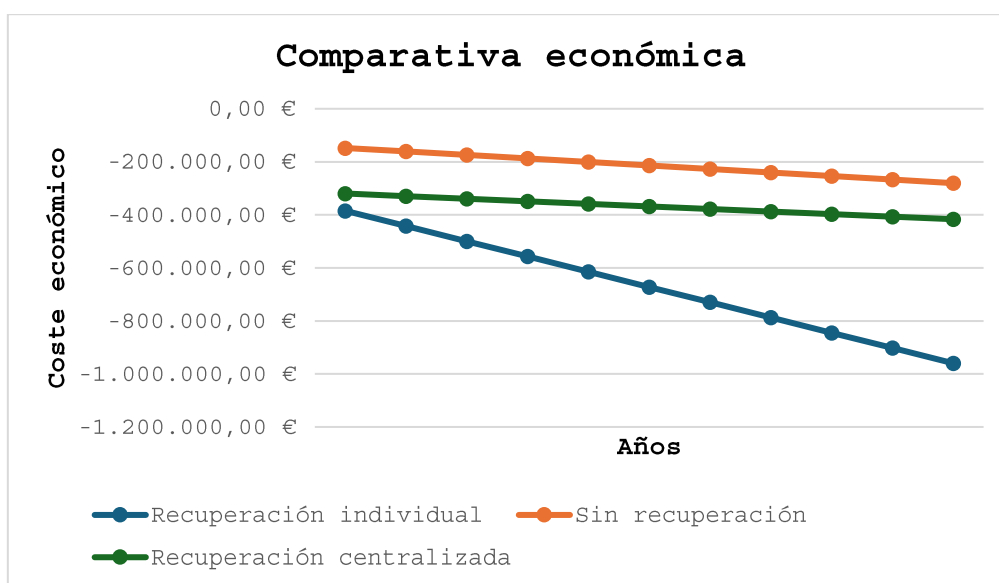


Figura 27. Comparativa económica alternativas

Como se puede observar la inversión inicial menor es la alternativa sin recuperación de energía, al tener menos elementos y conducto que las otras alternativas. Comparando la alternativa con recuperación individual y centralizada la que menor inversión inicial tiene es la de recuperación individual, por el coste que tiene la compra de una máquina de ventilación para cada vivienda.

Comparando el coste anual se puede observar como la mayor pendiente la tiene la alternativa de recuperación individual, especialmente por el elevado coste de mantenimiento de cada una de las máquinas. El coste anual que tiene el caso sin recuperación y con recuperación centralizada es muy similar, como se puede apreciar con las pendientes de ambas, siendo inferior el coste del caso de recuperación centralizada.

Un último punto a comparar es el coste a largo plazo de las alternativas sin recuperación y con recuperación centralizada. Mediante esta comparación se conoce el

punto en el cual el coste de la alternativa sin recuperación es mayor que con recuperación centralizada y comienza a ser rentable su instalación.

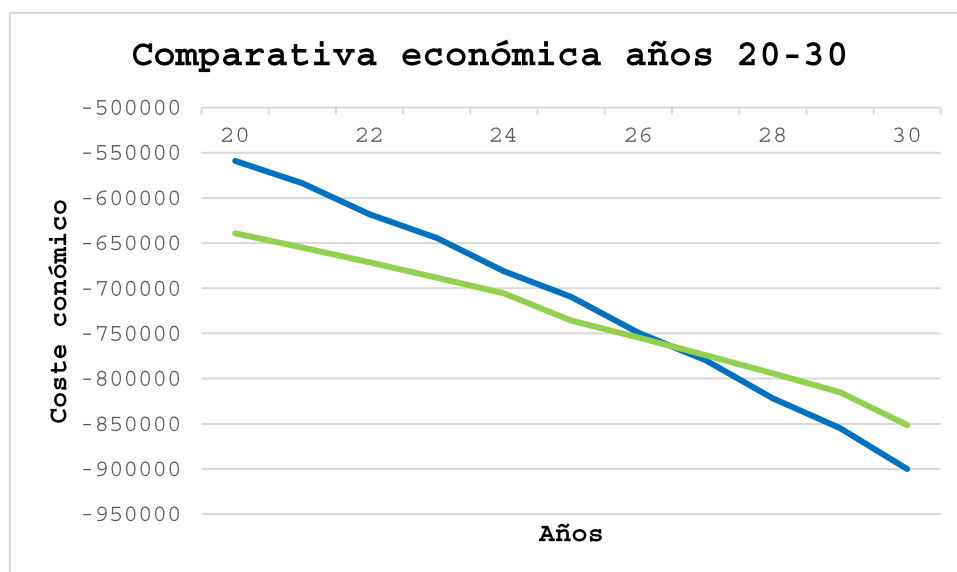


Figura 28. Periodo de retorno recuperación centralizada

En la Figura 28 se representa dicha comparación. Como se puede observar a partir de aproximadamente 28 años el coste de la alternativa sin recuperación es mayor que con recuperación centralizada.

6.8. Conclusiones apartado económico

El análisis económico reporta que, de las tres alternativas, la de menor coste es la alternativa sin recuperación de energía, al requerir de una inversión inicial mucho menor, ya que el periodo en el que se amortizaría es de 28 años. Es por ello que, teniendo en cuenta el periodo de amortización, si atendemos únicamente a los aspectos económicos la opción más rentable es la instalación sin recuperación de energía.

Comparando la alternativa de recuperación de energía centralizada y recuperación de energía individual se puede concluir que tanto la inversión inicial, debido al coste de los dispositivos en cada vivienda, como el coste anual de mantenimiento son mayores en el caso de la recuperación individual. Por ello en caso de realizar la instalación de un bloque de viviendas con recuperación de energía, siempre va a ser más rentable la recuperación centralizada.

7. Comparativa energética Zaragoza/Tenerife /Glasgow /Berlín

En este capítulo se va a realizar un breve resumen de la comparativa energética de 9 viviendas con recuperación de energía centralizada entre distintas zonas climáticas. El desarrollo y análisis completo se encuentra en el Anexo IV.

En la Tabla 29 se exponen las temperaturas máximas y mínimas de cada una de las zonas climáticas que se van a estudiar. Las temperaturas se muestran de forma mensual, para conocer de forma aproximada la evolución temporal de las temperaturas en cada una de las zonas a lo largo del año.

| | | Comparativa Temperaturas Mensuales | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|------------------------------------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| | | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| Zaragoza | T. Máxima | 12 | 16 | 20 | 22 | 27 | 33 | 37 | 35 | 34 | 24 | 17 | 10 |
| | T. Mínima | -3 | -5 | -3 | -2 | 1 | 6 | 10 | 11 | 11 | 5 | 0 | -4 |
| Tenerife | T. Máxima | 18 | 20 | 22 | 23 | 24 | 25 | 30 | 28 | 25 | 24 | 23 | 18 |
| | T. Mínima | 7 | 8 | 8 | 11 | 11 | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 15 | 5 |
| Glasgow | T. Máxima | 12 | 10 | 10 | 16 | 18 | 23 | 25 | 20 | 27 | 17 | 14 | 13 |
| | T. Mínima | -5 | -5 | 0 | 4 | 5 | 7 | 8 | 8 | 5 | 2 | 1 | 0 |
| Berlín | T. Máxima | 5 | 10 | 16 | 22 | 21 | 28 | 30 | 31 | 25 | 22 | 13 | 10 |
| | T. Mínima | -10 | -6 | -2 | -2 | 5 | 7 | 10 | 9 | 5 | -5 | -5 | -5 |

Tabla 29. Temperaturas zonas climáticas

Conocidas las temperaturas se realiza el estudio energético en cada una de las zonas. Los resultados que se van a mostrar son los más representativos, las cargas de ventilación e infiltraciones negativas y la demanda de calefacción.

En la Figura 29 se representan las cargas de ventilación.

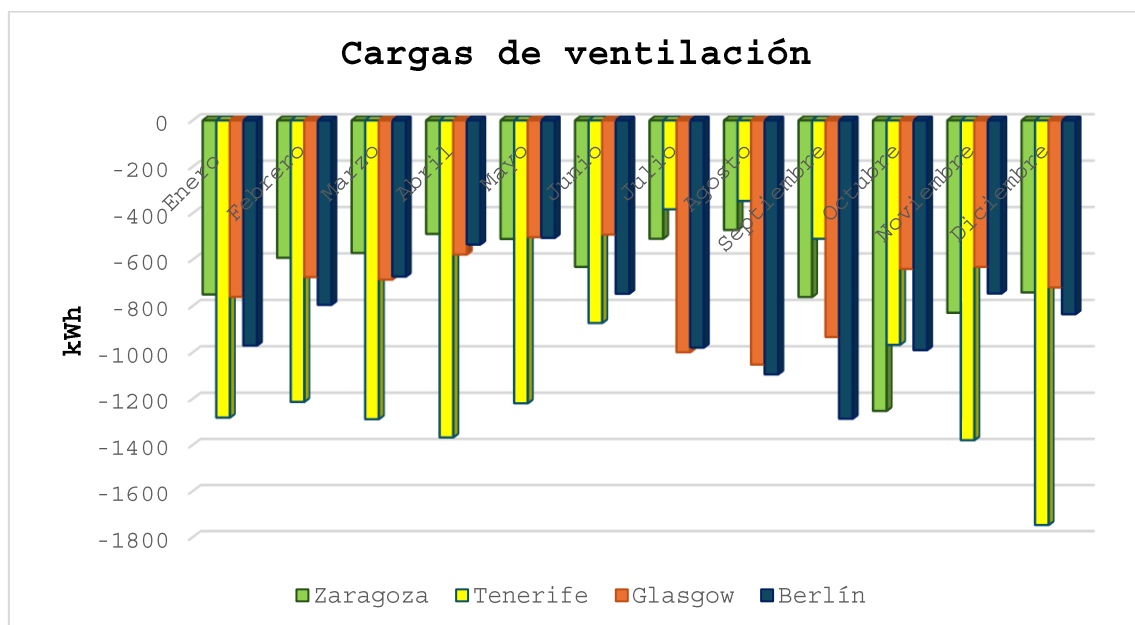


Figura 29. Cargas de ventilación zonas climáticas

Entre las ciudades de Berlín, Zaragoza y Glasgow, se puede observar que la ciudad con mayores cargas negativas en los meses de invierno es Berlín. Esto es debido a la inferior temperatura durante todo el año respecto al resto de ciudades. Comparando las

ciudades de Glasgow y Zaragoza, las cargas de ventilación negativas en los meses de invierno son muy similares, debido a similares perfiles de temperatura.

Es de interés el valor de las cargas negativas en Tenerife a lo largo del año. Esto es debido a la posibilidad de realizar free-cooling que tienen los sistemas con recuperación de energía. Mediante el free-cooling el aire entra a temperatura exterior, consiguiendo introducir cargas mayores. De esta forma el sistema consigue reducir al máximo posible las demandas de refrigeración que necesita a lo largo del año.

Se da una explicación más detallada en el Anexo IV.

En la figura 30 se muestran los resultados de las demandas de calefacción en cada zona climática.

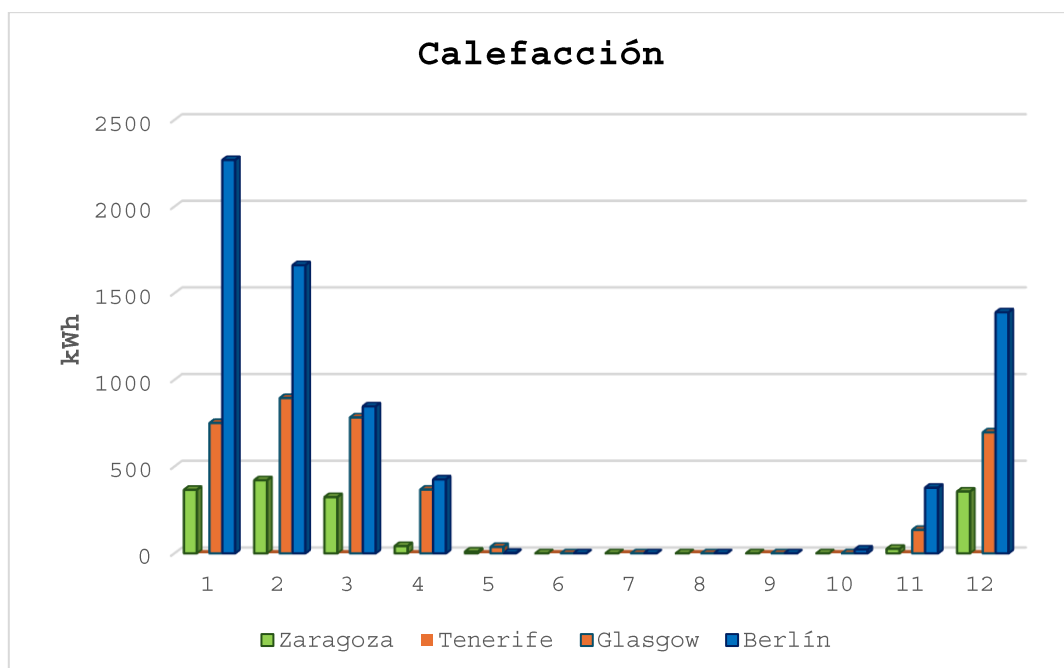


Figura 30. Demanda de calefacción zonas climáticas

La demanda de calefacción más elevada se encuentra en Berlín, ciudad más fría del estudio. Podemos observar como los valores de demanda en Zaragoza y Glasgow disminuyen, debido a las temperaturas más elevadas a lo largo del año, si bien por el mismo motivo en Glasgow son superiores. Se puede observar demanda nula de calefacción durante todo el año en Tenerife, debido al clima templado y a sus temperaturas más elevadas.

Como en el caso anterior, en el Anexo IV se realiza una descripción más detallada.

8. Conclusiones

El proyecto de Fin de Máster se ha centrado en el estudio de uno de los aspectos con mayor importancia dentro del concepto PassivHaus, la ventilación de las viviendas.

En la comparativa energética realizada se ha mostrado el efecto que tiene la recuperación de energía en la ventilación en el cambio de la demanda energética que se tiene dentro de las viviendas, reduciendo los valores de la demanda a valores cercanos al 60%. A pesar del ahorro en la demanda energética y la disminución de los costes que ello genera, los mayores costes en la inversión inicial que requieren los sistemas con recuperación hacen que no sea viable si la comparativa entre las 3 alternativas la realizamos de forma puramente económica.

La comparativa económica, a su vez, arroja resultados claros a la hora de comparar instalaciones individuales y centralizadas. Se ha demostrado como, sistemas con prestaciones y funcionamiento similares, económicamente ofrecen resultados totalmente distintos. Tanto las inversiones iniciales como los gastos anuales con recuperación individual son superiores a los que conllevan la recuperación centralizada. Es por ello que, en bloques de viviendas, especialmente con números elevados de viviendas, siempre ofrecerá mayor rentabilidad la instalación mediante sistemas centralizados.

Finalmente, como se ha visto en la comparativa entre distintas zonas climáticas, la ventilación con recuperación aumenta su valor en climas extremos. En estos climas, las cargas por ventilación, al ser muy superiores a climas más templados, el efecto que tiene la recuperación de energía en términos absolutos es superior.

Como conclusión final del proyecto, una vez conocida las restricciones normativas que atañen a nuestro proyecto, a la hora de realizar la instalación de ventilación, es muy importante valorar aquellos criterios a los que vamos a dar importancia. En términos puramente económicos, en caso de que la normativa nos lo permita, podremos decantarnos por una solución sin recuperación. Dando mayor importancia a otros criterios como el confort térmico en el interior de nuestro hogar o las cuestiones medioambientales, por un coste no muy superior se pueden obtener beneficios muy elevados.

9. Referencias

- Asociación Española de Normalización. (2006). *UNE Normalización Española*. Obtenido de UNE-EN ISO 8996:2005: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0033958>
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2019). *Fundamentos de Climatización*. Atecyr.
- caloryfrio.com. (2021). *PORTAL SECTORIAL DE LAS INSTALACIONES*. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html>
- Casals Fans of innovation. (2020). *PRESSURE DROP CALCULATION IN ACCESSORIES*. Obtenido de CÁLCULO DE PÉRDIDA DE CARGA EN ACCESORIOS: https://www.casals.com/assets/uploads/herramientas_pagina/perdidas%20de%20carga%20accesorios_accessories-load-loss.pdf
- Endesa. (13 de 06 de 2024). *Endesa*. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/cuanto-cuesta-electricidad>
- Eurovent Certified Performance. (23 de 6 de 2024). *Eurovent Certified Performance*. Obtenido de <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/understanding-seer-and-scop?universe=energy-efficiency#:~:text=La%20eficiencia%20energ%C3%A9tica%20de%20una,para%20el%20modo%20de%20calefacci%C3%B3n>.
- Gobierno de España. (12 de 6 de 2024). *Código Técnico de la Edificación*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/Salubridad.html>
- Gobierno de España. (12 de 6 de 2024). *Código Técnico de la Edificación*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- Hitecsa Cool air. (2023). Catálogo General 2023. *Soluciones eficientes y sostenibles en climatización Hitecsa*, 242.
- Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España. (2000). *NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire*. Obtenido de https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074
- Passipedia. (12 de 6 de 2024). *The passive house resource*. Obtenido de <https://passipedia.org/>

Passive House Institute. (2024). *Passive House Institute*. Obtenido de <https://passivehouse.com/>

Siber Zone, S.L.U. (13 de 6 de 2024). *Siber Ventilación Inteligente, Fabricante de Sistemas de Ventilación con Alta Eficiencia Energética*. Obtenido de <https://www.siberzone.es/descarga/siber-df-evo-1-15309/>

Statista. (13 de 06 de 2024). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/476953/tasa-de-inflacion-anual-en-espana/>

ANEXOS

Anexo I: Simulación energética

En este anexo se va a describir el proceso seguido para realizar la simulación energética del bloque de viviendas prototipo. Comenzando por el diseño del bloque de viviendas en CAD, su modelado 3D en CYPECAD MEP y su posterior simulación energética en CYPECADTHERM HE.

1. Diseño bloque de viviendas en CAD

Se ha diseñado una vivienda individual tipo, conformado por:

- Dormitorio principal con baño y vestidor
- Dos dormitorios individuales
- Baño individual
- Sala de estar
- Cocina
- Terraza

Para el diseño del bloque de viviendas (Figura 31) que se va a repetir a lo largo del edificio se realizó la simetría de la vivienda individual. Se añadió una zona intermedia entre las viviendas individuales para la zona de escaleras ascensor y paso de conductos de las instalaciones.

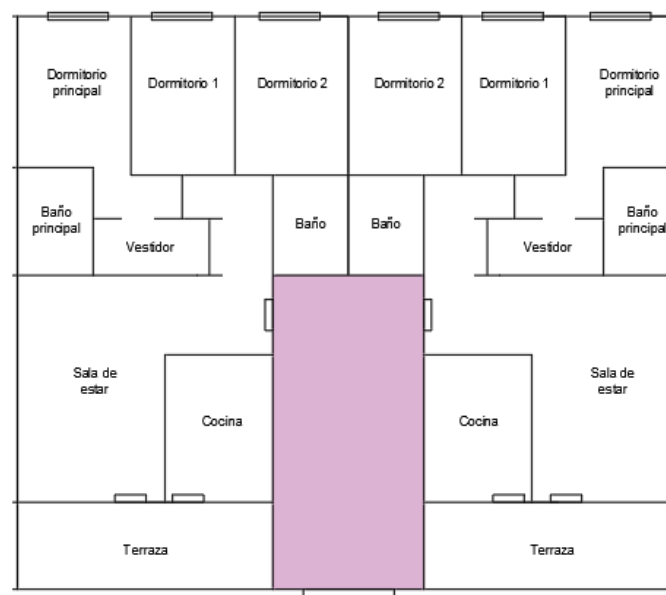


Figura 31. Pareado viviendas

El edificio final de estudio se ha diseñado en L con un total de 16 viviendas por planta tal y como se muestra en la Figura 32.

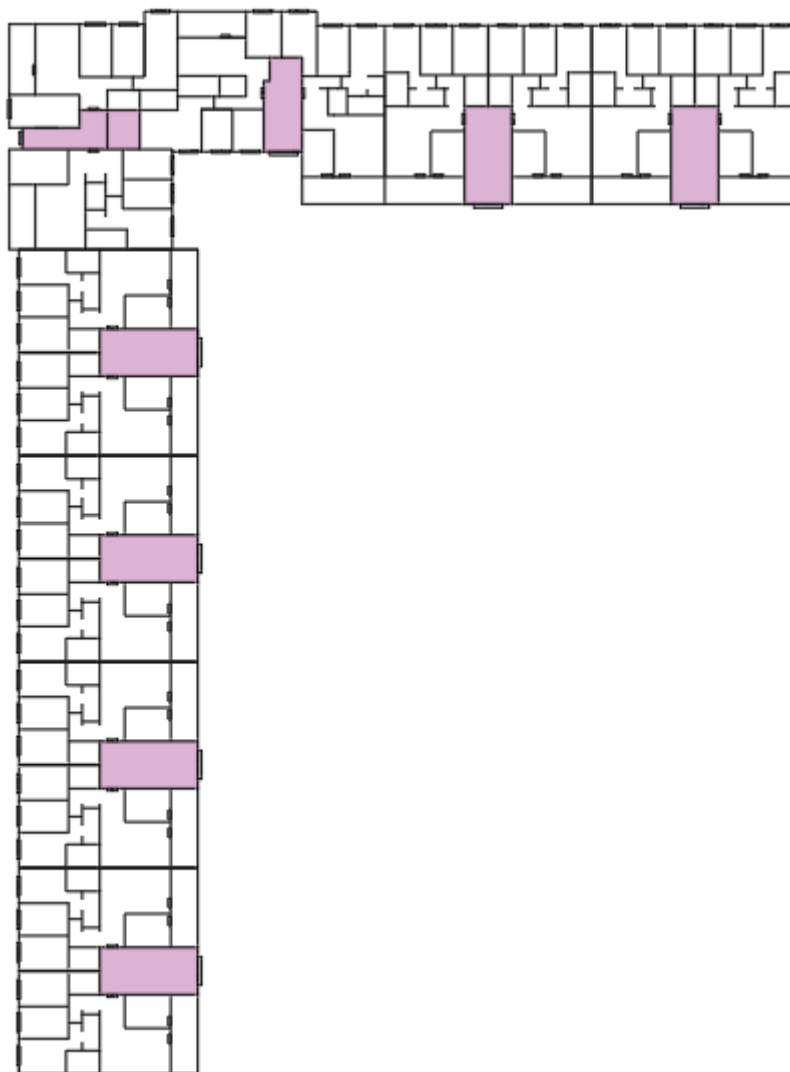


Figura 32. Bloque de viviendas

2. Modelado en CYPECAD MEP

Una vez realizado el diseño en CAD se importa el modelo a CYPECAD MEP, entorno de diseño en el que se va a modelar el edificio para la posterior obtención de la demanda energética.

2.1 Modelo importado

En la Figura 33 se muestra el edificio importado en CYPECAD MEP.

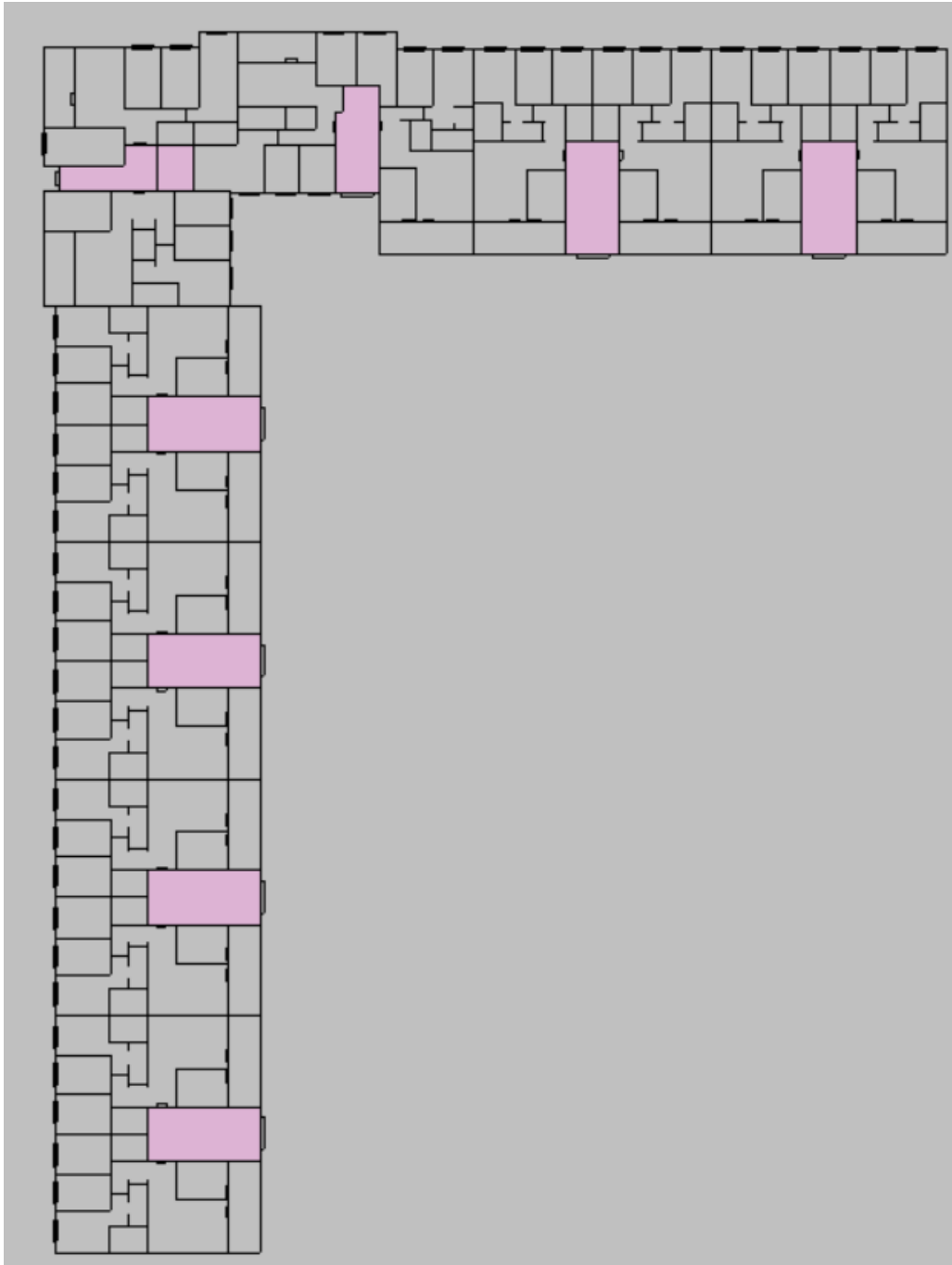


Figura 33. Bloque viviendas CYPECAD MEP

Una vez introducida la plantilla se define el número de plantas (Figura 34) del bloque de viviendas. Por simplicidad se ha diseñado un edificio de planta baja+ 6 plantas, empleando en todas las plantas la misma plantilla.

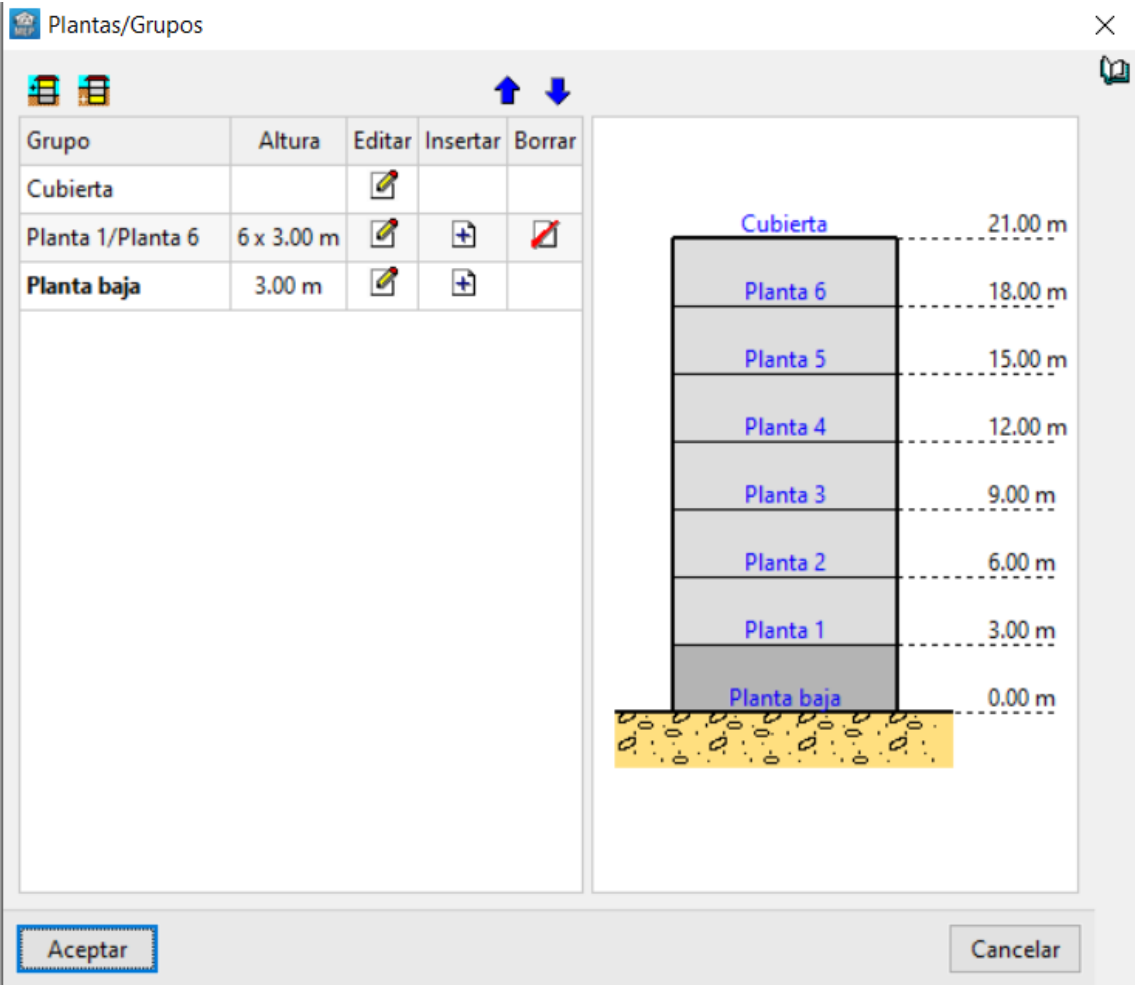


Figura 34. Definición plantas bloque viviendas

2.2 Elementos constructivos

Una vez importada la plantilla y definidas las plantas del edificio, se tienen que definir los elementos constructivos del bloque. Se definen tanto los elementos constructivos utilizados en la envolvente del edificio como aquellos utilizados como elementos de separación entre viviendas y entre las distintas zonas de la propia vivienda.

- **Cerramiento exterior**

El cerramiento exterior debe tener una transmitancia máxima de $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ para cumplir con los requisitos PassivHaus, más restrictivos que el CTE.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 35.

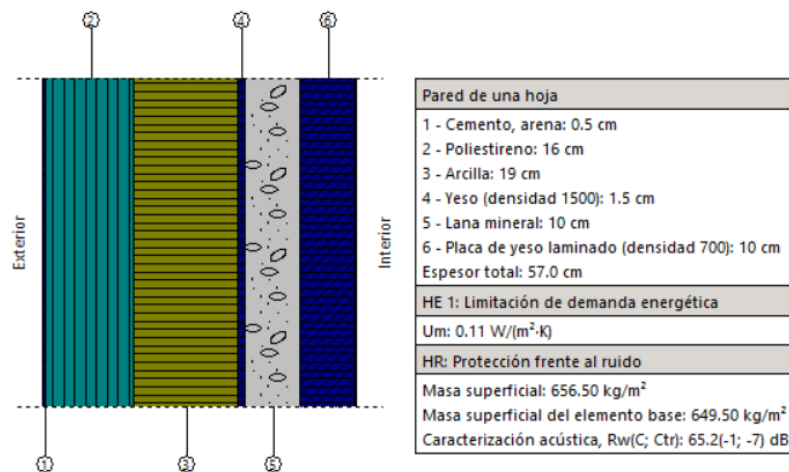
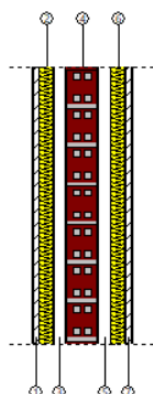


Figura 35. Definición cerramiento exterior

- **Tabique interior**

El tabique interior se ha diseñado en cumplimiento del CTE con un valor límite de $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ para la transmitancia térmica. Este tabique se ha sobredimensionado por criterios acústicos, para mejorar la insonorización respecto a las viviendas contiguas.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 36.



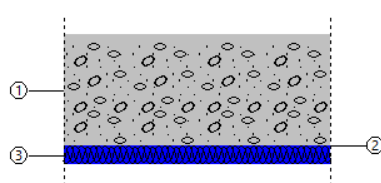
| Pared de una hoja |
|---|
| 1 - Placa de yeso laminado: 1.5 cm |
| 2 - Lana mineral: 3 cm |
| 3 - Separación: 2.8 cm |
| 4 - Fábrica de ladrillo cerámico hueco: 7 cm |
| 5 - Separación: 2.8 cm |
| 6 - Lana mineral: 3 cm |
| 7 - Placa de yeso laminado: 1.5 cm |
| Espesor total: 21.6 cm |
| HE 1: Limitación de demanda energética |
| Um: $0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ |
| HR: Protección frente al ruido |
| Masa superficial: $92.25 \text{ kg}/\text{m}^2$ |
| Masa superficial del elemento base: $65.10 \text{ kg}/\text{m}^2$ |
| Caracterización acústica por ensayo, $R_w(\text{C}; \text{Ctr})$: $33.1(-1; -1) \text{ dB}$ |
| Referencia del ensayo: No disponible. Los valores se han estimado mediante leyes de masa obtenidas extrapolando el catálogo de elementos constructivos. |
| Mejora del índice global de reducción acústica del revestimiento: 25.5 dBA |
| Seguridad en caso de incendio |
| Resistencia al fuego: EI 90 |

Figura 36. Descripción tabique interior

- **Solera**

Para el diseño de la solera se han utilizado ejemplos de casas certificadas PassivHaus debido a restricciones ambiguas referidas a la solera. Se ha diseñado una solera con una transmitancia térmica de $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$, transmitancia que además cumple el límite superior de transmitancia térmica establecido en el CTE.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 37.



| Solera |
|---|
| 1 - Solera de hormigón en masa con un contenido de fibras sin función estructural, fibras de polipropileno Paviland Fibras "GRUPO PUMA" de $0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ y aditivo para reducir la retracción del hormigón y distanciar las juntas de retracción $10 \text{ kg}/\text{m}^3$; 25 cm |
| 2 - Film de polietileno: 0.02 cm |
| 3 - Poliestireno extruido: 4 cm |
| Espesor total: 29.0 cm |
| HE 1: Limitación de demanda energética |
| Us: $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ |
| (Para una solera con longitud característica $B' = 5 \text{ m}$) |
| Solera con banda de aislamiento perimetral (ancho 1.2 m y resistencia térmica: $1.21 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) |
| Detalle de cálculo (Us) |
| Superficie del forjado, A: 100.00 m^2 |
| Perímetro del forjado, P: 40.00 m |
| Resistencia térmica del forjado, R_f : $1.32 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ |
| Resistencia térmica del aislamiento perimetral, R_f : $1.21 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ |
| Espesor del aislamiento perimetral, dn: 4.00 cm |
| Tipo de terreno: Arena semidensa |
| HR: Protección frente al ruido |
| Masa superficial: $626.38 \text{ kg}/\text{m}^2$ |
| Masa superficial del elemento base: $625.18 \text{ kg}/\text{m}^2$ |
| Caracterización acústica, $R_w(\text{C}; \text{Ctr})$: $64.6(-1; -7) \text{ dB}$ |
| Nivel global de presión de ruido de impactos normalizado, $L_{n,w}$: 66.1 dB |

Figura 37. Descripción solera

- **Forjado unidireccional**

El forjado entre pisos se ha definido en cumplimiento del CTE, con un valor límite de $0.85 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ de transmitancia térmica.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 38.

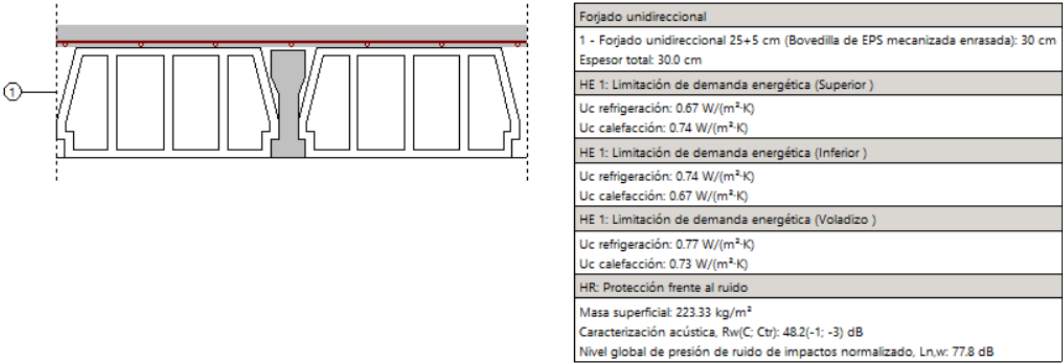


Figura 38. Descripción forjado

- **Forjado terrazas**

El forjado de terrazas se ha diseñado con una transmitancia de $0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ por criterios de seguridad, dado que ni CTE ni PassivHaus definen criterios de transmitancia para elementos constructivos que no comunican con el interior.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 39.

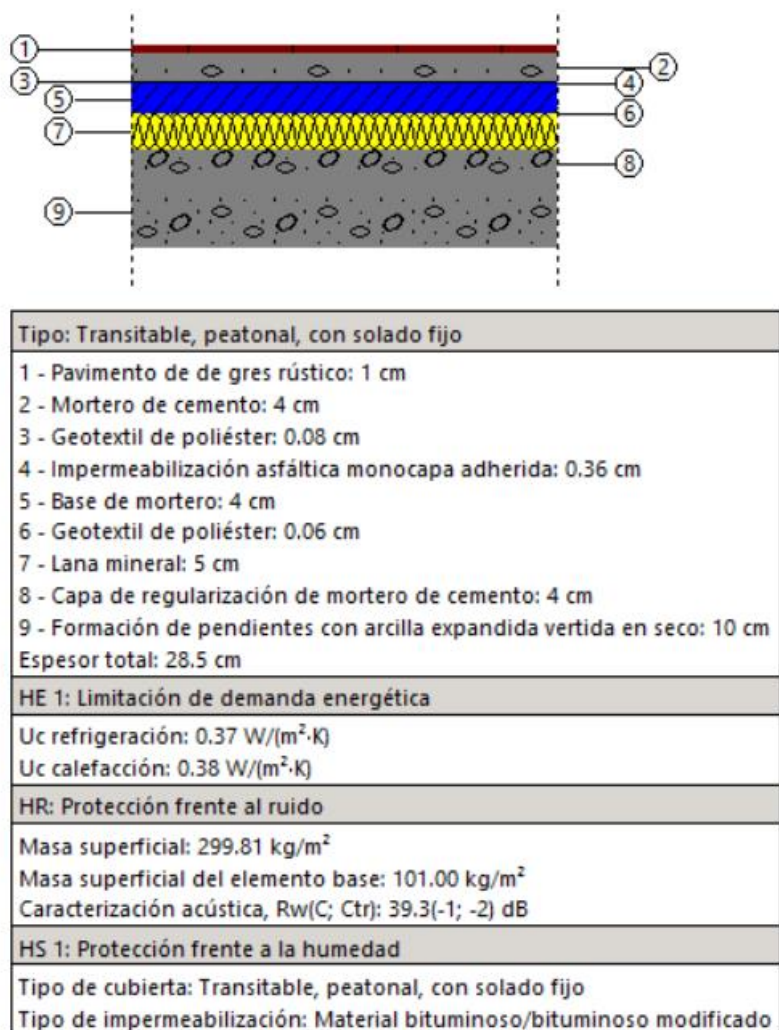


Figura 39. Descripción forjado

- **Tejado**

El tejado se ha definido en cumplimiento de los requisitos PassivHaus, con un límite superior de $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ de transmitancia térmica.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 40.

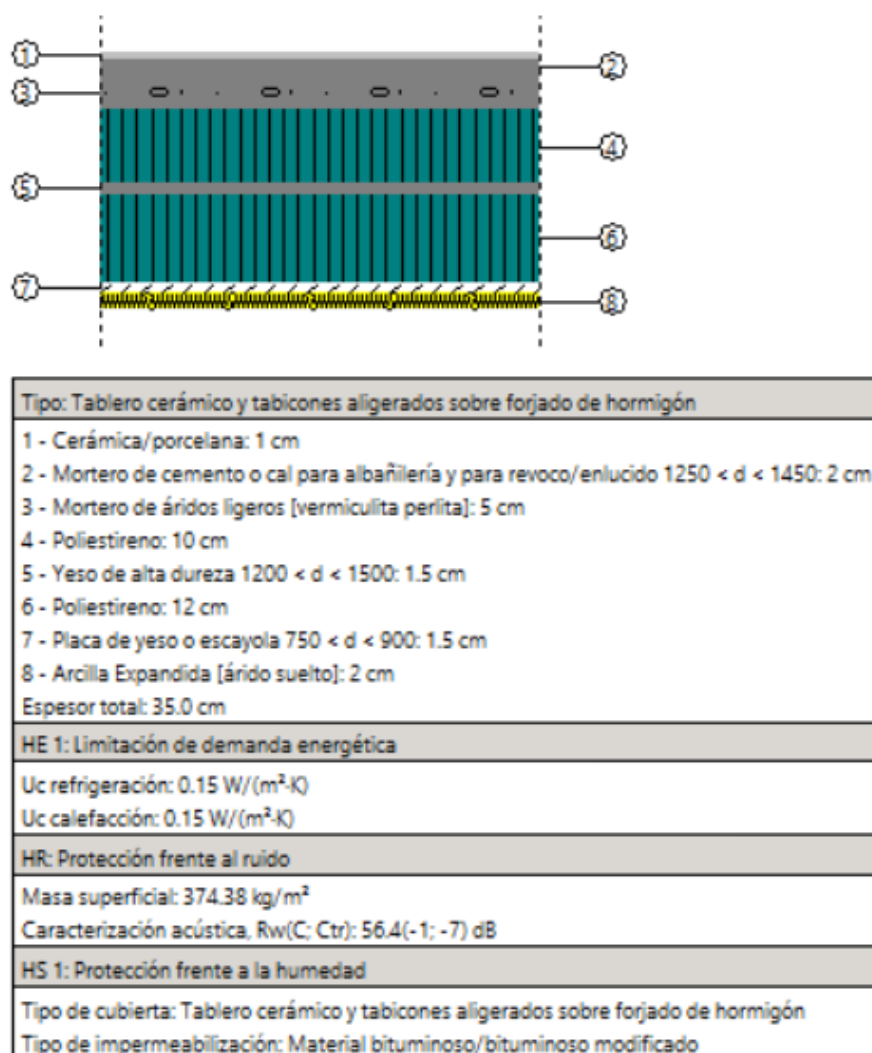


Figura 40. Descripción tejado

- **Huecos**

Las ventanas se han definido con una transmitancia térmica de $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, límite superior para los vidrios de las ventanas según los requisitos PassivHaus.

Los materiales utilizados se definen en la Figura 41.

Aislamiento térmico:

Transmitancia térmica: Uvidrio = $0.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Ucarpintería = $1.00 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Transmitancia térmica: U = $0.97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Factor solar del vidrio: fsv = 0.50

Factor solar de la carpintería: fsc = 0.02

Factor solar de la ventana: fs = 0.08

(a falta de la corrección por factor de sombra)

Aislamiento acústico:

Rw(C;Ctr) del vidrio: 27.0(-1;-1) dB

Apertura batiente, oscilobatiente o no practicable

Rw(C;Ctr) de la ventana, corregido según EN 14351-1: 30.0(-1;-2) dB

Figura 41. Descripción huecos

Los marcos de las ventanas se han definido para el cumplimiento de la normativa PassivHaus, con un límite superior de permeabilidad de $3 \text{ m}^3/(h \cdot \text{m}^2)$. Para su cumplimiento, el marco de las ventanas debe ser de clase 4 tal y como se muestra en la Figura 42.

Carpintería

Premarco

Persiana

Sellado

Serie

☐ Eurofutur 70

☐ Kömmerling 76AD

☒ Kömmerling 76MD

☐ Kömmerling 76MD Zero

Información técnica

Transmitancia térmica del marco: $U_{h,m} = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Espesor máximo del acristalamiento: 50 mm

Permeabilidad al aire clase 4, según UNE-EN 12207

Estanqueidad al agua clase 9A, según UNE-EN 12208

Resistencia a la carga del viento clase C5, según UNE-EN 12210

Posibilidades de apertura

☒ Interior

☐ Exterior

Ancho (mm)

☒ 800

☐ 900

☐ 1000

☐ 1100

☐ 1200

☐ 1300

☐ 1400

☐ 1500

☐ 1600

☐ 1700

☐ 1800

☐ 1900

☐ 2000

☐ 2100

☐ 2200

Alto (mm)

☒ 400

☐ 500

☐ 600

☐ 700

☐ 800

☐ 900

☐ 1000

☐ 1100

☐ 1200

☐ 1300

☐ 1400

☐ 1500

☐ 1600

☐ 1700

☐ 1800

☐ 1900

☐ 2000

☐ 2100

☐ 2200

☐ 2300

☐ 2400

☐ 2500

Acabado

☒ Blanco estándar

☐ Foliado en la cara exterior

☐ Foliado en las dos caras

☐ Foliado especial en la cara exterior

☐ Foliado especial en las dos caras

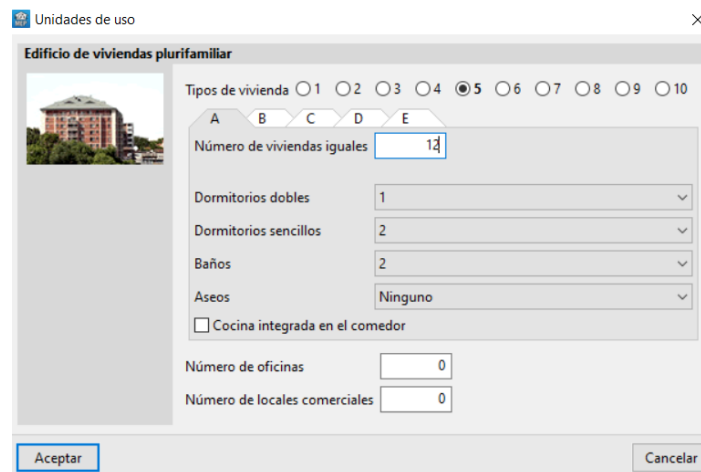
Figura 42. Descripción ventanas

67

2.3 Definición de la vivienda

Para la definición de las unidades de uso se han definido 5 tipos de viviendas distintos en función de la geometría. Las viviendas tipo A son las diseñadas como vivienda tipo inicialmente, con un total de 12 por planta. Las viviendas tipo B, C, D y E son adaptaciones de la vivienda tipo A para formar el bloque de viviendas en L, con una vivienda por de cada tipo por planta.

En las unidades de uso se deben definir además el número de dormitorios dobles y sencillos que hay en cada tipo de vivienda, así como el número de baños y aseos. Todo ello se muestra en la Figura 43.



Unidades de uso

Edificio de viviendas plurifamiliar

Tipo de vivienda: 1 2 3 4 **5** 6 7 8 9 10

A B C D E

Número de viviendas iguales: 12

Dormitorios dobles: 1

Dormitorios sencillos: 2

Baños: 2

Aseos: Ninguno

☐ Cocina integrada en el comedor

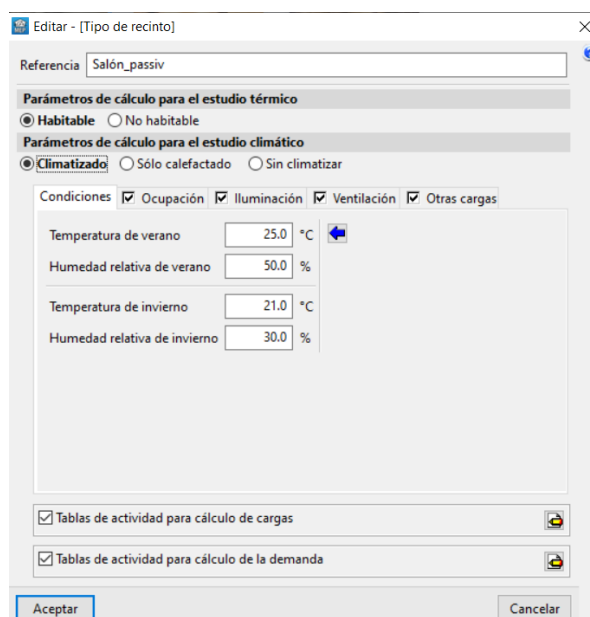
Número de oficinas: 0

Número de locales comerciales: 0

Aceptar Cancelar

Figura 43. Definición viviendas

Las condiciones de diseño (Figura 44) se han implementado para asegurar el confort interior en cumplimiento de la tabla 1.4.1.1 del RITE. Por ello la temperatura interior en verano que se ha seleccionado es de 25°C y en invierno de 21°C.



Editar - [Tipo de recinto]

Referencia: Salón_passiv

Parámetros de cálculo para el estudio térmico

☒ Habitable ☐ No habitable

Parámetros de cálculo para el estudio climático

☒ Climatizado ☐ Sólo calefactado ☐ Sin climatizar

Condiciones: ☒ Ocupación ☒ Iluminación ☒ Ventilación ☒ Otras cargas

Temperatura de verano: 25.0 °C

Humedad relativa de verano: 50.0 %

Temperatura de invierno: 21.0 °C

Humedad relativa de invierno: 30.0 %

☒ Tablas de actividad para cálculo de cargas

☒ Tablas de actividad para cálculo de la demanda

Aceptar Cancelar

Figura 44. Ejemplo condiciones diseño

2.4 Escenario de ocupación

Para el cálculo de cargas y de la demanda energética es imprescindible definir los escenarios de ocupación dentro de la vivienda. Para su definición se ha empleado el Apéndice C del Documento Básico HS Salubridad.

- **Cocina**

En la cocina se han definidos los periodos de ocupación(Figura 45) en función de las horas más habituales de uso en las viviendas, adaptando los horarios de uso los fines de semana.

| Cocina | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Intervalo horario | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| 0:00-1:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1:00-2:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2:00-3:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3:00-4:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4:00-5:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5:00-6:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6:00-7:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:00-8:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:00-9:00 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 100 | 100 |
| 9:00-10:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 10:00-11:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00-12:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12:00-13:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00-14:00 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 |
| 14:00-15:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 15:00-16:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 16:00-17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00-18:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20:00-21:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21:00-22:00 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 50 | 50 |
| 22:00-23:00 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 50 | 50 |
| 23:00-0:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 45. Horarios ocupación cocina CYPECAD

- **Sala de estar**

En la sala de estar(Figura 46) debe haber estancia simultánea de todos los ocupantes de la vivienda al menos de dos horas al día los días laborables y de 4 horas al día los fines de semana.

| Sala de estar | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Intervalo horario | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| 0:00-1:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1:00-2:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2:00-3:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3:00-4:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4:00-5:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5:00-6:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6:00-7:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7:00-8:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8:00-9:00 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 |
| 9:00-10:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 10:00-11:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 11:00-12:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 12:00-13:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 13:00-14:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 14:00-15:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 15:00-16:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 16:00-17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 17:00-18:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 20:00-21:00 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 50 | 50 |
| 21:00-22:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 22:00-23:00 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 0 | 0 |
| 23:00-0:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 |

Figura 46. Horarios ocupación sala de estar CYPECAD

- **Baños**

En los baños(Figura 47) se deben incluir dos estancias de media hora continua por persona al día.

| | Baño | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Intervalo horario | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| 0:00-1:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1:00-2:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2:00-3:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3:00-4:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4:00-5:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5:00-6:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6:00-7:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| 7:00-8:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 8:00-9:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9:00-10:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00-11:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00-12:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12:00-13:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00-14:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| 14:00-15:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 |
| 15:00-16:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:00-17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00-18:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20:00-21:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21:00-22:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 22:00-23:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23:00-0:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 47. Horarios ocupación baños CYPECAD

- **Dormitorios**

En los dormitorios(Figura 48) se tiene que cumplir el requisito de ocupación en el periodo horario de 0:00-8:00, debido al periodo de sueño de las personas.

| Dormitorios | | | | | | | |
|-------------------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| Intervalo horario | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| 0:00-1:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1:00-2:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 2:00-3:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3:00-4:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4:00-5:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5:00-6:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 6:00-7:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 7:00-8:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 8:00-9:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9:00-10:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10:00-11:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11:00-12:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12:00-13:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00-14:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14:00-15:00 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 15:00-16:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16:00-17:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17:00-18:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18:00-19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00-20:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20:00-21:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21:00-22:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22:00-23:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 23:00-0:00 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Figura 48.Horarios ocupación dormitorios CYPECAD

Las horas restantes de ocupación se distribuyen entre los locales habitables de la vivienda según las necesidades de uso consideradas en cada caso.

2.5 Modelo 3D

En la figura se muestra la vista isométrica de la primera planta del bloque de viviendas. Se puede observar la división en recintos del interior de cada una de las viviendas, separando las distintas zonas de la vivienda.

En la zona de la terraza (Figura 49) se definió un ventanal que permite el acceso directo desde la zona de la terraza a la sala de estar y una puerta de acceso desde la cocina a la terraza.



Figura 49. Modelo planta baja

En la Figura 50 y Figura 51 se muestra una vista en planta del bloque de viviendas que se va a utilizar como modelo a repetir a lo largo del edificio y una vista en planta del bloque de viviendas en conjunto.

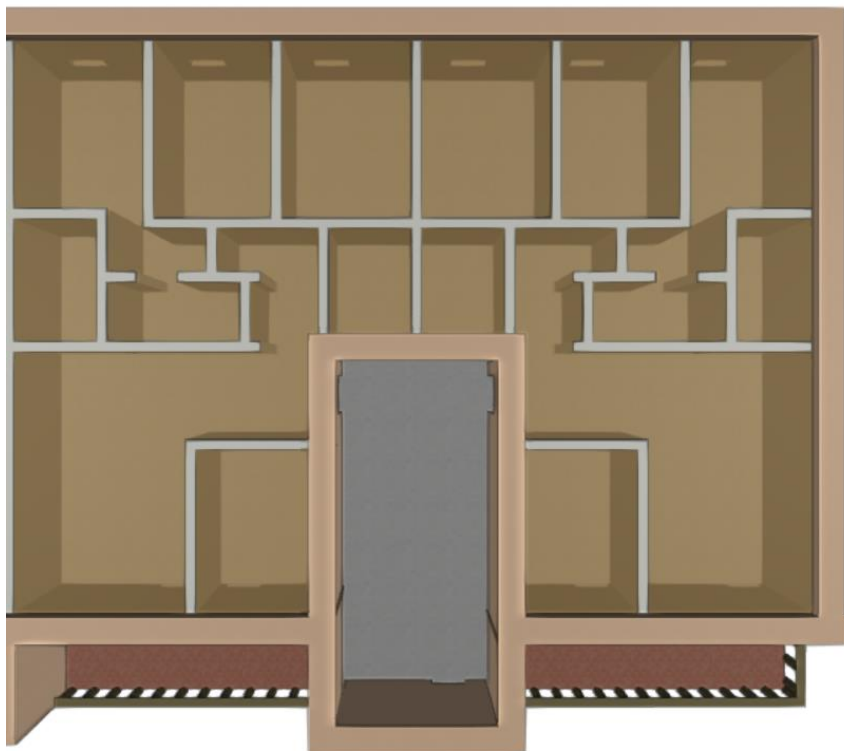


Figura 50. Modelo arquetipo viviendas

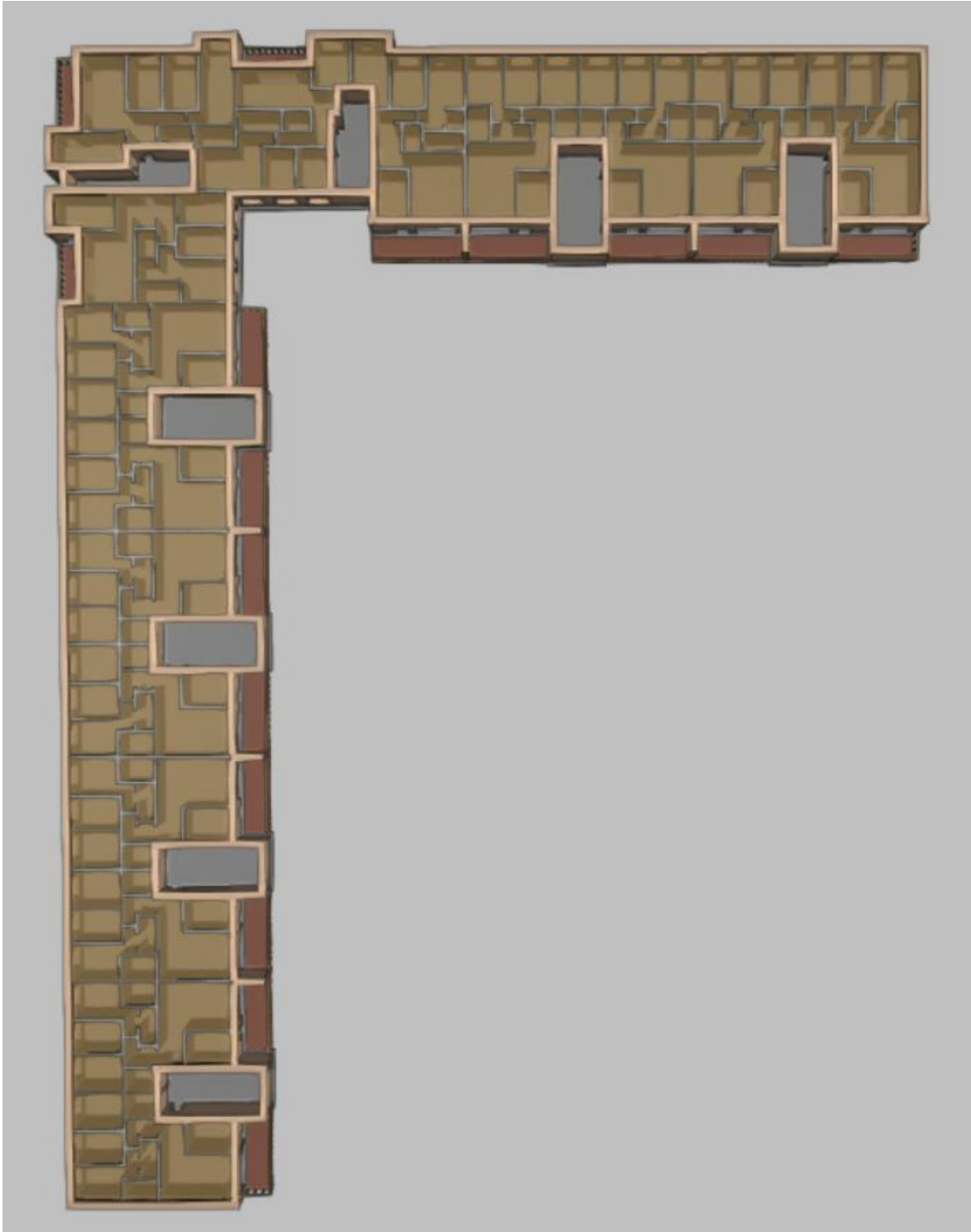


Figura 51. Modelo 3D bloque viviendas

En la Figura 52 se muestra el forjado interior entre plantas y cómo se han conformado las terrazas, proyectando sombra en las viviendas de la planta inferior.

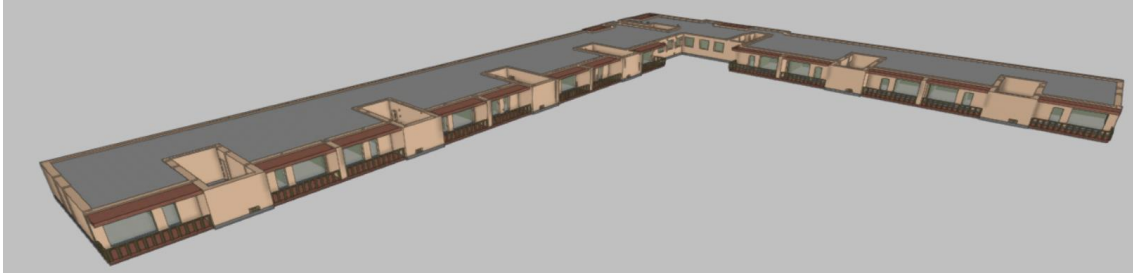


Figura 52. Modelo 3D Planta Baja-Interplanta

En la Figura 53 y Figura 54 se muestra una vista isométrica de la zona delantera y trasera del edificio respectivamente.

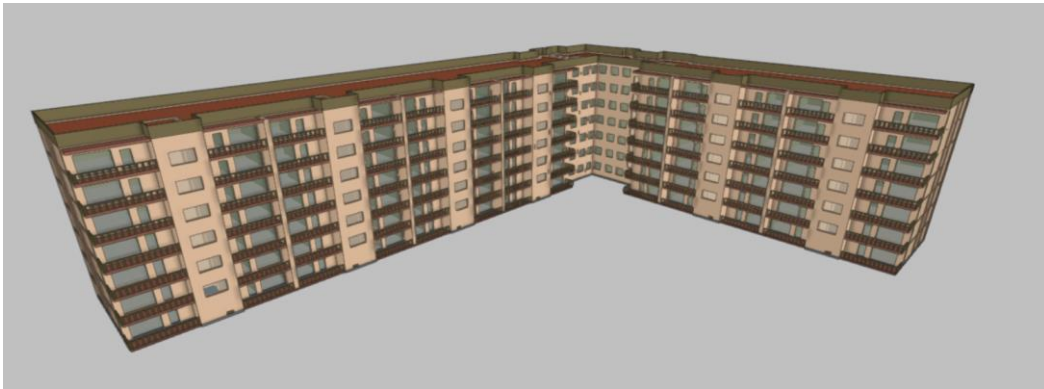


Figura 53. Modelo 3D frontal bloque viviendas



Figura 54. Modelo 3D parte trasera bloque viviendas

3. Diseño de instalaciones de ventilación en CYPETHERM HE

Una vez se ha definido totalmente el edificio se exporta para emplear el modelo 3D en CYPETHERM HE, entorno en el que se diseñan las instalaciones y se realizan las simulaciones energéticas de las alternativas planteadas.

3.1 Emplazamiento

Lo primero a definir es el emplazamiento donde se va a realizar la simulación y según el cual se establecerán los límites de cumplimentación del CTE. En la Figura 55 se observan los datos del emplazamiento seleccionado, en este caso Zaragoza.

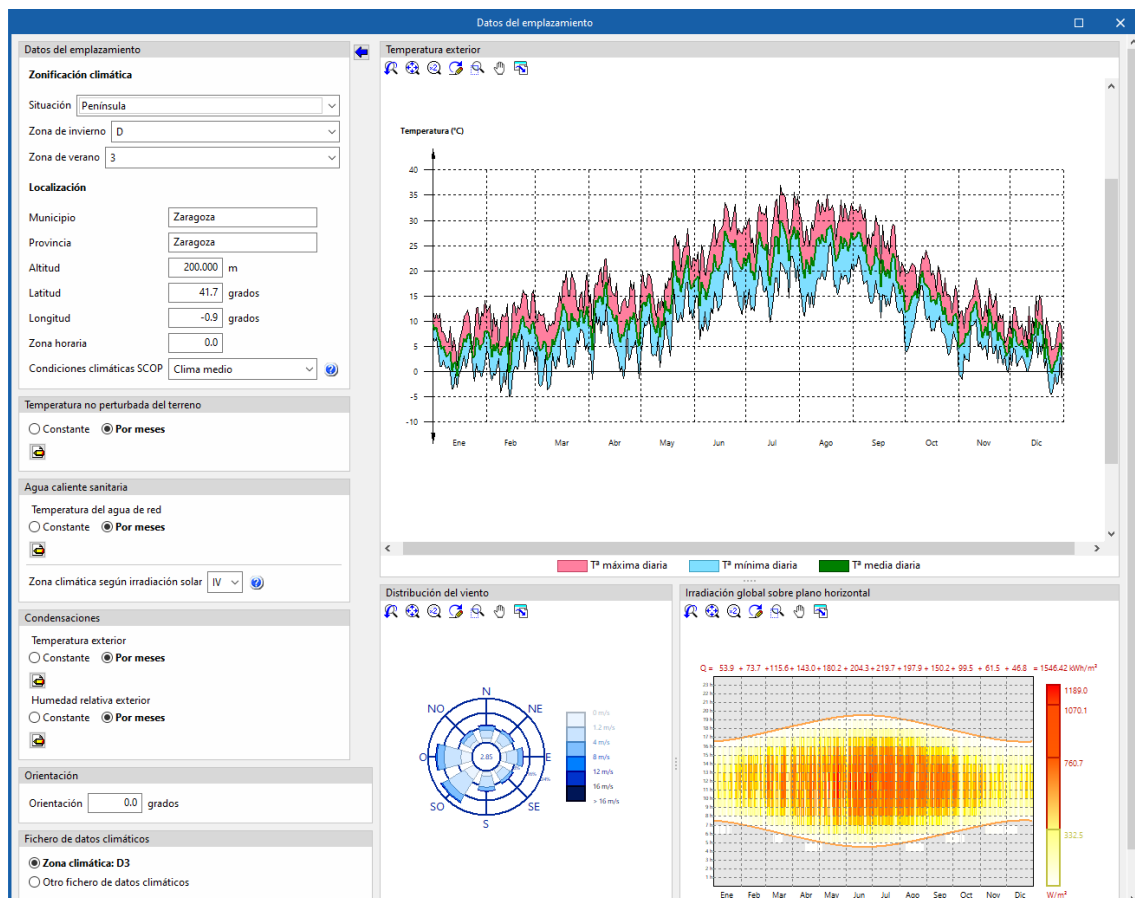


Figura 55. Emplazamiento CYCAD THERM HE

El programa define la zona climática en la que se encuentra Zaragoza, zona climática D. Además de ello se define la altitud en la que se va a realizar la simulación.

El programa ofrece una base de datos climáticos para cada una de las zonas climáticas, en este caso de forma predeterminada para la zona que se ha definido, se establece la zona climática D3. CYPETHERM ofrece una gráfica de la evolución de las temperaturas en esa zona tanto la mínima como la máxima del día. Mediante estas temperaturas realizará el cálculo de las cargas térmicas del edificio.

3.2 Horarios de ocupación

Definido el emplazamiento se tienen que estipular los horarios de ocupación de cada una de las zonas en las que se divide la vivienda.

Lo primero de todo es realizar la distinción de ocupación entre los días laborables y los fines de semana. Es imprescindible distinguirlos debido a los requisitos que impone el CTE DB HS 3 Apéndice C respecto a la ocupación en las viviendas.

En la Figura 56 y Figura 57 se presenta esta distinción en CYPETHERM, en este caso el ejemplo escogido es el salón de las viviendas. En la figura se representa la ocupación en el salón de lunes a viernes, mientras que en la figura se representa la ocupación en el salón los fines de semana.

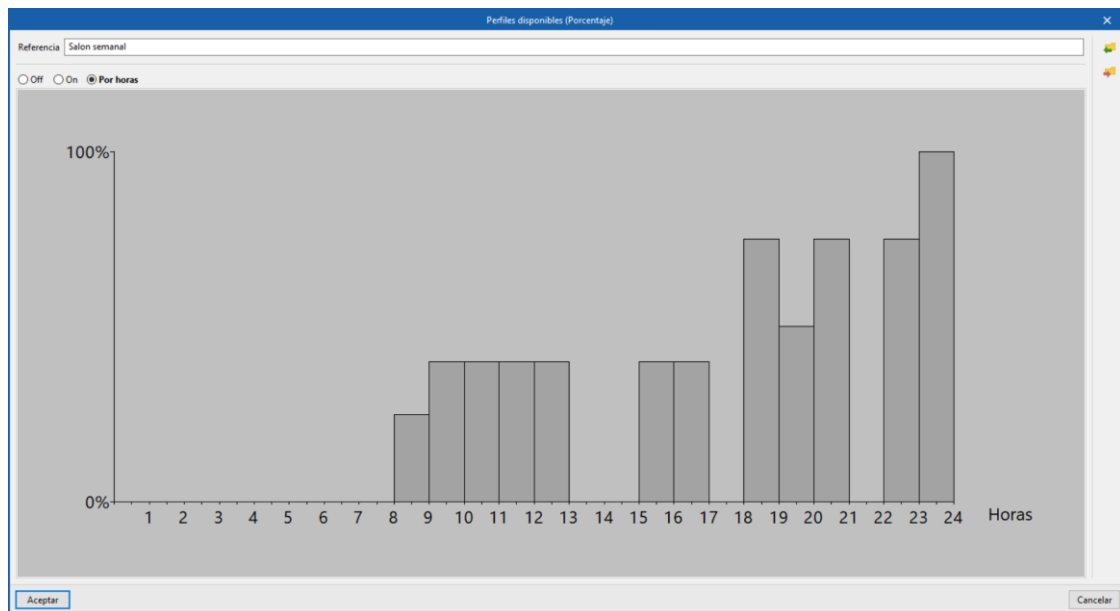


Figura 56. Horarios ocupación CYPECAD THERM HE Lunes-Viernes

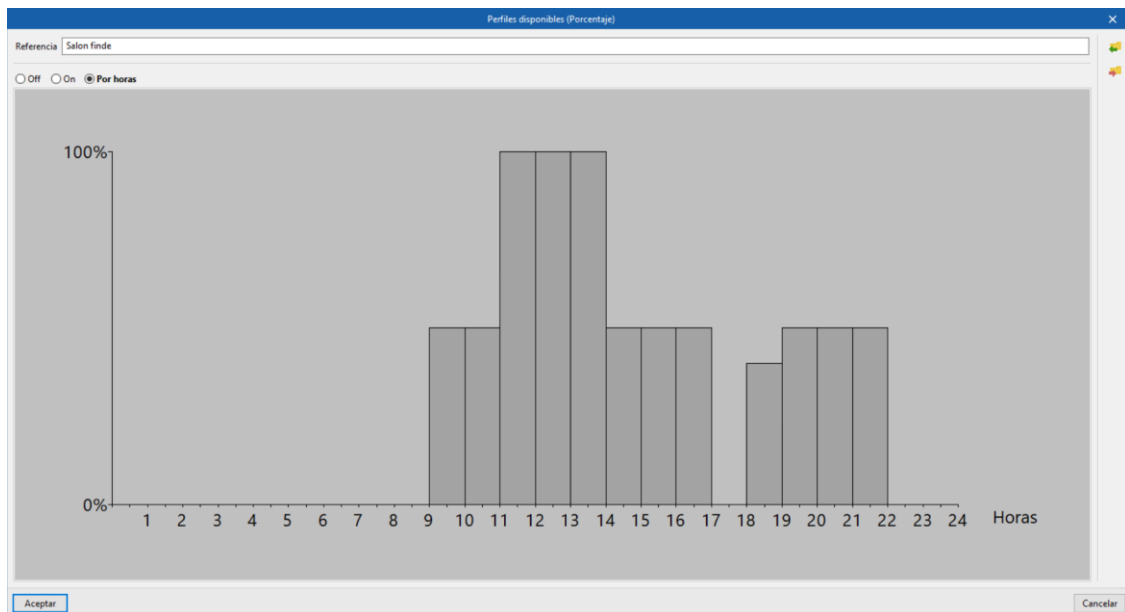


Figura 57. Horarios ocupación CYPECAD THERM HE Sábado-Domingo

Una vez definidos los horarios de ocupación a lo largo de la semana se introducen como perfil de uso para la simulación(Figura 58).

| Laborables | | | | | Fin de semana | |
|---------------|--------|-----------|--------|---------|---------------|---------|
| Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Sábado | Domingo |
| Salon semanal | | | | | Salon finde | |
| | | | | | | |

Figura 58. Definición horarios ocupación

3.3 Puentes térmicos

Una vez definidos los horarios de ocupación en todas las zonas se determinan los valores de los puentes térmicos del edificio. Los puentes térmicos son las zonas del edificio en los que se puede transmitir el calor de forma más sencilla que en las zonas circundantes. Los puentes térmicos se generan en zonas donde se rompe la continuidad de los materiales aislantes.

La Figura 59 representa los puentes térmicos que se han tenido en cuenta en el cálculo de las cargas del edificio.

| | | Referencia | Psi | Valor | En uso | |
|----|--|---------------------------------|-------|-------------|--------|--|
| 1 | | LFi [E]Solera-[B]Muro_Exteri... | 0.21 | CTE DB-HE | | |
| 2 | | LFs [G]Tejado_cubierta-[B]... | 0.21 | CTE DB-HE | | |
| 3 | | TFs [G]Tejado_cubierta-[H](... | 0.21 | CTE DB-HE | | |
| 4 | | TFmi [F]Forjado unidireccio... | 0.01 | CTE DB-HE | | |
| 5 | | TFms [F]Forjado unidireccio... | 0.01 | CTE DB-HE | | |
| 6 | | LWo [B]Muro_Exterior_passi... | 0.01 | CTE DB-HE | | |
| 7 | | LWo [B]Muro_Exterior_passi... | - | Introducido | | |
| 8 | | LWi [B]Muro_Exterior_passi... | -0.03 | CTE DB-HE | | |
| 9 | | TWI [B]Muro_Exterior_passi... | -0.03 | CTE DB-HE | | |
| 10 | | TWI [B]Muro_Exterior_passi... | - | Introducido | | |
| 11 | | TWI [C]Tabique de una hoja... | - | Introducido | | |
| 12 | | TWr [B]Muro_Exterior_passi... | -0.03 | CTE DB-HE | | |
| 13 | | TWr [B]Muro_Exterior_passi... | - | Introducido | | |
| 14 | | TWr [C]Tabique de una hoja... | - | Introducido | | |
| 15 | | TW [B]Muro_Exterior_passiv... | - | Introducido | | |
| 16 | | TW [B]Muro_Exterior_passiv... | 0.01 | CTE DB-HE | | |
| 17 | | CW [B]Muro_Exterior_passi... | -0.03 | CTE DB-HE | | |
| 18 | | CW [B]Muro_Exterior_passi... | - | Introducido | | |
| 19 | | CW [C]Tabique de una hoja ... | - | Introducido | | |
| 20 | | P [P]Pilar 0.3x0.3 cm-[B]Mu... | 1.06 | CTE DB-HE | | |
| 21 | | Ws [J]Puerta_Passiv-[B]Mur... | - | CTE DB-HE | | |
| 22 | | WI [J]Puerta_Passiv-[B]Mur... | - | CTE DB-HE | | |
| 23 | | Wi [K]Triple_Acristalamient... | 0.08 | CTE DB-HE | | |
| 24 | | Ws [K]Triple_Acristalamient... | 0.11 | CTE DB-HE | | |
| 25 | | WI [K]Triple_Acristalamient... | 0.01 | CTE DB-HE | | |

Figura 59.Puentes térmicos

Como se puede observar los valores que se han empleado para el cálculo son valores establecidos por el CTE.

3.4 Definición de viviendas

En la Figura 60 y Figura 61 se muestra la definición de las condiciones de las viviendas.

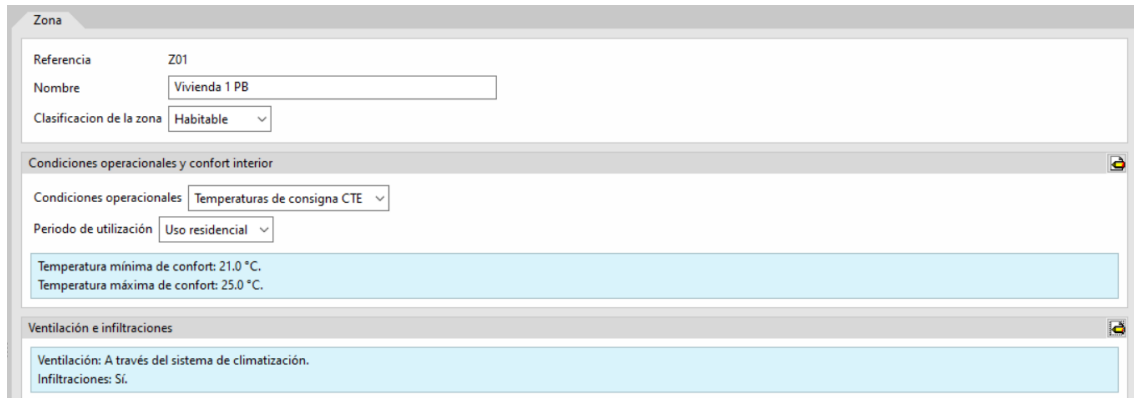


Figura 60. Condiciones viviendas

Como se puede observar en la figura anterior, las viviendas se han definido como zonas habitables con condiciones operacionales definidas por el CTE. Los límites de confort se han establecido empleando el RITE, definiendo una temperatura máxima de confort en el interior de las viviendas de 25°C y una temperatura mínima de 21°C.

En la Figura 61 se definen algunos parámetros del sistema de ventilación y de las infiltraciones.

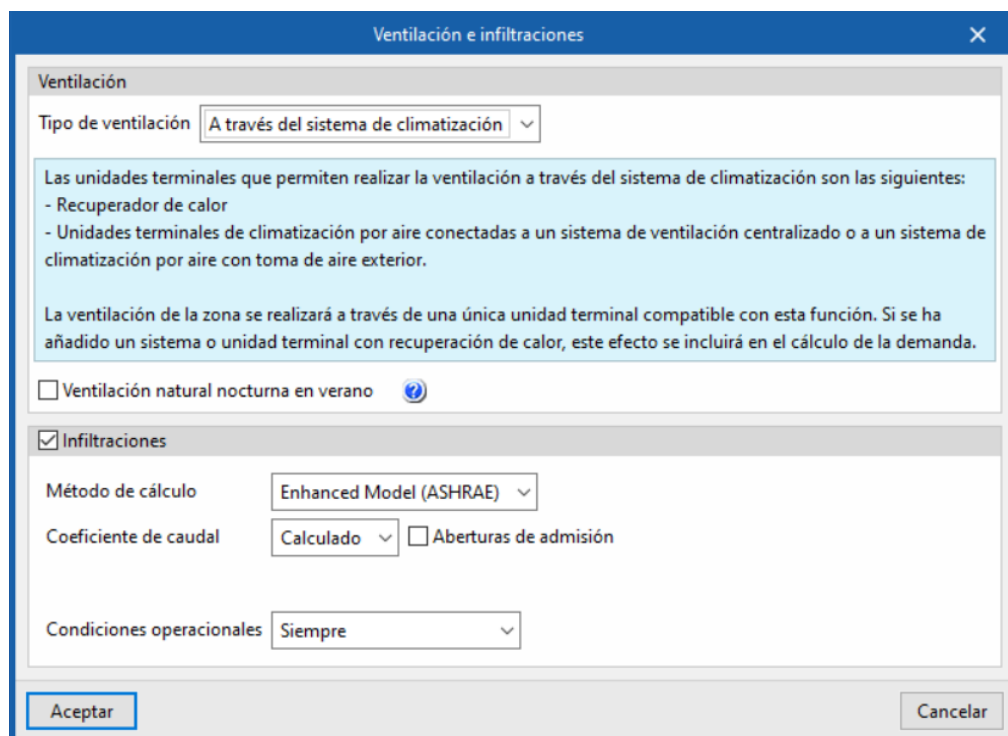


Figura 61. Condiciones ventilación e infiltraciones

Como se puede observar la ventilación se realiza a través del sistema de climatización (explicación ampliada en apartados siguientes), no permitiendo la ventilación natural

nocturna en verano. Esta función se encuentra desactivada ya que los sistemas de ventilación permiten realizar free-cooling cuando las condiciones climáticas sean óptimas, estableciendo condiciones más restrictivas para dicha función. Además de ello, mediante el free-cooling se tiene el control del caudal que se está introduciendo en cada momento, algo imposible si se realiza la ventilación de forma natural.

Para el cálculo de las infiltraciones se ha empleado un dato proporcionado en "" que realiza un estudio en profundidad de las infiltraciones que se tiene en una PassivHaus situada en Zaragoza.

3.5 Sistemas de ventilación

Una vez definidos los anteriores parámetros en CYPETHERM HE únicamente queda por definir el sistema de ventilación en cada una de las alternativas de estudio que se han planteado.

3.5.1 Sistema de ventilación con recuperación centralizada

La primera alternativa es la ventilación mediante un sistema centralizado (Figura 62) de ventilación. El sistema se diseña mediante una UTA con una eficiencia del 81.2% y una potencia específica de $584 \text{ W} / (\frac{\text{m}^3}{\text{s}})$ tal y como se muestra en la figura 55.

Esta unidad permite además realizar bypass de aire exterior cuando las condiciones climáticas sean óptimas. Las condiciones que se han definido son 22°C como temperatura interior máxima, es decir, se podrá realizar bypass cuando la temperatura en el interior de la vivienda sea superior a 22°C. La temperatura exterior mínima de 10°C de modo que si es inferior a esta no se produzca el bypass de aire. La última condición es que la temperatura exterior sea inferior a la temperatura interior de la vivienda.

Sistemas

Referencia 1

Sistema de ventilación centralizado

Recuperador de calor

Intercambiador de calor

Eficiencia sensible 81.20 %

☐ Eficiencia latente

Ventiladores

Potencia específica 584.00 W/(m³/s)

Este equipo contiene dos ventiladores idénticos, uno en la admisión y otro en la extracción. Debe definir únicamente las características de uno de los ventiladores. El equipo impulsa el caudal de aire de ventilación total definido en los recintos de las zonas a las que está conectado. La potencia eléctrica de sus ventiladores se calcula en función de dicho caudal.

Bypass de aire exterior

Temperatura interior máxima 22.0 °C

Temperatura exterior mínima 10.0 °C

Figura 62. Definición UTAs

Se realiza la extracción del aire de cada una de las viviendas de forma individual que se recoge en conductos que conducen el aire hasta el sistema de ventilación centralizado donde se realiza la recuperación de energía. Como elemento de impulsión se introducen terminales de impulsión de aire (Figura 63) en cada una de las viviendas conectadas con el sistema de ventilación centralizado.

Unidad terminal

Nombre Rejilla impulsión

Terminal de impulsión de aire

☐ Sistema de climatización por aire ☒ Sistema de ventilación centralizado

Sistema

Sistema de ventilación centralizado 1

Figura 63. Definición boca impulsión

3.5.2 Sistema de ventilación con recuperación individual

La segunda alternativa se resuelve mediante la instalación de recuperadores individuales en cada una de las viviendas (Figura 64). Estos permiten realizar la ventilación de las viviendas mediante la impulsión de aire exterior y la extracción del aire del interior de la vivienda. La eficiencia de estos recuperadores se ha definido del 84% y la potencia específica de los ventiladores de $945 \text{ W}/(\frac{\text{m}^3}{\text{s}})$ que como se puede

apreciar es superior al del sistema centralizado. Este equipo además como se indica permite realizar bypass de aire exterior cuando las condiciones climáticas sean las adecuadas, coincidentes con las del apartado anterior.

Unidad terminal

Nombre:

Recuperador de calor

Intercambiador de calor

Eficiencia sensible: %

☐ Eficiencia latente

Ventiladores

Potencia específica: W/(m³/s)

Este equipo contiene dos ventiladores idénticos, uno en la admisión y otro en la extracción. Debe definir únicamente las características de uno de los ventiladores.
El equipo impulsa el caudal de aire de ventilación total definido en los recintos de las zonas a las que está conectado. La potencia eléctrica de sus ventiladores se calcula en función de dicho caudal.

Bypass de aire exterior

Temperatura interior máxima: °C

Temperatura exterior mínima: °C

Figura 64. Definición recuperadores individuales

3.5.3 Sistema de ventilación sin recuperación de energía

Para el diseño del sistema de ventilación sin recuperación de energía (Figura 65) se ha seleccionado un sistema de ventilación centralizado con recuperación de energía del 0%, para simular la ventilación de las viviendas simplemente con ventiladores. Por ello, además del 0% de recuperación se ha introducido el consumo específico de ventiladores estándar de $255 \text{ W}/(\frac{\text{m}^3}{\text{s}})$ inferior al consumo específico de los sistemas con recuperación de energía al ser sistemas mucho más sencillos.

Sistemas

Referencia:

Sistema de ventilación centralizado

Recuperador de calor

Intercambiador de calor

Eficiencia sensible: %

☐ Eficiencia latente

Ventiladores

Potencia específica: W/(m³/s)

Este equipo contiene dos ventiladores idénticos, uno en la admisión y otro en la extracción. Debe definir únicamente las características de uno de los ventiladores.
El equipo impulsa el caudal de aire de ventilación total definido en los recintos de las zonas a las que está conectado. La potencia eléctrica de sus ventiladores se calcula en función de dicho caudal.

Figura 65. Sistema ventilación sin recuperación

Anexo II: Método cálculo caudal constante

El cálculo del caudal necesario a suministrar en la vivienda de forma constante para el cumplimiento del CTE DB HS 3 se realiza a través de la tabla 2.1 del documento mencionado (Tabla 30).

Tabla 2.1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables

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

Tabla 30. Locales húmedos y secos

En la tabla se definen los locales de una vivienda que se consideran húmedos y los que se consideran secos. La ventilación se realiza desde los locales secos, donde se sitúan las impulsiones o entradas de aire, hacia los locales húmedos, donde se situarán las extracciones.

1. Locales secos

La vivienda prototipo se ha diseñado con los siguientes locales secos:

- 1 dormitorio principal
- 2 dormitorios individuales
- 1 sala de estar y comedor

Al haber 3 o más dormitorios en la vivienda el dormitorio principal requiere 8 l/s, el resto de dormitorios 4 l/s y la sala de estar 10 l/s. Realizando la suma de todos los locales se obtiene un caudal de 26 l/s.

2. Locales húmedos

La vivienda prototipo se ha diseñado con los siguientes locales húmedos:

- 2 baños
- 1 cocina

Al ser una vivienda de 3 o más dormitorios, cada uno de los locales requiere 8 l/s de caudal de extracción, sumando un total de 24 l/s entre los tres locales.

El mínimo caudal requerido en una vivienda de 3 o más dormitorios es de 33 l/s, superior al calculado local por local, por lo que el caudal mínimo de extracción serán 33 l/s.

3. Caudal final

Conocido el caudal que se requiere de impulsión en locales secos y extracción en locales húmedos se establece un caudal de ventilación de 33 l/s que cumple el caudal de ventilación necesario calculado por los dos criterios. Mediante la conversión del caudal se obtiene un caudal de $118 \text{ m}^3/\text{h}$, que se ha aproximado a $120 \text{ m}^3/\text{h}$.

Anexo III: Comparativa alternativa en distintos puntos de funcionamiento

En el Anexo III se van a mostrar resultados de simulaciones del bloque de viviendas en distintos puntos de funcionamiento para cada una de las alternativas. El objetivo es entender mejor el comportamiento de cada una de las alternativas en distintos puntos en los que puede trabajar a lo largo del año.

1. Caudal mínimo funcionamiento ($4256 \text{ m}^3/\text{h}$)

El caudal mínimo de funcionamiento equivale a un caudal de $38 \text{ m}^3/\text{h}$ por vivienda, caudal mínimo de ventilación cuando no existe ocupación en las viviendas. En el caso de la recuperación individual, es muy posible que trabaje en este modo de funcionamiento, ya que por las mañanas muchas viviendas se quedan sin ocupación. En el caso de la ventilación con recuperación a través de la UTA o la ventilación sin recuperación, las probabilidades son más bajas, ya que esto equivaldría a que no haya ninguna persona en el edificio, sin embargo, se va a realizar el estudio para este caudal para comparar el funcionamiento de la UTA en distintos puntos de trabajo.

La comparativa del consumo eléctrico se representa en la Figura 66.

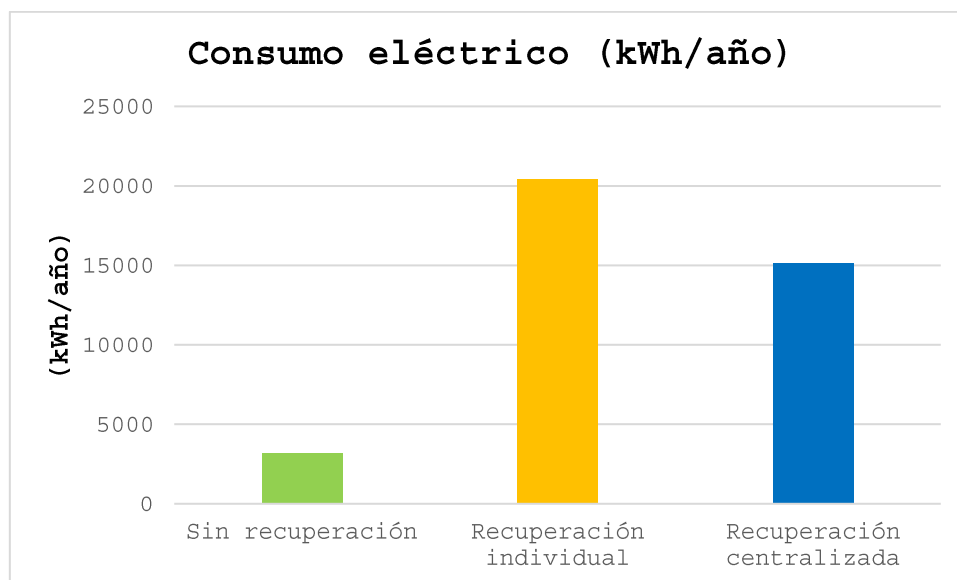


Figura 66. Consumo eléctrico $4256 \text{ m}^3/\text{h}$

Como se puede observar el caso sin recuperación de energía presenta el menor consumo de las tres alternativas, siendo muy inferior al consumo de los casos con recuperación, que se encuentran más parejos.

El sistema sin recuperación presenta un consumo mucho menor en el ventilador ya que al no tener recuperador en el sistema de ventilación la pérdida de carga que tiene que vencer es mucho menor. Al tener la pérdida de carga más baja, se traduce en consumos

menores. Además, como se ha explicado en el trabajo el sistema sin recuperación únicamente requiere de extracción por lo que reduce a prácticamente la mitad su consumo al no contar con ventilador de impulsión.

En cuanto al consumo con recuperación individual y centralizada(Figura 67), los consumos son significativamente mayores. La mayor diferencia entre recuperación individual y centralizada es la capacidad de adaptación que tiene cada una. Los recuperadores individuales debido a la pérdida de carga que vencen a caudales bajos, necesitan usar caudales más altos del requerido para tener mayor presión disponible.

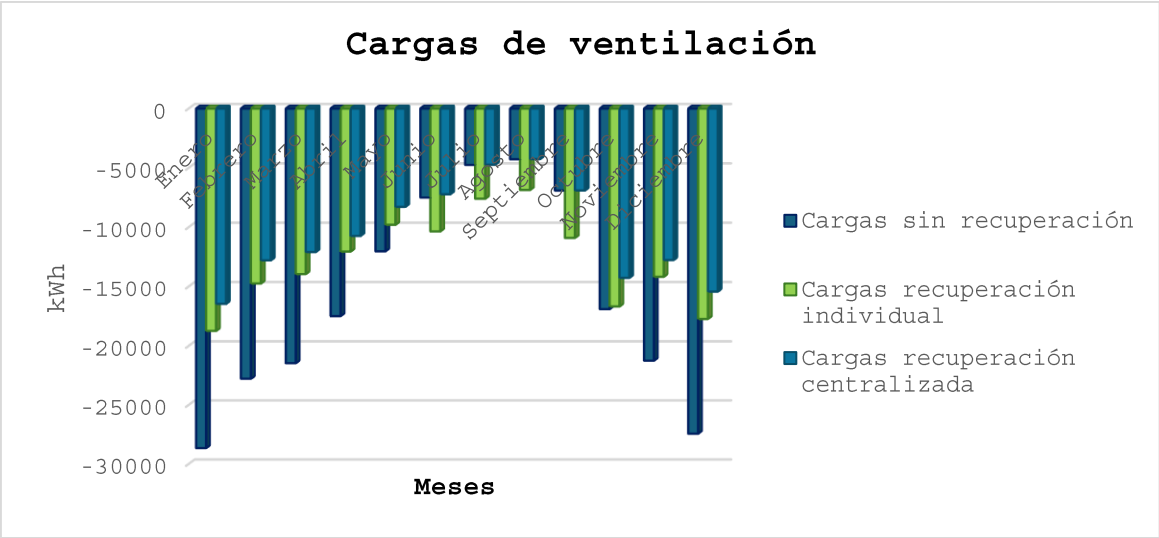


Figura 67.Cargas ventilación 4256 m3/h

2. Caudal con coeficiente de simultaneidad ($8064 \text{ m}^3/\text{h}$)

La UTA suministra a 112 viviendas de forma simultánea por lo que se ha decidido aplicar un coeficiente de simultaneidad de 0.8, teniendo en cuenta que durante muchos tramos del año habrá personas que no se encuentren en la vivienda o las diferencias horarias de las personas a lo largo del día. Por ello, durante muchos tramos va a trabajar a un caudal inferior al promedio y se considera de interés mostrar el comportamiento del sistema para dicho caudal. La comparativa se va a realizar con el caudal estándar de funcionamiento ($10080 \text{ m}^3/\text{h}$). En la Figura 68 se representan estos consumos.

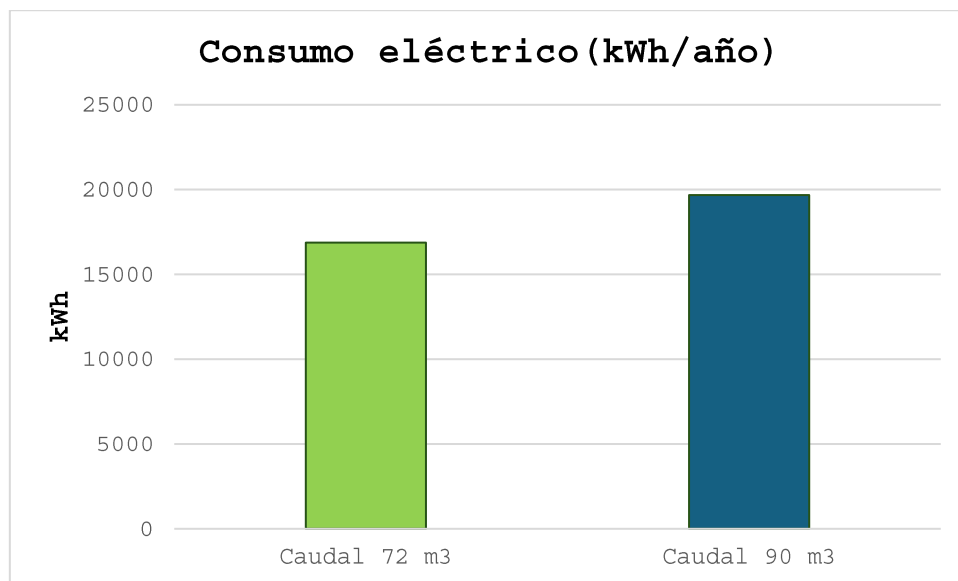


Figura 68. Consumo eléctrico $8064 \text{ m}^3/\text{h}$

El consumo eléctrico cuando la UTA funciona con el coeficiente de simultaneidad es de 16874 kWh/año ($1.83 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$), mientras que en funcionamiento normal es de 19677 kWh/año ($2.13 \text{ kWh}/(\text{m}^2 * \text{año})$).

El consumo eléctrico es un 15% menor cuando la UTA tenga que proporcionar ese caudal respecto al realizado en el estudio. Esta disminución del consumo se debe al menor caudal con el que trabaja ya que el consumo específico de los ventiladores es prácticamente idéntico en ambos casos.

Las cargas de ventilación se representan en la Figura 69.

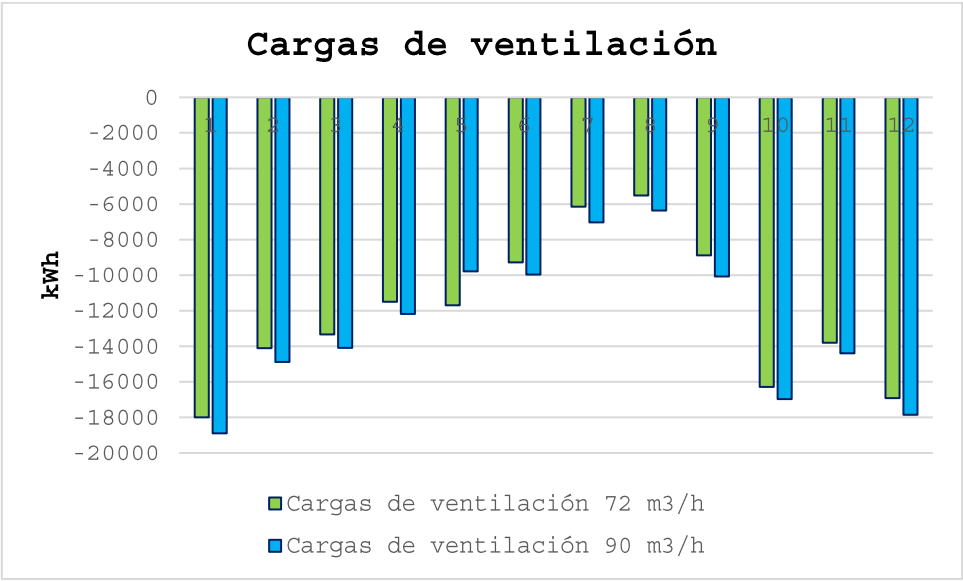


Figura 69. Cargas ventilación 8064 m3/h

Como se puede observar las cargas de ventilación son similares siendo menores durante todo el año por la impulsión de menor caudal, además de tener mayor eficiencia en la recuperación de calor al disminuir la velocidad de paso por el propio recuperador.

Anexo IV: Comparativa energética Zaragoza/Tenerife /Glasgow /Berlín

En este capítulo se va a realizar la comparativa energética de 9 viviendas con recuperación de energía centralizada en la ventilación entre distintas zonas climáticas. Para darle un enfoque más amplio, se va a comparar en cada zona climática la alternativa con recuperación de energía con la alternativa sin recuperación de energía.

1. Datos climáticos

En este apartado se van a exponer los datos climáticos de las zonas en las que se va a realizar el estudio comparativo. Para ello se van a presentar datos anuales de las temperaturas y humedades en cada una de las zonas de estudio.

1.1 Zaragoza

En la Figura 70 se pueden observar los datos climáticos de temperatura empleados para realizar el estudio en Zaragoza. Los datos son los mismos que se han utilizado en el punto 5 del proyecto.

Zaragoza se utiliza como representante de las zonas climáticas cálidas-templadas, según la clasificación que realiza el instituto PassivHaus en las distintas zonas del planeta.

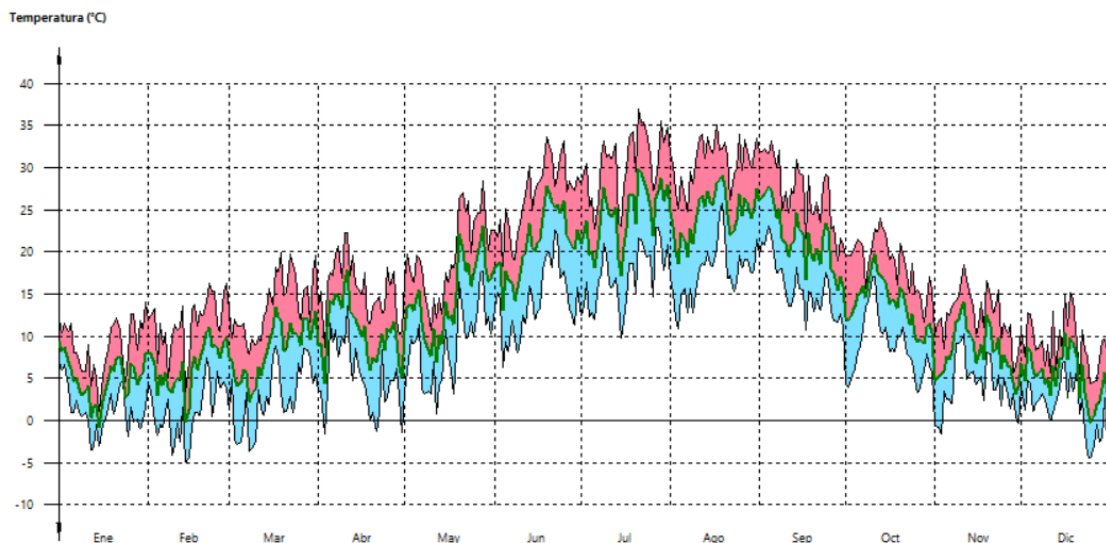


Figura 70. Datos climáticos Zaragoza

En la Figura 71 se representa la humedad relativa en la ciudad de Zaragoza.

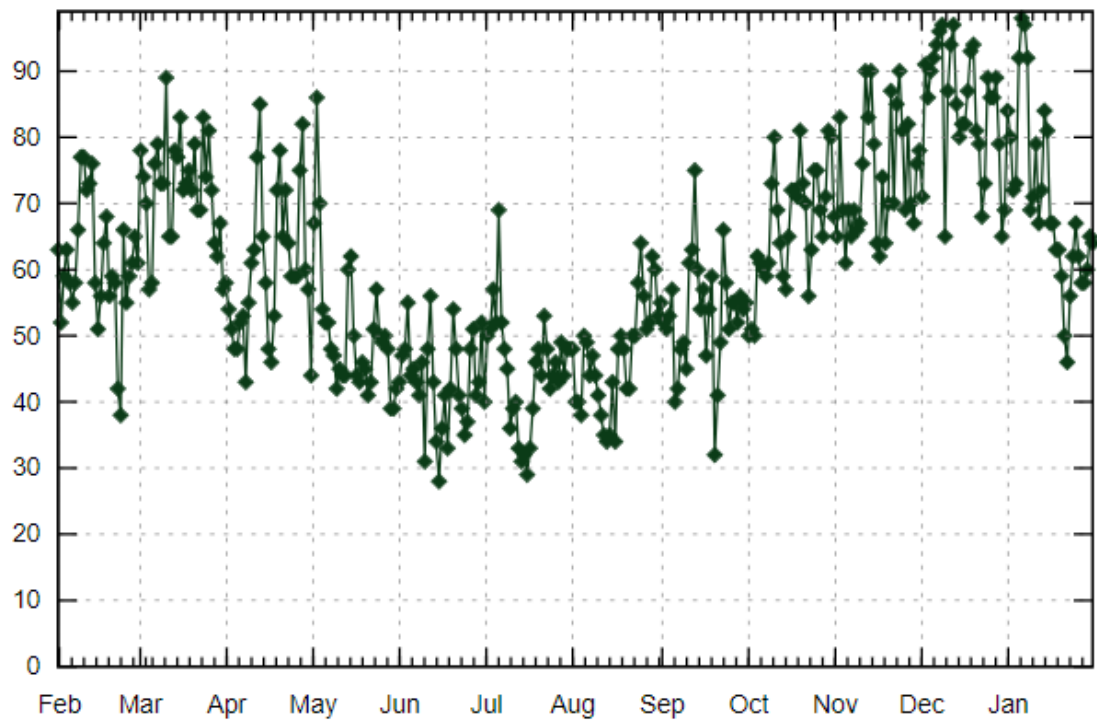


Figura 71. Humedad relativa Zaragoza

1.2 Tenerife

La Figura 72 representa los datos climáticos en la ciudad de Tenerife, perteneciente a una zona climática cálida según la clasificación PassivHaus.

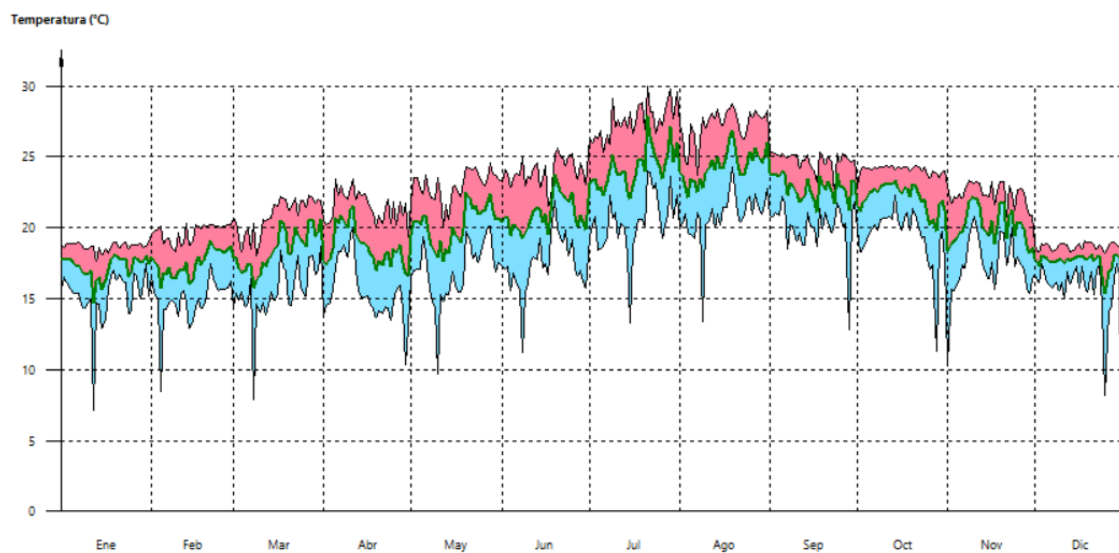


Figura 72. Datos climáticos Tenerife

En la Figura 73 se representa la humedad relativa en la ciudad de Tenerife.

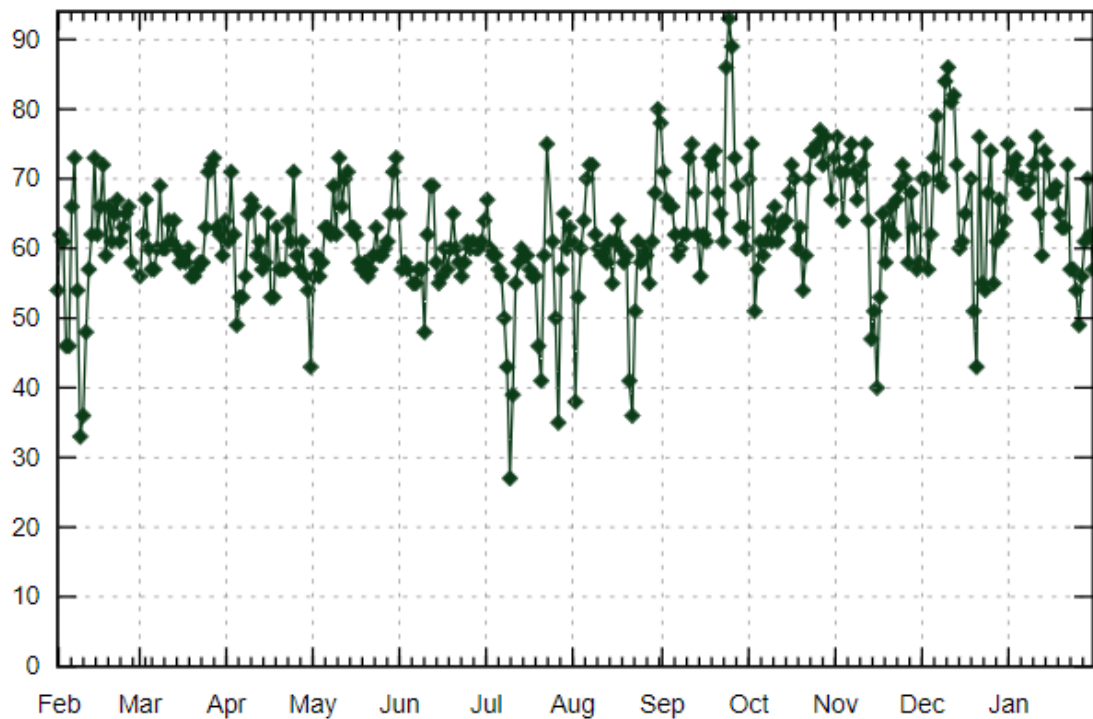


Figura 73. Humedad relativa Tenerife

1.3 Glasgow

La Figura 74 presenta las temperaturas anuales en Glasgow, zona climática fría-templada según la clasificación PassivHaus. Se pueden observar temperaturas inferiores durante todo el año respecto a las temperaturas en Valencia y Zaragoza. El descenso de las temperaturas es especialmente notorio durante la época de verano.

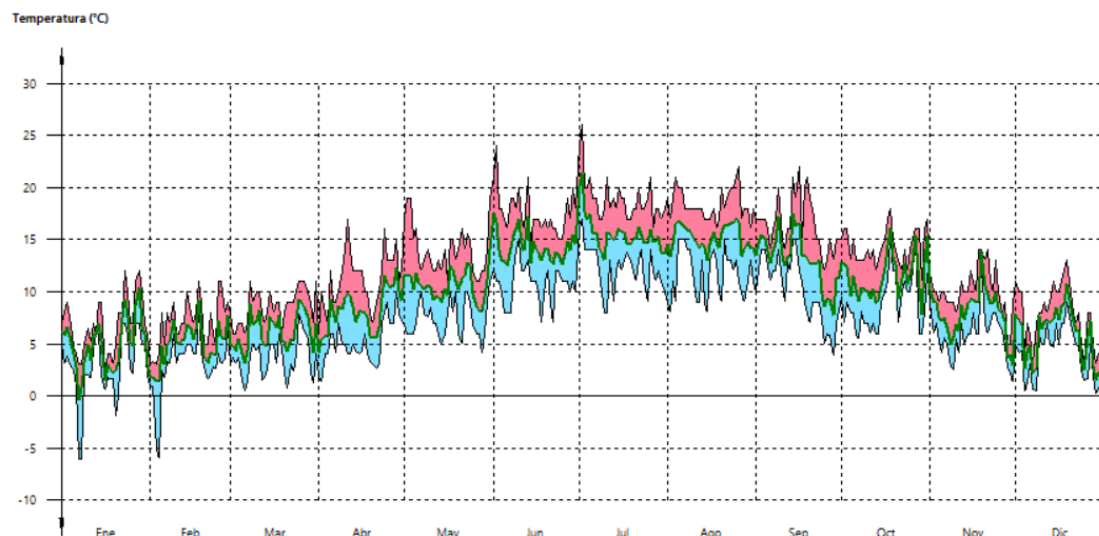


Figura 74. Datos climáticos Glasgow

En la Figura 75 se representa la humedad relativa en la ciudad de Glasgow.

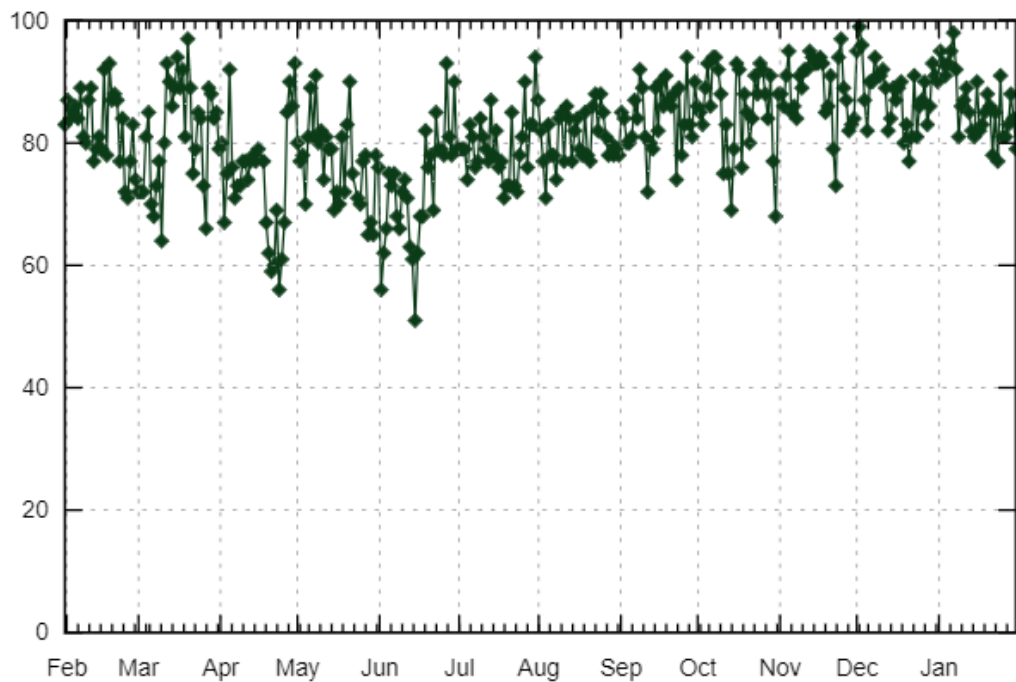


Figura 75. Humedad relativa Glasgow

1.4 Berlín

El último caso se representa en la Figura 76. Se ha escogido la ciudad de Berlín por pertenecer a la zona climática fría-templada, pero con temperaturas próximas a las zonas climáticas frías de más al norte.

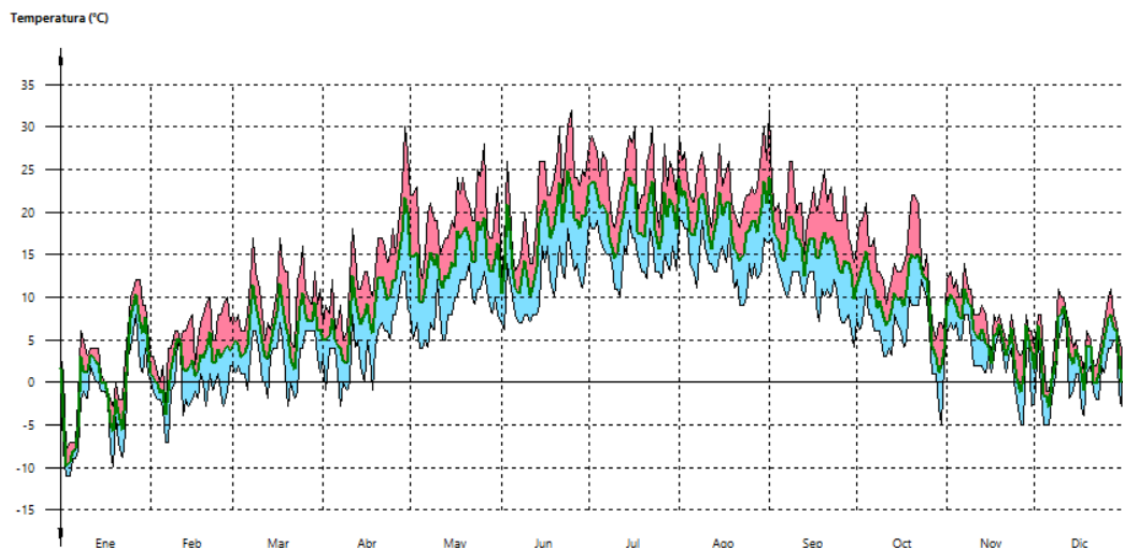


Figura 76. Datos climáticos Berlín

Se pueden observar temperaturas más extremas que en Glasgow, siendo inferiores durante las épocas frías del año y superiores durante las épocas cálidas. Esto se debe al

efecto que tiene la cercanía del mar y océano a Glasgow y alejada que está de zonas marítimas Berlín teniendo un clima mucho más parecido al clima interior.

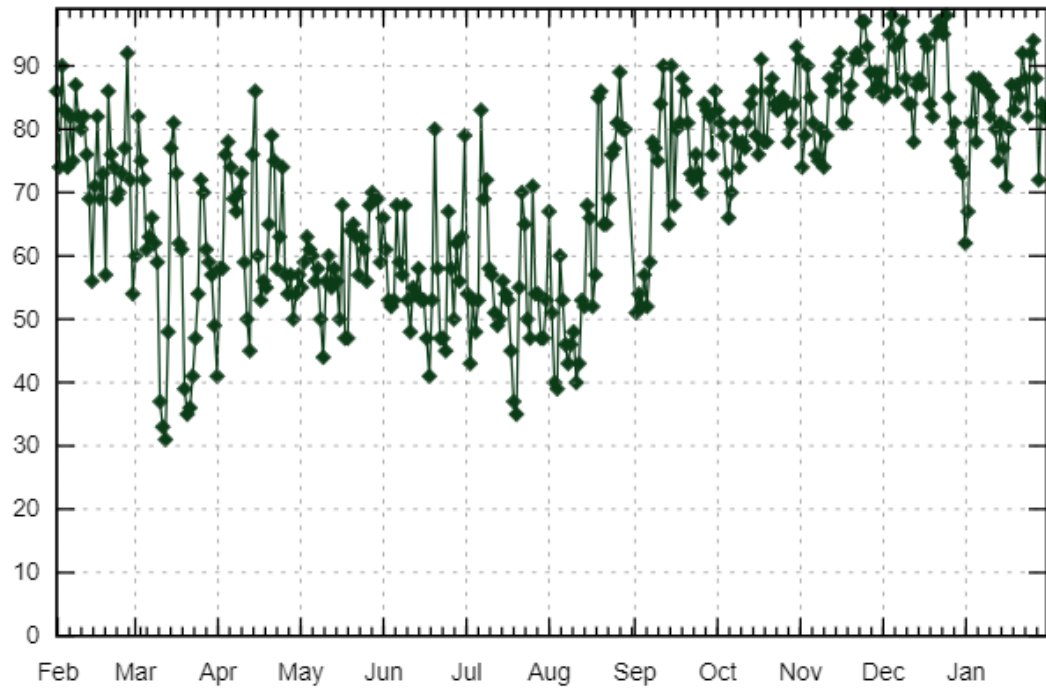


Figura 77. Humedad relativa Berlín

Como se puede observar comparando las figuras 76 y 77 las humedades difieren bastante entre Berlín y Glasgow como cabía esperar debido a su emplazamiento.

2. Comparativa energética

Una vez definidas las condiciones climáticas de las zonas de estudio se proceden a mostrar los resultados de mayor importancia. En la Figura 78 se muestran las cargas de ventilación e infiltraciones y en la Figura 78 la demanda de calefacción de cada una de las zonas.

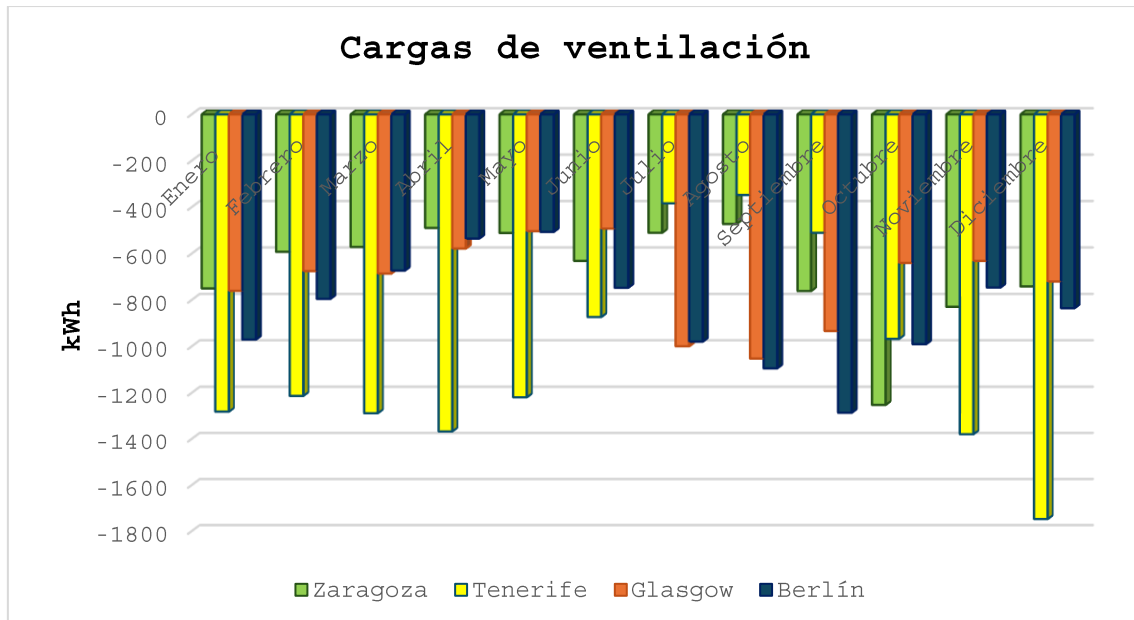


Figura 78. Cargas ventilación comparativa climática

Entre las ciudades de Berlín, Zaragoza y Glasgow, se puede observar que la ciudad con mayores cargas negativas en los meses de invierno es Berlín. Esto es debido a la temperatura inferior durante todo el año respecto al resto de ciudades. Comparando las ciudades de Glasgow y Zaragoza, las cargas de ventilación negativas en los meses de invierno son muy similares, debido a similares perfiles de temperatura.

En verano, se puede observar un incremento de las cargas negativas en Glasgow y Berlín. El motivo del aumento es la posibilidad de hacer free-cooling durante las épocas cálidas del año, ya que hay ciertos momentos de estos meses en los que las temperaturas bajan por debajo de la temperatura de consigna.

El valor de las cargas en Tenerife es explicarán en el apartado siguiente.

Estas diferencias en las cargas de ventilación e infiltraciones se pueden apreciar en la demanda de calefacción de cada una de las zonas, representada en la Figura 79.

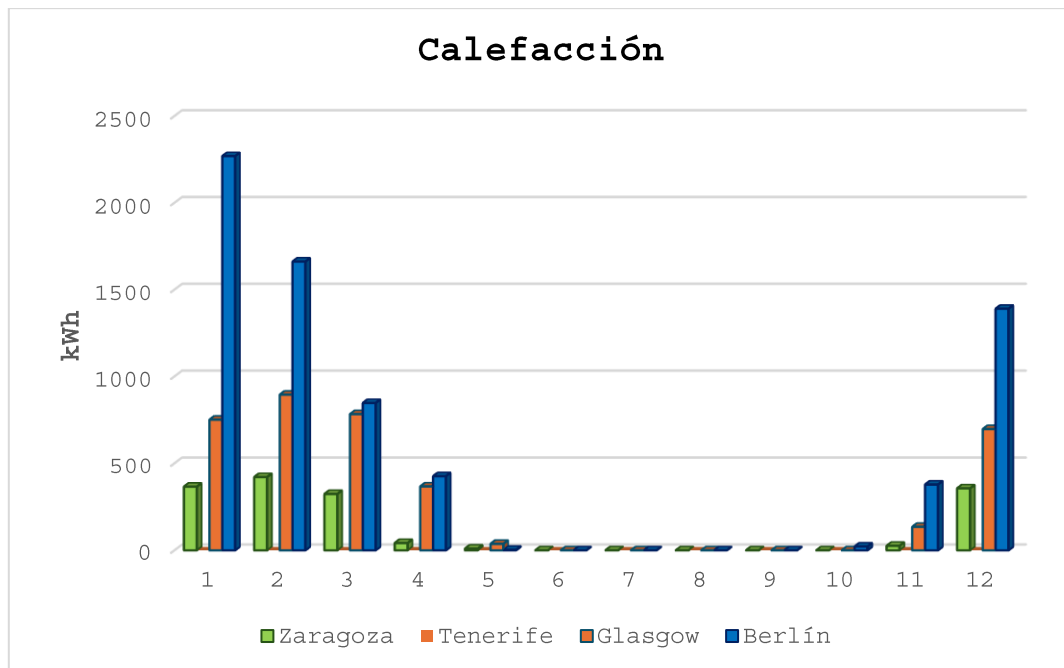


Figura 79. Demandas de calefacción zonas climáticas

Se puede apreciar como Berlín tiene una demanda de calefacción mucho mayor al resto de las zonas. Esto es debido tanto a las superiores cargas térmicas que se introducen a través de la ventilación e infiltraciones, como las que se introducen a través de los elementos constructivos. Glasgow es la segunda con mayor demanda al aumentar las temperaturas respecto a las de Berlín.

Cabe destacar la demanda nula de calefacción en Tenerife durante todo el año. Esto es debido a sus temperaturas mucho más elevadas y por lo tanto no va a requerir de calefacción ningún mes del año.

2.1 Comparativa recuperación-sin recuperación

En este apartado se va a comparar como afecta la recuperación de energía a las distintas zonas climáticas. Se va a excluir Zaragoza del estudio ya que este se ha realizado previamente durante el proyecto.

2.1.1. Berlín

La comparativa entre la ventilación con y sin recuperación de energía se representa en la Figura 80.

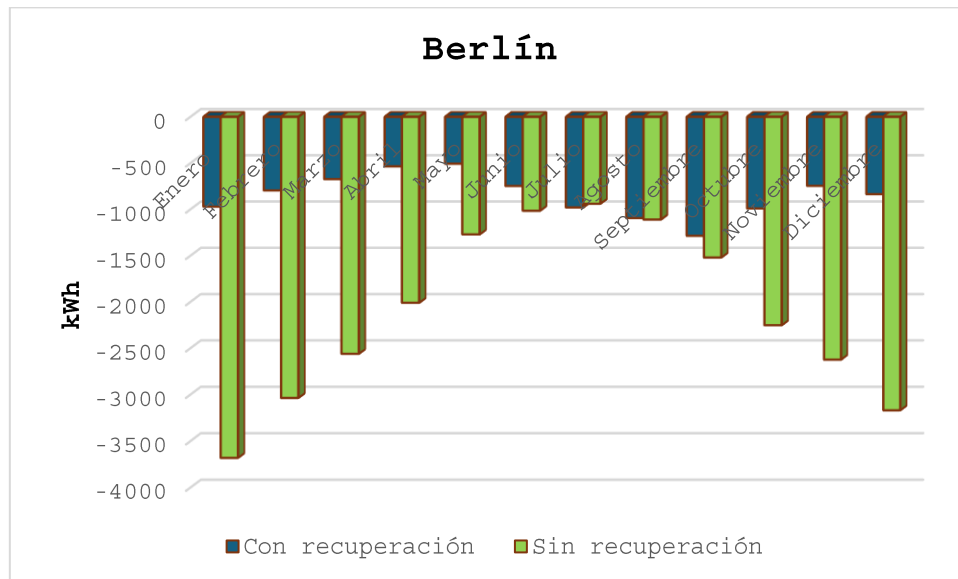


Figura 80. Comparativa con-sin recuperación Berlín

Se puede apreciar una disminución considerable de las cargas de ventilación e infiltraciones. En los meses más fríos la recuperación llega a valores muy próximos al 80%. En los meses más cálidos, la diferencia entre las cargas de ventilación e infiltraciones con y sin recuperación disminuye porcentualmente. Esta diferencia se debe a la posibilidad de realizar free-cooling durante los meses de verano, momento en el que las cargas con y sin recuperación se igualan por la inutilización de la recuperación de energía.

2.1.2. Glasgow

La comparativa entre la ventilación con y sin recuperación de energía en Glasgow se representa en la Figura 81.

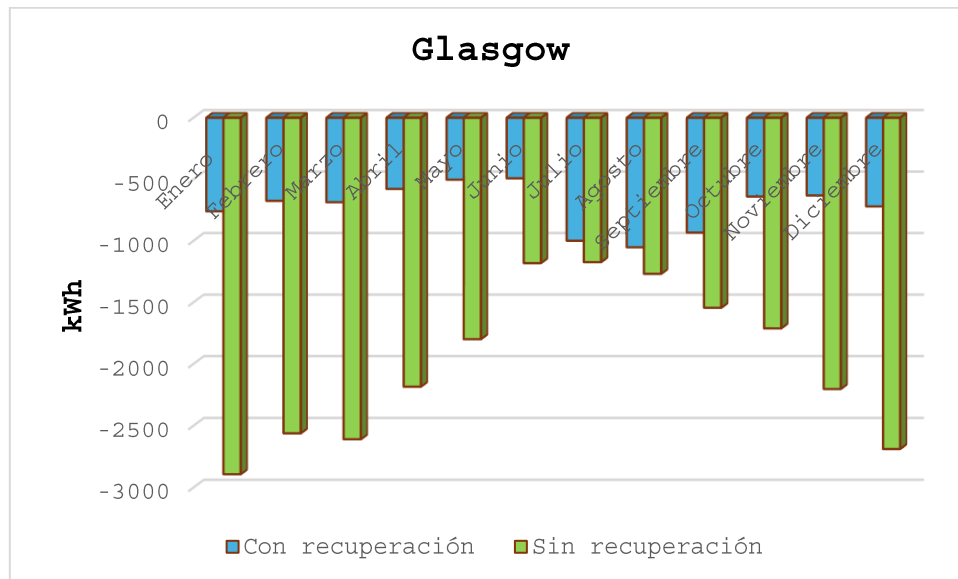


Figura 81.Comparativa con-sin recuperación Glasgow

La comparativa en Glasgow, muestra resultados similares a los obtenidos en Berlín. En este caso al ser valores absolutos inferiores, la recuperación de energía genera menores beneficios absolutos, al recuperar menor cantidad de energía mensualmente.

2.1.3. Tenerife

La comparativa entre la ventilación con y sin recuperación de energía se representa en la Figura 82.

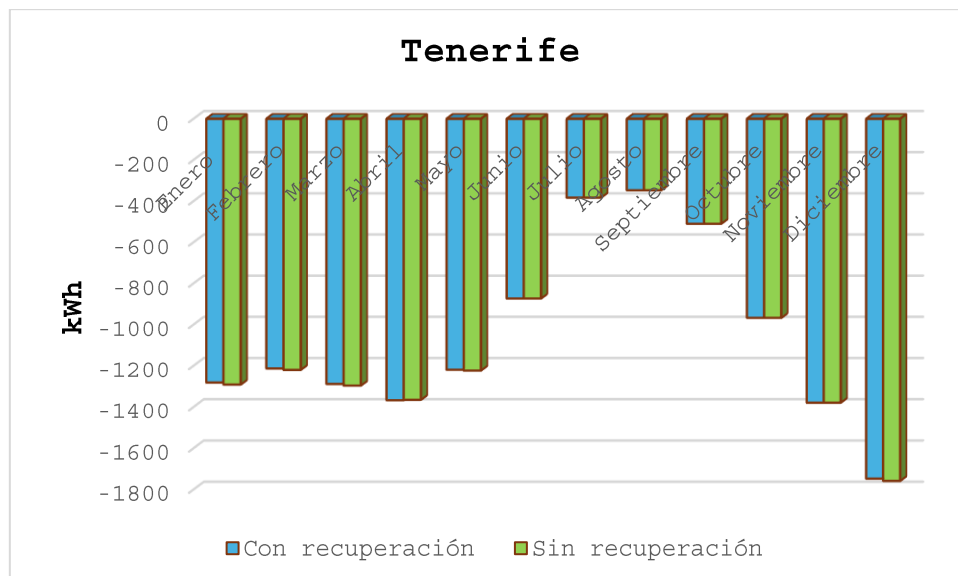


Figura 82.Comparativa con-sin recuperación Tenerife

En Tenerife el caso cambia radicalmente. Las cargas de ventilación introducidas con y sin recuperación de energía son idénticas durante todo el año.

Las elevadas temperaturas durante todo el año provocan que no se emplee la calefacción en ningún momento y se utilice el free-cooling durante todas las épocas del año. En el apartado anterior, por este motivo, las cargas de ventilación negativas que se introducían en el caso de Tenerife eran superiores en las épocas frías del año. En el resto de zonas climáticas, se estaba empleando la recuperación de energía para disminuir el efecto de las cargas negativas en el interior de la vivienda, mientras que en Tenerife en las épocas del año frías se aprovecha la capacidad de hacer free-cooling para introducir aire frío a las viviendas y así disminuir al máximo la demanda energética de refrigeración.

Durante las épocas cálidas del año, en cualquier momento en el que se pueda introducir aire frío del exterior al interior de la vivienda, se va a realizar free-cooling, introduciendo el aire directamente del exterior. Es por ello que, durante todo el año, las cargas introducidas por ventilación son iguales.

2.1.4. Conclusiones zonas climáticas

Se ha podido observar comparando las zonas climáticas, el distinto efecto que tiene la recuperación de energía en la ventilación de las viviendas.

En zonas con climas extremos, ya sea climas con temperaturas muy bajas o muy elevadas, la recuperación va a producir beneficios mucho mayores que en zonas con temperaturas templadas. Esto es debido a que se va a poder aprovechar la recuperación de energía más horas durante el año y además va a recuperar mayor cantidad de energía por unidad de tiempo.

En las zonas climáticas templadas, la temperatura se encuentra próxima o dentro del rango de temperaturas de consigna durante más horas al año que en climas extremos. Cuando la temperatura exterior se encuentre dentro de dicho rango, no será de utilidad el recuperador de energía, perdiendo horas de uso. Además de ello, al ser temperaturas mucho más próximas a las de consigna la potencia de recuperación que tiene decae proporcionalmente.

Es por ello que es de vital importancia el estudio de la zona climática en la que se va a realizar la instalación de ventilación para conocer la utilidad que va a tener la implementación de la recuperación de energía en el sistema de ventilación.