

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

**MÁSTER EN INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EDIFICACIÓN
TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO 2020-2021**

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR DE UN EDIFICIO DE USO EDUCACIONAL

AUTOR:
Jing Chen

TUTORES:
Antonio Rodríguez Sánchez
César Porrás Amores

RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster trata de estudiar el comportamiento de la eficiencia energética y la calidad interior del aire de la biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Edificación. Para llevar a cabo la investigación, se ha realizado una simulación con el programa Design Builder del edificio actual obteniendo información sobre la demanda energética y su estado de la calidad del aire.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se han propuesto estrategias con soluciones que actúan de forma activa y pasiva con el fin de mejorar y optimizar los índices de confort, y además cumpliendo con los requisitos de la ventilación natural exigida debido a la situación de la pandemia global.

Finalmente, se pretende comprobar las mejoras alcanzadas con las soluciones propuestas comparándolo con el modelo inicial.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo sostenible, construcción sostenible, eficiencia energética, calidad del aire, confort térmico.

ABSTRACT

This master's thesis aims to study the behaviour of the energy efficiency and indoor air quality of the library of the Escuela Técnica Superior de Edificación. In order to carry out the research, a simulation of the current building was carried out with the Design Builder programme, obtaining information on energy demand and air quality status.

After the analysis of the results obtained, strategies have been proposed with solutions that act actively and passively in order to improve and optimise the comfort indexes, and also to comply with the natural ventilation requirements demanded due to the global pandemic situation.

Finally, the aim is to verify the improvements achieved with the proposed solutions by comparing it with the initial model.

KEY WORDS

Sustainable development, sustainable construction, energy efficiency, air quality, thermal comfort.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. SOSTENIBILIDAD, DESARROLLO SOSTENIBLE	1
1.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIÓN.....	4
1.3. CALIDAD DEL AIRE INTERIOR(IAQ) EN EDIFICIOS.....	9
1.3.1. Marco normativo	9
1.3.2. Definición del concepto	10
1.3.3. Ventilación natural	11
1.3.4. Ventilación mecánica	12
1.4. CONFORT TÉRMICO	14
1.5. SIMULACIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS.....	16
1.6. ESCENARIO DE PANDEMIA COVID-19.....	17
1.7. CONSIDERACIONES	20
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	22
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	23
3.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	24
4.1. EDIFICIO ESTUDIADO	24
4.2. VALORES METEOROLÓGICOS	28
4.3. MODELO DE SIMULACIÓN.....	43
4.3.1. Diseño del modelo	43
4.3.2. CFD	51
4.3.3. Demanda energética.....	80

4.3.4. Análisis y conclusión	85
4.4. ESTRATEGIAS Y PROPUESTAS DE MEJORA	89
4.4.1. Medidas pasivas	89
4.4.2. Medida activa.....	93
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	94
5.1. CFD INTERIOR.....	94
5.1.1. Planta sótano 2: Sala de lectura	95
5.1.2. Planta sótano 3	99
5.2. DEMANDA ENERGÉTICA	103
5.2.1. Simulación	103
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	108
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	110
CAPÍTULO 8. ANEXOS	115
8.1. CATÁLOGO Y FICHA TÉCNICA DE SGG PLANITHERM 4S	115
8.2. FICHA TÉCNICA DE KÖMMERLING	118
8.3. FICHA TÉCNICA DE SIBERDUO TM.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de sensación térmica	15
Tabla 2. Frecuencias de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de enero)	30
Tabla 3. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de enero)	31
Tabla 4. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de febrero)	32
Tabla 5. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de febrero)	33
Tabla 6. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de marzo).....	34
Tabla 7. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de marzo)	34
Tabla 8. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de abril).....	35
Tabla 9. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de abril)	35
Tabla 10. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de mayo).....	36
Tabla 11. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de mayo).....	36
Tabla 12. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de junio)	37
Tabla 13. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de junio)	37
Tabla 14. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de julio)	38
Tabla 15. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de julio)	38

Tabla 16. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de agosto).....	39
Tabla 17. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de agosto).....	39
Tabla 18. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de septiembre).....	40
Tabla 19. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de septiembre).....	40
Tabla 20. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de noviembre).....	41
Tabla 21. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de noviembre).....	41
Tabla 22. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de diciembre).....	42
Tabla 23. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de diciembre).....	42
Tabla 24. Composición de fachada.....	44
Tabla 25. Valores característicos calculados por Design Builder (fachada).....	46
Tabla 26. Composición de partición interior.....	47
Tabla 27. Valores característicos calculados por Design Builder (partición interior).....	48
Tabla 28. Valores característicos calculados por Design Builder (partición interior de vidrio).....	48
Tabla 29. Composición de la hoja de la ventana.....	50
Tabla 30. Valores característicos calculados por Design Builder (acristalamiento).....	50
Tabla 31. Valores característicos calculados por Design Builder (marco).....	50
Tabla 32. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de febrero).....	53
Tabla 33. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de febrero).....	53
Tabla 34. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de marzo).....	54
Tabla 35. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de marzo).....	54
Tabla 36. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de mayo).....	54

Tabla 37. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de mayo)	54
Tabla 38. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de diciembre)	55
Tabla 39. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de diciembre) .	55
Tabla 40. Temperatura y humedad relativa de los meses de análisis	56
Tabla 41. Edad del aire límite	85
Tabla 42. Cumplimiento de los valores de la edad del aire respecto al límite exigido	85
Tabla 43. PMV promedio	88
Tabla 44. PPD promedio (%)	88
Tabla 45. Cumplimiento de los valores de PMV y PPD respecto al límite exigido.....	88
Tabla 46. Valores característicos calculados por Design Builder (Fachada ventilada)	91
Tabla 47. Valores característicos calculados por Design Builder (Marco KÖMMERLING) .	92
Tabla 48. Valores característicos calculados por Design Builder (partición con placas de yeso laminadas)	93
Tabla 49. Promedio de PMV y PPD del modelo actual	102
Tabla 50. Mejoras obtenidas en PPD	102
Tabla 51. Mejoras obtenidas en PMV	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible	2
Figura 2. Triple Bottom Line	3
Figura 3. Estándares de Passivhaus	6
Figura 4. Passivhaus en el mundo.....	7
Figura 5. PPD en función de PMV	15
Figura 6. Programa Design Builder.....	16
Figura 7. Número de renovación de aire por hora (ACH).....	18
Figura 8. Límites nivel CO ₂	18
Figura 9. Localización de la Escuela Técnica superior de Edificación (ETSEM)	25
Figura 10. Localización de la biblioteca en la ETSEM	26
Figura 11. Fachada oeste de la biblioteca	26
Figura 12. Sección vertical del edificio.....	27
Figura 13. Sala de lectura	27
Figura 14. Despachos	28
Figura 15. Rosa de los vientos de 16 rumbos.....	29
Figura 16. Rosa de vientos (mes de enero).....	31
Figura 17. Rosa de vientos (mes de febrero).....	33
Figura 18. Rosa de vientos (mes de marzo)	34
Figura 19. Rosa de vientos (mes de abril)	35
Figura 20. Rosa de vientos (mes de mayo)	36
Figura 21. Rosa de vientos (mes de junio)	37
Figura 22. Rosa de vientos (mes de julio).....	38
Figura 23. Rosa de vientos (mes de agosto)	39
Figura 24. Rosa de vientos (mes de septiembre)	40
Figura 25. Rosa de vientos (mes de noviembre)	41
Figura 26. Rosa de vientos (mes de diciembre).....	42
Figura 27. Datos del sitio en Design Builder	43
Figura 28. Geometría del edificio.....	44
Figura 29. Configuración de la composición del muro exterior.....	45

Figura 30. Composición de fachada	45
Figura 31. Tabla a-Anejo E. Transmitancia térmica del elemento	46
Figura 32. Particiones interiores en la planta sótano 2	47
Figura 33. Composición de partición interior	48
Figura 34. Localización de las ventanas en la planta sótano 2	49
Figura 35. Localización de las ventanas en la planta sótano 3	49
Figura 36. Configuración CFD exterior	51
Figura 37. Corte vertical por la ventana V1 (mes de mayo)	52
Figura 38. Los puntos del corte introducidos en Autocad	52
Figura 39. Obtención de velocidades en puntos geométricos de interés	53
Figura 40. Condiciones de contorno CFD	57
Figura 41. Opciones de cálculo de velocidad de aire	57
Figura 42. Distribución de la planta sótano 2	58
Figura 43. Modelo 3D de la sala de lectura	59
Figura 44. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de febrero)	60
Figura 45. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de marzo)	60
Figura 46. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de mayo)	60
Figura 47. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de diciembre)	60
Figura 48. Edad del aire (s) de la sala de lectura (mes de febrero)	61
Figura 49. Edad del aire (s) de la sala de lectura (mes de marzo)	61
Figura 50. Edad del aire (s) de la sala de lectura (mes de mayo)	61
Figura 51. Edad del aire (s) de la sala de lectura (mes de diciembre)	61
Figura 52. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de febrero)	62
Figura 53. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de marzo)	62
Figura 54. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de mayo)	62
Figura 55. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de diciembre)	62
Figura 56. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de febrero)	63
Figura 57. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de marzo)	63
Figura 58. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de mayo)	63
Figura 59. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de diciembre)	63
Figura 60. Planta sótano 3 representada en Design Builder	64

Figura 61. Modelo 3D de la planta sótano 3	64
Figura 62. Modelo 3D del despacho 1	65
Figura 63. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de febrero)	66
Figura 64. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de marzo)	66
Figura 65. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de mayo)	66
Figura 66. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de diciembre)	66
Figura 67. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de febrero)	67
Figura 68. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de marzo)	67
Figura 69. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de mayo).....	67
Figura 70. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de diciembre)	67
Figura 71. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de febrero).....	68
Figura 72. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de marzo)	68
Figura 73. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de mayo)	68
Figura 74. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de diciembre)	68
Figura 75. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de febrero)	69
Figura 76. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de marzo)	69
Figura 77. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de mayo).....	69
Figura 78. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de diciembre)	69
Figura 79. Modelo 3D del despacho 2	70
Figura 80. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de febrero).....	71
Figura 81. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de marzo)	71
Figura 82. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de mayo)	71
Figura 83. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de diciembre).....	71
Figura 84. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de febrero)	72
Figura 85. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de marzo)	72
Figura 86. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de mayo).....	72
Figura 87. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de diciembre)	72
Figura 88. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de febrero).....	73
Figura 89. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de marzo)	73
Figura 90. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de mayo)	73
Figura 91. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de diciembre)	73

Figura 92. Confort CFD: PPD del despacho 2 (mes de febrero)	74
Figura 93. Confort CFD: PPD del despacho 2 (mes de marzo)	74
Figura 94. Confort CFD: PPD del despacho 2 (mes de mayo).....	74
Figura 95. Confort CFD: PPD del despacho 2 (mes de diciembre)	74
Figura 96. Modelo 3D del despacho 3	75
Figura 97. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de febrero)	76
Figura 98. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de marzo)	76
Figura 99. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de mayo)	76
Figura 100. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de diciembre)	76
Figura 101. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de febrero)	77
Figura 102. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de marzo).....	77
Figura 103. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de mayo).....	77
Figura 104. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de diciembre)	77
Figura 105. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de febrero).....	78
Figura 106. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de marzo)	78
Figura 107. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de mayo)	78
Figura 108. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de diciembre).....	78
Figura 109. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de febrero)	79
Figura 110. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de marzo)	79
Figura 111. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de mayo).....	79
Figura 112. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de diciembre)	79
Figura 113. Resultado de simulación HVAC: confort	80
Figura 114. Resultado de simulación HVAC: ganancias internas	81
Figura 115. Resultado de simulación HVAC: consumos desglosados	82
Figura 116. Resultado de simulación HVAC: consumo total	83
Figura 117. Resultado de simulación HVAC: emisiones de CO ₂	84
Figura 118. Edad del aire de la planta sótano 3 (Mes de diciembre)	85
Figura 119. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de marzo)	86
Figura 120. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de mayo)	87
Figura 121. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de julio).....	87
Figura 122. Configuración de la composición de la fachada ventilada	90

Figura 123. Composición de la fachada ventilada	91
Figura 124. Composición de partición interior (con placas de yeso laminadas)	92
Figura 125. Recuperador de calor	93
Figura 126. Ventilación mecánica controlada Doble Flujo (SIBERDUO TM).....	94
Figura 127. Velocidad del aire (m/s) con las soluciones propuestas.....	95
Figura 128. Edad del aire (s) con las soluciones propuestas	96
Figura 129. Índice PMV con las soluciones propuestas.....	97
Figura 130. Índice PPD con las soluciones propuestas	98
Figura 131. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1	99
Figura 132. Edad del aire (s) del despacho 1	99
Figura 133. Confort CFD: PMV del despacho 1	99
Figura 134. Confort CFD: PPD del despacho 1	99
Figura 135. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2	100
Figura 136. Edad del aire (s) del despacho 2	100
Figura 137. Confort CFD: PMV del despacho 2.....	100
Figura 138. Confort CFD: PPD del despacho 2	100
Figura 139. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3	101
Figura 140. Edad del aire (s) del despacho 3	101
Figura 141. Confort CFD: PMV del despacho 3.....	101
Figura 142. Confort CFD: PPD del despacho 3	101
Figura 143. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): consumos desglosados	104
Figura 144. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): consumos totales	105
Figura 145. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): emisiones de CO ₂	106
Figura 146. Comparación de los resultados energéticos de los dos modelos.....	107

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. SOSTENIBILIDAD, DESARROLLO SOSTENIBLE

Hoy en día, el desarrollo sostenible es un concepto muy conocido como estrategia a las consecuencias del cambio climático. Sin embargo, no es nada nuevo ni innovador, ya que, en el año 1948, Aldo Leopoldo introdujo una nueva perspectiva de la ética ambiental: una Ética de la Tierra. En ese trabajo el autor consideraba que la clave de la evolución de la ética está en la expansión de la ética, incluyendo a los seres no humanos de la naturaleza, y lo que en conjunto se conoce como “la tierra”. Donde el ser humano ya no es el centro del mundo, sino un miembro más de la comunidad [1]. Décadas más tarde, en 1962, Rachel Carson [2] manifestó los efectos perjudiciales del uso de pesticidas en el medio ambiente y su crecimiento provocado por la industria química. La publicación de su libro movilizó al movimiento ecologista contra los pesticidas, y también fue la base sobre la que se creó la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Pero no fue hasta 1972, cuando los ecologistas [3] mostraron preocupación por el gran incremento de la población, la industrialización, la sobreexplotación de recursos y la contaminación, por ser conscientes de la capacidad límite del planeta para sostener las actividades humanas. Y, en el mismo año, se creó el Programa de Las Naciones Unidas para el Medio Ambiente con el fin de desarrollar y promover los esfuerzos para el cuidado del ecosistema y luchar contra los desastres medioambientales [4].

Los autores nombrados anteriormente fueron considerados como precursores de la sostenibilidad, pero en el Informe Brundtland [5] apareció por primera vez el término desarrollo sostenible, y se define como aquel que *“satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”*.

Más adelante, en 1992, se aprobó el Programa 21 [6] conocido también como Agenda 21 en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), celebrado en Río de Janeiro. Se trata de un plan de acción estratégico que debe ser llevado a cabo a nivel global para lograr un desarrollo más sostenible en el siglo XXI, y alcanzar el bienestar de la comunidad.

El Protocolo de Kyoto [7] fue desarrollado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1997, que implicaba a que los países desarrollados e industrializados redujesen un 5% de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, con el fin de combatir el calentamiento global provocado por estos gases. Sin embargo, no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. Y a partir de entonces los miembros de la CMNUCC se reunieron para hacer seguimientos de los objetivos establecidos. Años después, el 8 de diciembre de 2012, se aprobó la Enmienda de Doha [8] para el periodo de 2013 y 2020, en la que se incluyen unas nuevas responsabilidades, actualizaciones de algunos artículos, y una disminución de un mínimo de 18% de emisiones de GEI respecto a los niveles de 1990.



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible

En el año 2000, se establecieron los 8 Objetivos del Milenio, que comprendían el desarrollo humano como meta para el año 2015. Esta edición se enfocó principalmente en temas sociales, y entre ellos, cabe destacar los objetivos 7 y 8, centrados en garantizar la sostenibilidad del medio ambiente y en fomentar una asociación mundial para el desarrollo. Luego, este listado de objetivos fue extendido, y actualmente se le conoce como los 17

Objetivos de Desarrollo Sostenible [9] aprobados por las Naciones Unidas. En él se han introducido nuevas prioridades como el cambio climático o el consumo sostenible, además de otras metas que deben cumplirse durante el periodo 2015-2030.



Figura 2. Triple Bottom Line

Un resultado sostenible no se consigue con la aproximación de un aspecto parcial, sino se trata de una suma total y global de todos los sectores. Como lo indica la Triple Cuenta de Resultados [10], hay que considerar los tres factores: social, económico y medioambiental es que están entrelazados entre ellos, así consiguiendo un equilibrio en el desarrollo, una mejor calidad de vida a un largo plazo.

Todos los habitantes de la Tierra tienen una responsabilidad de contribuir en el desarrollo sostenible, ya que es un objetivo global. El sector de la construcción es uno de los principales consumidores energéticos, está un 50% de energía destinado a la edificación, por lo que se debe contribuir al desarrollo sostenible con una arquitectura más sostenible que tiene en cuenta la eficiencia energética, reducción de las emisiones de CO₂, ahorro en el gasto de energía, uso de la energía renovable, calidad ambiental interior, etc. [11].

1.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIÓN

El aumento del consumo energético en viviendas está actuando como un componente importante en el valor total del gasto energético. Por este motivo, se considera la construcción como un elemento clave para luchar contra el cambio climático.

Hoy en día, la eficiencia energética es un aspecto que tiene mucha importancia en el sector de la construcción, cuyo fin es aportar confort y calidad de vida a los ocupantes, y al mismo tiempo contar con una baja demanda energética. Para lograr esto, tienen que aplicar estrategias de soluciones pasivas y activas.

Una edificación energéticamente eficiente es aquellas que minimiza el gasto de las energías, es decir, aquellos edificios de baja demanda energética. Este tipo de construcción más conocido es el que de por sí tiene un consumo casi nulo, también es conocido como edificaciones Passivhaus. El estándar Passivhaus es de origen alemán y trata de crear un ambiente de confort térmico para el usuario con una baja demanda energética. Este consiste en edificar teniendo en cuenta cinco principios básicos: el diseño de envolvente con un alto nivel de aislamiento térmico; el control de puentes térmicos; la aplicación de carpinterías de altas prestaciones; la alta hermeticidad y estanquidad; y una ventilación controlada con sistema de recuperación de calor [12].

- Un alto nivel de aislamiento térmico de la envolvente: según los estudios realizados, se ha detectado que la pérdida de calor por la envolvente térmica es un factor muy considerable para el tema de la eficiencia energética. Pues, además de realizarse el cerramiento siguiendo un buen criterio, también es necesario aumentar su resistencia térmica aplicando un tipo de aislante adecuado. De esta manera se reduce la transmitancia térmica por las capas de la envolvente del edificio [13]. También, un estudio del impacto generado de la fachada en el rendimiento energético, mediante la realización de simulación con un programa software y análisis de datos reales, demuestra que un menor tamaño de los huecos y un valor de baja transmitancia térmica son factores determinantes para conseguir una mejor eficiencia energética [14].
- Control de puentes térmicos: existen distintos tipos de puentes térmicos. Pueden ser lineales y puntuales, y normalmente los primeros son más influyentes que los

segundos, por lo que hay que tener especial cuidado con ellos. Además, es necesario considerar aquellos puentes térmicos generados por la presencia de huecos en la envolvente, y aplicar una solución que evite una transmitancia de calor por esos puntos críticos [15].

- Alta estanqueidad al paso del aire: las infiltraciones del aire generan pocos impactos en los edificios situados en la zona climática cálida, sin embargo, para aquellas construcciones localizadas en un área que requiere mucho del uso de la calefacción, esas infiltraciones pueden ser consideradas como puntos de fuga de calor e incrementarse el consumo de energía [16].
- Uso de ventanas de alta prestación: los huecos en la envolvente de un edificio son las zonas más débiles, y son localizaciones donde se produce la mayor pérdida de calor, por este motivo es necesario aplicar ventanas con acristalamiento y marco de baja transmitancia térmica para tener una mejor eficiencia energética en el edificio. Para mejorar este aspecto, ha habido muchas investigaciones e innovaciones, como ventanas con acristalamiento dinámico, ventanas fotovoltaicas, ventanas termotrópicas, etc. [17], [18].
- Ventilación de confort con sistema recuperador de calor: trata de ser un sistema de ventilación que permite una circulación del aire sin tener que abrir las ventanas. De esta manera se evita una pérdida del calor por las ventilaciones naturales. Es un método que mejora el confort térmico y la calidad interior del aire con un mayor nivel de eficiencia energética [19], [20].

Las estrategias pasivas citadas anteriormente son los resultados de la línea de investigación que han logrado los diferentes autores hasta el momento.

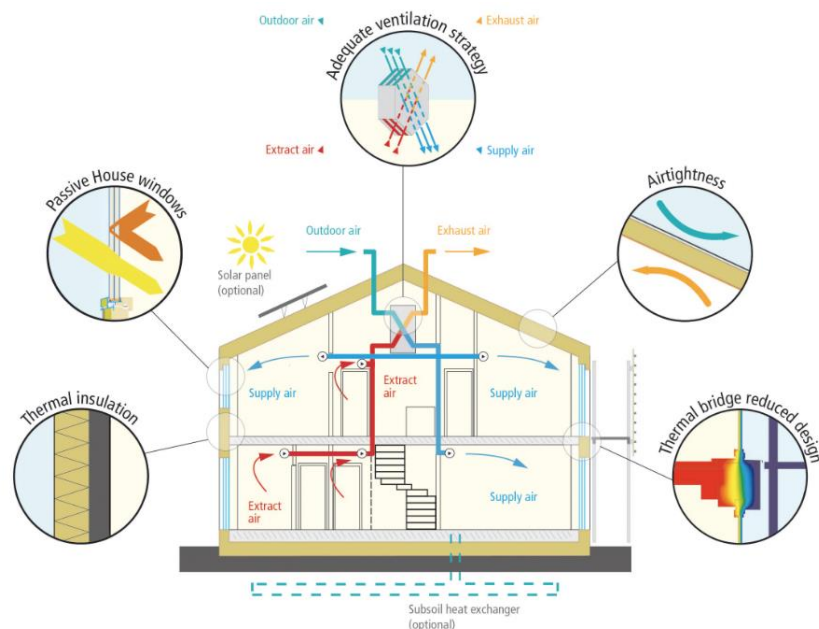


Figura 3. Estándares de Passivhaus

Durante la última década, la demanda energética en los edificios ha aumentado debido al cambio climático, al crecimiento de la población, al tiempo invertido en las actividades en su interior, y al aumento de peticiones para cubrir las necesidades de sus usuarios [21], [22]. Debido a estas razones, han surgido las construcciones de consumo casi nulo, combinando los técnicos activos con los pasivos. De esta manera se puede alcanzar el resultado deseado, y al mismo tiempo se dispone de un mayor nivel de confort en el interior de la vivienda [23].

Según los datos mostrados en la Passive House Database, Alemania es el país líder en cuanto a cantidades de proyectos realizados con el estándar Passivhaus, y a continuación le siguen otros países europeos como Austria, Francia, Reino Unido, España, etc. También Estados Unidos y Canadá son naciones que están construyendo muchas viviendas con criterios pasivos, y estados como China, Japón, Australia, Nueva Zelanda y algunos países de Europa oriental son los que están invirtiendo en edificios con esta técnica de construcción y con una tendencia creciente.

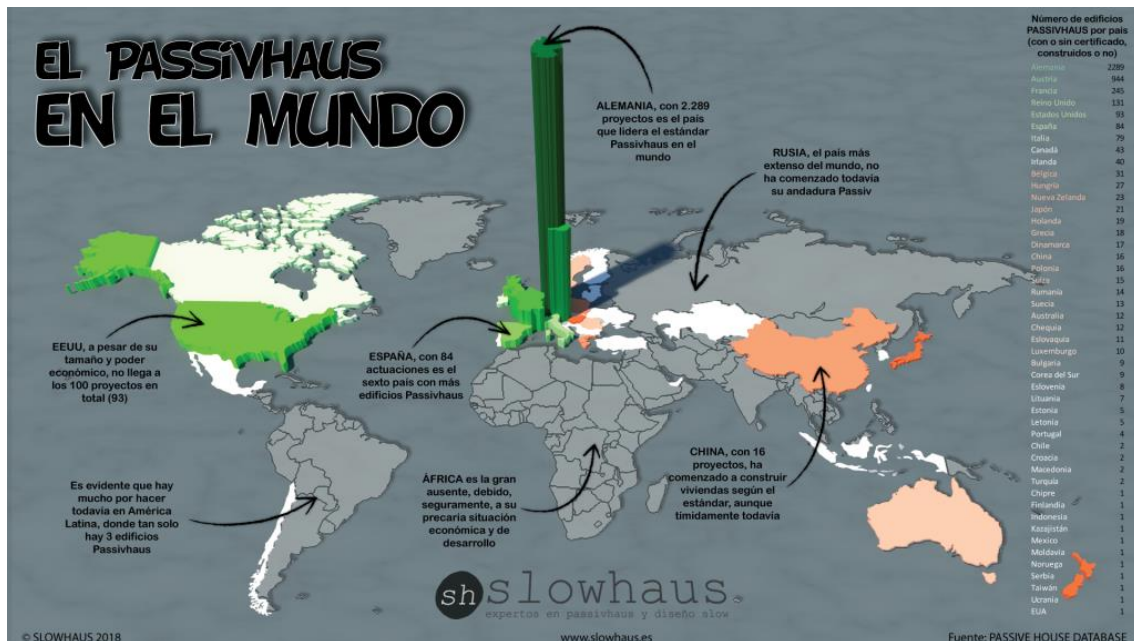


Figura 4. Passivhaus en el mundo

La construcción del edificio de consumo casi nulo es la tendencia actual en este momento. Hay un artículo publicado por V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos y L. Tupliano sobre los procesos de auditoría energética y análisis de costes, como pasos previos para la transformación de un instituto educacional italiano en un edificio de nZEB [24]. La metodología aplicada parte de un modelo con los datos reales de comportamiento, clima y gasto energético del edificio, y posteriormente, se aplica una medida de optimización para minimizar costes del consumo de energía.

Una investigación de confort térmico de un edificio escolar realizada en 2018 [25] expone que el consumo energético en los edificios educativos en Francia representa el 19,5% de los edificios no residenciales, con una media de 142 kWh/m, ubicado en Troyes, Francia. Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de alcanzar un ahorro energético y mejorar la calidad del aire interior mediante la aplicación de un sistema de gestión de edificios, teniendo en cuenta la demanda de energía y el consumo de los equipos auxiliares. Además, se realizó una evaluación y análisis de los niveles de CO₂.

Otro trabajo realizado en ese mismo año fue publicado por Yazed Ghadi y Ali M. Baniyounes sobre una auditoría y análisis energético de edificios del campus de la Universidad Central de Queensland, Australia [26]. El objetivo de esta publicación fue

determinar el patrón de consumo energético de los edificios estudiados enfocándose en factores como la temperatura del aire interior, el nivel de la humedad, el gasto energético vinculado al funcionamiento del sistema de la calefacción y refrigeración. En la metodología aplicada para llevar a cabo su meta se han tenido que considerar los gastos eléctricos facturados, registrar las horas de consumos de las iluminarias, tiempo transcurrido del funcionamiento del sistema HVAC, el diseño y sistema constructivo de los edificios y los materiales empleados. En el resultado de la evaluación, los autores afirman que el principal consumo de energía está distribuido en HVAC e iluminación, y que además guarda una relación estrecha con los días y las estaciones del año.

Una investigación a nivel internacional [27] menciona que la auditoría energética es el primer paso que se da para conseguir un alto nivel de eficiencia energética al ofrecer apoyo en el proceso de planificación de edificios renovados o nuevos. Este proceso de evaluación puede variar con respecto a su alcance y recursos, pero suele abarcar varios aspectos: la recopilación y revisión de datos, el estudio y monitoreo del sistema, la observación y revisión de las prácticas operativas, y los datos del análisis. Los autores de este artículo realizaron una evaluación de las herramientas de auditoría energética y las de simulación en un caso práctico, en el que estudiaron las demandas de energía de la calefacción y refrigeración de distintos tipos de edificios, nivel de energía y climática. Como conclusión, se dieron cuenta de que existe poca desviación entre los resultados obtenidos, por lo que se requiere calibrar las herramientas para obtener simulaciones con mayor nivel de confianza. De este modo se pueden plantear los sistemas constructivos de calefacción y refrigeración en fase de diseño para optimizar el consumo energético.

Y, finalmente, una auditoría energética de edificios en Melbourne [28] demuestra que no solo es importante conocer el consumo de energía en el edificio, sino también es necesario saber el gasto energético debido al tipo de tenencia de la construcción, características constructivas, orientación, distribución, y altura del edificio. Por lo que, una vez se detecta el impacto que genera el sistema constructivo existente, se deben solucionar los problemas combinando un diseño arquitectónico junto con el comportamiento socioeconómico de los usuarios del edificio, ya que son los principales determinantes del consumo energético.

1.3. CALIDAD DEL AIRE INTERIOR(IAQ) EN EDIFICIOS

1.3.1. Marco normativo

La calidad del aire en edificios siempre ha sido considerada como un factor importante para la salud humana, el confort y el rendimiento de actividad. A lo largo de la historia, se han elaborado una serie de normativas e indicaciones con el fin de garantizar un ambiente saludable para los ocupantes de los edificios. En el siglo XX, salió a la luz la primera versión de la Norma 62 de ASHRAE, donde se definen condiciones y requisitos que garantizan una ventilación adecuada para una calidad de aire en edificios. Con el paso del tiempo se han establecido más pautas para la evaluación y el control de la calidad del aire interior en los distintos países del mundo [29].

A nivel nacional están unas colecciones de Notas Técnicas de Prevención (NTP) del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSST), se tratan de unas guías de buenas prácticas, y no son de uso obligatorio, entre ellos están NTP 243, NTP 343, NTP 431, NTP 549, NTP 607, NTP 779, NTP 1064 y NTP 1065.

El Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de Edificación (CTE DB HS) [30] establece unas exigencias sobre la calidad del aire interior en la sección 3. Son aplicadas en los edificios de viviendas, sus recintos interiores, los trasteros, los almacenes de residuos y aparcamientos.

El resto de edificio son regulados por el apartado 1.1.4.2 del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [31], donde requiere un cumplimiento de la exigencia de calidad de aire interior, exigiendo un sistema de ventilación para garantizar un caudal de aire suficiente. En el cual dependiendo de la función del uso del edificio se clasifica varias categorías de calidad del aire interior (IDA), e indica varios métodos para determinar el caudal mínimo de ventilación.

Además, el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 13779 también es una norma válida ya que aborda la ventilación en edificios no residenciales. En dicho documento también se establecen requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos.

La Norma UNE-EN 15251 indica los parámetros que se debe tomar para evaluar el ambiente interior de los edificios no industriales.

También, las tres partes de la norma UNE 171330 son importantes para la evaluación de calidad ambiental interior (CAI): la UNE 171330-1:2008, en el que redacta el diagnóstico que se realiza sobre CAI; la UNE171330-2:2014, que describe el procedimiento de inspección de CAI; y la norma UNE 171330-3:2010, que rige el sistema de gestión de los ambientes interiores [32]-[34].

La norma UNE-EN ISO7730:2006 se centra en analizar el bienestar térmico a través del cálculo de los índices Voto Medio Estimado (PMV) y Porcentaje Estimado de Insatisfecho (PPD).

A nivel de la comunidad de Madrid, está el documento Guía de Calidad del Aire Interior en edificios de uso público de la Comunidad Autónoma de Madrid [35].

Otro documento que relaciona con el tema tratado es el de Calidad del Ambiente Interior en edificios de uso público editado por la Dirección General de Salud Pública de la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid [36].

1.3.2. Definición del concepto

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los ciudadanos se pasan del 80 al 90% del día en espacios cerrados. Por lo tanto, la calidad del ambiente interior debe proporcionar buenas condiciones de salubridad para no generar malas molestias y afecciones negativas a la salud de los ocupantes de los edificios [35].

En el capítulo 44 de la enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo [37] publicado en la página de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), indica que existen muchas partículas contaminantes en el ambiente interior, los cuales son los principales causantes de la mala calidad del aire. Esta concentración de aire contaminado puede ser debido a una falta de ventilación; entrada insuficiente de aire exterior; contaminación provocada por las actividades y el uso del edificio; contaminación procedente del exterior; y la contaminación microbiológica. Entre ellos, la mayoría de los problemas son causados por el tema de la ventilación. Además, se trata de un problema cada vez mayor en nuestra sociedad debido a la búsqueda de la mayor hermeticidad en edificio y el ahorro en el uso energético.

Los contaminantes pueden ser clasificados por las siguientes categorías [36], [37]:

- Contaminantes químicos: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, amianto, ozono, compuestos orgánicos volátiles, formaldehídos, humo de tabaco, radón, creosota y olores.
- Contaminantes físicos: confort térmico, campos electromagnéticos y ruidos.
- Biocontaminantes: bacterias, virus, mohos, levaduras, algas, amebas y otros.
- Otros: presencia de animales en edificios y su entorno.

Existen diversas formas para medir la calidad de ambiente interior de un edificio [38], entre ellos están el técnico descrito en el documento RITE, el método ASHRAE 55:2004, e índices IAQ. Este último mencionado es el más usado para evaluar el grado de confort dentro de un recinto, y los más generales son el Voto Medio Estimado (PMV), Porcentaje Estimado de Insatisfecho (PPD), Porcentaje de insatisfacción por diferencia vertical (PD), Porcentaje de personas que se estima que sentirán molestias (DR) y Edad media del aire.

Las variables que se deben tener en cuenta para su aplicación se clasifican dos grupos: ambientales y personales. Las variables ambientales son aquellos parámetros físicos como la temperatura seca del aire marcada por un termómetro; la temperatura operativa, que es la temperatura media entre la temperatura radiante y la temperatura del aire; la humedad relativa y la velocidad del aire. Y las variables personales son las que están relacionadas con el tipo de actividad que se desarrolla, el tipo de vestimenta, el tiempo de permanencia y la constitución corporal de los ocupantes.

1.3.3. Ventilación natural

El sistema de ventilación natural es uno de los métodos para mejorar la calidad del aire interior. La ventilación natural puede ser originada por varias causas: la ventilación cruzada, que trata de ser un chorro de aires inducidos por efectos dinámicos; la ventilación de la chimenea o la convección natural originados por fuerzas de flotabilidad de origen térmico; y la combinación de los dos tipos anterior que da lugar chorros de flotabilidad, son originados por fuerzas de calor y efectos dinámicos.

La ventilación natural es muy distinta a la ventilación mecánica, ya que en gran medida depende de las condiciones climáticas de cada zona, siendo además muy inestable [39]. Y

para estudiar bien el comportamiento de la ventilación natural, se debe diferenciar en dos partes: los flujos envolventes, es decir el aire que entra y sale de un edificio y el flujo del aire interno (su movimiento cuando está en el interior de un espacio).

En un edificio educacional, la calidad de aire es uno de los factores relevantes que se debe cuidar, ya que genera un impacto importante en la salud de los alumnos y la productividad académica. En un caso de estudio realizado en las aulas de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Jordania [40] demuestra varias técnicas de ventilación natural para mejorar la IAQ. La evaluación de los efectos generados en cada caso se lleva a cabo mediante el método digital, es decir con los programas de simulaciones. De esta manera, se comparan los resultados obtenidos y concluye que la incorporación de una chimenea solar junto con una torre eólica da un mejor efecto de ventilación, además aumenta las horas de confort en las aulas. Y una disminución de 39% en el consumo de energía respecto a un sistema de aire acondicionado.

Un artículo de la revista *Journal of Cleaner Production* [41] discute sobre los efectos de ventilación en las diferentes posiciones de las aulas en edificio educacional tipo línea. Según el estudio, el efecto de la ventilación natural es dependiente a la dirección del viento y las posiciones de los espacios, por lo que en las diferentes zonas de un edificio tienen un comportamiento específico. La investigación fue realizada a través de la simulación Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en Xiamen, una ciudad en la región subtropical, teniendo en cuenta una serie de parámetros como el tamaño de las aulas, el ángulo de la ventilación, el tipo de pasillo: interior y exterior. El resultado de las distintas configuraciones de los parámetros fue evaluado analizando el área de la edad del aire y muestra que la ventilación en el edificio con pasillo exterior es un 35,55% mejor que el con pasillo interior. Y las aulas de dimensión grande ventilan un 30,84% mejor que las pequeñas. Además, dependiendo del ángulo del viento, las aulas reciben distinto grado de ventilación, y el mejor ángulo de viento para una ventilación adecuada en el edificio de estudio es de 305° a 55°.

1.3.4. Ventilación mecánica

Una buena IAQ y eficiencia energética pueden ser conseguidas mediante la aplicación de la ventilación controlada por demanda (DCV), es decir un sistema que controla el flujo de aire cuyo objetivo es garantizar una buena IAQ y un confort térmico. Una investigación

realizada en Noruega [42] trata de comparar el nivel de la eficiencia en energía que puede aportar la combinación de la ventilación con el control de la demanda y la ventilación por desplazamiento (DCDV), y comparando el resultado con el efecto que genera el sistema de ventilación de con caudal de aire constante (CAV). El trabajo fue llevado a cabo en dos escuelas, con un periodo de una semana como el tiempo de estudio en el mes de noviembre. Y tras analizar los resultados obtenidos puede afirmar que el sistema DCDV con detector de CO₂ puede disminuir considerablemente el consumo energético en varios aspectos. Por un lado, es capaz de ahorrar la demanda energética por la calefacción en un 21%, también puede reducir la cantidad de calor que escape por la ventilación en un 54%, una bajada de tasa de flujo de aire en un 50%, y por último un ahorro de energía que consume el ventilador en un 87%.

Otro artículo publicado estudia el rendimiento de la ventilación controlada por demanda en las escuelas de Noruega [43], en el cual se tiene en cuenta el parámetro de la tasa de ocupación en los espacios aparte del nivel de la concentración de CO₂. En esta publicación analiza los distintos resultados que se obtiene de los diferentes sistemas: el sistema DCV con detector de CO₂, el DCV con detector de ocupación infrarroja y el sistema de ventilación con caudal de aire constante. Y se observa el volumen de aire que se renueva con CAV es mucho mayor que el sistema DCV, sin embargo, teniendo en cuenta que las aulas no suelen tener una ocupación de 100%, el sistema DCV ofrece un mejor rendimiento energético que CAV. Comparando con DCV-IR, la estrategia de DCV-CO₂ consume mayor cantidad de energía, tanto las que son destinadas a la ventilación como las primarias. Pero el sistema DCV-CO₂ puede reducir el riesgo de ventilación insuficiente de los espacios con gran tasa de ocupación que los otros dos sistemas. La solución más rentable va dependiendo de la situación del entorno, es decir, cuando la tasa de ocupación es alta considera que DCV-IR es más eficiente, y en el caso contrario la respuesta adecuada sería DCV-CO₂.

Un estudio elaborado por Bart Merema y otros coautores [44] consiste en investigar la eficiencia de ventilación, el ahorro energético y la calidad del aire que puede generar, aplicando el sistema DCV en varias salas públicas en edificios educativos y de oficinas durante dos semanas consecutivas en la época del invierno. Los resultados de este estudio demuestran que con el uso del sistema DCV es capaz de reducir el consumo de la energía

y pérdida de calor por ventilación. Sin embargo, es un método que no aporta mucha mejora en la eficiencia de la ventilación.

Otro artículo interesante [45] habla sobre el comportamiento energético de una combinación del DCV con el sistema de la viga fría activa (ACB) en un edificio de oficina situado en Finlandia. Este estudio se basa en realizar unas simulaciones dinámicas y análisis de datos reales, para comprobar que la aplicación de una ventilación controlada por demanda junto con la presencia de ACB mejora la eficiencia energética, la calidad del aire interior y el confort térmico. Los resultados obtenidos de casos con las distintas combinaciones de sistemas demuestran que el uso del sistema DCV aumenta el rendimiento energético cuando la tasa de ocupación no es muy alta; la CAV gasta más energía suministrada comparada con el sistema DCV; también el consumo de energía generado con el sistema CAV es mayor que la ventilación controlada por demanda; además la combinación de DCV con el sistema de enfriamiento aporta un mejor rendimiento que un sistema simple; además afirma que tanto con el uso del sistema CAV como con el DCV mejora la calidad del aire interior, sin embargo, en algunas ocasiones el sistema de ventilación por el control de la demanda no consigue a mantener el nivel de IAQ, ya que necesita una serie de ajustes en los parámetros de control; y dentro de los distintos sistemas de enfriamiento, el sistema húmedo da mejor rendimiento térmico que el sistema seco.

1.4. CONFORT TÉRMICO

Según la norma UNE-EN ISO7730:2006, el confort térmico se puede evaluar a través del cálculo de los índices PMV y PPD.

Los valores de PMV reflejan el valor medio de los votos emitidos por un grupo de personas respecto a una escala de sensación térmica de siete niveles, como está indicado en la siguiente tabla. Este índice depende de factores como el nivel de la vestimenta, la humedad relativa, la tasa metabólica, la temperatura operativa y del aire, etc.

Tabla 1 – Escala de sensación térmica de siete niveles

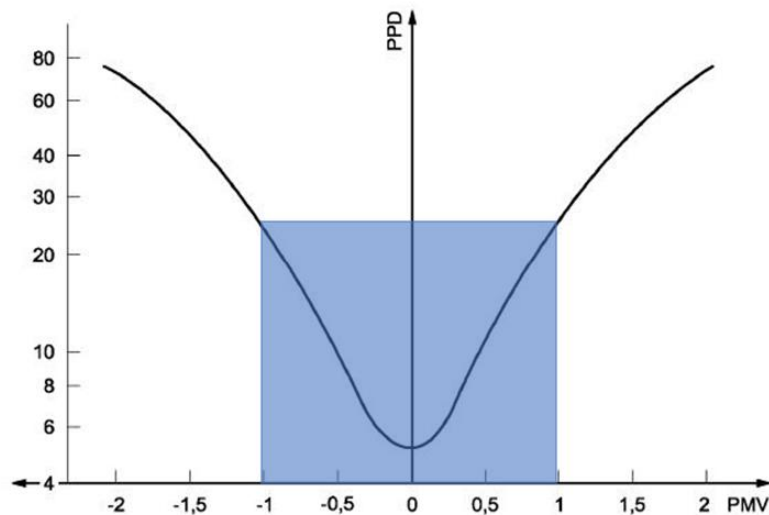
+ 3	Muy caluroso
+ 2	Caluroso
+ 1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
- 1	Ligeramente fresco
- 2	Fresco
- 3	Frio

Tabla 1. Escala de sensación térmica

El índice PPD mide el porcentaje de habitantes con insatisfacción térmica en un espacio. Puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$PPD = 100 - 95^{(-0,03353(PMV)^4 - 0,2179(PMV)^2)}$$

En la siguiente figura se demuestra el valor de PPD en función del PMV, considerando que entre el rango de -1 y 1 se alcanza el bienestar térmico. La limitación correspondiente en el índice PPD es del 25 %, en el que valores superiores a 25% indican que los habitantes están insatisfechos con la sensación térmica del ambiente en el que se encuentran.



Leyenda

PMV voto medio estimado

PPD porcentaje estimado de insatisfechos, %

Figura 5. PPD en función de PMV

1.5. SIMULACIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

Hoy en día, el cambio climático es un reto global que está enfrentando al mundo. El sector de la construcción, por su parte, es una de las áreas que está trabajando con el objetivo de reducir el consumo de energía y aumentar el nivel de confort de los habitantes mediante el uso de estrategias de mejora.

La simulación energética es una herramienta que permite las siguientes funciones:

- Determinar la solución óptima para el edificio.
- Conocer los impactos que pueden generar los sistemas de calefacción y refrigeración.
- Identificar las emisiones de CO₂ generado por el edificio.
- Calcular la demanda energética del edificio de estudio.
- Realizar las simulaciones de fluidodinámica computacional que permiten analizar el flujo de aire tanto externo como interno, y el comportamiento de confort CFD.

Los programas más conocidos y usados son: Design Builder, EnergyPlus, Ecotect, y OpenStudio, entre otros.

Design Builder [46] dispone de un módulo de CFD que permite evaluar las condiciones ambientales en el interior de las edificaciones. Y para poder conocer la calidad del aire interior lo hace con el cálculo de la edad del aire. Este programa también puede analizar el comportamiento del viento en el exterior de los edificios.

Además, cuenta con un módulo de HVAC, con el motor de EnergyPlus, que considera los distintos sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación. Por lo que es capaz de realizar una simulación de climatización y ver las demandas energéticas.



Figura 6. Programa Design Builder

1.6. ESCENARIO DE PANDEMIA COVID-19

Ante la situación de la pandemia COVID-19, la calidad del aire interior de un edificio puede considerarse como un factor de gran importancia importante para sus ocupantes.

Centrado en las edificaciones de uso público como oficinas y centros educativos, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ha publicado una serie de documentos para garantizar una adecuada ventilación en los centros educativos. Entre ellos está la guía que muestra las pautas que se deben seguir para ventilar las aulas con el objetivo de reducir el riesgo de contagio por virus [47]. Como la ventilación adecuada depende del volumen del aula, el número de alumnos, el tipo de actividad realizada, etc., esta guía presenta la forma para medir la ventilación teniendo en cuenta el número de renovación de aire por hora (ACH) recomendada por la guía de Harvard es 5-6 ACH ($ACH = \text{lítros por persona y segundo} * \text{número personas} * 3600 \text{ segundos/hora} * 0.001 \text{ m}^3/\text{lítro} / \text{volumen sala en m}^3$), y las cantidades de aire por persona y segundo es 14l /s*persona como puede ver en la figura 7. También muestra varias soluciones para mejorar la calidad del aire, en situaciones permitidas siempre es mejor optar por realizar actividades en ambiente exterior donde la corriente del aire ayuda a diluir la concentración de las partículas nocivas. En el caso contrario la ventilación natural es considerada como una respuesta eficaz, y la actuación más efectiva se consigue con la ventilación cruzada teniendo las puertas y ventanas abiertas en lados opuestos aumentando la tasa de renovación de aire. Sin embargo, esta técnica es muy dependiente de las características ambientales y en muchos casos las condiciones del entorno no permiten una ventilación natural suficiente, y ante este problema se incorpora el sistema de ventilación forzada central o individual. Por último, en un escenario desfavorable sin posibilidad de ventilación natural ni ventilación mecánica, o cuando no genera una renovación el aire suficiente, se procede a instalar un purificador para eliminar las partículas contaminantes acumuladas del espacio interior. En esta guía también se presenta una técnica experimental para valorar la ventilación en las clases, se trata de realizar la medición de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂). Con los datos obtenidos pueden calcular la tasa de renovación, teniendo en cuenta el nivel de CO₂ del tiempo inicial y final en partes por millones (ppm), y el periodo transcurrido en unidad de tiempo en hora (h). Además, puede determinar la concentración de CO₂ objetivo en estado

estable, conociendo la generación de CO₂, el caudal de aire exterior objetivo y el nivel de CO₂ en el exterior.

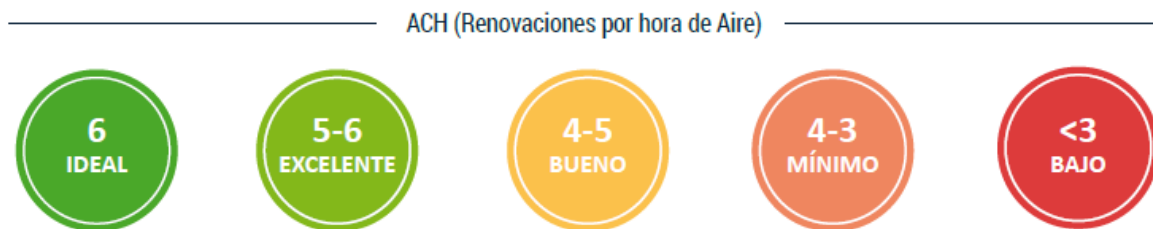


Figura 7. Número de renovación de aire por hora (ACH)

Fuente: Guía para ventilación en aulas [47], [48]

El nivel de CO₂ en exteriores es aproximadamente 400 ppm, cuando la concentración de CO₂ en el espacio interior supera 700 ppm se considera que existe un riesgo asumible, y cuando supera a 800 ppm se sugieren medidas correctoras. José Luis Jiménez, el fundador de la plataforma AIREAMOS explica que la medición del nivel de dióxido de carbono permite conocer la calidad del aire del interior, y puede ayudar a tener una ventilación natural de manera eficiente garantizando el confort térmico [49].



Figura 8. Límites nivel CO₂

Fuente: Recuperado de la página web AIREAMOS <https://www.aireamos.org/#QueHacemos>

Otro documento [50] de CSIC presenta dos herramientas importantes para controlar la pandemia. La primera de ellas es reducir la emisión por exhalación, es decir, disminuir el

número de alumnos en las clases, ya que son los emisores de los aerosoles y además así se puede facilitar el cumplimiento de la distancia social exigida. La otra forma es eliminar los aerosoles acumulados en el aire, ya que no es suficiente la reducción de los alumnos, y se necesita una constante renovación del aire para eliminar las partículas contaminadas mediante la ventilación natural, aprovechando la corriente de aire, y/o la ventilación mecánica en el caso de que la ventilación natural no sea posible o sea insuficiente. De este modo, se puede expulsar el aire sucio del recinto interior e introducir aire limpio del exterior. Cuando la ventilación no esté permitida, debe disponerse de dispositivos para purificar el aire.

El Ministerio de Sanidad y otras instituciones han redactado unas recomendaciones [51] para la operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios, excepto los de los recintos hospitalarios. Las recomendaciones se clasifican en cuatro bloques distintos, que son las operaciones relacionadas con las instalaciones de climatización, los sistemas de filtración y purificación del aire, el mantenimiento de las instalaciones y las actuaciones acerca de la limpieza de la instalación ante un caso sospechoso de COVID-19. Entre las recomendaciones expuestas, destacan la propuesta de garantizar un caudal mínimo de aire exterior de 12,5 l/segundo por persona, y una renovación de aire de 6-10 r/h, mediante el incremento de la tasa de ventilación y la disminución de los ocupantes; reducir la recirculación de aire en los dispositivos pasando al modo de la función de intercambiar el aire con el exterior; en caso de disponer un recuperador de calor, proceder a realizar una inspección sobre el estado de la sección de recuperación en cuanto a fugas y by-pass de partículas para verificar que la cantidad de partículas que pasan no superan el 5%; aumentar la tasa de ventilación natural, incluso en aquellos edificios que disponen de sistema de ventilación mecánica; mantener la temperatura de consigna de calefacción y refrigeración y la humedad relativa en el rango establecido habitualmente; aumentar la capacidad de la filtración del aire de los sistemas de filtración y purificación centralizados; y en caso de edificios con una ventilación insuficiente, incorporación de unidades de filtración y purificación portátiles con filtros HEPA con una eficacia del aire superior al 99,95%.

Como los centros educativos son considerados focos de contagio por coronavirus, el Ministerio de Sanidad, junto con el Ministerio de Educación y Formación Profesional han establecido unas medidas frente al COVID-19 para los edificios educacionales que ofrezcan un ambiente escolar saludable y seguro [52]. En ellas se recogen unos principios básicos sobre la limitación del contacto, las medidas de prevención personal, la limpieza y ventilación y la gestión de casos. Las sugerencias acerca del tema de la ventilación son ventilar el espacio un mínimo de 5-10 minutos antes de empezar la jornada, entre la hora del cambio de clases, y al finalizar las actividades. Y siempre que la situación lo permita, se deben dejar las clases con una ventilación natural. Además, hay que tener claro que la solución correcta y efectiva es aumentar la renovación del aire fresco, y no incrementar la tasa de recirculación.

A nivel regional, la Comunidad de Madrid ha publicado unas recomendaciones para la prevención y control del nuevo coronavirus en el ámbito educativo [53], y las precauciones establecidas son similares a las mencionadas en el documento anterior [52]. Aunque el tiempo mínimo de ventilación sugerido es más restrictivo, de 10-15 minutos.

1.7. CONSIDERACIONES

- Una gran parte de la energía del mundo está destinada a los edificios.
- La búsqueda de una mayor eficiencia energética en la edificación es un aspecto clave en el sector. Se puede lograr con medidas correctoras pasivas y activas.
- El mayor número de quejas referentes a la calidad del aire del interior de un edificio entran dentro del apartado de confort térmico y ventilación. En la mayoría de los estudios realizados en edificios, los problemas son causados por una inadecuada ventilación. Sin embargo, un aumento en la velocidad del aire puede variar el nivel de la temperatura que se establece dentro de un local. En el caso contrario, una falta de ventilación puede causar una acumulación de contaminantes que pueden generar problemas de salud para los ocupantes.
- Se ha priorizado el criterio sanitario frente a la comodidad, es decir, se ha tomado la calidad del aire interior como la primera necesidad frente al confort térmico interior del local, problemas de ruido exterior o el riesgo causado por los contaminantes procedentes del exterior. De este modo, se rebaja el nivel de confort y la eficiencia

energética frente a la salubridad durante la emergencia sanitaria actual causada por el COVID-19.

- En el sistema de ventilación natural el recorrido de los aerosoles es difícilmente controlable ya que depende de aspectos como las características del entorno, la velocidad y dirección del viento. Por esta razón, la corriente del aire incontrolada puede dar lugar a una mayor posibilidad de contagio.
- La ventilación natural debe estar activa siempre que las condiciones climatológicas lo permitan. Y en los meses de invierno, aunque es difícil mantener las ventanas y puertas abiertas durante toda la jornada, al menos debe ventilarse de manera frecuente al comienzo y finalización de la clase, durante el tiempo de descanso y entre las distintas clases, con un periodo de tiempo de 10-15 minutos.
- El sistema de ventilación mecánica permite que el flujo de aire viciado esté controlado y dirigido de forma segura al exterior. Además, es independiente de los factores del entorno, y proporciona un mayor nivel de eficiencia energética.
- Según el doctor Juan Antonio Ortega [54], la mayoría de los centros españoles no cuentan con un plan interno para manejar la calidad del ambiente interior. Y, según el estudio realizado por AEP y CEAPA, un 85% de los centros educativos en España tienen clases muy frías en invierno y muy calurosas en la época de verano.
- La Comunidad de Madrid [55], dice que entre las soluciones que existen para mejorar la calidad del aire interior prevalece el sistema de la ventilación natural. Y, en cuanto a los purificadores, considera que no es la respuesta adecuada para los centros educativos, ya que no son diseñados para mejorar la calidad del aire interior en las escuelas y el ruido que se produce puede ser molesto para los usuarios, o que incluso podría influir en el rendimiento académico de los alumnos. De este modo, el sistema de purificación es rechazado en los espacios educativos.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Actualmente el cambio climático es considerado como un problema ambiental muy grave que afecta a todas las partes del planeta.

En el sector de construcción, se puede colaborar para resolver este problema climático mediante la práctica de construcción sostenible, desarrollando edificaciones que tengan en cuenta el impacto medioambiental en todas sus fases: el diseño, el proceso constructivo, la vida de uso, el mantenimiento, la fase de demolición y la gestión de los residuos. Y durante el periodo del uso de edificio, los ocupantes pueden utilizar instalaciones eficientes, incluso fuentes de energía renovable para contribuir al desarrollo sostenible.

Además, este tipo de construcciones proporciona mayor nivel de confort a los usuarios de una forma más eficiente, es decir, consumiendo menos energía y recursos económicos.

El confort térmico, acústico, la iluminación y la calidad del aire se consideran los aspectos más importantes para preservar el confort de los ocupantes. Entre ellos, el nivel de calidad del aire interior es un factor muy importante ya que condiciona el estado de salud, efectividad, rendimiento del trabajo y el confort en las personas. En la situación de pandemia mundial en la que nos encontramos este aspecto ha cobrado una mayor relevancia frente a los demás.

Una mayor tasa de ventilación natural puede garantizar un buen nivel de calidad del aire, eliminando las sustancias contaminantes y ofrecer un aire limpio y sano. Sin embargo, no es una solución eficiente, ya que desfavorece el confort térmico y acústico en el edificio, y al mismo tiempo provoca una mayor pérdida de energía, sobre todo en las zonas con climas extremos.

Todas estas justificaciones citadas son las razones que apoya la realización de este proyecto, que estudia las condiciones de confort térmico y calidad interior del aire de los distintos espacios de la biblioteca de la ETSEM con el fin de mejorar y ofrecer un espacio de estudio confortable en todos los aspectos.

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este trabajo es mejorar el confort térmico y al mismo tiempo garantizar una buena calidad del aire interior para los usuarios de la biblioteca de la ETSEM mediante estrategias eficientes y sostenibles.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las condiciones ambientales tanto interior como exterior del edificio con la simulación CFD.
- Mejorar la eficiencia energética en el edificio mediante las medidas correctoras pasivas y activas.
- Conseguir una mejora en el confort térmico de la biblioteca.
- Disminuir las emisiones de CO₂ con la reducción de consumo energético en los sistemas de climatización.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el trabajo consta de los siguientes pasos:

1. Analizar los datos meteorológicos de AEMET del año 2018 para determinar la dirección predominante del viento, su velocidad, la temperatura media y la humedad relativa de cada mes. Este primer paso es imprescindible para poder iniciar el cálculo del análisis de CFD exterior.
2. Hacer la geometría del edificio en el programa Design Builder para poder ejecutar el modelado del proyecto. Partiendo de este modelo se realizarán todas las simulaciones y análisis que interesen.
3. Realizar el análisis CFD exterior para determinar las velocidades de aire entrante a través de los huecos. En esta etapa, se introduce la dirección predominante y la velocidad obtenidos en el primer paso para iniciar el cálculo de las ecuaciones residuales. De esta manera se pueden conocer las velocidades exteriores reales para poder trabajar con más exactitud sobre las condiciones internas.
4. Realizar el análisis CFD interior con los resultados conseguidos del punto anterior, para determinar las condiciones del espacio interior como la velocidad del aire, la edad del aire, los índices PMV y PPD.
5. Analizar el comportamiento de la ventilación y confort, comparándolo con los valores límites exigidos por la normativa.
6. Realizar simulaciones HVAC para ver la demanda energética del edificio.
7. Proponer las propuestas de mejoras con las soluciones activas y pasivas para mejorar tanto los aspectos de confort térmico como de calidad interior del aire.
8. Realizar las simulaciones CFD y HVAC con las medidas de mejoras.
9. Analizar los resultados obtenidos con la incorporación de medidas correctoras, y comparar con los resultados obtenidos del edificio original para cuantificar el ahorro y mejoras conseguidas.

4.1. EDIFICIO ESTUDIADO

El edificio objeto de este estudio es la Escuela Técnica Superior de Edificación, y concretamente la biblioteca que está situada en la zona oeste del edificio, que corresponde

a una parte de nueva ampliación para la escuela. Está localizada en la avenida Juan de Herrera nº 6, del distrito Ciudad Universitaria de Madrid.

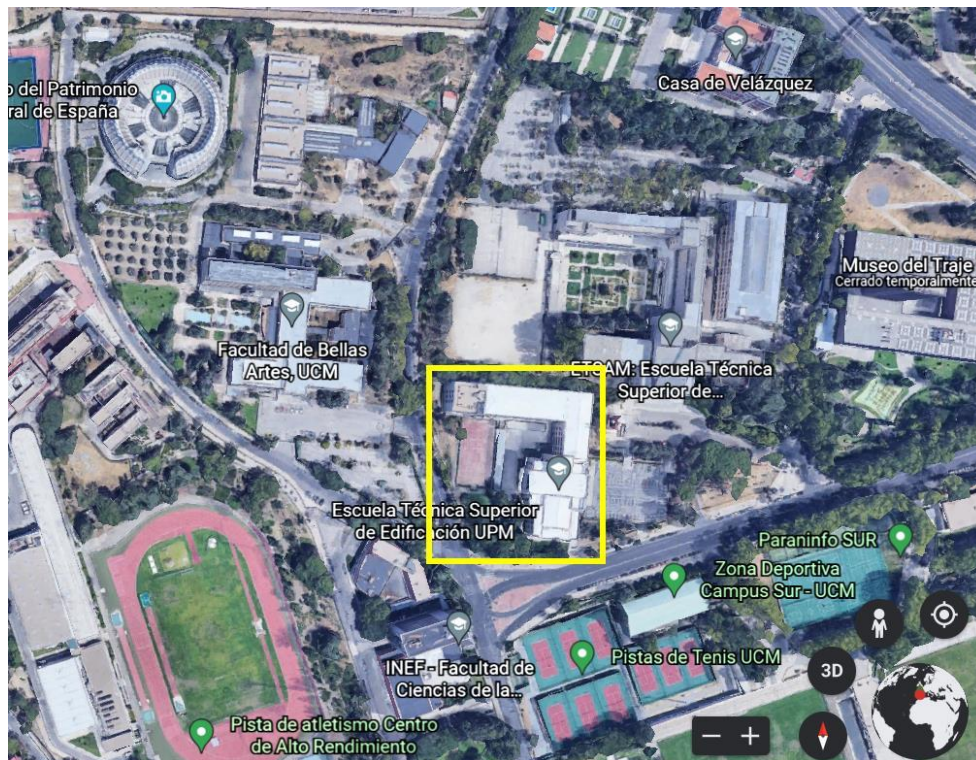


Figura 9. Localización de la Escuela Técnica superior de Edificación (ETSEM)

La fachada principal del ala donde se encuentra la biblioteca está orientada hacia el oeste con una pequeña inclinación de 4º hacia norte, se encuentra paralela a la calle Arquitecto López Otero.



Figura 10. Localización de la biblioteca en la ETSEM

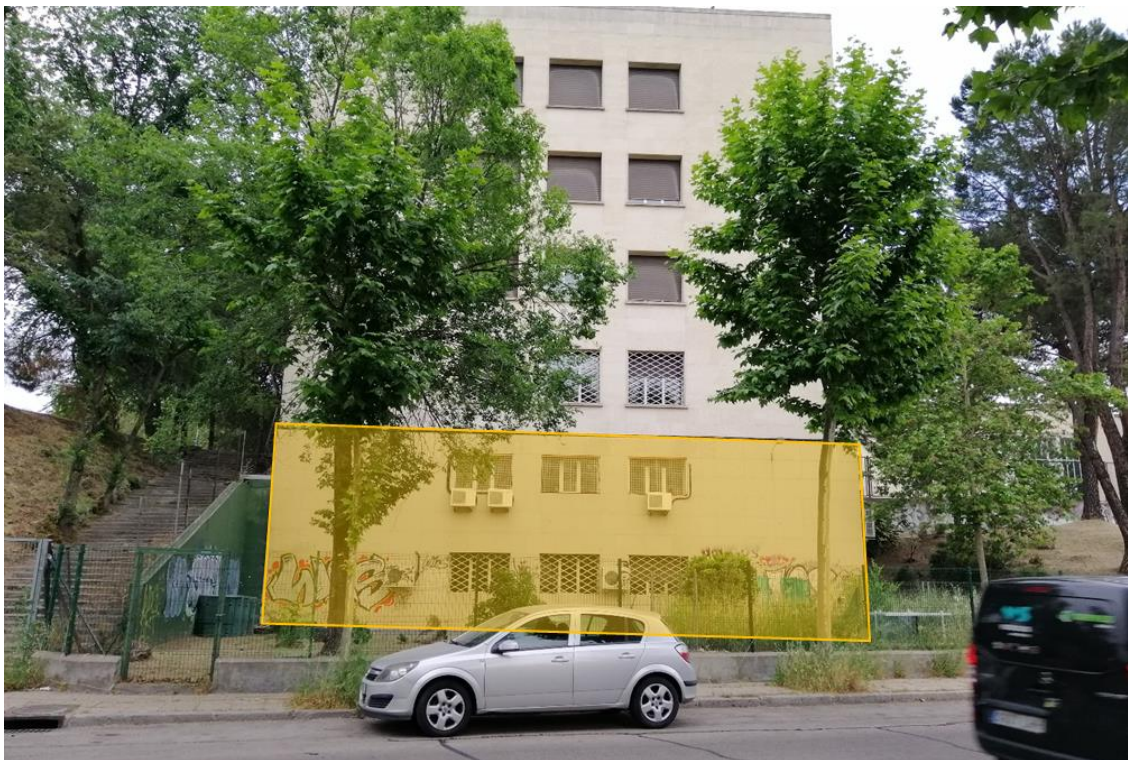


Figura 11. Fachada oeste de la biblioteca

La biblioteca está ubicada en una de las zonas de la ETSEM que fueron ampliadas. La fachada oeste está construida íntegramente sobre rasante y consta de ventanas exteriores en los dos niveles de biblioteca. Si contamos desde la calle de Arquitecto López Otero, la biblioteca se encuentra en la planta baja y primera, sin embargo, si contamos desde el lado

de la fachada principal del edificio, la biblioteca está localizada en 2 niveles inferiores, es decir, está situada en el nivel sótano 2 y 3 (ver la figura 12).

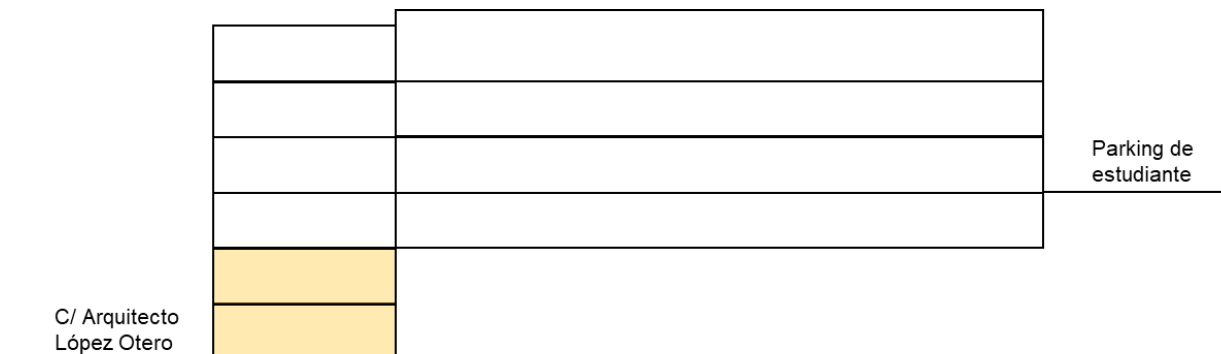


Figura 12. Sección vertical del edificio

La biblioteca está comprendida en dos plantas. En la planta sótano 2 está ubicada la sala de lectura y un espacio como sala de consulta. Mientras que en la planta sótano 3 se encuentran tres despachos de los bibliotecarios y el resto del espacio está destinado al repositorio.



Figura 13. Sala de lectura



Figura 14. Despachos

4.2. VALORES METEOROLÓGICOS

Los valores meteorológicos empleados para el estudio son datos climáticos de origen Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Y la estación meteorológica más cercana está situado a una distancia de 1,64 km del edificio: estación Ciudad Universitaria. Se decide analizar los datos del año 2018, siendo el periodo que contiene los datos más actualizados y completos salvo el mes de octubre, ya que estos últimos años no disponen las informaciones acerca de los vientos debido que los sensores relacionados están estropeados.

De todos los datos meteorológicos disponibles se deciden centrar en los datos de 9h a 21h, el horario en el que la biblioteca de la escuela está abierta al público. Para hacer un estudio más específico se filtran los datos diezminutales de temperaturas, humedad relativa, velocidad del viento y la dirección del viento.

Con ellos se determinan la dirección dominante del viento mediante la rosa de viento de 16 rumbos.

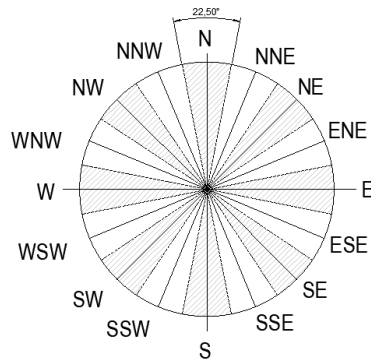


Figura 15. Rosa de los vientos de 16 rumbos

También con el mismo gráfico se determina la categoría de velocidad de viento dominante, y la velocidad dominante puede ser sacada calculando la media de las velocidades de la categoría dominante. La temperatura y humedad relativa media también son calculadas con el mismo modo que la velocidad dominante.

Las categorías de la velocidad están clasificadas de la siguiente manera:

- Categoría 1: 0 – 1 m/s
- Categoría 2: 1 – 2 m/s
- Categoría 3: 2 – 3 m/s
- Categoría 4: 3 – 4 m/s
- Categoría 5: 4 – 5 m/s
- Categoría 6: 5 – 6 m/s
- Categoría 7: 6 – 7 m/s
- Categoría 8: 7 – 8 m/s
- Categoría 9: 8 – 9 m/s
- Categoría 10: 9 – 10 m/s
- Categoría 11: 10 – 11 m/s
- Categoría 12: 11 – 12 m/s
- Categoría 13: 12 – 13 m/s
- Categoría 14: > 13 m/s

DATOS HORARIO LABORABLE: 9H-21H

- **Enero**

En el mes de enero se dispone de 2381 datos del viento entre las 9:00-21:00. En la siguiente tabla se puede ver la clasificación de estas informaciones en las distintas categorías de velocidades y las direcciones de viento.

		Categoría de velocidades								Total general
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Dirección de viento	N	55	24	4	3	1	0	0	0	87
	NNE	11	27	21	17	17	6	1	0	100
	NE	21	50	44	20	8	6	6	0	155
	ENE	24	35	32	41	26	18	4	0	180
	E	27	31	30	8	2	2	0	0	100
	ESE	28	12	11	6	0	0	0	0	57
	SE	31	19	4	0	0	0	0	0	54
	SSE	82	33	3	0	0	0	0	0	118
	S	116	43	0	0	0	0	0	0	159
	SSW	123	51	1	0	0	0	0	0	175
	SW	108	155	79	25	5	1	0	0	373
	WSW	61	102	88	55	6	6	2	0	320
	W	56	55	15	15	3	4	1	0	149
	WNW	28	46	20	17	39	16	5	7	178
	NW	34	25	13	9	8	3	0	0	92
	NNW	30	43	7	3	1	0	0	0	84
Total general		835	751	372	219	116	62	19	7	2381

Tabla 2. Frecuencias de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de enero)

A continuación, se presenta una rosa de viento realizada en base a los datos mostrados en la tabla anterior. Se puede observar que la dirección predominante del mes de enero es suroeste (SW). Y la velocidad predominante de esta dirección es de la categoría 2, es decir, las velocidades frecuentes son entre 1 - 2m/s.

La velocidad media del mes de enero es 1,39 m/s, con una temperatura media de 9,13°C y 59,86% de humedad relativa.

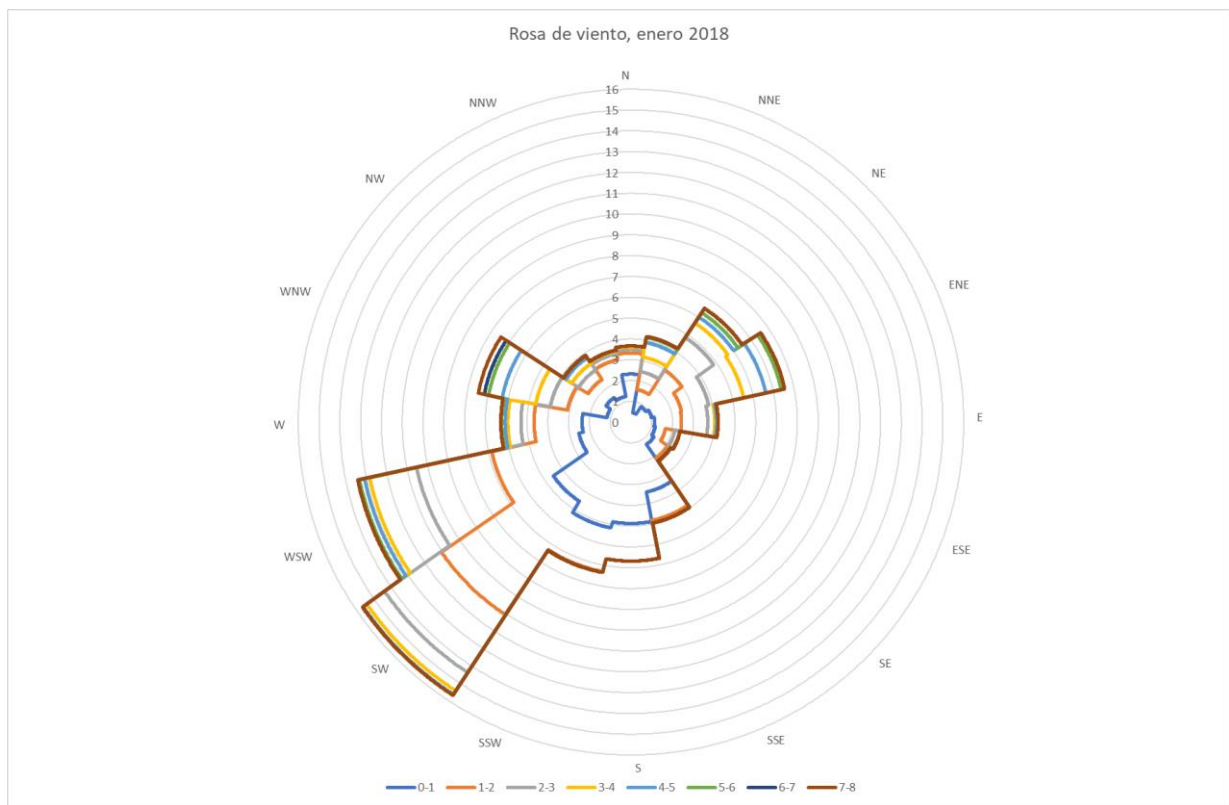


Figura 16. Rosa de vientos (mes de enero)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
SW	225	1,39	0,99	0,99	9,13	59,86

Tabla 3. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de enero)

- **Febrero**

A continuación, se clasifican los 2184 datos del viento entre las 9:00-21:00 de febrero, según las categorías de velocidad y dirección del viento, y se obtiene la siguiente tabla de frecuencia.

		Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
Dirección de viento	N	19	36	14	8	21	3	1	102
	NNE	16	36	85	46	30	9	1	223
	NE	15	58	115	166	71	13	1	439
	ENE	15	46	38	42	24	7	0	172
	E	10	11	11	1	0	0	0	33
	ESE	8	4	1	0	0	0	0	13
	SE	8	2	0	0	0	0	0	10
	SSE	24	36	4	0	0	0	0	64
	S	73	44	12	0	0	0	0	129
	SSW	57	26	5	0	0	0	0	88
	SW	67	93	44	38	16	0	0	258
	WSW	57	57	35	27	31	9	0	216
	W	39	62	15	27	21	3	0	167
	WNW	18	34	14	12	17	7	0	102
	NW	20	42	5	9	8	1	0	85
	NNW	21	39	13	6	2	2	0	83
Total general		467	626	411	382	241	54	3	2184

Tabla 4. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de febrero)

La rosa de viento de 16 rumbos indica que la dirección predominante del viento es noreste (NE), con una velocidad predominante de categoría 4. La velocidad media calculada de esta categoría es 3,39 m/s.

La temperatura media del mes de febrero es 6,06°C y la humedad relativa 47,11%.

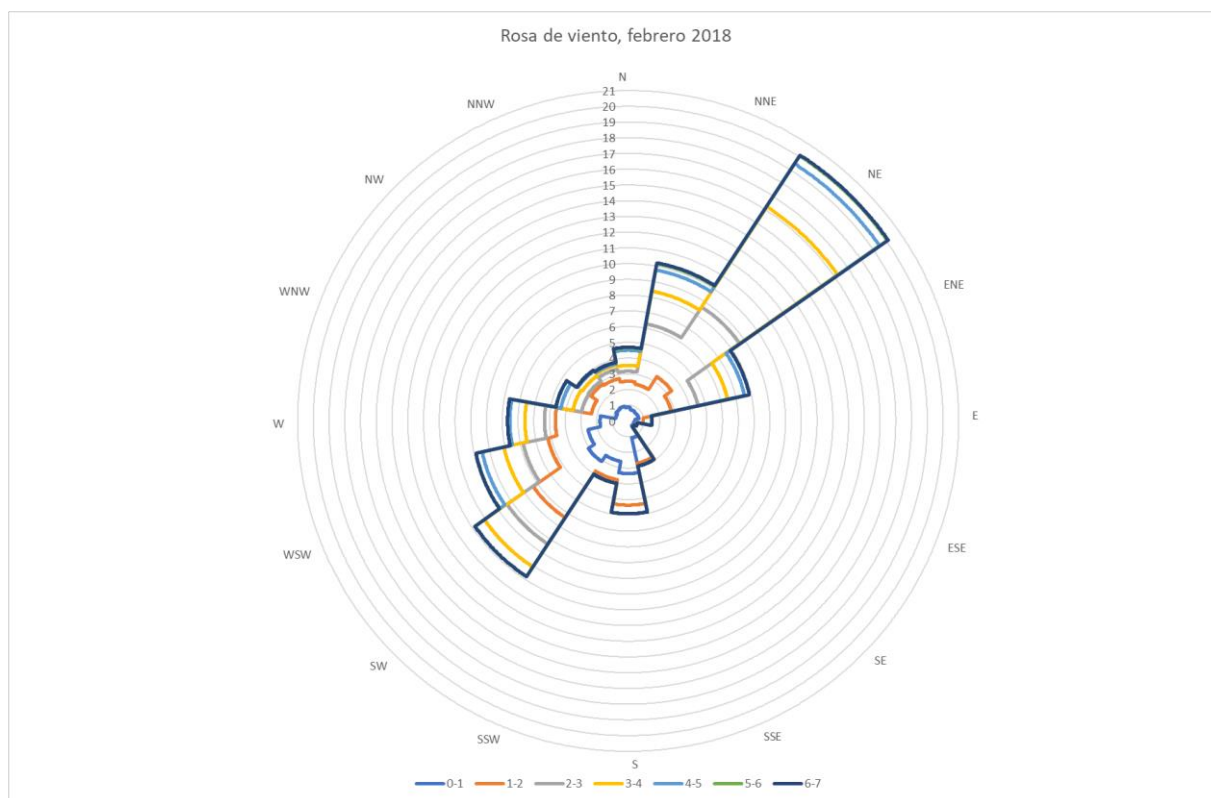


Figura 17. Rosa de vientos (mes de febrero)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
NE	45	3,39	2,40	2,40	6,06	47,11

Tabla 5. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de febrero)

- **Marzo:** analizando los 2418 datos disponibles del mes de marzo, se ha determinado que la dirección predominante del viento es oeste-sudoeste (WSW), con una temperatura media de 9,44 °C y 59,48% de humedad relativa.

	Dirección de viento	Categoría de velocidades													Total general	
		1	2	3	4	5	6	7	8	11	10	9	12	13		
	N	13	6	15	15	19	2	0	0	0	0	0	0	0	0	70
	NNE	5	8	10	25	13	12	4	0	0	0	0	0	0	0	77
	NE	10	7	5	9	10	11	3	1	0	0	0	0	0	56	
	ENE	7	5	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	19	
	E	7	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	
	ESE	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	
	SE	9	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	
	SSE	39	92	53	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	205	
	S	59	58	19	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	
	SSW	46	66	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	128	
	SW	33	116	120	86	59	30	8	5	1	0	0	0	0	458	
	WSW	23	56	78	130	142	89	56	21	6	3	1	1	0	606	
	W	12	29	55	35	37	21	0	1	0	0	0	0	0	190	
	WNNW	12	23	29	59	92	46	12	10	13	6	9	3	1	315	
	NW	8	19	19	20	8	0	1	0	0	0	0	0	0	75	
	NNW	7	22	7	0	5	1	0	1	0	0	0	0	0	43	
	Total general	296	519	433	403	388	212	84	39	20	9	10	4	1	2418	

Tabla 6. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de marzo)

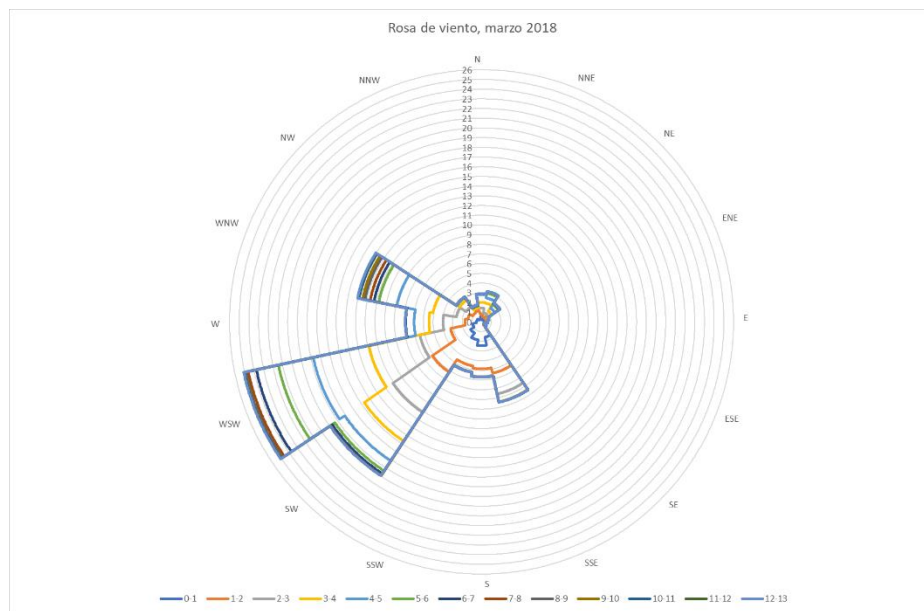


Figura 18. Rosa de vientos (mes de marzo)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
WSW	247,5	4,45	4,11	1,70	9,44	59,48

Tabla 7. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de marzo)

- **Abril:** estudiando los datos climáticos entre las 9:00-21:00, se obtiene una dirección predominante del suroeste, con una velocidad media de 2,39m/s. La temperatura media de abril es de 13,55 °C y la humedad relativa es 53,18%.

		Categoría de velocidades										Total general
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Dirección de viento	N	8	13	2	1	0	0	0	0	0	0	24
	NNE	6	23	17	0	0	0	0	0	0	0	46
	NE	7	17	68	43	10	1	0	0	0	0	146
	ENE	9	38	48	41	6	0	0	0	0	0	142
	E	19	45	33	16	1	0	0	0	0	0	114
	ESE	15	41	33	4	2	0	0	0	0	0	95
	SE	31	59	35	13	0	0	0	0	0	0	138
	SSE	44	100	37	4	0	0	0	0	0	0	185
	S	63	35	2	0	0	0	0	0	0	0	100
	SSW	36	80	31	10	0	0	0	0	0	0	157
	SW	28	130	135	99	41	15	4	0	0	0	452
	WSW	14	53	76	91	84	47	32	9	0	0	406
	W	9	22	24	29	25	11	6	0	0	0	126
	WNW	12	18	11	8	14	12	11	10	2	1	99
	NW	13	15	3	2	0	0	0	0	0	0	33
	NNW	6	18	3	1	0	0	0	0	0	0	28
Total general		320	707	558	362	183	86	53	19	2	1	2291

Tabla 8. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de abril)

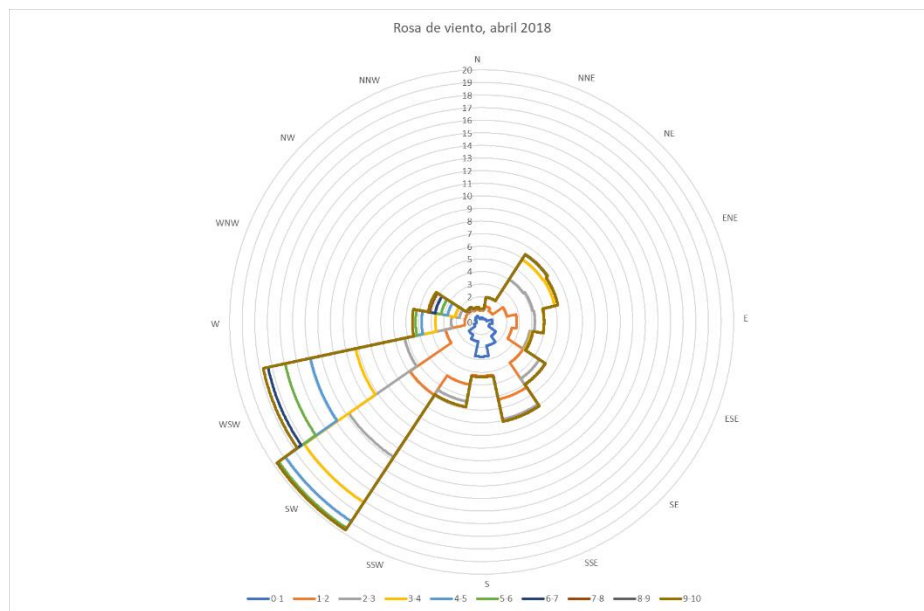


Figura 19. Rosa de vientos (mes de abril)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
SW	225	2,39	1,69	1,69	13,55	53,18

Tabla 9. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de abril)

- **Mayo:** la dirección predominante del viento de mayo es oeste-sudoeste, con una velocidad de 2,42 m/s, y una temperatura y humedad de 21,16 °C y 37,39% respectivamente.

		Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
Dirección de viento	N	22	33	25	3	0	0	0	83
	NNE	17	53	33	14	4	0	0	121
	NE	22	72	66	54	21	1	0	236
	ENE	20	62	80	50	23	16	0	251
	E	30	55	45	19	7	1	0	157
	ESE	30	41	14	14	6	0	0	105
	SE	33	28	15	6	1	0	0	83
	SSE	58	35	8	0	1	0	0	102
	S	56	22	2	0	0	0	0	80
	SSW	52	32	0	0	0	0	0	84
	SW	52	80	38	10	2	0	0	182
	WSW	36	81	88	65	10	2	0	282
	W	34	88	51	30	19	4	1	227
	WNW	19	51	32	48	48	29	5	232
	NW	34	37	12	9	9	2	0	103
	NNW	25	36	17	10	2	0	0	90
Total general		540	806	526	332	153	55	6	2418

Tabla 10. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de mayo)

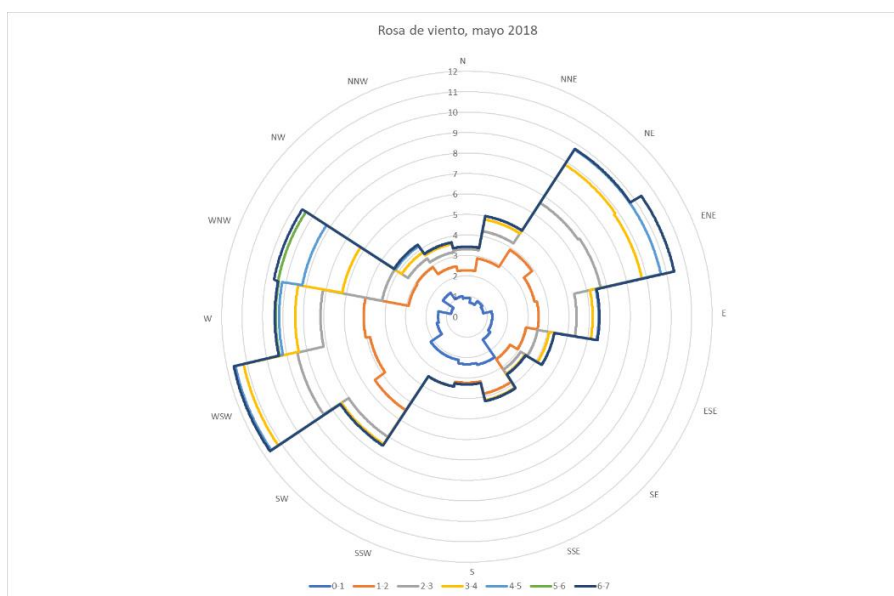


Figura 20. Rosa de vientos (mes de mayo)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
WSW	247,5	2,42	2,24	0,93	21,16	37,39

Tabla 11. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de mayo)

- **Junio:** la dirección de viento más frecuente es oeste-sudoeste, y su velocidad media es 3,45 m/s. La temperatura media es 23,2 °C y la humedad relativa es 38,45%.

	Dirección de viento	Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
	N	13	49	9	1	0	0	0	72
	NNE	8	37	31	1	1	0	0	78
	NE	20	35	75	86	21	3	1	241
	ENE	10	42	59	26	18	9	0	164
	E	21	54	49	10	1	0	0	135
	ESE	27	78	15	1	0	0	0	121
	SE	42	58	4	0	0	0	0	104
	SSE	48	70	4	0	0	0	0	122
	S	57	56	1	0	0	0	0	114
	SSW	41	56	6	0	0	0	0	103
	SW	29	87	58	25	8	0	0	207
	WSW	20	55	117	130	69	14	0	405
	W	13	68	84	48	20	1	0	234
	WNW	9	38	44	13	5	0	0	109
	NW	17	37	14	1	0	0	0	69
	NNW	11	38	11	2	0	0	0	62
	Total general	386	858	581	344	143	27	1	2340

Tabla 12. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de junio)

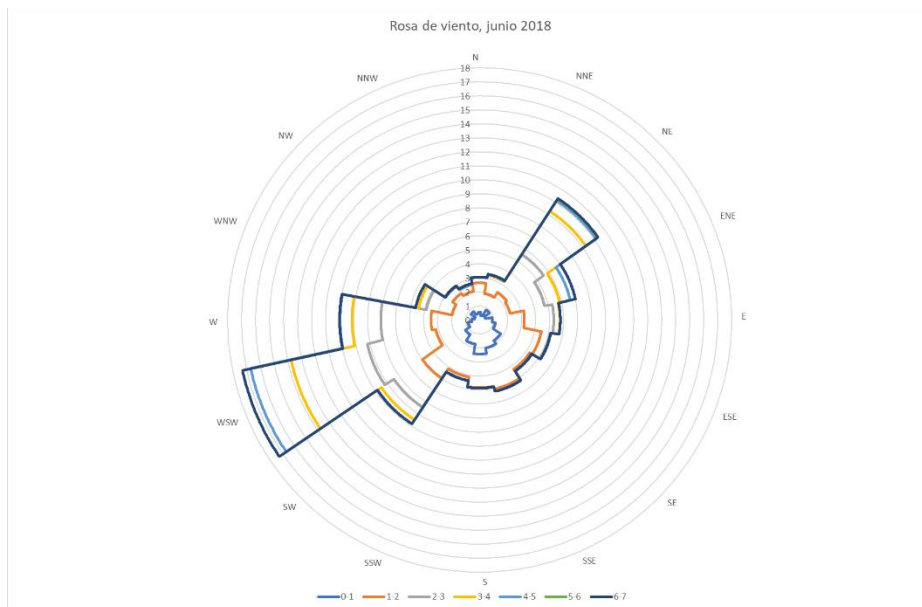


Figura 21. Rosa de vientos (mes de junio)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
WSW	247,5	3,45	3,19	1,32	23,20	38,45

Tabla 13. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de junio)

- **Julio:** la dirección y velocidad predominante de julio es similar que la del mes pasado, ya que su dirección es WSW y su velocidad es de 3,42 m/s. Cuenta con una temperatura media de 30,94°C y una humedad del 29,16%.

	Dirección de viento	Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
	N	19	29	0	1	0	0	0	49
	NNE	7	17	7	4	0	0	0	35
	NE	9	16	37	35	16	1	0	114
	ENE	6	27	16	15	13	2	0	79
	E	13	33	18	0	0	0	0	64
	ESE	21	32	4	0	0	0	0	57
	SE	24	29	1	0	0	0	0	54
	SSE	49	48	0	0	0	0	0	97
	S	74	66	3	0	0	0	0	143
	SSW	47	122	10	1	0	0	0	180
	SW	37	141	144	53	18	2	0	395
	WSW	24	122	180	202	100	30	1	659
	W	18	88	67	53	24	6	0	256
	WNW	13	53	32	22	5	2	2	129
	NW	17	41	6	0	0	0	0	64
	NNW	16	22	4	1	0	0	0	43
	Total general	394	886	529	387	176	43	3	2418

Tabla 14. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de julio)

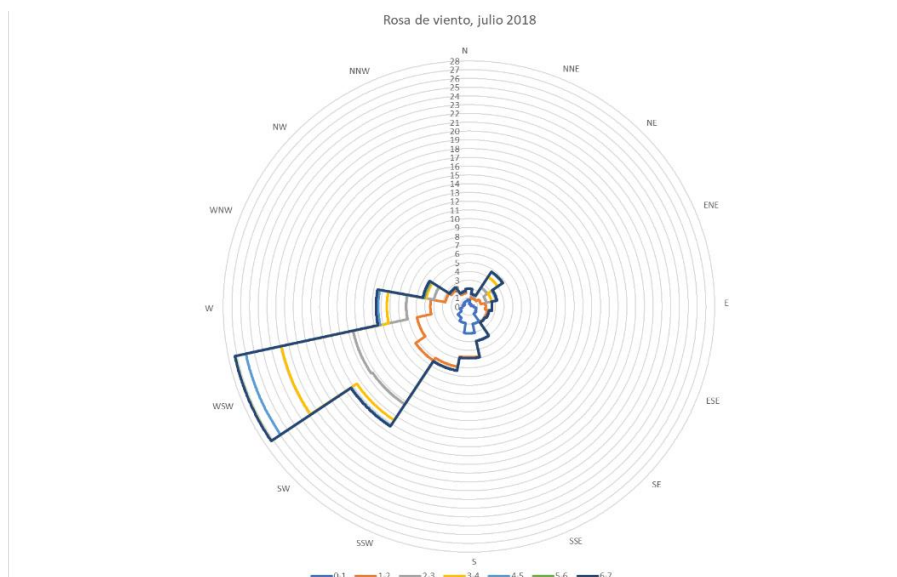


Figura 22. Rosa de vientos (mes de julio)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
WSW	247,5	3,42	3,16	1,31	30,94	29,16

Tabla 15. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de julio)

- **Agosto:** la dirección predominante sigue siendo WSW y su velocidad de 1,38 m/s. La temperatura media mide 33,68 °C y la humedad relativa es 30,09%.

	Dirección de viento	Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
	N	56	27	21	10	1	0	0	115
	NNE	8	41	22	11	4	0	0	86
	NE	18	30	46	59	13	4	0	170
	ENE	28	80	39	14	19	16	2	198
	E	43	91	36	2	0	0	0	172
	ESE	38	81	16	0	0	0	0	135
	SE	53	50	3	2	0	0	0	108
	SSE	76	51	6	3	0	0	0	136
	S	81	59	0	0	0	0	0	140
	SSW	68	70	9	0	0	0	0	147
	SW	63	101	26	20	8	2	0	220
	WSW	45	65	57	35	31	33	3	269
	W	38	65	49	29	8	3	0	192
	WNW	18	33	35	14	15	2	0	117
	NW	18	48	20	26	5	0	0	117
	NNW	29	35	20	7	5	0	0	96
	Total general	680	927	405	232	109	60	5	2418

Tabla 16. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de agosto)

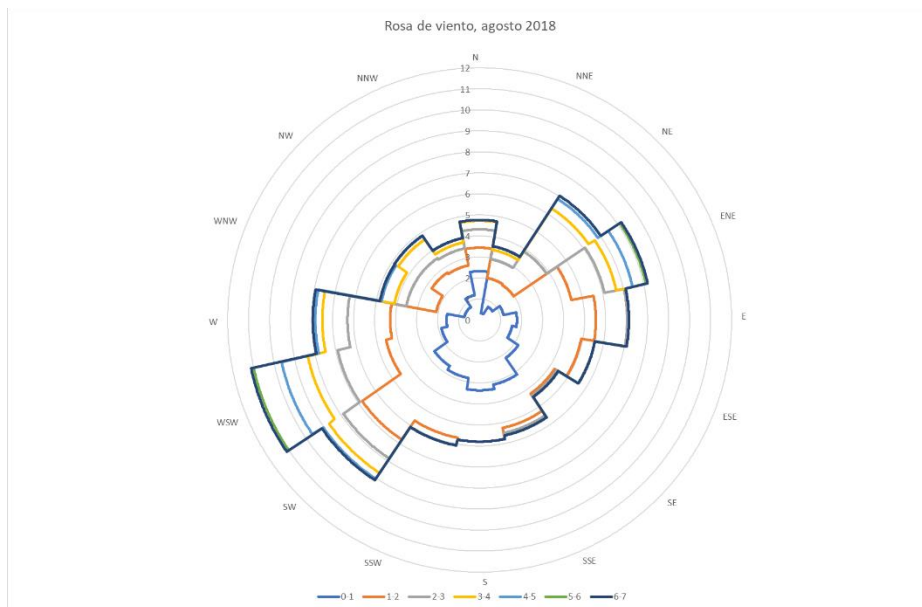


Figura 23. Rosa de vientos (mes de agosto)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
WSW	247,5	1,38	1,28	0,53	33,68	30,09

Tabla 17. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de agosto)

- **Septiembre:** Como se puede ver en la rosa de viento, las direcciones predominantes son este-noreste, este, sur-sureste, suroeste y oeste-sudoeste. Con la ayuda de la tabla de frecuencias, se puede afirmar que la dirección más predominante es el este, con una velocidad media de 1,45 m/s. La temperatura media es 26,77 °C y la humedad relativa de 39,13%.

		Categoría de velocidades							Total general
		1	2	3	4	5	6	7	
Dirección de viento	N	101	42	13	0	0	0	0	156
	NNE	9	32	9	3	0	0	0	53
	NE	19	45	65	23	1	0	0	153
	ENE	20	51	57	53	24	1	1	207
	E	40	89	67	12	3	2	0	213
	ESE	60	70	22	5	1	0	0	158
	SE	86	78	10	0	1	0	0	175
	SSE	108	81	25	1	0	0	0	215
	S	137	42	0	0	0	0	0	179
	SSW	101	46	4	0	0	0	0	151
	SW	72	106	28	6	0	0	0	212
	WSW	38	65	49	19	4	0	0	175
	W	31	47	25	7	1	0	0	111
	WNW	26	34	3	0	0	0	0	63
	NW	17	22	3	1	0	0	0	43
	NNW	15	39	20	2	0	0	0	76
Total general		880	889	400	132	35	3	1	2340

Tabla 18. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de septiembre)

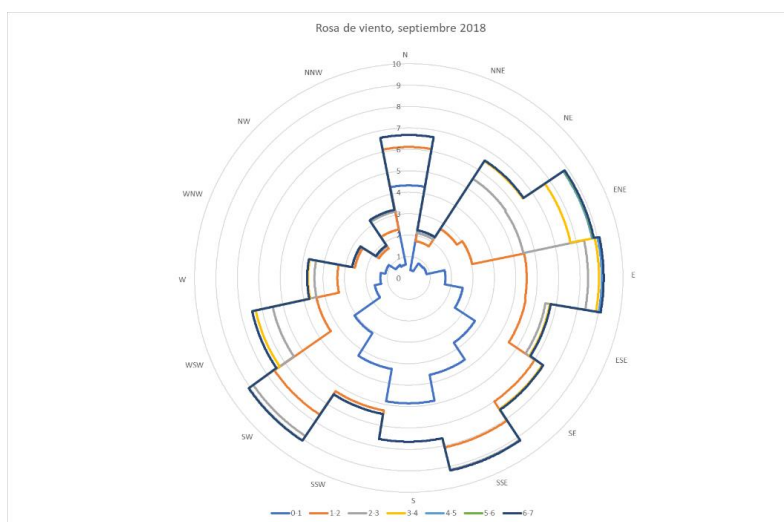


Figura 24. Rosa de vientos (mes de septiembre)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
E	90	1,45	1,45	0,00	26,77	39,13

Tabla 19. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de septiembre)

- **Noviembre:** la dirección del viento suroeste es la más predominante. La velocidad media predominante es 2,44m/s, la temperatura media y humedad son 10,89°C y 66,52% respectivamente.

		Categoría de velocidades								Total general
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Dirección de viento	N	36	10	4	0	0	0	0	0	50
	NNE	14	12	7	0	0	0	0	0	33
	NE	12	37	39	18	0	0	0	0	106
	ENE	40	70	80	11	0	0	0	0	201
	E	27	72	59	9	0	0	0	0	167
	ESE	27	38	27	15	0	0	0	0	107
	SE	33	28	5	0	0	0	0	0	66
	SSE	79	132	7	0	0	0	0	0	218
	S	83	71	1	0	0	0	0	0	155
	SSW	49	47	7	0	0	0	0	0	103
	SW	79	99	124	108	32	4	0	0	446
	WSW	46	74	65	70	60	11	0	0	326
	W	43	52	15	20	14	6	1	0	151
	WNW	21	29	8	5	9	12	7	3	94
	NW	28	16	11	8	3	0	0	0	66
	NNW	19	27	3	2	0	0	0	0	51
Total general		636	814	462	266	118	33	8	3	2340

Tabla 20. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de noviembre)

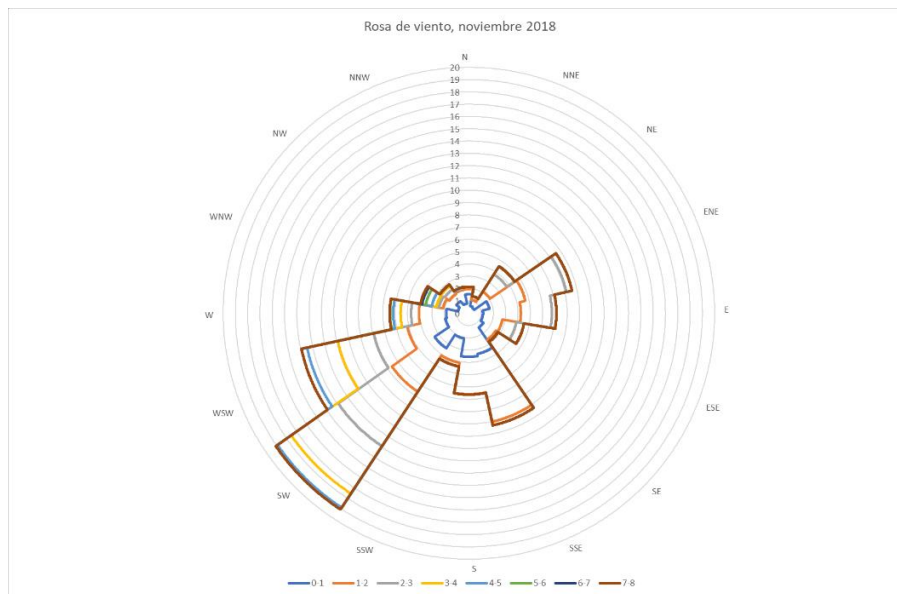


Figura 25. Rosa de vientos (mes de noviembre)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
SW	225	2,44	1,73	1,73	10,89	66,52

Tabla 21. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de noviembre)

- **Diciembre:** el viento predominante viene de la dirección sureste con una velocidad media de 0,59 m/s, la temperatura media mide 10,64°C y la humedad relativa es de 56,02%.

		Categoría de velocidades									Total general
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dirección de viento	N	151	22	0	0	0	0	0	0	0	173
	NNE	39	21	2	0	0	0	0	0	0	62
	NE	33	59	29	2	0	0	0	0	0	123
	ENE	55	38	42	15	2	0	0	0	0	152
	E	38	19	5	5	0	0	0	0	0	67
	ESE	14	9	2	0	0	0	0	0	0	25
	SE	24	1	0	0	0	0	0	0	0	25
	SSE	82	14	0	0	0	0	0	0	0	96
	S	175	30	0	0	0	0	0	0	0	205
	SSW	133	12	0	0	0	0	0	0	0	145
	SW	204	106	29	5	0	0	0	0	0	344
	WSW	151	57	23	14	7	8	5	0	0	265
	W	137	102	9	9	10	0	0	0	0	267
	WNW	54	43	26	27	30	20	15	8	5	228
	NW	57	48	1	6	4	0	0	0	0	116
	NNW	70	53	2	0	0	0	0	0	0	125
Total general		1417	634	170	83	53	28	20	8	5	2418

Tabla 22. Frecuencia de dirección de rosa de los vientos con 16 rumbos y categoría de velocidades (mes de diciembre)

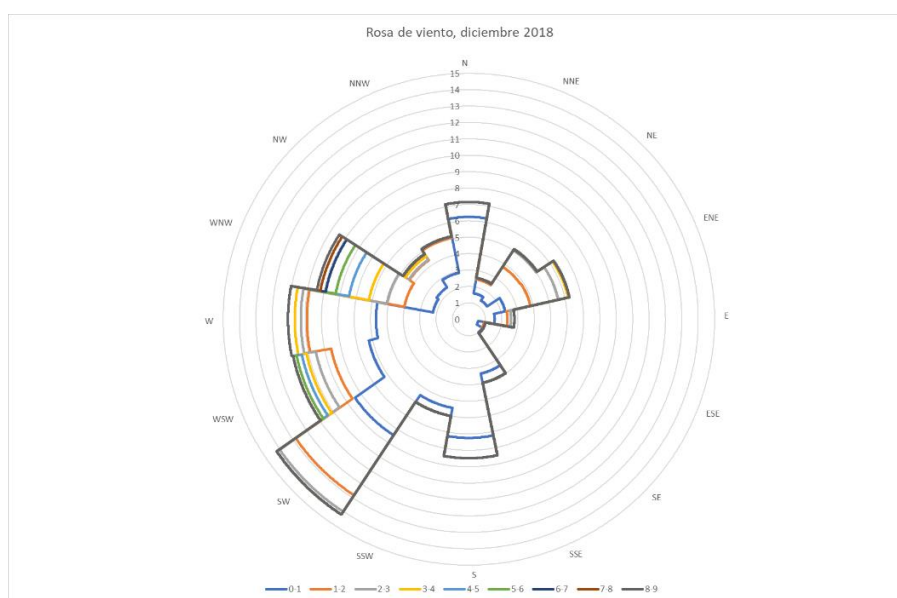


Figura 26. Rosa de vientos (mes de diciembre)

Dirección dominante	Dirección (grado)	Velocidad dominante media (m/s)	Vel. Eje X (m/s)	Vel. Eje Y (m/s)	Temperatura media (°C)	HR media (%)
SW	225	0,59	0,42	0,42	10,64	56,02

Tabla 23. Dirección y velocidad dominante del viento, temperatura y humedad relativa media (mes de diciembre)

El viento procedente del oeste-suroeste (WSW) es el más frecuente, seguido del viento del suroeste. Las velocidades medias de los once meses están entre los 0,59 m/s y los 4,45 m/s.

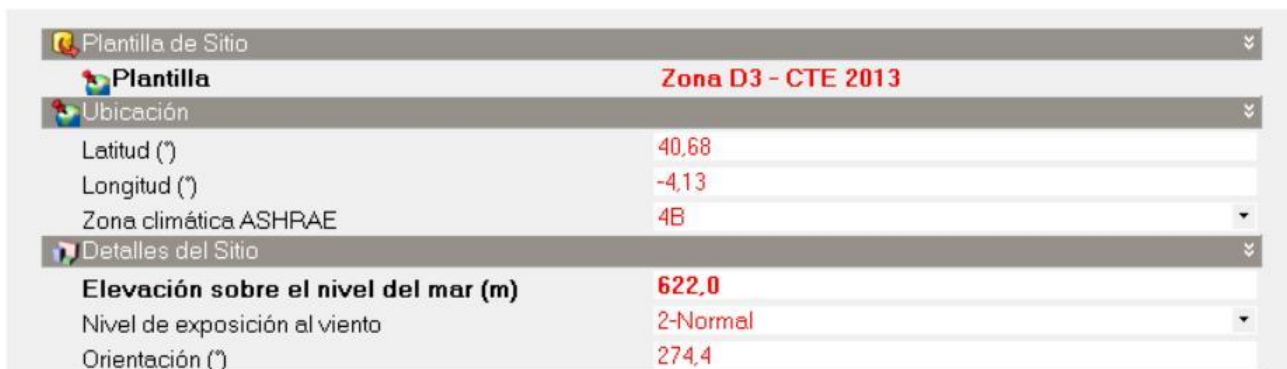
Una vez se obtienen las informaciones climatológicas más necesarias se analiza la CFD exterior, centrándose en los meses de febrero, marzo, mayo y diciembre. Ya que los meses de marzo y diciembre son los que tienen la mayor y menor velocidad de viento, 4,45 m/s y 0,59 m/s respectivamente; los meses de febrero y julio, porque son los periodos con la menor temperatura, 6,06°C, y el mes de mayo por unas características climáticas más severas.

4.3. MODELO DE SIMULACIÓN

Se emplea el programa de Design Builder para realizar las simulaciones, centrandose en los módulos de HVAC y CFD que permiten evaluar la demanda energética y el comportamiento de la ventilación.

4.3.1. Diseño del modelo

Se define los datos climáticos de la ubicación del proyecto, utilizando la plantilla de CTE específicamente la de la zona D3.



Plantilla de Sitio	
Plantilla	Zona D3 - CTE 2013
Ubicación	
Latitud (°)	40,68
Longitud (°)	-4,13
Zona climática ASHRAE	4B
Detalles del Sitio	
Elevación sobre el nivel del mar (m)	622,0
Nivel de exposición al viento	2-Normal
Orientación (°)	274,4

Figura 27. Datos del sitio en Design Builder

Se prepara el modelo 3D del edificio y los elementos de alrededor, considerando las dos plantas de la biblioteca como un bloque del edificio, y el resto de los elementos se representan como bloques de componentes. La colocación del resto del edificio de la escuela y otros edificios colindantes es para dar más realismo a los fenómenos de la ventilación natural en el exterior, y así obtener resultados más fiables (ver la figura 28).

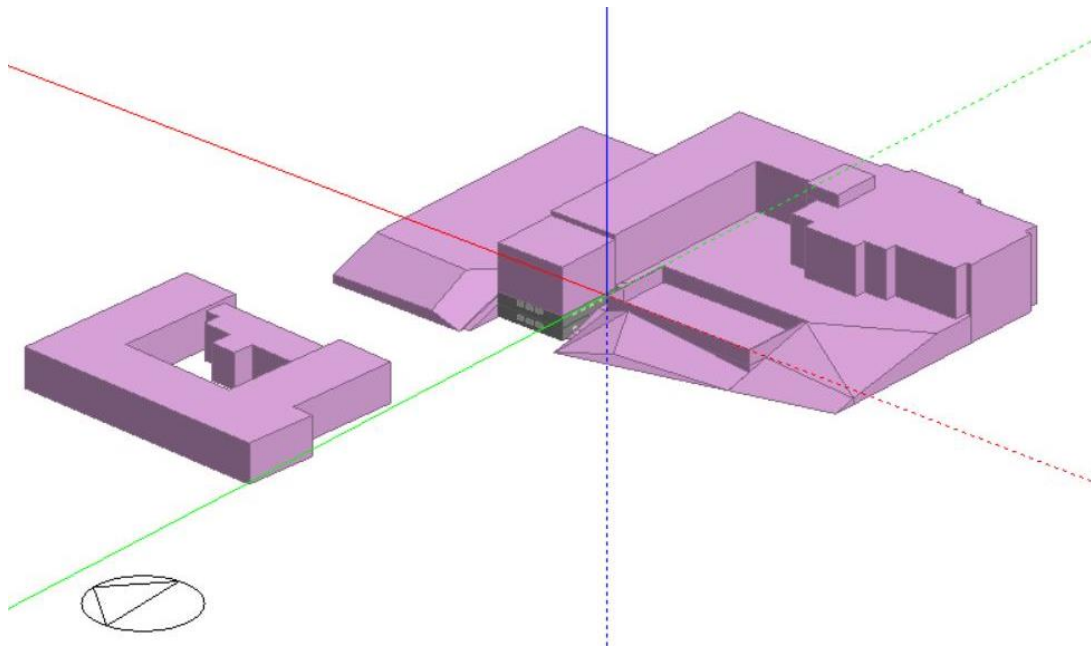


Figura 28. Geometría del edificio

- **Fachada**

La fachada de la escuela tiene un espesor total de 0,62 m, está compuesta por los siguientes elementos constructivos mostrados en la figura 29, que están colocados desde la capa más externa hasta a más interna.

En la siguiente tabla, se demuestra la composición de la fachada actual y el espesor de cada capa.

Materiales	Espesor (cm)
Aplacado de piedra caliza	3
Mortero	3
Fábrica de ladrillo	11,5
Cámara de aire	31
Material aislante: lana mineral	5
Tabiquería	7
Revestimiento interior: enfoscado y enlucido	1,5
	62

Tabla 24. Composición de fachada

En la siguiente imagen está presentada la configuración del muro exterior en Design Builder. De la capa exterior a la interior, con el tipo de material y el espesor correspondiente.

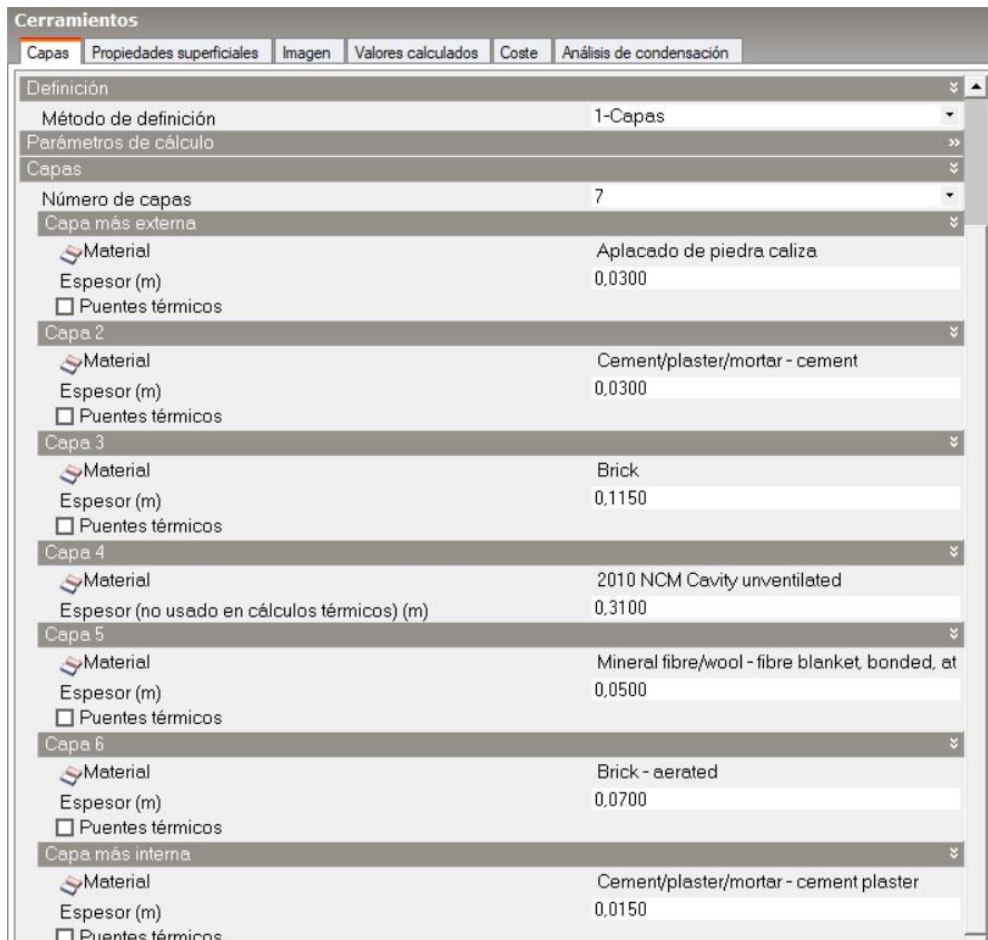


Figura 29. Configuración de la composición del muro exterior



Figura 30. Composición de fachada

Fachada	
Espesor (m)	0,62
Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	81,2316
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	2,207
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	2,207
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	0,491
Valor R (m ² K/W)	2,207
Valor U (W/m ² K)	0,453

Tabla 25. Valores característicos calculados por Design Builder (fachada)

**Tabla a-Anejo E. Transmitancia térmica del elemento,
U [W/m² K]**

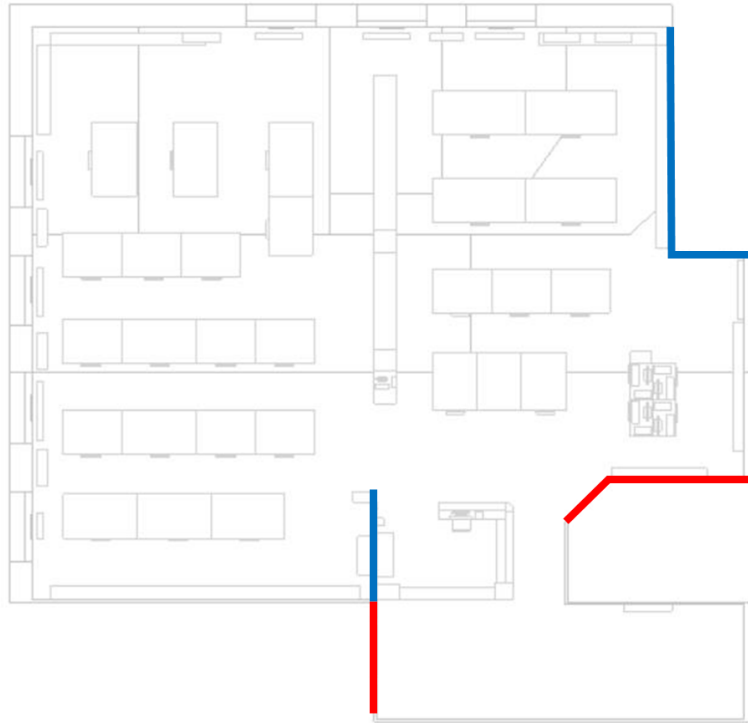
	Zona Climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior, U _M , U _S	0,56	0,50	0,38	0,29	0,27	0,23
Cubiertas en contacto con el aire exterior, U _C	0,50	0,44	0,33	0,23	0,22	0,19
Elementos en contacto con espacios no habitables o con el terreno, U _T	0,80	0,80	0,69	0,48	0,48	0,48
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana), U _H	2,7	2,7	2,0	2,0	1,6	1,5

Figura 31. Tabla a-Anejo E. Transmitancia térmica del elemento

La transmitancia térmica de la fachada actual es 0,453 W/m²K, la cual no cumple con el límite establecido en el Documento Básico HE del CTE para la zona climática D3: 0,27 W/m²K exigido en el Anejo E del Código Técnico de Edificación.

- **Partición interior**

Hay dos tipos de particiones interiores en la planta sótano 2 del estudio como está mostrado en la figura 32.



Partición interior tipo 1: ———

Partición interior tipo 2: ———

Figura 32. Particiones interiores en la planta sótano 2

Las particiones interiores del tipo 1 están compuestas por 3 capas con un espesor total de 10 cm como puede observar en la tabla 26.

Materiales	Espesor (cm)
Revestimiento interior: enfoscado y enlucido	1,5
Tabique	7
Revestimiento interior: enfoscado y enlucido	1,5
	10

Tabla 26. Composición de partición interior

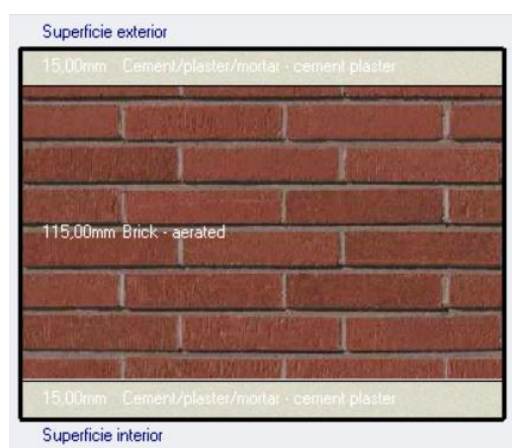


Figura 33. Composición de partición interior

Partición interior	
Espesor (m)	0,1
Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	51,576
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	2,207
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	0,535
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	3,636
Valor R (m ² K/W)	0,535
Valor U (W/m ² K)	1,869

Tabla 27. Valores característicos calculados por Design Builder (partición interior)

La partición interior del tipo 2 está formado solo por una capa de vidrio de 1 cm.

Partición interior (de vidrio)	
Espesor (m)	0,01
Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	10,5
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	0,27
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	0,27
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	105
Valor R (m ² K/W)	0,27
Valor U (W/m ² K)	3,71

Tabla 28. Valores característicos calculados por Design Builder (partición interior de vidrio)

- **Huecos**

Las ventanas de la biblioteca tienen una superficie de 2,6 m², están compuesta de 3 hojas, y solo la hoja central es practicable que permite la ventilación natural.

Las ventanas V1, V2 y V3 están situadas en la fachada oeste de la biblioteca, y las ventanas V4, V5, V6 y V7 están en la fachada orientada hacia sur.

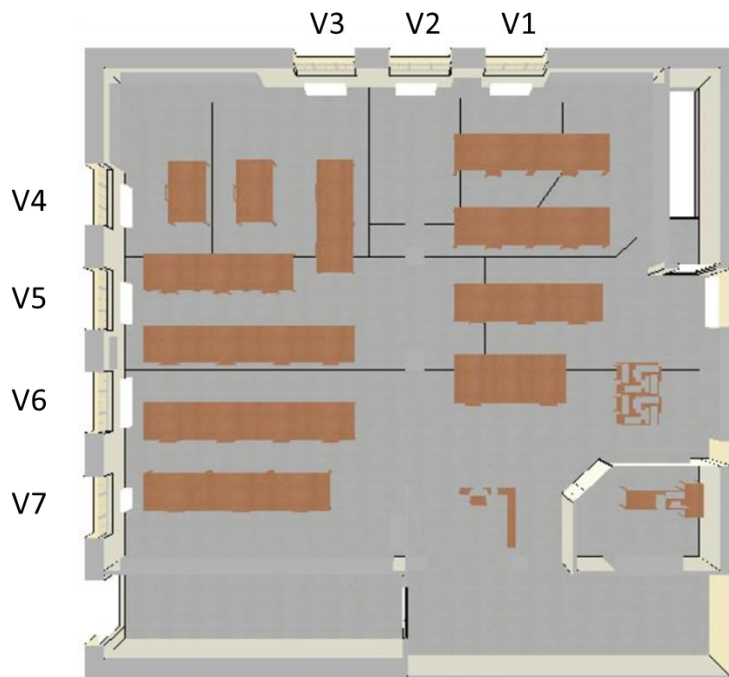


Figura 34. Localización de las ventanas en la planta sótano 2

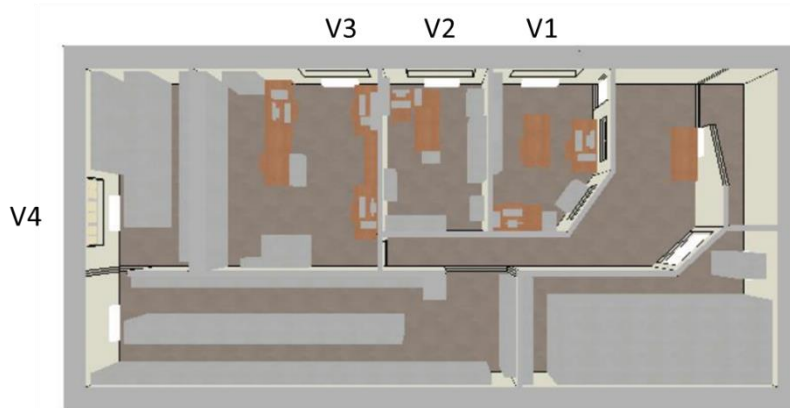


Figura 35. Localización de las ventanas en la planta sótano 3

- **Acristalamiento**

La ventana del modelo inicial está formada por un acristalamiento de 2 vidrios y una cámara del aire.

Materiales	Espesor (cm)
Vidrio Generic PYR B CLEAR	0,3
Cámara del aire	1,3
Vidrio Generic CLEAR	0,3
	1,9

Tabla 29. Composición de la hoja de la ventana

Acristalamiento	
Transmisión solar total (SHGC)	0,691
Transmisión solar directa	0,624
Transmisión de luz	0,744
Valor U (ISO 10292/EN 673) (W/m ² K)	1,924
Valor U (W/m ² K)	1,96

Tabla 30. Valores característicos calculados por Design Builder (acristalamiento)

- **Marco**

El marco de la ventana está compuesto por material de PVC de color blanco.

Marco de la ventana	
Espesor (m)	0,05
Km – capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	12,51
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	0,288
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	0,288
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	8,5
Valor R (m ² K/W)	0,288
Valor U (W/m ² K)	3,476

Tabla 31. Valores característicos calculados por Design Builder (marco)

4.3.2. CFD

En la parte de la simulación CFD se divide en dos partes. En la primera etapa trata de hacer el CFD exterior para calcular las velocidades del aire de entrada de cada ventana, y en base de estas informaciones obtenidas se realizar la segunda etapa de simulación con el CFD interior para ver el estado de la ventilación interior de las zonas interesadas.

4.3.2.1. CFD exterior

Aunque se conoce la velocidad dominante de cada mes, sin embargo, las velocidades del viento que entran por cada hueco no son homogéneas. Se realizan las simulaciones CFD exterior con todo el edificio y los elementos del entorno se pueden obtener las velocidades del aire concretos correspondientes a cada ventana. La forma más adecuada es obtener la media de varios datos por cada hueco, pero debido a la dimensión del edificio se ha establecido una malla con un espaciamiento de 2 m para obtener una convergencia en un tiempo razonable, genera solo un valor por ventana.

Nuevo Análisis Externo	
Datos	
Plantilla de Opciones	
Nombre	Mes Febrero
Análisis CFD Externo	
Tipo de malla	1-No uniforme
Espaciamiento de malla (m)	2,000
Límite inferior de separación de líneas...	0,5000
Viento	
Velocidad (m/s)	3,39
Dirección (°)	45
Exposición	2-Suburbano
Factores del Dominio	
Factor de longitud	1,50
Factor de anchura	1,50
Factor de altura	1,50

Figura 36. Configuración CFD exterior

Se procede a genera un corte vertical en el plano por cada hueco como demostrado en la figura 37, y se exporta los resultados del plano de corte en formato Excel. Los datos ofrecidos tienen 3 coordenadas: X, Y del plano de corte, y Z se corresponde a la velocidad del aire de cada punto.

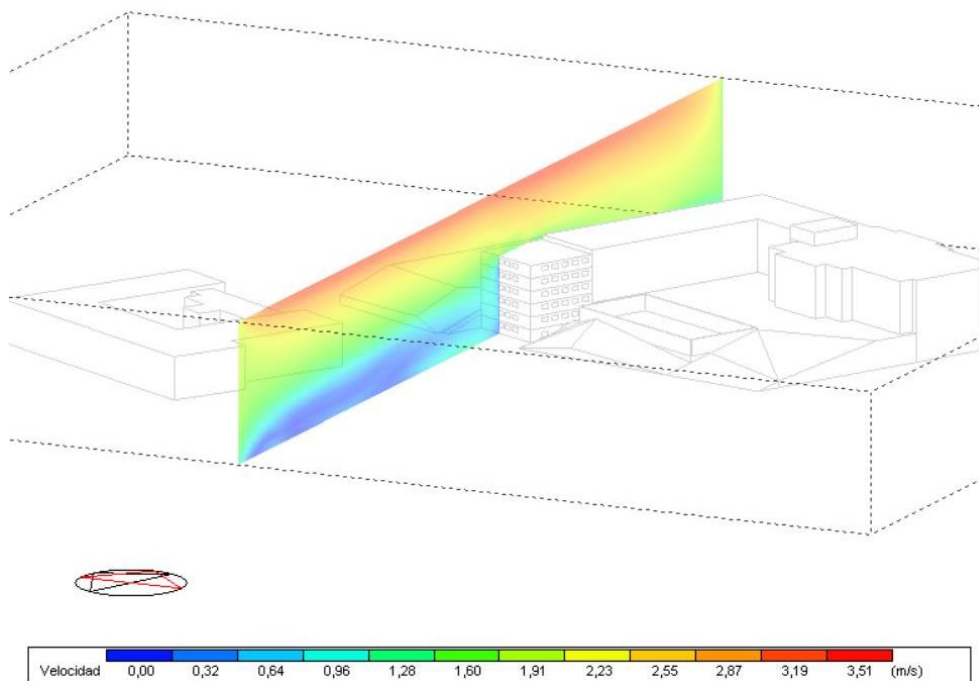


Figura 37. Corte vertical por la ventana V1 (mes de mayo)

Sabiendo las coordenadas de cada punto exportados, se pasan estas informaciones en un plano de Autocad (ver la figura 39), donde se eliminan los puntos con velocidad = 0, que son los que se encuentran en el interior del edificio. Una vez se eliminan los puntos con coordenada Z=0, se selecciona el punto cercano a la fachada en dos alturas: altura igual a 4,85 m que corresponde a una altura del sótano 2, y la altura igual a 2,02 correspondiente a la altura del sótano 3.

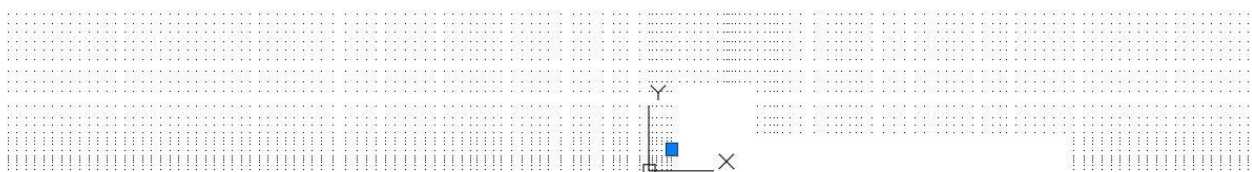


Figura 38. Los puntos del corte introducidos en Autocad

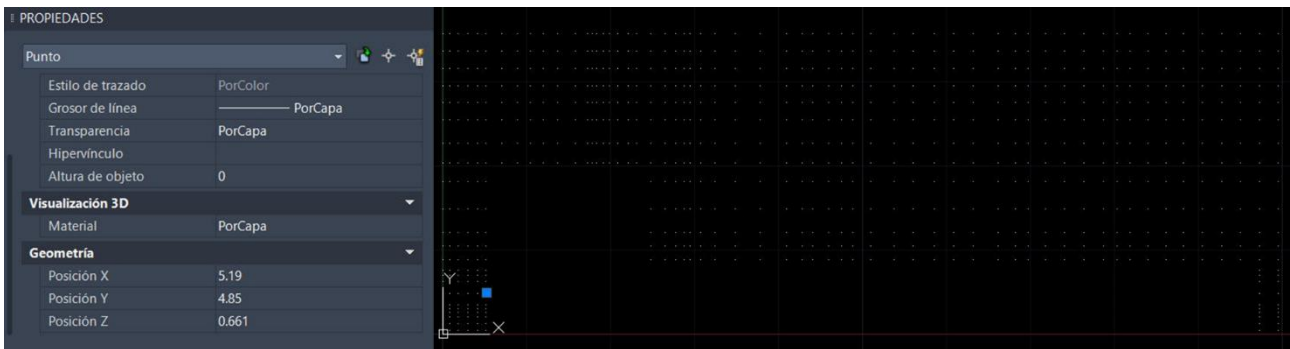


Figura 39. Obtención de velocidades en puntos geométricos de interés

De esta manera, se obtiene los valores específicos de las velocidades de aire por cada ventana, y están demostrados en las siguientes tablas inferior (la tablas 32, 34, 36 y 38).

Conociendo el área del hueco (superficie =0,816m²), se puede calcular el caudal de aire que entran multiplicando el área de la ventana por la velocidad del aire (las tablas 33, 35, 37 y 39).

- Febrero

	Velocidad del viento (m/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	0,248	0,3215	0,486	0,28	0,13	0,016	0,006
Planta sótano 3 H=2,02m	0,195	0,3265	0,348	0,0468			

Tabla 32. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de febrero)

	Caudal de aire (l/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	202,368	262,344	396,576	228,48	106,08	13,056	4,896
Planta sótano 3 H=2,02m	159,12	266,424	283,968	38,1888			

Tabla 33. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de febrero)

- Marzo

	Velocidad del viento (m/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	1,261	0,958	1,099	0,712	0,335	0,063	0,175
Planta sótano 3 H=2,02m	0,935	0,559	0,646	0,3245			

Tabla 34. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de marzo)

	Caudal de aire (l/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	1028,976	781,728	896,784	580,992	273,36	51,408	142,8
Planta sótano 3 H=2,02m	762,96	456,144	527,136	264,792			

Tabla 35. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de marzo)

- Mayo

	Velocidad del viento (m/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	0,661	0,52	0,577	0,384	0,192	0,084	0,097
Planta sótano 3 H=2,02m	0,464	0,284	0,317	0,1975			

Tabla 36. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de mayo)

	Caudal de aire (l/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	539,376	424,32	470,832	313,344	156,672	68,544	79,152
Planta sótano 3 H=2,02m	378,624	231,744	258,672	161,16			

Tabla 37. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de mayo)

- Diciembre

	Velocidad del viento (m/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	0,007	0,0055	0,01	0,023	0,033	0,015	0,002
Planta sótano 3 H=2,02m	0,009	0,0105	0,01	0,0115			

Tabla 38. Velocidad del aire (m/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de diciembre)

	Caudal de aire (l/s)						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Planta sótano 2 (H=4,85m)	5,712	4,488	8,16	18,768	26,928	12,24	1,632
Planta sótano 3 H=2,02m	7,344	8,568	8,16	9,384			

Tabla 39. Caudal del aire (l/s) por cada ventana en distintas alturas (mes de diciembre)

4.3.2.1.1. Consideraciones

Analizando los resultados obtenidos, se observa que en general la velocidad del aire en la altura superior es mayor que la planta inferior, salvo el mes de diciembre.

En general, los vientos que entra por la fachada paralela a la calle Arquitecto López Otero son más fuertes que la otra fachada, salvo los meses de julio y diciembre.

En la fachada orientada hacia sur, la velocidad del viento en las zonas cercana de V6 y V7 son menores que las demás, ya que la presencia del patio de baloncesto obstaculiza la entrada del aire, y V4 es la ventana con la mejor condición de ventilación.

En la fachada con la orientación oeste, la ventana que proporciona mayor caudal entrante es V1 en los meses de marzo y mayo. En los periodos de febrero y diciembre, la ventana V3 tiene la mayor velocidad.

4.3.2.2. CFD interior

En este apartado se realiza el cálculo de CFD interior de los distintos espacios de la biblioteca.

El primer paso es asignar caudal entrante de cada hueco en la pestaña de “edición con los datos obtenidos en la simulación exterior (ver las tablas 33, 35, 37 y 39), también en la misma ventana se introduce la temperatura del aire del mes correspondiente para iniciar el proceso de cálculo.

Una vez se alcanza la convergencia de la simulación, se inicia el cálculo de la antigüedad del aire, con un erro residual de 0,001.

En la tabla 40 presenta los datos necesarios como las temperaturas medias y humedades relativas para la simulación de CFD interior.

	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Febrero	6,06	47,11
Marzo	9,44	59,48
Mayo	21,6	37,39
Diciembre	10,64	56,02

Tabla 40. Temperatura y humedad relativa de los meses de análisis

La figura 40 muestra una ventana de configuración de las condiciones de contorno CFD, donde se requiere equilibrar los caudales del aire entrante y saliente por cada hueco para poder iniciar el proceso de cálculo de las condiciones interiores correctamente. Estas cantidades de aire son obtenidas en el apartado anterior (cálculo de CFD exterior).

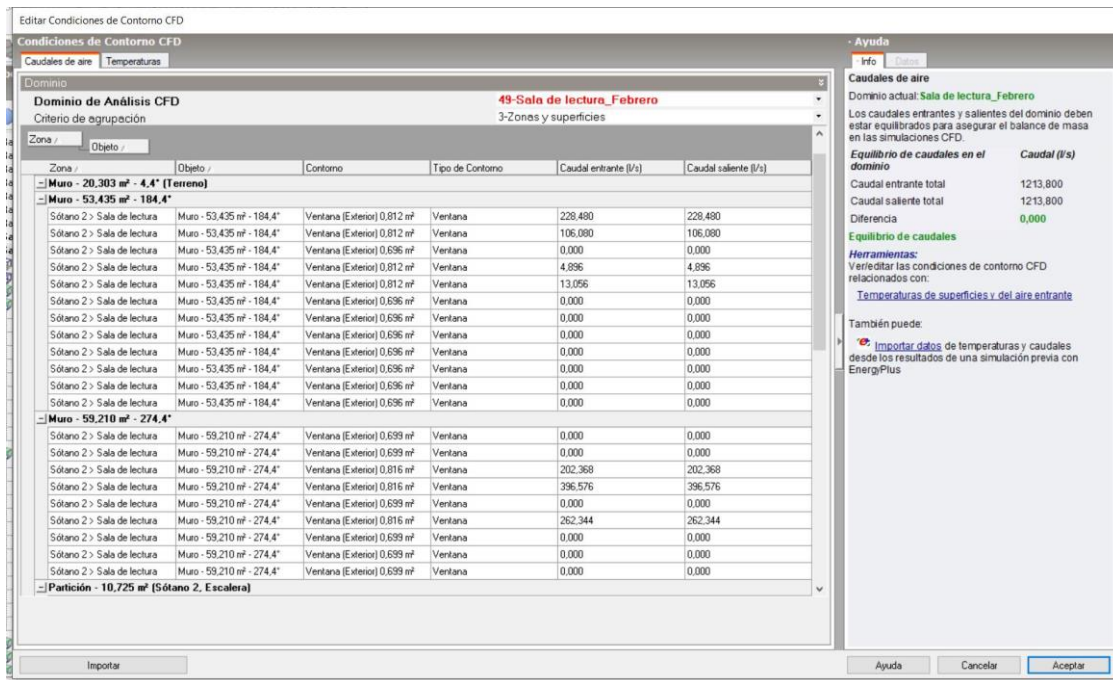


Figura 40. Condiciones de contorno CFD

La siguiente imagen presenta el diagrama de los residuos, en el que se tiene que alcanzar un valor residual de 10^{-2} para poder lograr una solución más fiable.

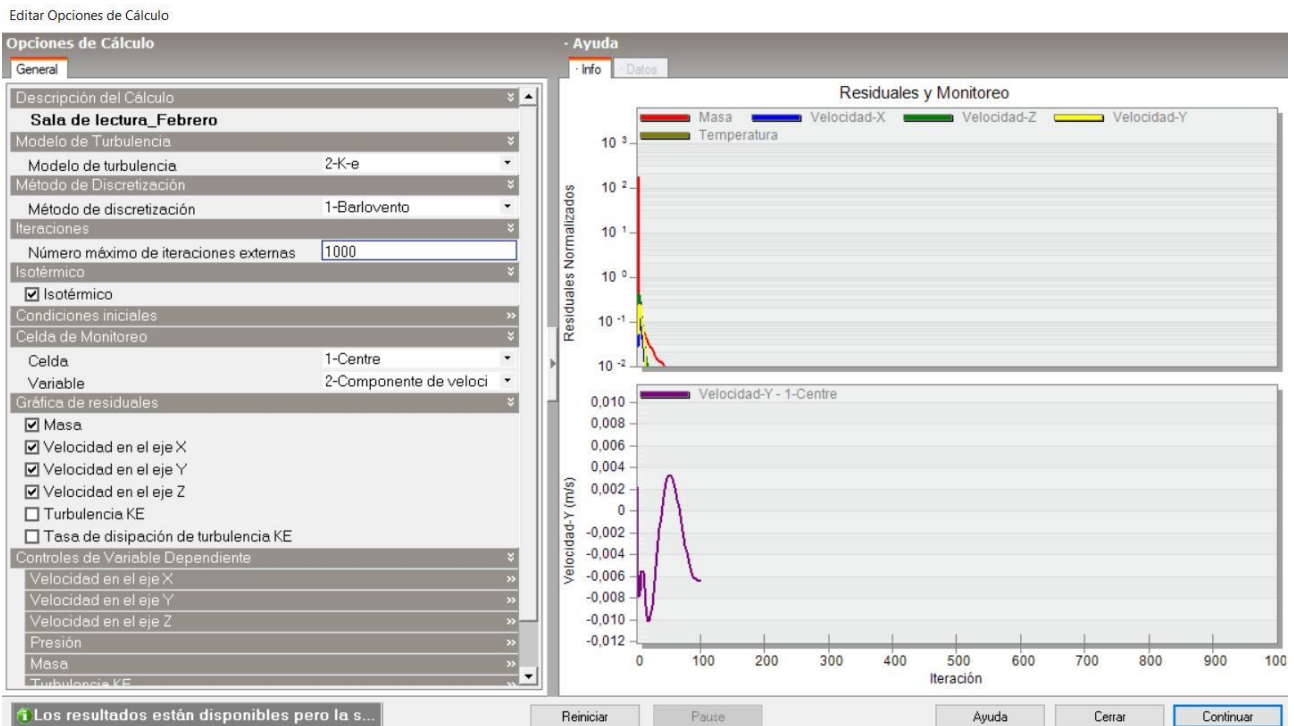


Figura 41. Opciones de cálculo de velocidad de aire

4.3.2.2.1. Planta sótano 2: Sala de lectura

La sala principal de la biblioteca consta de unas 28 mesas de estudio, unas 27 sillas, cuatro puestos de ordenadores, un puesto de recepción para el bibliotecario y una sala con un ordenador para realizar las consultas.

Esta sala cuenta con 9 radiadores. 7 de ellos están situados por debajo de las ventanas, uno está cerca de los puestos de ordenadores y otro está localizado en la zona de entrada de la biblioteca. También están los seis aires acondicionados situados en las dos fachadas con ventanas.

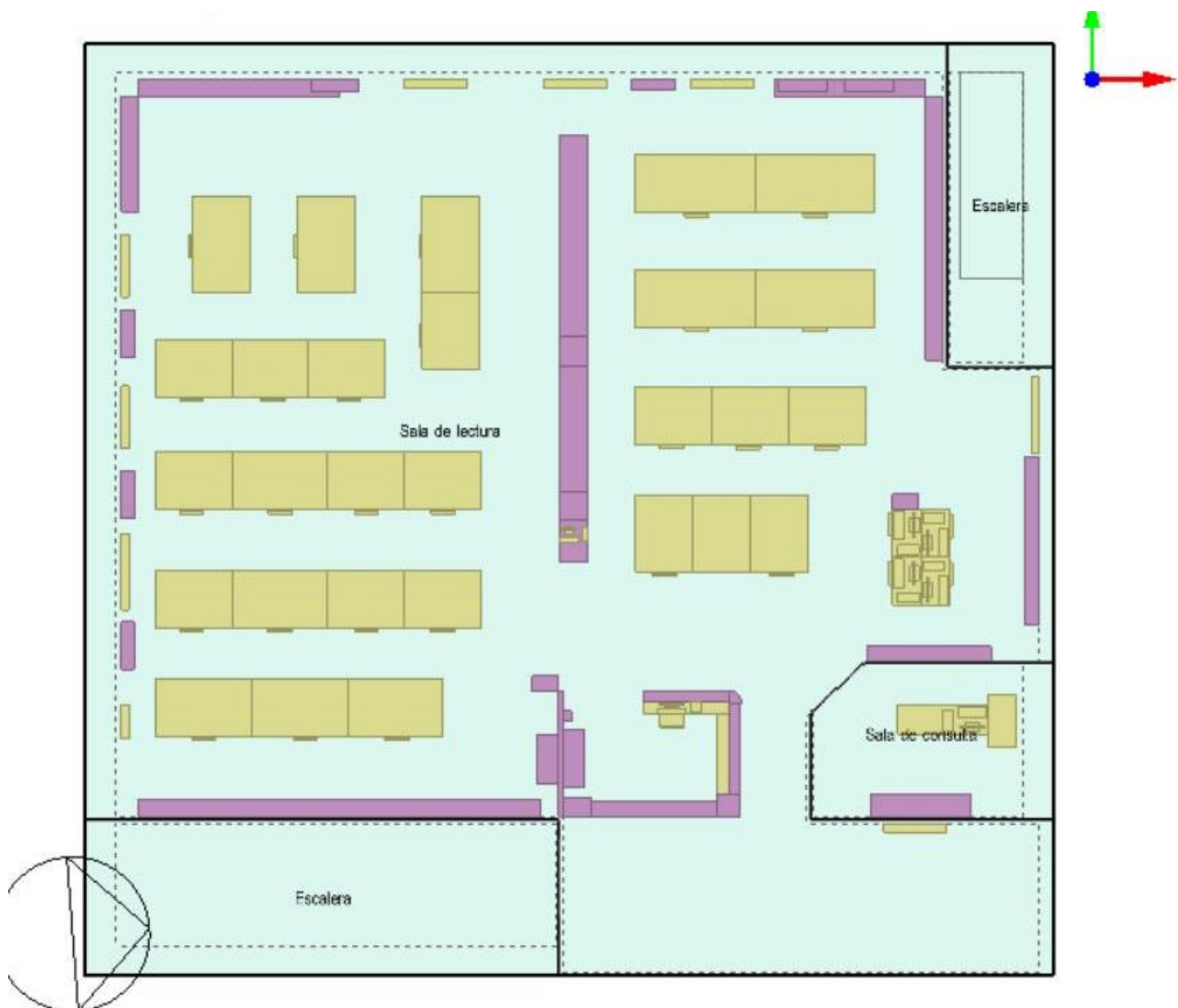


Figura 42. Distribución de la planta sótano 2

En la siguiente imagen en perspectiva se puede apreciar la altura de los elementos incluidos en la sala principal de la biblioteca.

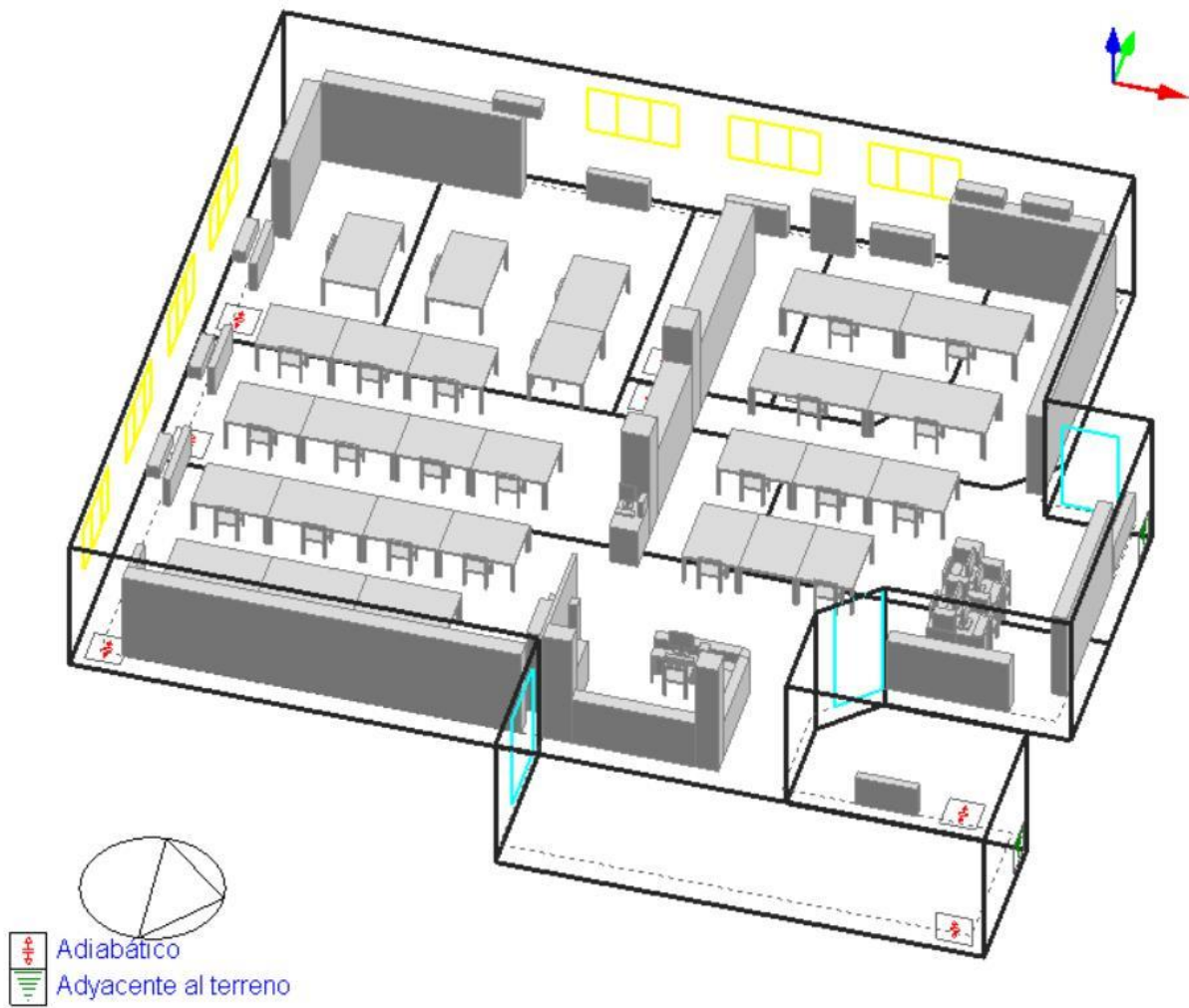


Figura 43. Modelo 3D de la sala de lectura

- Velocidad del aire

Las siguientes figuras muestran las velocidades del aire de los meses de febrero, marzo, mayo y diciembre en la sala de lectura. Se puede observar que marzo es el mes que cuenta con una mayor velocidad de aire, sobre todo en las zonas cercanas de las ventanas orientadas hacia la calle. El mes de diciembre es el peor ventilado.

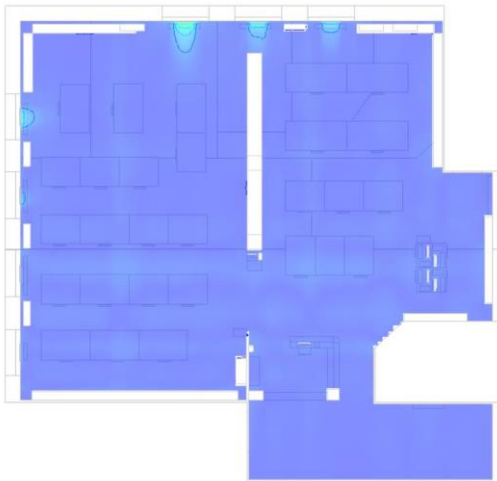


Figura 44. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de febrero)

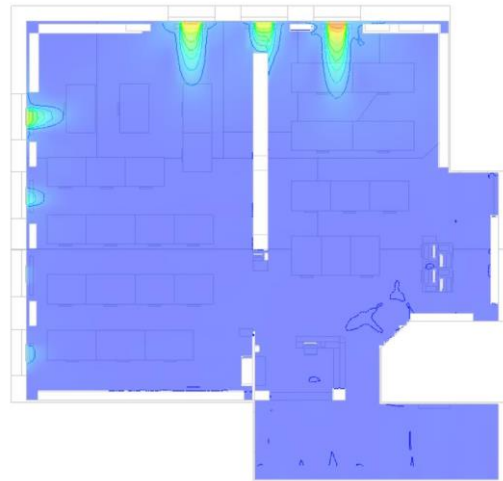


Figura 45. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de marzo)



Figura 46. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de mayo)

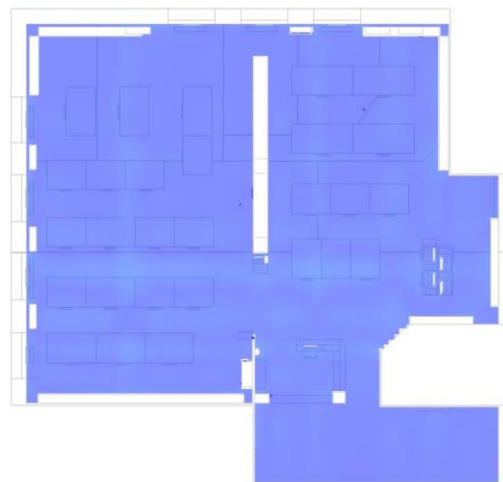


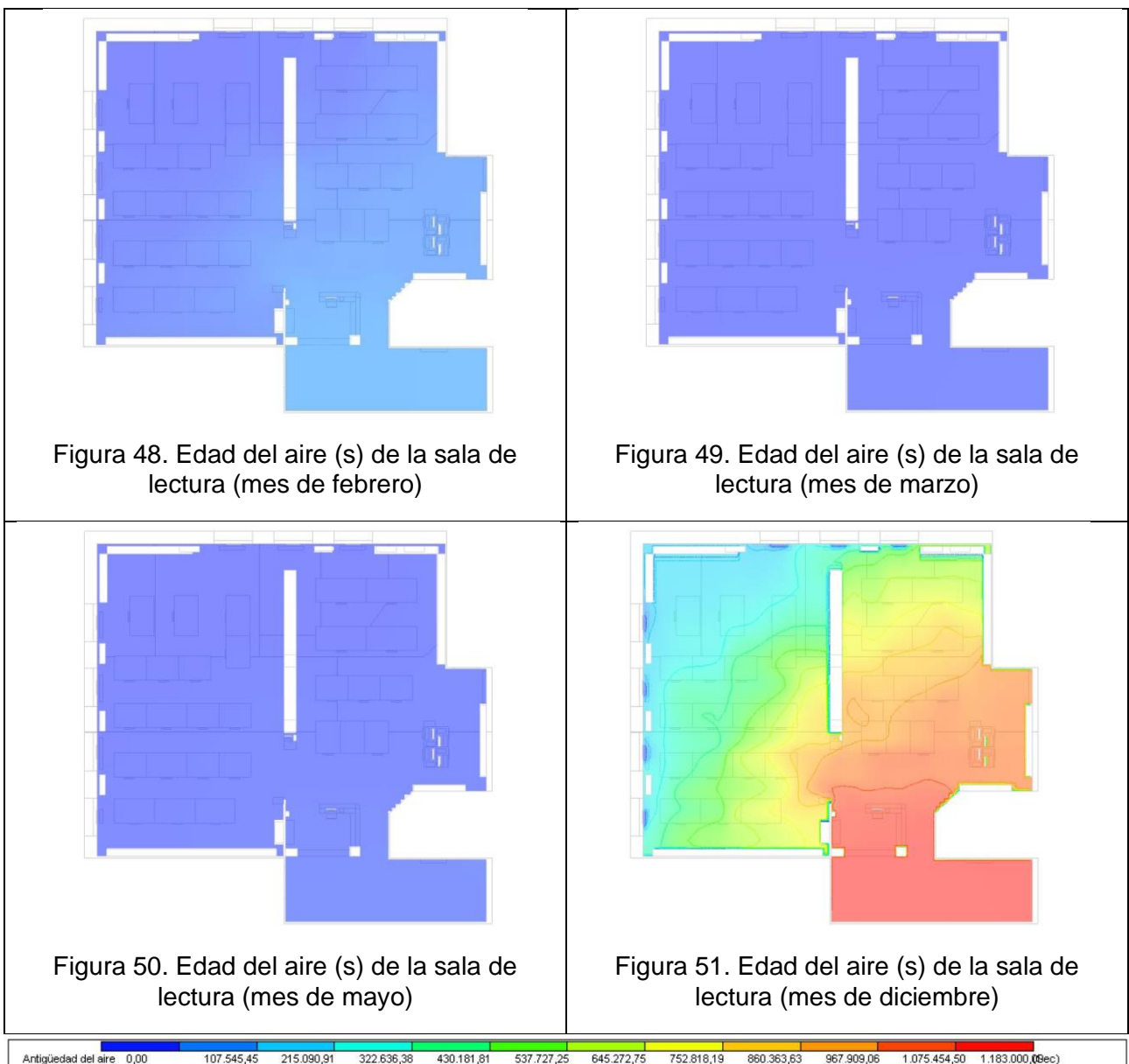
Figura 47. Velocidad del aire (m/s) de la sala de lectura (mes de diciembre)



- Edad del aire

Los resultados de la edad del aire concuerdan con las velocidades del aire de los meses analizados. El mes que cuenta con una mayor velocidad de aire tiene una edad de aire menor, mientras que el periodo menos ventilado cuenta con una edad de aire mayor.

La edad del aire es muy variada en las distintas zonas de la sala. Se puede observar que el aire que se encuentra en los espacios cercanos de las ventanas es más fresco y, por el contrario, más estanco en los espacios lejanos de los huecos.



- Índice PMV

Los resultados de PMV presentan un nivel de insatisfacción respecto al confort térmico, ya que están fuera del rango de -1 y 1. Se puede ver que las zonas cercanas de las ventanas y las mesas muestran un mayor grado de discomfort.

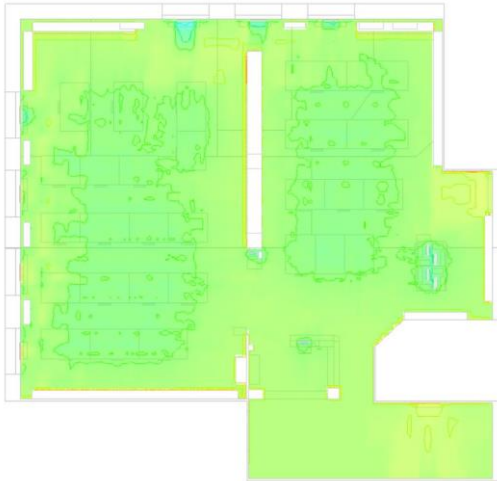


Figura 52. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de febrero)

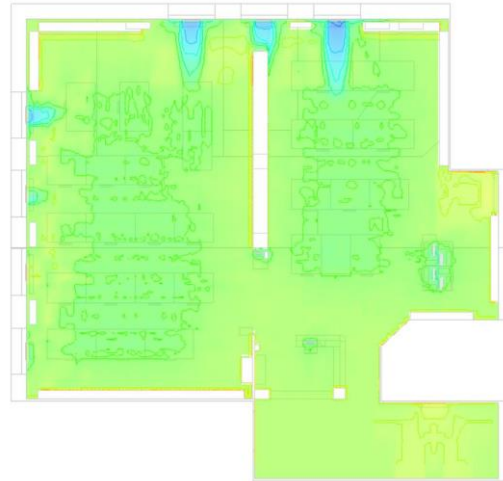


Figura 53. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de marzo)

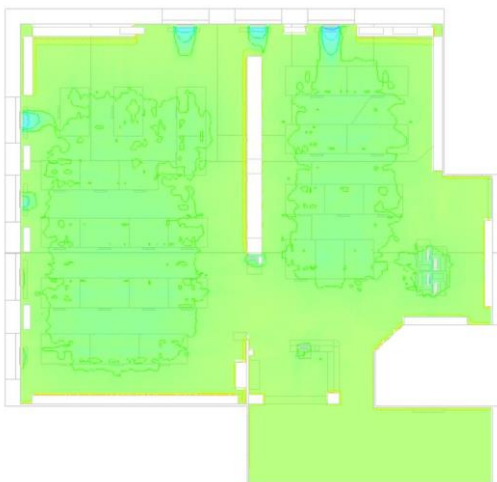


Figura 54. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de mayo)

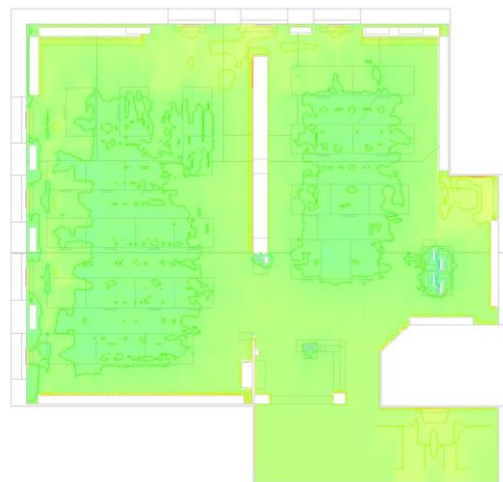


Figura 55. Confort CFD: PMV de la sala de lectura (mes de diciembre)



- Índice PPD

Las siguientes figuras presentan los resultados de PPD de los cuatros meses analizados. Se puede observar que todos presentan un porcentaje de insatisfechos muy alto, con un valor de casi 100%.

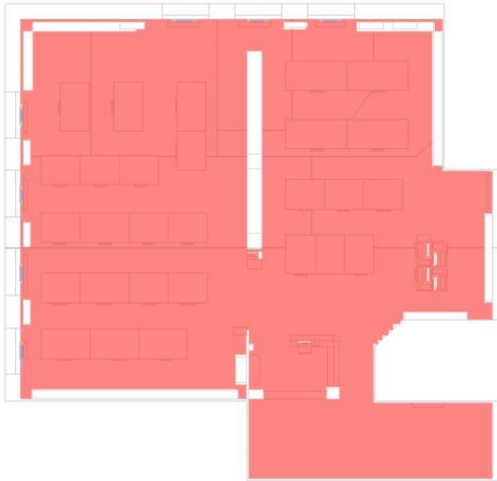


Figura 56. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de febrero)

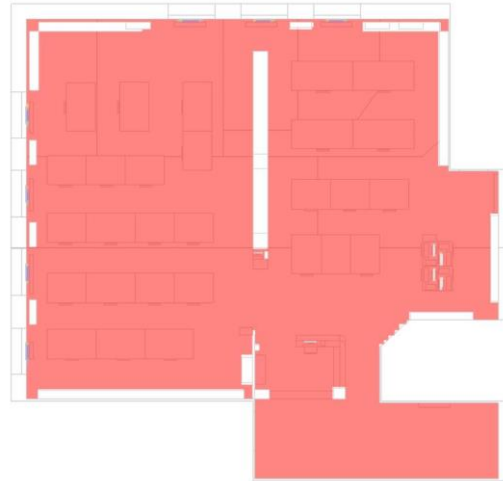


Figura 57. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de marzo)



Figura 58. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de mayo)

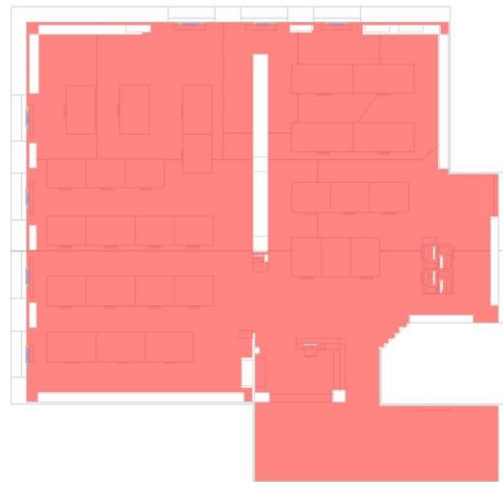


Figura 59. Confort CFD: PPD de la sala de lectura (mes de diciembre)



4.3.2.2.2. Planta sótano 3: repositorio y despachos

En la planta sótano 3 se encuentran 3 despachos y el resto de los espacios están destinados al repositorio.

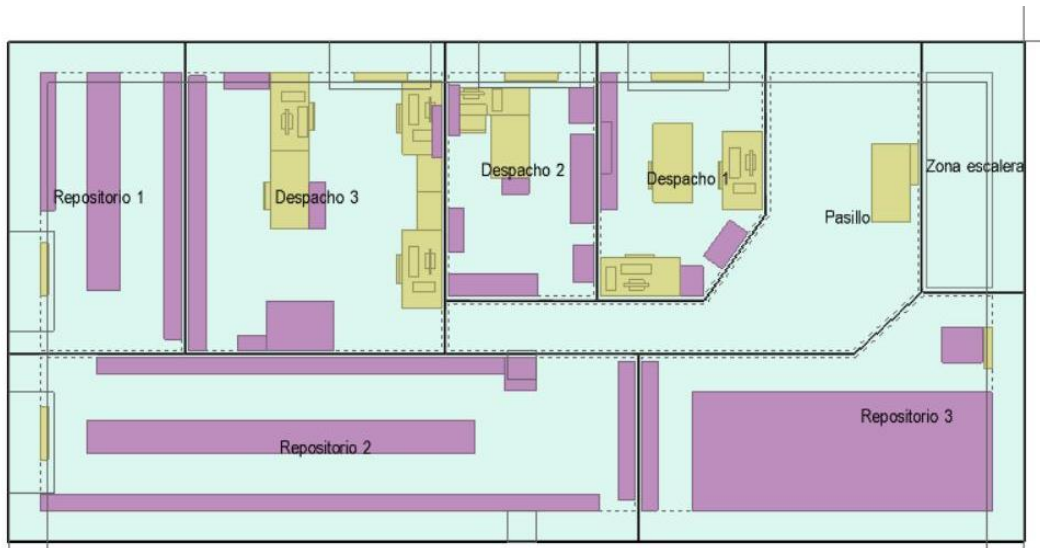


Figura 60. Planta sótano 3 representada en Design Builder

En la siguiente figura puede observar la vista axonométrica de la planta sótano 3, donde permite identificar mejor los mobiliarios y sus alturas.



Figura 61. Modelo 3D de la planta sótano 3

Esta planta representada se centra en analizar las tres oficinas de bibliotecarios, ya que son lugares donde suelen estar trabajando.

4.3.2.2.2.1. Despacho 1

El despacho 1 está localizado cerca de la escalera. Cuenta con 2 puestos de trabajo y una mesa en la zona central del despacho.

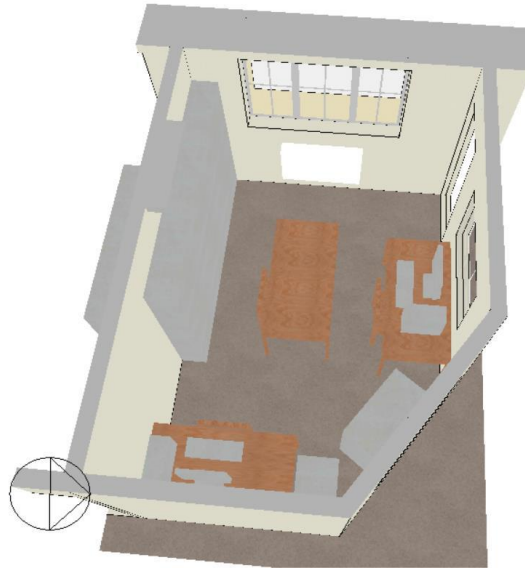


Figura 62. Modelo 3D del despacho 1

- Velocidad del aire

En las siguientes figuras se presentan las velocidades del aire de los meses de febrero, marzo, mayo y diciembre. Se puede observar que el aire se mueve con mayor velocidad en el mes de marzo, mientras que diciembre es el mes con menor velocidad del aire.



Figura 63. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de febrero)

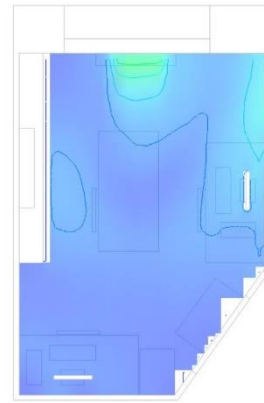


Figura 64. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de marzo)



Figura 65. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de mayo)



Figura 66. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1 (mes de diciembre)



- Edad del aire

Los resultados de la edad del aire concuerdan con los de la velocidad del aire, ya que el mes con una mejor ventilación presenta una edad de aire menor, y el mes peor ventilado tiene una antigüedad de aire mayor porque el aire es más estancado. La zona con la peor calidad de aire se encuentra en el rincón lejos de la ventana y la puerta.

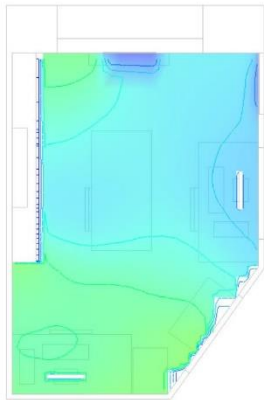


Figura 67. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de febrero)



Figura 68. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de marzo)



Figura 69. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de mayo)

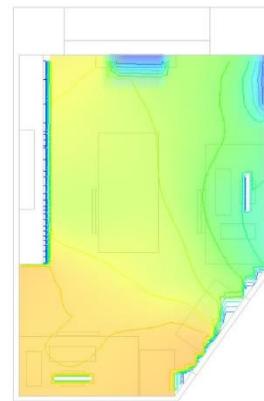
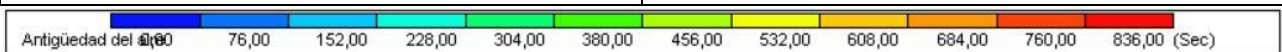


Figura 70. Edad del aire (s) del despacho 1 (mes de diciembre)



- Índice PMV

Los resultados de PMV obtenidos están fuera del rango de confort. El mes de marzo es el que presenta un disconfort mayor, sobre todo en las zonas cercanas de la ventana y la puerta, y esto puede deberse a un mayor caudal del aire entrante.



Figura 71. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de febrero)



Figura 72. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de marzo)



Figura 73. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de mayo)



Figura 74. Confort CFD: PMV del despacho 1 (mes de diciembre)



- Índice PPD

Los resultados de los índices PPD tienen un valor del 100% en la mayoría del espacio del despacho. Salvo las zonas cercanas de la ventana que tienen un valor inferior al 50%.



Figura 75. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de febrero)

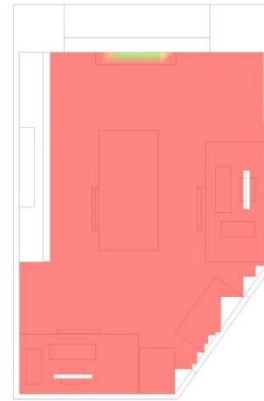


Figura 76. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de marzo)



Figura 77. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de mayo)

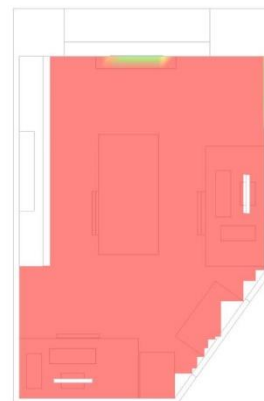


Figura 78. Confort CFD: PPD del despacho 1 (mes de diciembre)



4.3.2.2.2. Despacho 2

El despacho 2 es un despacho individual, está formado por una mesa de trabajo, una silla y unos armarios de almacenamiento.

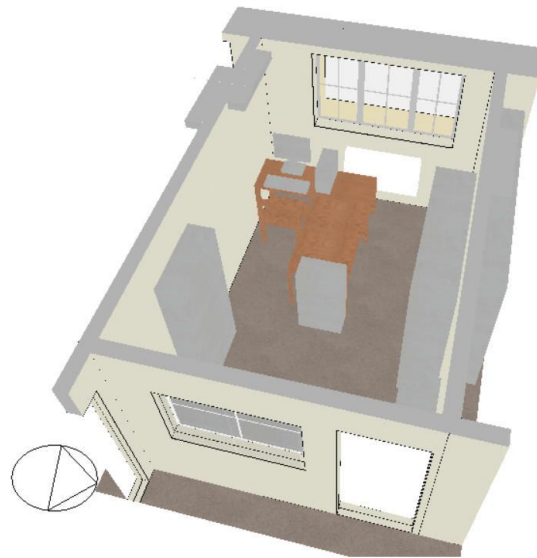


Figura 79. Modelo 3D del despacho 2

- Velocidad del aire

Las siguientes imágenes muestran las velocidades del aire en el despacho 2. En el mes de marzo tiene una mayor velocidad, sobre todo en las zonas en las que hay huecos.

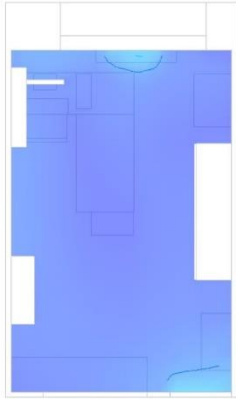


Figura 80. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de febrero)



Figura 81. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de marzo)

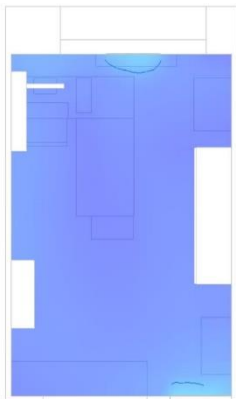


Figura 82. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de mayo)

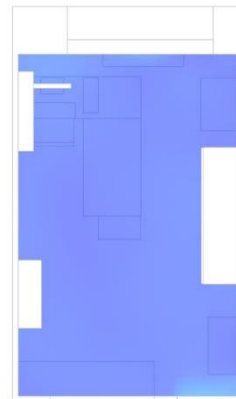
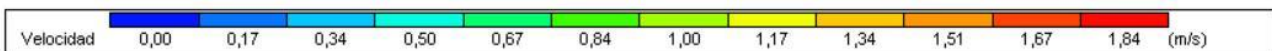


Figura 83. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2 (mes de diciembre)



- Edad del aire

La antigüedad del aire es menor en marzo. El mes de diciembre presenta una edad del aire mayor ya la velocidad y caudal de aire es menor en este mes. Dentro del recinto del despacho 2, la zona con una mejor calidad de aire se encuentra en la zona de la mesa.

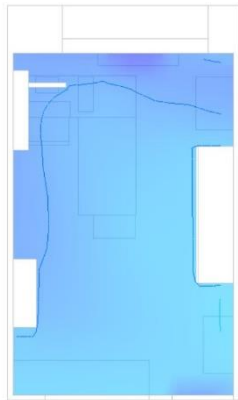


Figura 84. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de febrero)



Figura 85. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de marzo)

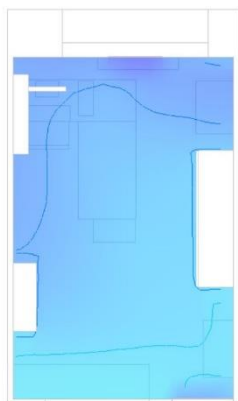


Figura 86. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de mayo)

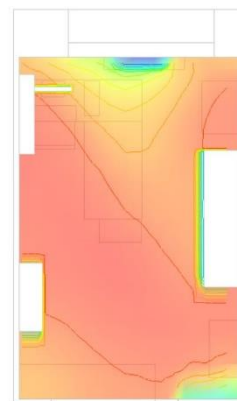
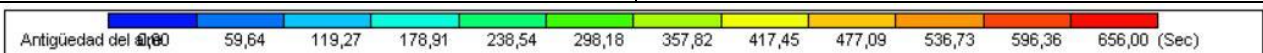


Figura 87. Edad del aire (s) del despacho 2 (mes de diciembre)



- Índice PMV

El índice de PMV del mes de diciembre es el peor por ser un ambiente con una sensación térmica bastante fría. Los resultados de los otros tres meses son muy similares, y presentan unos valores menores que en diciembre.

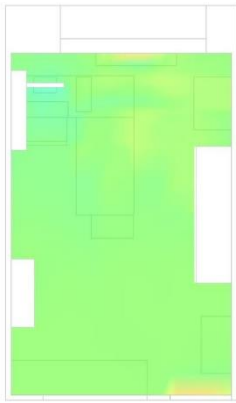


Figura 88. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de febrero)

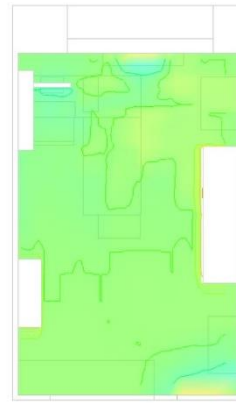


Figura 89. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de marzo)

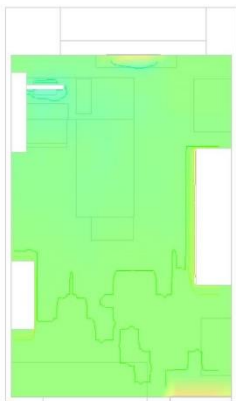


Figura 90. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de mayo)

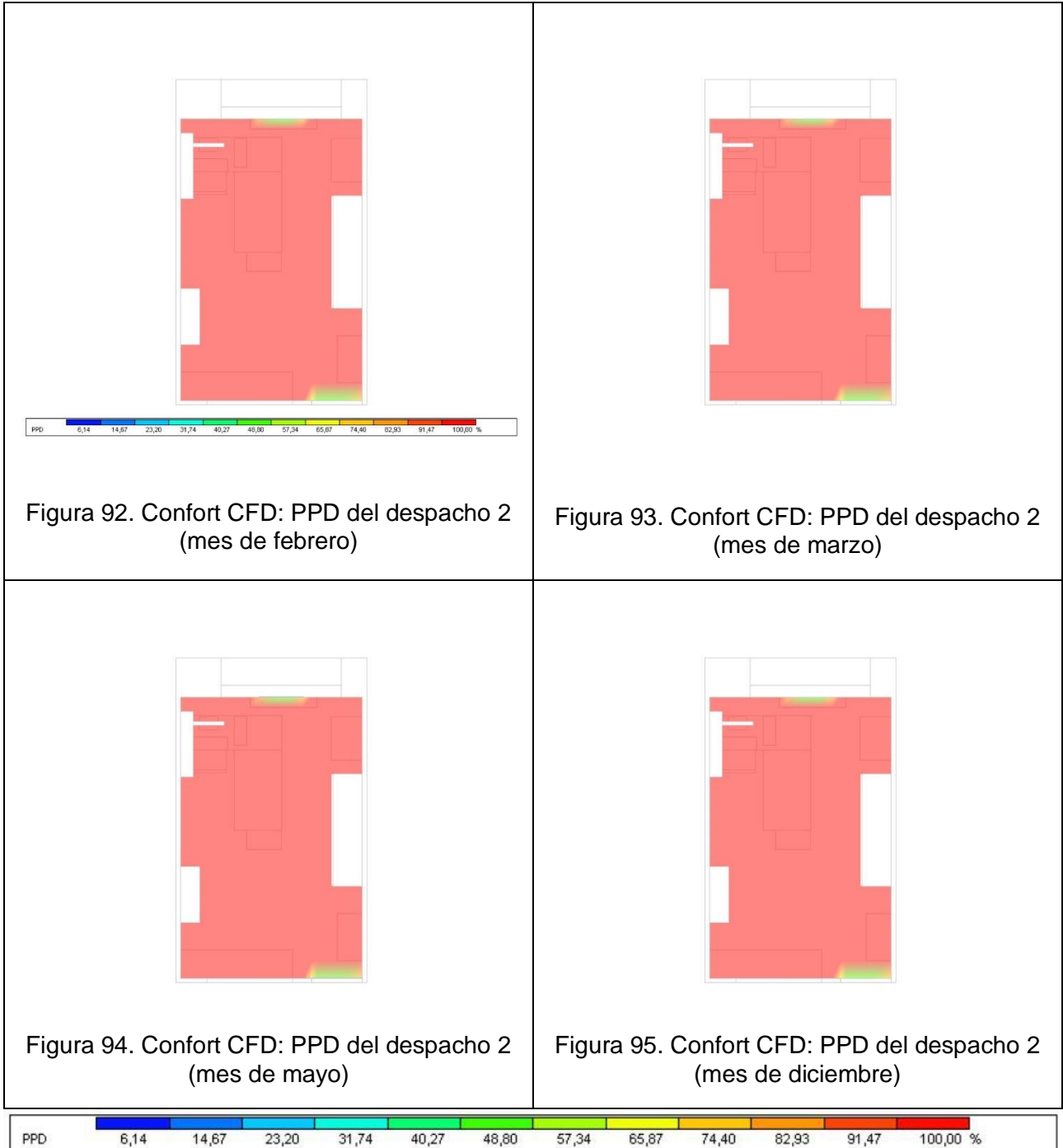


Figura 91. Confort CFD: PMV del despacho 2 (mes de diciembre)



- Índice PPD

Los resultados de los índices PPD tienen un valor del 100% en la mayoría del espacio del despacho, salvo en las zonas cercanas de la ventana que tienen un valor inferior.



4.3.2.2.2.3. Despacho 3

El despacho 3 es el más grande de las tres oficinas, tiene cuatro puestos de trabajo y unos armarios y estanterías de libro.

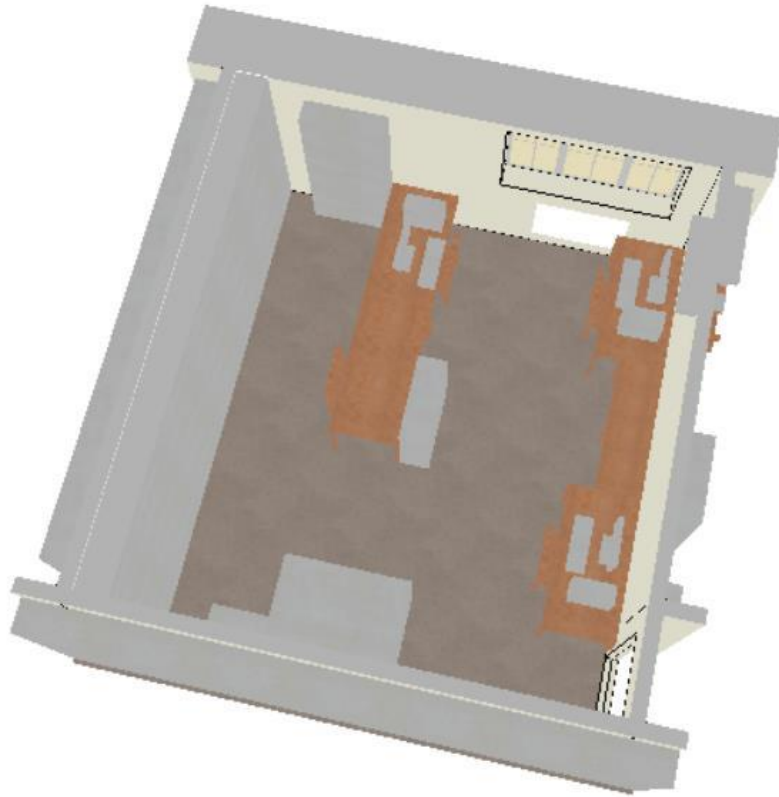


Figura 96. Modelo 3D del despacho 3

- Velocidad del aire

La velocidad del aire en la zona de la ventana y la puerta es mayor, y en las zonas de los puestos de trabajo es menor.



Figura 97. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de febrero)



Figura 98. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de marzo)



Figura 99. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de mayo)



Figura 100. Velocidad del aire (m/s) del despacho 3 (mes de diciembre)



- Edad del aire

La edad del aire en diciembre es mayor, ya que el caudal entrante del aire es menor. Mientras que el mes con la mejor calidad de aire es marzo, en el que el aire fresco abarca la mayor parte del espacio, salvo las zonas de la estantería de libros. El mes de mayo presenta una calidad de aire similar a la de marzo.

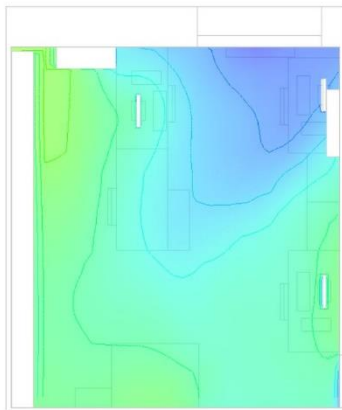


Figura 101. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de febrero)



Figura 102. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de marzo)



Figura 103. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de mayo)

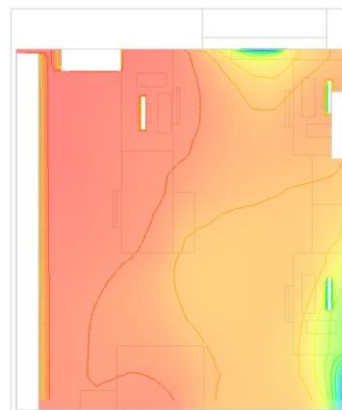
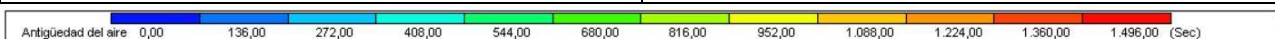


Figura 104. Edad del aire (s) del despacho 3 (mes de diciembre)



- Índice PMV

Los valores de PMV de los cuatros meses analizados son similares, en general, muestran que la sensación térmica de la zona es fría.

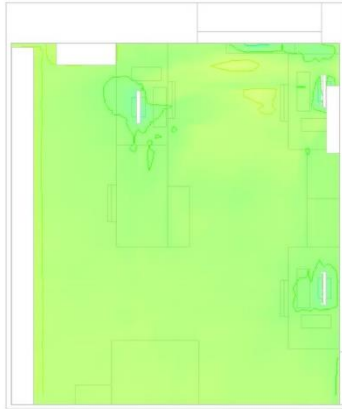


Figura 105. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de febrero)



Figura 106. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de marzo)



Figura 107. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de mayo)



Figura 108. Confort CFD: PMV del despacho 3 (mes de diciembre)



- Índice PPD

Los índices PPD de los cuatro meses analizados tienen un valor de casi el 100%.



Figura 109. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de febrero)



Figura 110. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de marzo)



Figura 111. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de mayo)



Figura 112. Confort CFD: PPD del despacho 3 (mes de diciembre)



4.3.3. Demanda energética

4.3.3.1. Simulaciones

- Confort

17.29
EnergyPlus

Confort - ETSEM, ETSEM
1 Ene - 31 Dic, Mensual

Estudiantil

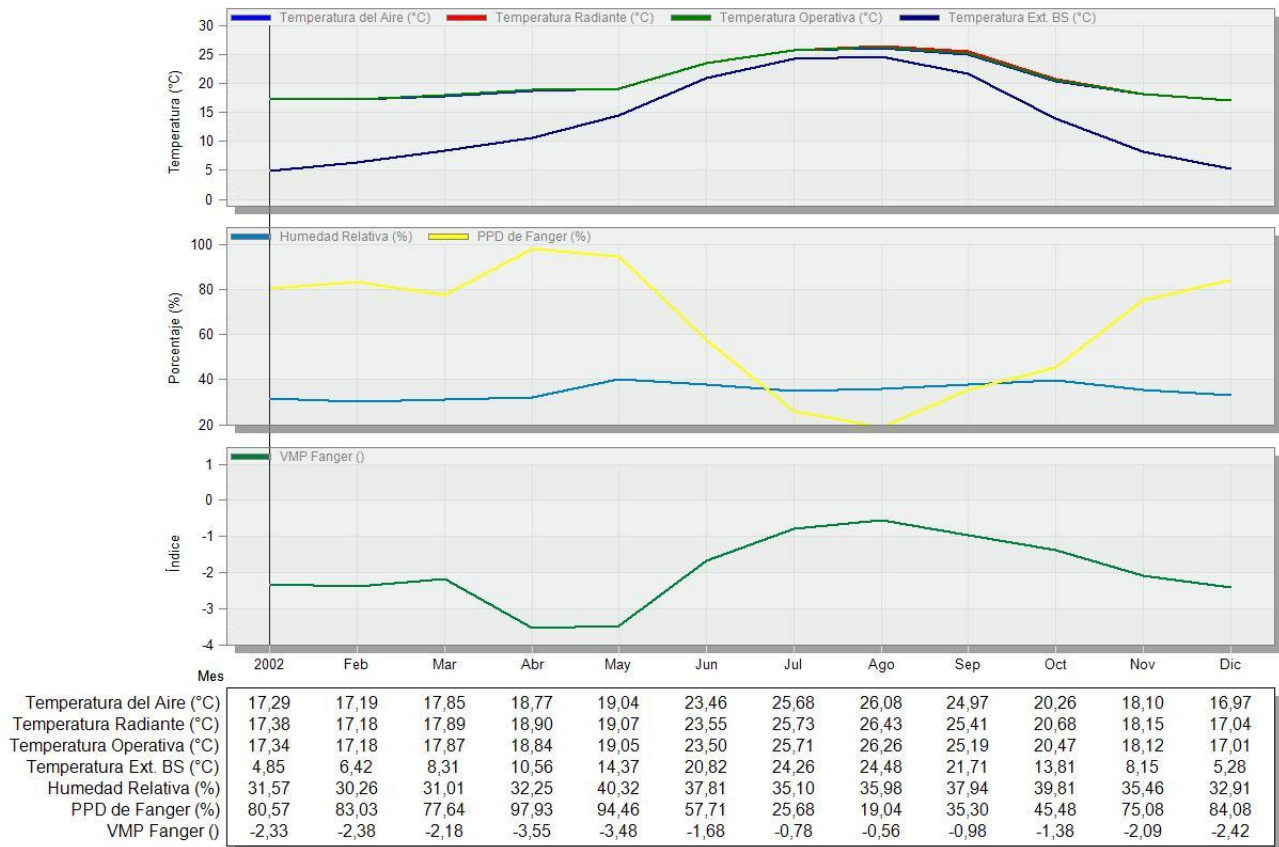


Figura 113. Resultado de simulación HVAC: confort

- Ganancia interna

1251,48
EnergyPlus

Ganancias Internas + Solares - ETSEM, ETSEM
1 Ene - 31 Dic, Mensual

Estudiantil

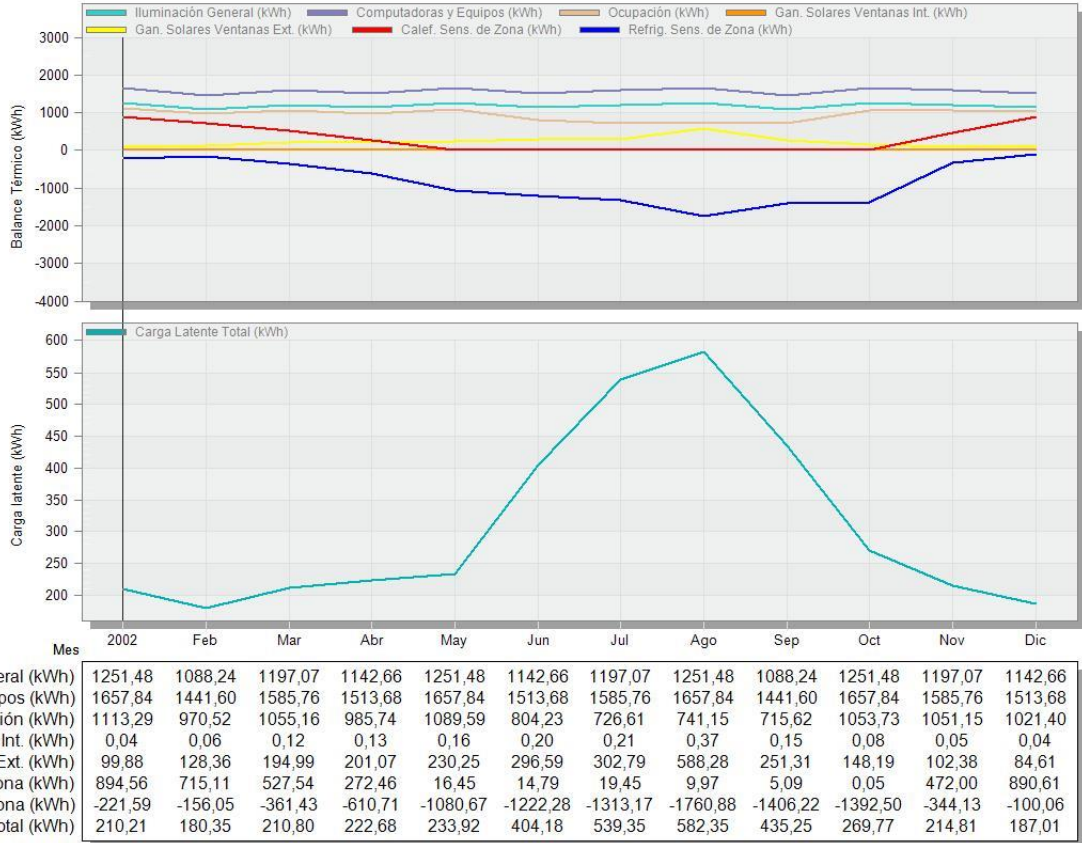


Figura 114. Resultado de simulación HVAC: ganancias internas

- Consumo desglosado

Los consumos energéticos están destinados a cuatro grupos: la calefacción, la refrigeración, la iluminación y los aparatos electrónicos. Entre ellos, la energía consumida en el sistema de calefacción es mayor. El funcionamiento de la calefacción se inicia en el mes de octubre y se termina en mayo. Mientras que el consumo de gas natural va incrementando según va pasando el tiempo en invierno, hasta el mes enero, cuando se alcanza el mayor gasto de 5059kWh. A partir de enero, el consumo decrece hasta mayo, el mes que se apaga la calefacción.

El uso de la energía eléctrica destinado a la iluminación y los aparatos electrónicos tiene una tendencia constante, ya que son elementos que siempre están en uso y no dependen de los meses.

Otra aplicación de la energía eléctrica es el sistema de refrigeración. Su uso se inicia en el mes de mayo y termina en octubre.

1657.84
EnergyPlus

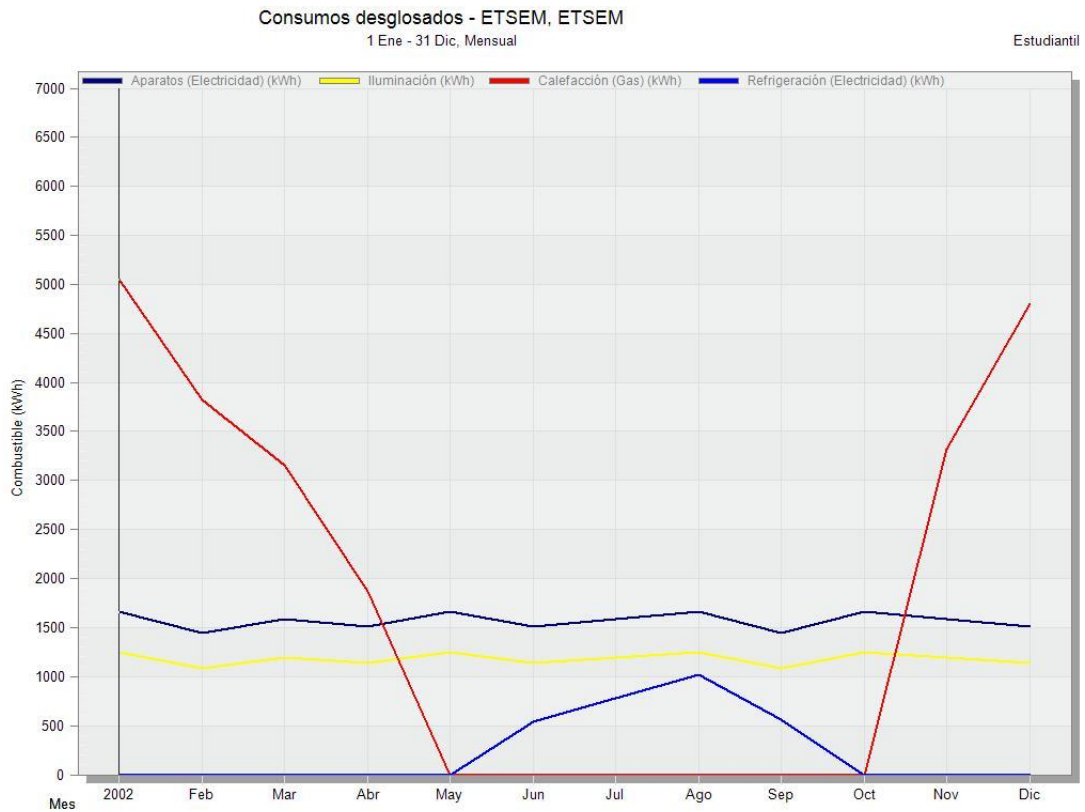


Figura 115. Resultado de simulación HVAC: consumos desglosados

- Consumo total

Las fuentes de energía que consume el edificio son electricidad y gas natural. En los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, el consumo energético de gas es mayor, mientras que en el resto de los meses el uso de la energía eléctrica es superior. El mes de enero es el periodo con mayor gasto energético, ya que cuenta con un consumo de energía de casi 8000kWh. Y los meses con menos kWh consumidos son mayo y octubre, con solo 2909kWh de energía consumida.

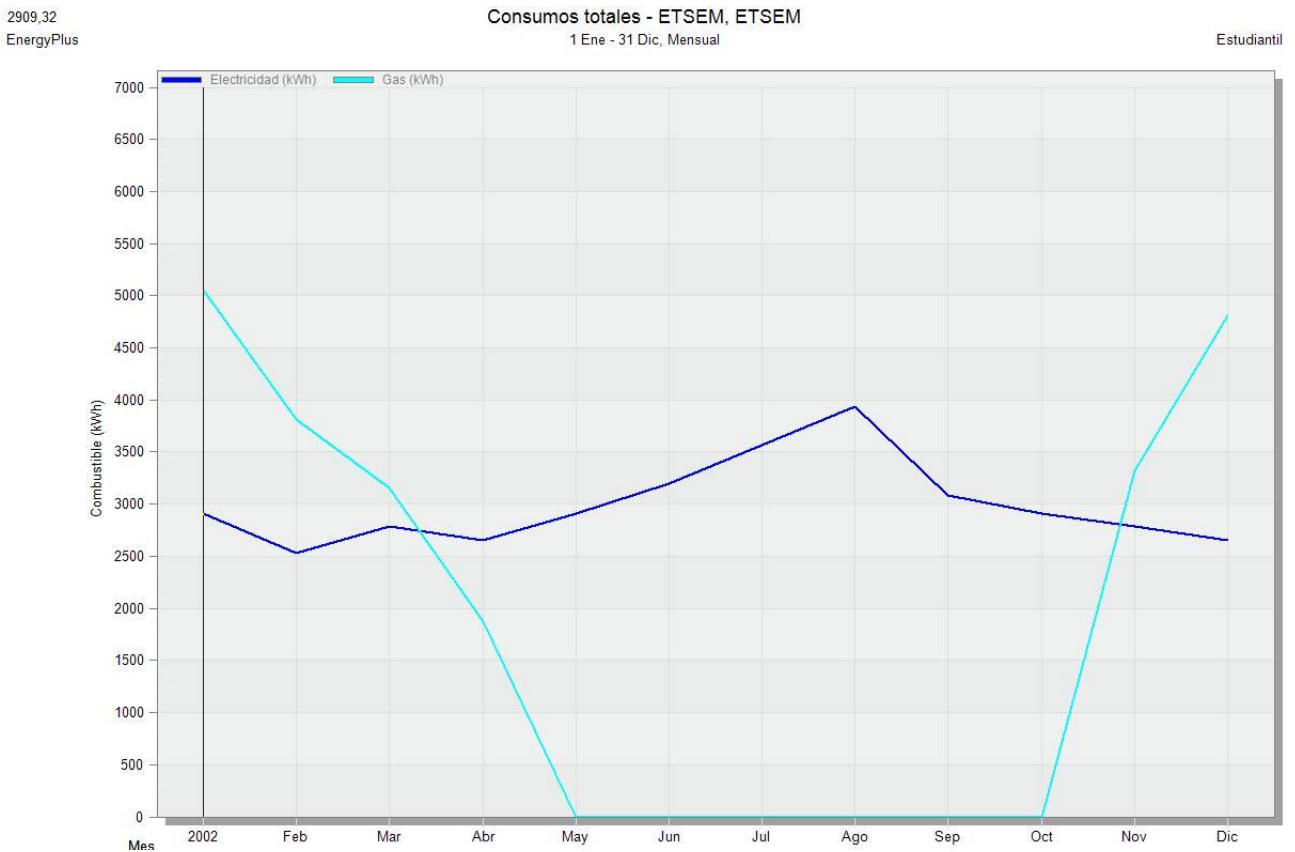


Figura 116. Resultado de simulación HVAC: consumo total

- Emisiones de CO₂

Los meses con mayores emisiones de CO₂ coinciden con los meses de mayor consumo energético, que son enero, agosto y diciembre. Los periodos con menores emisiones de dióxido de carbono son mayo y octubre, cuando no se cuenta con ningún tipo de sistema de climatización.

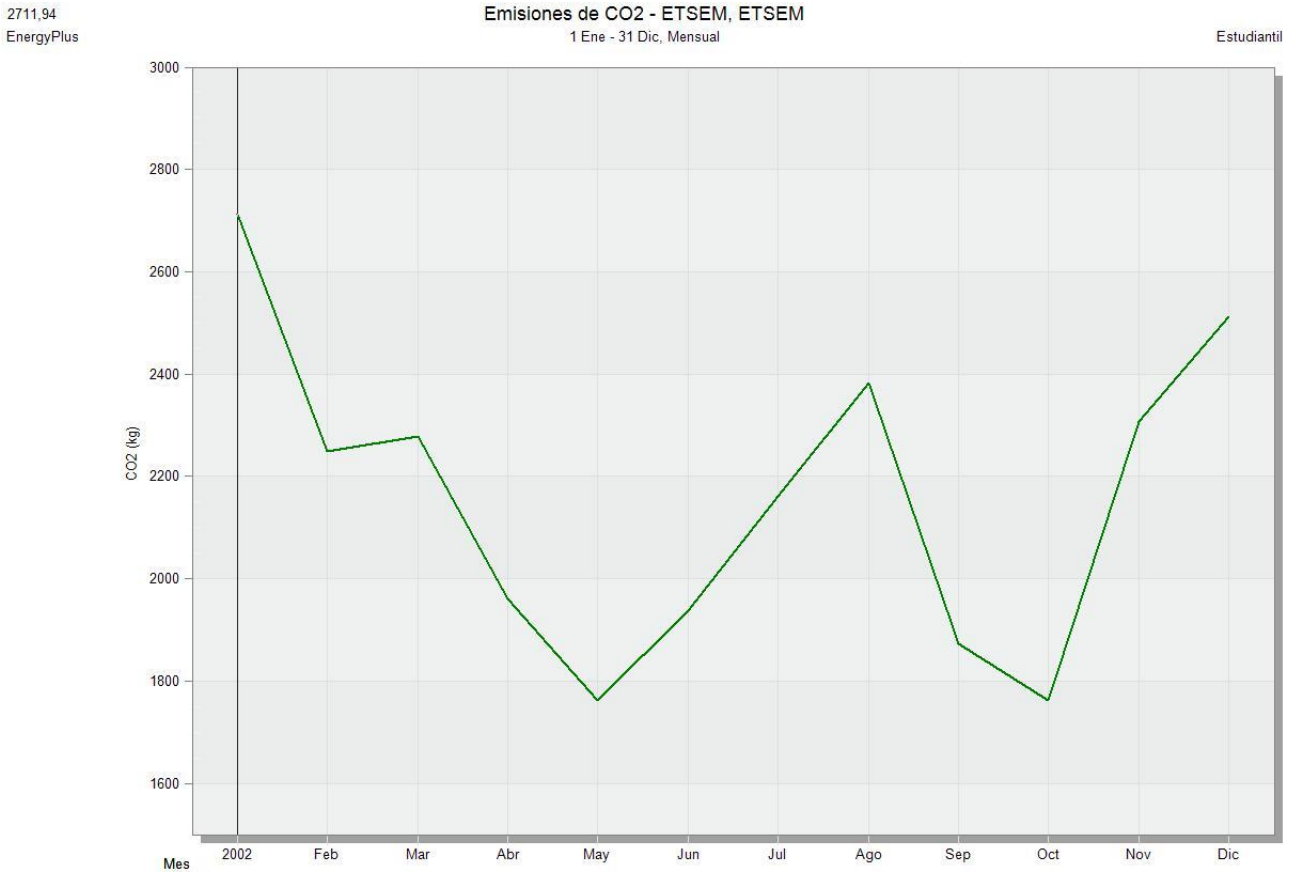


Figura 117. Resultado de simulación HVAC: emisiones de CO₂

4.3.4. Análisis y conclusión

4.3.4.1. Edad del aire

En cuanto al cumplimiento de la ventilación, la Guía para ventilación en Aulas recomienda una renovación de aire de 14l/persona*segundo, teniendo en cuenta el volumen del espacio y número de ocupantes, se calcula la edad del aire límite para cumplir la recomendación establecido. Y los resultados calculados está mostrado en la tabla 41.

	Edad de aire límite (s)
Planta S2: Sala de lectura	2122,55
Planta S3: Despacho 1	1014,29
Planta S3: Despacho 2	2922,86
Planta S3: Despacho 3	1590,36

Tabla 41. Edad del aire límite

En la tabla 42 se puede observar que los resultados de la planta sótano 3 cumplen con el límite calculado para cada espacio, salvo la simulación de la planta entera en el mes de diciembre. En estas dos situaciones, no todas las áreas comprendidas en estas zonas cumplen con la edad del aire límite.

	Edad del aire			
	Planta Sótano 2	Planta sótano 3		
	Sala de lectura	Despacho 1	Despacho 2	Despacho 3
Febrero	x	✓	✓	✓
Marzo	✓	✓	✓	✓
Mayo	✓	✓	✓	✓
Diciembre	x	✓	✓	✓

- ✓ : Cumple
- ✓ : Cumple parcialmente
- x : No cumple

Tabla 42. Cumplimiento de los valores de la edad del aire respecto al límite exigido

Figura 118. Edad del aire de la planta sótano 3 (Mes de diciembre)

Analizando los resultados obtenidos de la planta sótano 2, la edad del aire de los meses de febrero y diciembre superan al valor máximo permitido, ya que son los meses con menor caudales entrantes. Mientras que los resultados de los periodos de marzo y mayo cumplen son más favorables, pero no todos los espacios de la sala de lectura cumplen con el valor exigido. Como se puede ver en las figuras 119,120 y 121, los espacios que están marcados en color rojo y comprendidos en la isolínea del color rojo está por encima del valor máximo permitido, donde reflejan que en la zona del trabajo de los bibliotecarios, las mesas de ordenadores y algunas mesas de estudios no están bien ventiladas.

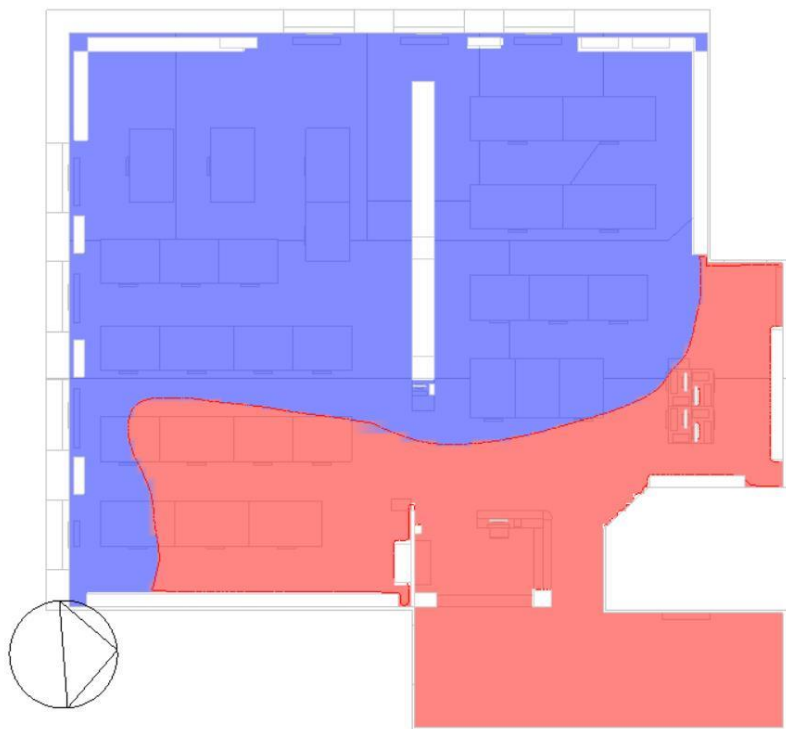


Figura 119. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de marzo)

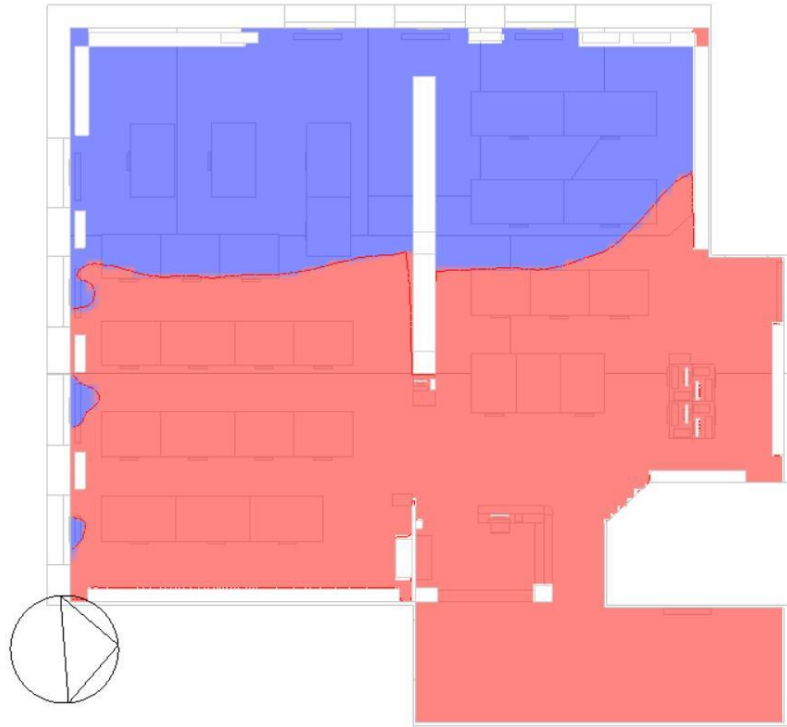


Figura 120. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de mayo)

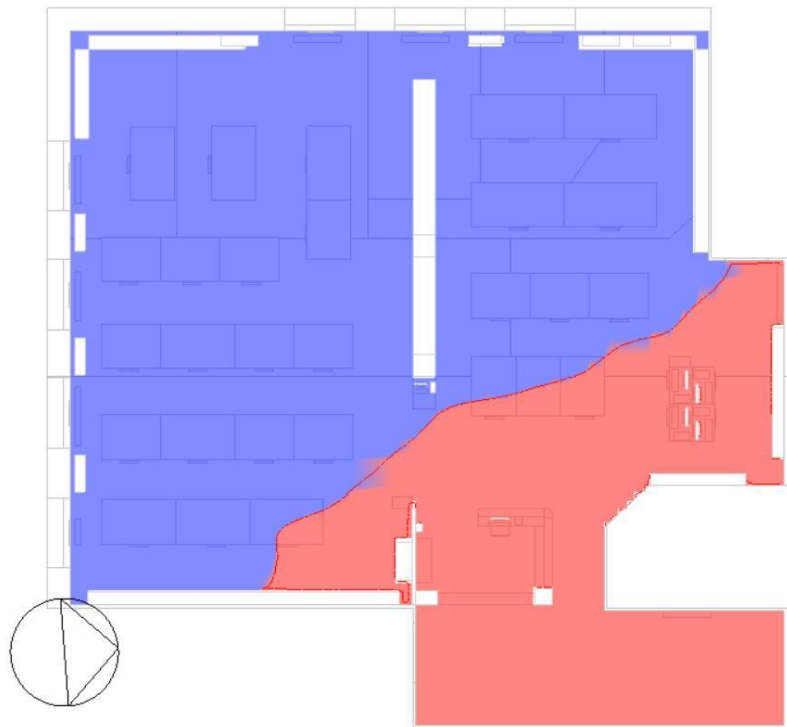


Figura 121. Edad del aire de la sala de lectura (Mes de julio)

4.3.4.2. Confort térmico

En las dos figuras inferiores presentan los valores promedio de PPD y PMV obtenido cada uno de los cuatro meses.

Los valores de PMV obtenidos están fuera del rango de confort térmico (-1 y 1), por lo que los resultados de las simulaciones deben ser mejorados con soluciones correctoras.

	PMV promedio			
	Febrero	Marzo	Mayo	Diciembre
Sala de lectura	-3,948	-3,964	-3,96	-3,927
Despacho 1	-3,863	-3,9	-4,015	-3,834
Despacho 2	-4,02	-4,026	-4,161	-3,981
Despacho 3	-4,162	-4,178	-4,299	-4,151

Tabla 43. PMV promedio

Los índices de PPD están no cumple con la exigencia normativa, ya que supera el límite de 25% de PPD establecido.

	PPD promedio (%)			
	Febrero	Marzo	Mayo	Diciembre
Sala de lectura	91,526	90,905	92,608	91,193
Despacho 1	93,446	92,802	94,072	92,982
Despacho 2	97,281	97,054	97,642	97,117
Despacho 3	98,185	98,189	98,466	98,232

Tabla 44. PPD promedio (%)

	PMV y PPD			
	Planta Sótano 2	Planta sótano 3		
	Sala de lectura	Despacho 1	Despacho 2	Despacho 3
Febrero	x	x	x	x
Marzo	x	x	x	x
Mayo	x	x	x	x
Diciembre	x	x	x	x

x : No cumple

Tabla 45. Cumplimiento de los valores de PMV y PPD respecto al límite exigido

Como se puede observar en el capítulo 1.4 los valores PMV deben estar entre -1 y 1 para que la situación térmica pueda considerarse satisfactoria y confortable para la mayoría de las personas. En el resto de los casos, la situación se considera inadecuada, y se deben tomar medidas correctoras para alcanzar un ambiente confortable para la mayoría de las ocupantes.

Y en cuanto al número de personas insatisfechas (PPD), un porcentaje inferior o igual al 25% representa una situación satisfactoria para la mayoría de las personas, ya que otro 75% serían insatisfechos y esto indica una situación de no confortable.

Analizando los resultados obtenidos de las simulaciones CFD interior, vemos que ninguno de los casos cumple con los valores exigidos en la norma, ya que todos los valores PPD están por encima de 25%, y los valores de PMV no están comprendidos dentro del rango -1 y +1, salvo las zonas cercanas de los cerramientos.

Viendo los problemas de discomfort y mala calidad de aire en algunos espacios, se procede a proponer medidas de mejora para optimizar los resultados de las simulaciones.

4.4. ESTRATEGIAS Y PROPUESTAS DE MEJORA

Las estrategias planteadas para mejorar la ventilación y confort térmico son las siguientes:

4.4.1. Medidas pasivas

Consiste en mejorar los elementos constructivos de la envolvente exterior del edificio, y también la partición de vidrio que separa la biblioteca con la zona de la escalera.

La fachada actual del edificio es del tipo convencional con un espesor total de 62 cm. De este inmenso grosor, el material aislante solo ocupa 5 cm, y un 50% del espesor total es la cámara del aire (31 cm).

La propuesta consiste en reemplazar la fachada original por una fachada ventilada para mejorar la transmitancia térmica, de esta manera disminuye la pérdida de calor y energía. Está compuesta por un revestimiento exterior de piedra natural de 3cm de espesor, una cámara de aire ventilada de 5cm, un aislamiento térmico de poliestireno extruido de 6cm fijado sobre la fábrica de ladrillo existente, y en la parte interior de la hoja principal está las

capas de cámara de aire de 31cm, un aislamiento térmico de lana mineral de 5cm, un tabique de 7cm y un enfoscado y enlucido de 1,5cm.

La transmitancia térmica calculada es $U = 0,235 \text{ W/m}^2\text{K}$, que cumple con el mínimo exigido en el CTE.

Definición	
Método de definición	1-Capas
Parámetros de cálculo	
Capas	
Número de capas	8
Capa más externa	
Material	Piedra caliza
Espesor (m)	0,0300
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 2	
Material	2010 NCM Cavity ventilated
Espesor (no usado en cálculos térmicos) (m)	0,0500
Capa 3	
Material	XPS Extruded Polystyrene - HFC Blowing
Espesor (m)	0,0600
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 4	
Material	Brick
Espesor (m)	0,1150
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 5	
Material	2010 NCM Cavity unventilated
Espesor (no usado en cálculos térmicos) (m)	0,3100
Capa 6	
Material	Mineral fibre/wool - fibre blanket, bonded, at
Espesor (m)	0,0500
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 7	
Material	Brick - aerated
Espesor (m)	0,0700
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa más interna	
Material	Cement/plaster/mortar - cement plaster
Espesor (m)	0,0150
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	

Figura 122. Configuración de la composición de la fachada ventilada



Figura 123. Composición de la fachada ventilada

Fachada ventilada	
Espesor (m)	0,70
Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	81,2316
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	4,256
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	4,256
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	0,245
Valor R (m ² K/W)	4,256
Valor U (W/m ² K)	0,235

Tabla 46. Valores característicos calculados por Design Builder (Fachada ventilada)

También se plantea mejorar las ventanas, ya que la zona de los huecos son los puntos más débiles de la fachada, y es el lugar por donde se escapa la mayoría del calor interior. La gama de acristalamiento seleccionado para la nueva ventana es SGG CLIMALIT PLUS 4-16-4 (ver en anexo la ficha técnica), en la que el vidrio exterior es SGG PLANITHERM 4S, el vidrio interior de SGG STADIP SILENCE, y entre ellos una cámara de gas de argón. Permite un máximo nivel de confort tanto en invierno como en verano, un ahorro energético en la calefacción y aire acondicionado, y además presta protección y aislamiento acústico

siendo una ventaja muy considerable ya que el proyecto de este trabajo trata de una biblioteca, un espacio que requiere un alto nivel de protección contra el ruido.

Y el tipo de perfilería elegido es de KÖMMERLING 76 MD Certificada (ver en anexo la ficha técnica), del material PVC-U.

Marco de la ventana	
Espesor (m)	0,76
Km – capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	130,5
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	1,014
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	1,014
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	1,184
Valor R (m ² K/W)	1,014
Valor U (W/m ² K)	0,986

Tabla 47. Valores característicos calculados por Design Builder (Marco KÖMMERLING)

Otra solución pasiva presentada es cambiar la partición interior de vidrio situado en la entrada de la biblioteca por un tipo de tabique con placas de yeso laminados con una capa de aislamiento térmico en el interior, garantizando un máximo nivel de confort térmico y acústico.

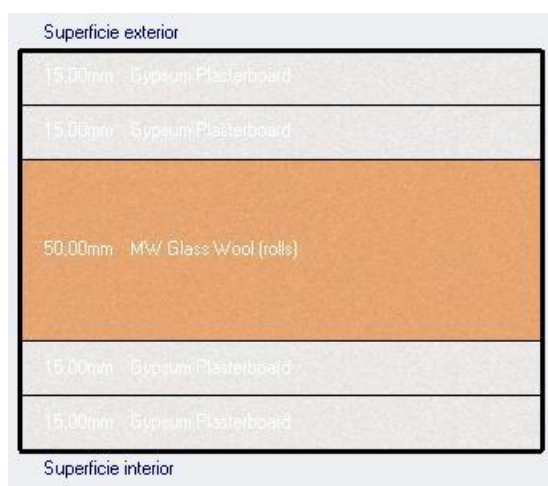


Figura 124. Composición de partición interior (con placas de yeso laminadas)

Partición interior	
Espesor (m)	0,11
Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)	27,252
Límite superior de resistencia (m ² K/W)	1,75
Límite inferior de resistencia (m ² K/W)	1,75
Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)	0,671
Valor R (m ² K/W)	1,75
Valor U (W/m ² K)	0,571

Tabla 48. Valores característicos calculados por Design Builder (partición con placas de yeso laminadas)

4.4.2. Medida activa

Para reducir la pérdida de calor y energía por la ventilación natural, se decide incorporar instalación de ventilación mecánica con recuperador de calor

La gama seleccionada es SIBERDUO RM, se trata de un sistema de ventilación mecánica de doble que garantiza la calidad del aire mediante la extracción del aire contaminado en los espacios interiores y al mismo tiempo introduce un caudal de aire fresco, cuenta con un intercambiador de calor que recupera el calor del aire extraído con ese calor se precalienta el aire nuevo que entra.

También realiza la función de filtración y purificación del aire. Y presenta una eficiencia y rendimiento mayor que 90%.

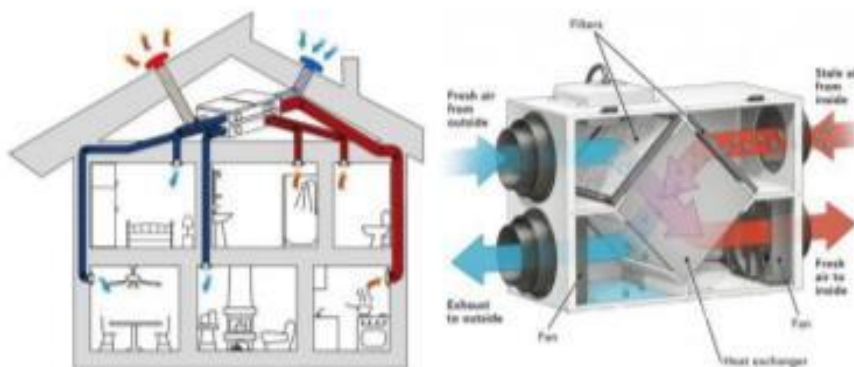


Figura 125. Recuperador de calor



Figura 126. Ventilación mecánica controlada Doble Flujo (SIBERDUO TM)

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. CFD INTERIOR

El caudal del aire considerado para cada simulación es:

- Sala de lectura: 392 l/s
- Despacho 1: 28 l/s
- Despacho 2: 14 l/s
- Despacho 3: 56 l/s

Para realizar el cálculo de confort CFD, debe tener en cuenta los siguientes datos:

- Tasa metabólica (met): 1,2
- Nivel de vestimenta (clo): 1,5
- Humedad relativa (%): 40

5.1.1. Planta sótano 2: Sala de lectura

- Velocidad del aire

La velocidad del aire en las rejillas de impulsión de aire es mayor y se mueve a 0,26 m/s. En el resto de las zonas el aire se mueve a una velocidad menor de 0,1 m/s.

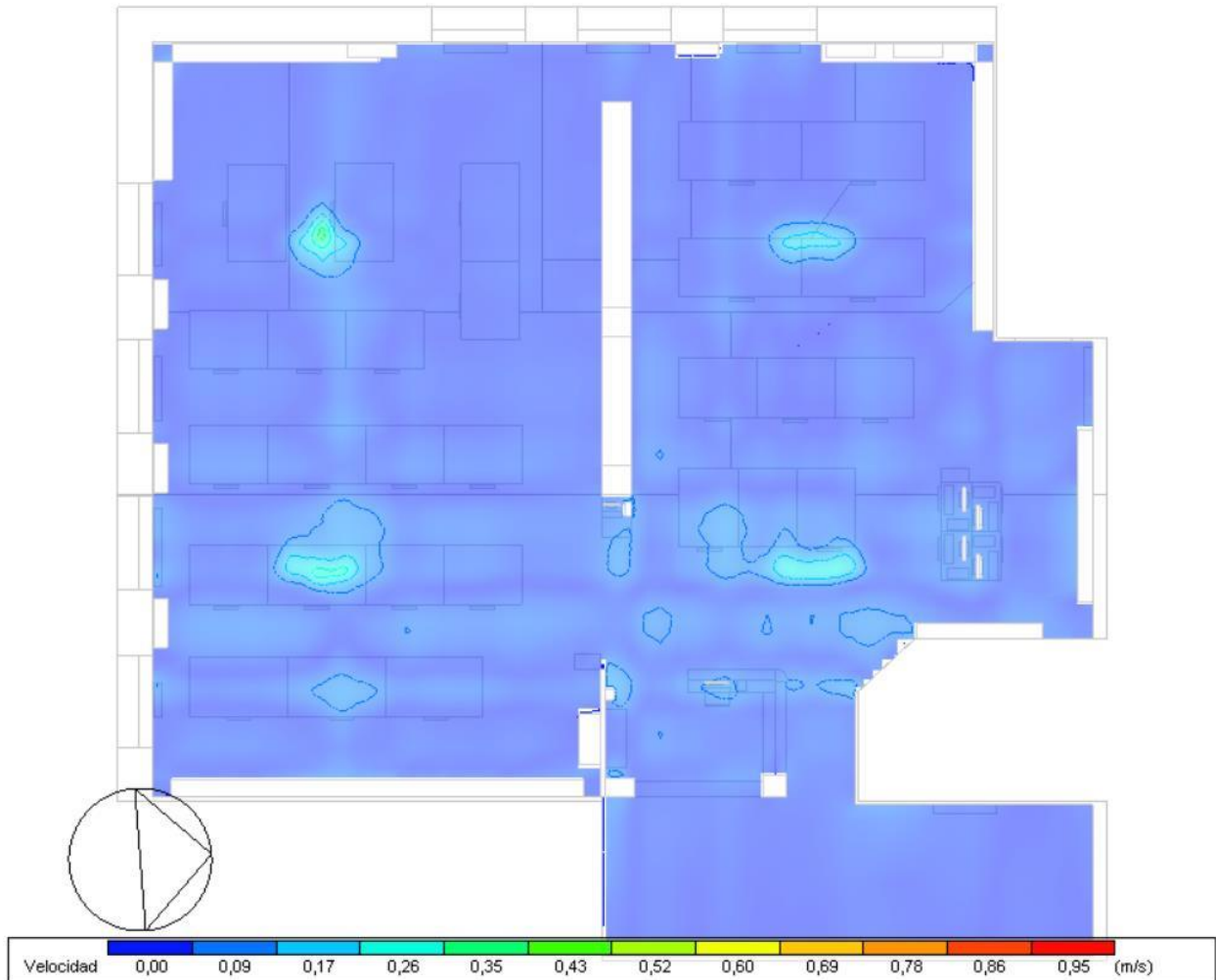


Figura 127. Velocidad del aire (m/s) con las soluciones propuestas

- Edad del aire

Los valores de la edad del aire son más uniformes en comparación a los del edificio original. La antigüedad del aire es menor en las zonas cercanas a las rejillas entrantes de aire, y las zonas que tienen una mayor edad se debe a una menor de velocidad del aire.

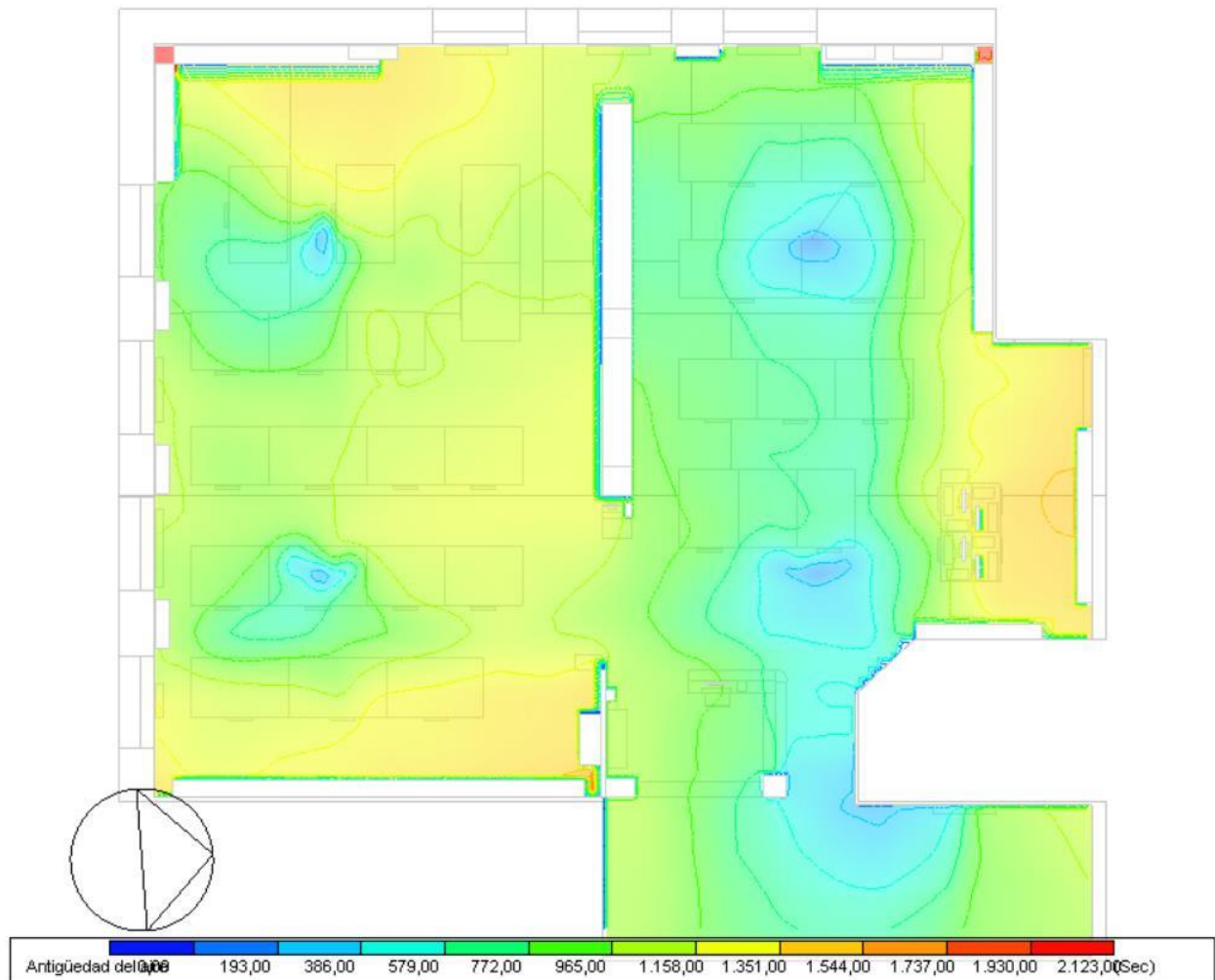


Figura 128. Edad del aire (s) con las soluciones propuestas

- Índice PMV

Los valores de índice PMV en las mesas de trabajo y puestos de ordenadores son menores, esto indican una sensación térmica más fría que el perímetro de la sala.

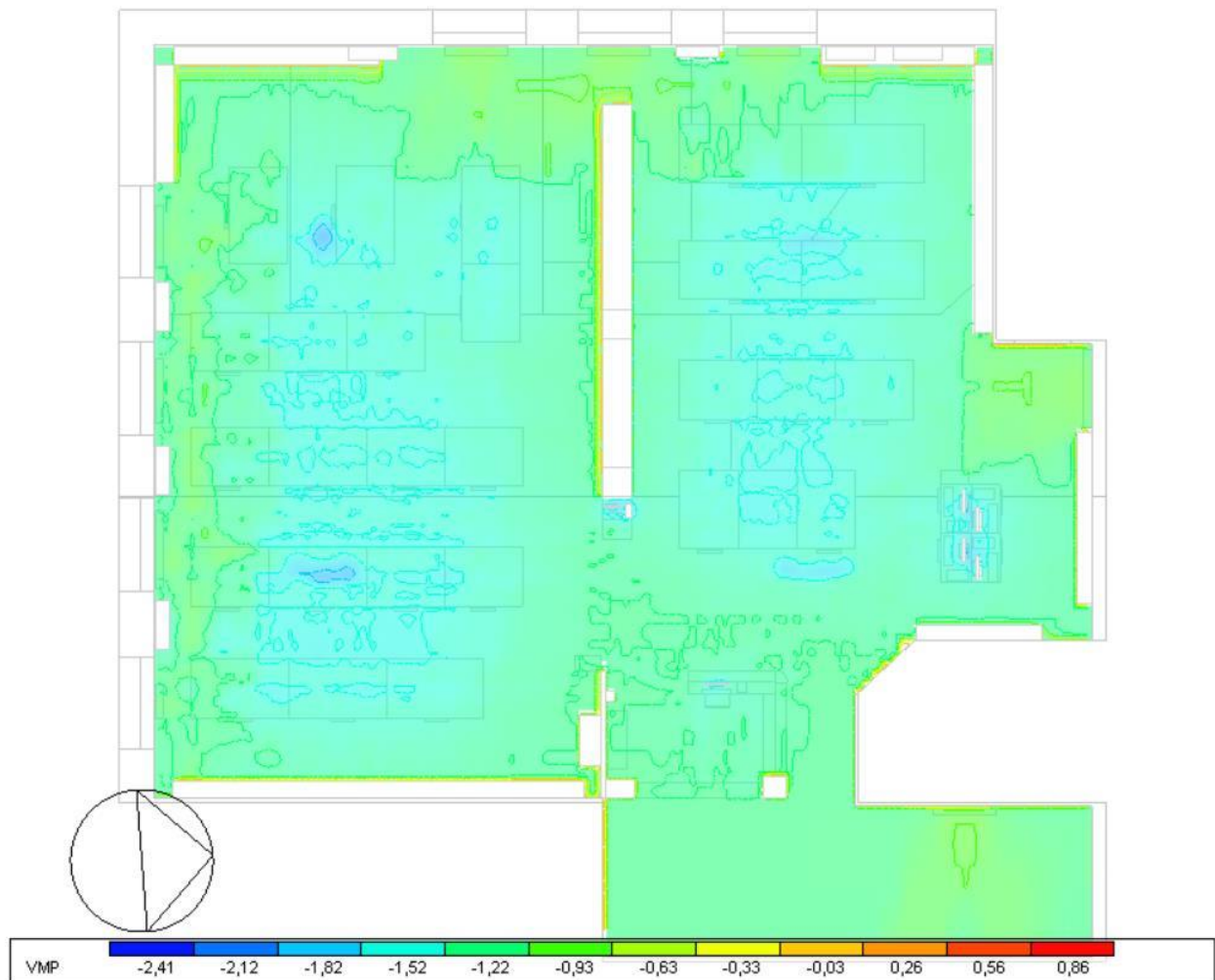


Figura 129. Índice PMV con las soluciones propuestas

- Índice PPD

Los índices PPD concuerdan con los resultados de PMV, el porcentaje de insatisfechos en las zonas de las mesas de estudio y los puestos con ordenadores es mayor que en otros espacios.

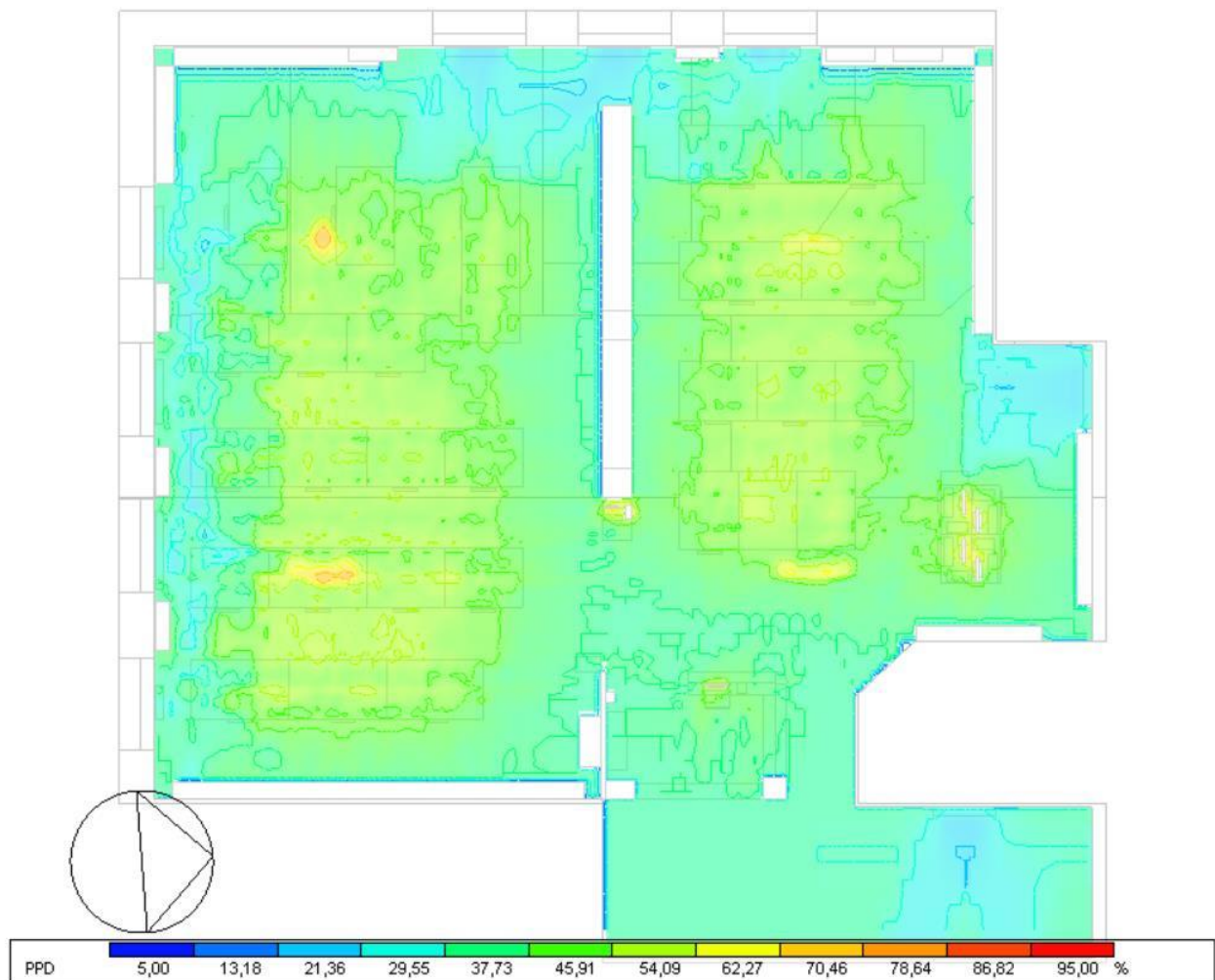


Figura 130. Índice PPD con las soluciones propuestas

5.1.2. Planta sótano 3

5.1.2.1. Despacho 1

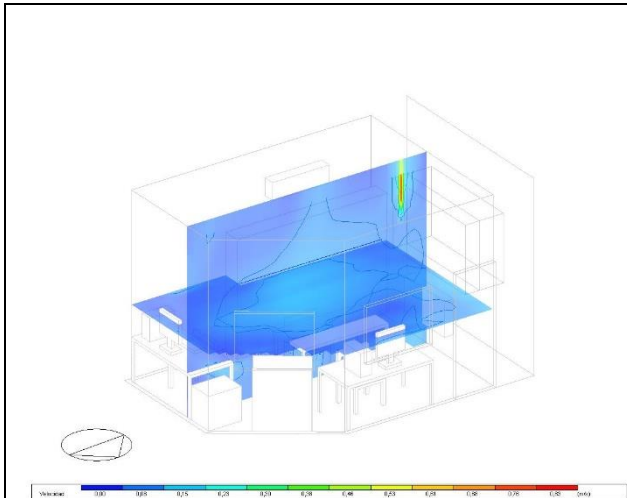


Figura 131. Velocidad del aire (m/s) del despacho 1



Figura 132. Edad del aire (s) del despacho 1

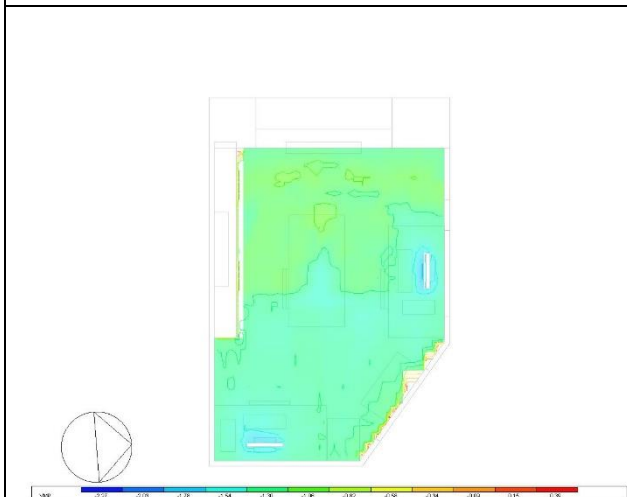


Figura 133. Confort CFD: PMV del despacho 1

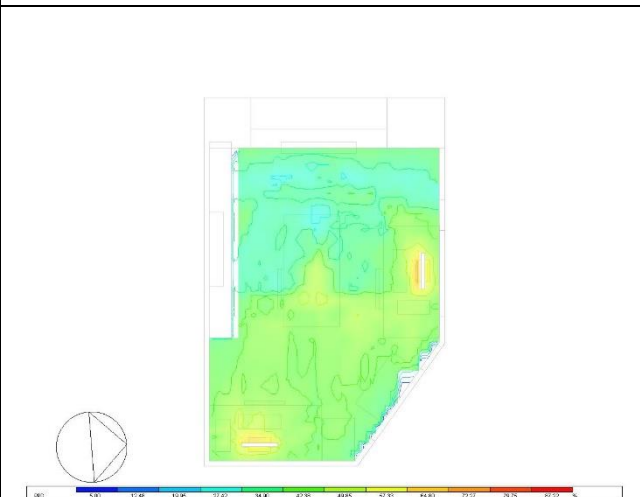


Figura 134. Confort CFD: PPD del despacho 1

5.1.2.2. Despacho 2

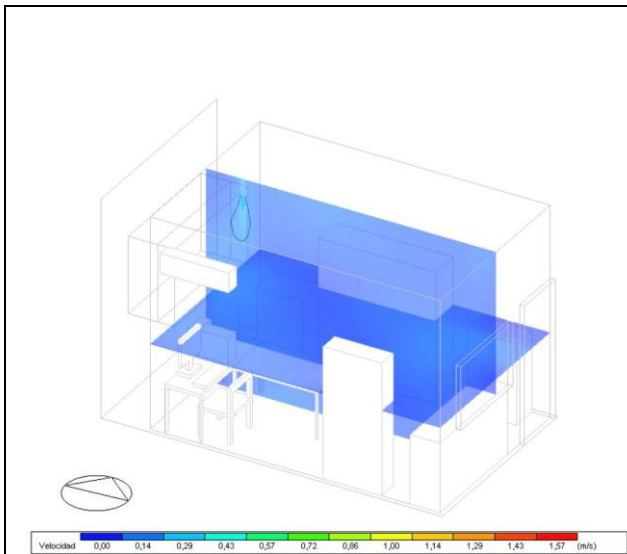


Figura 135. Velocidad del aire (m/s) del despacho 2

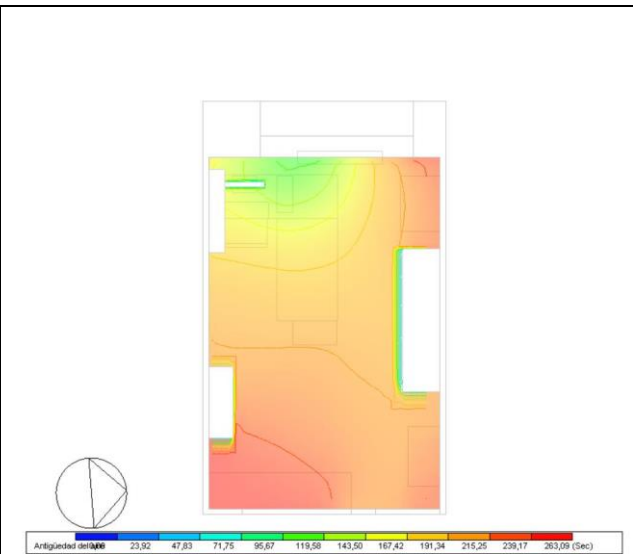


Figura 136. Edad del aire (s) del despacho 2



Figura 137. Confort CFD: PMV del despacho 2

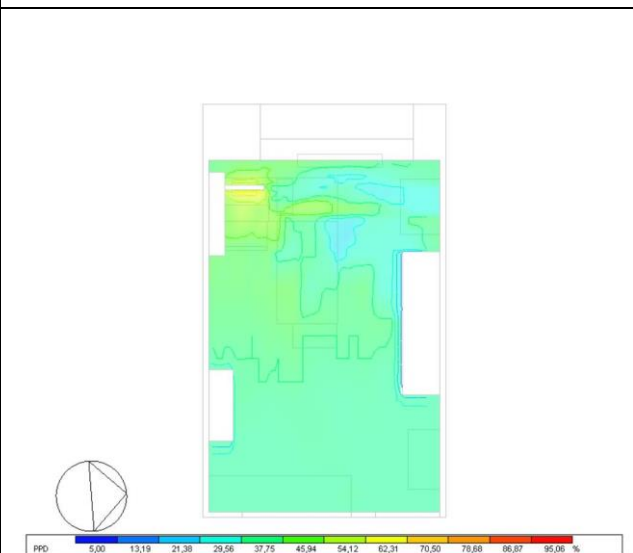
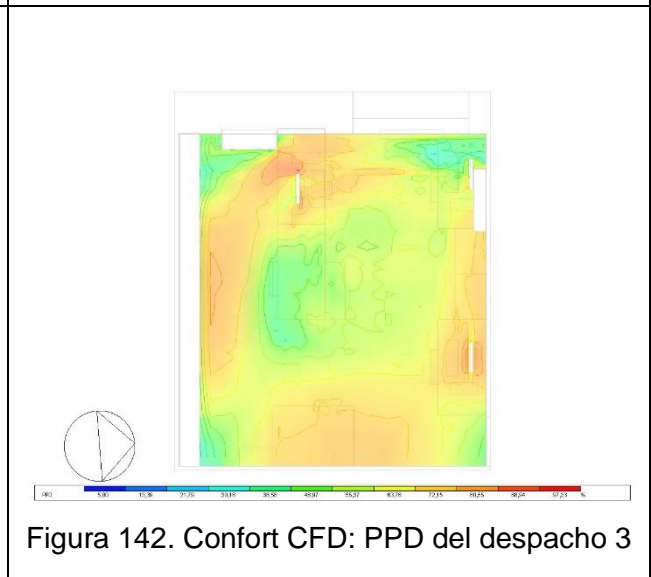
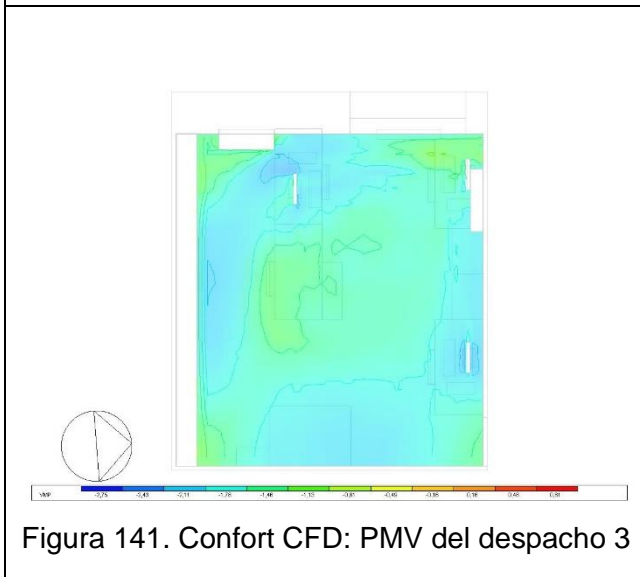
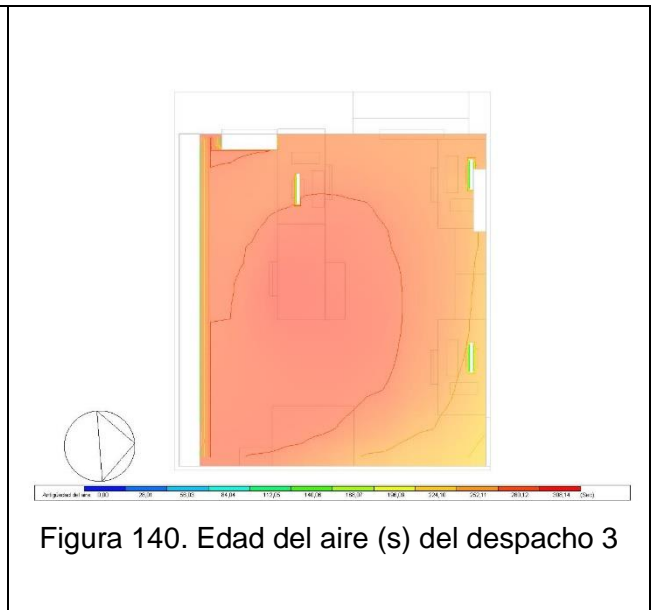
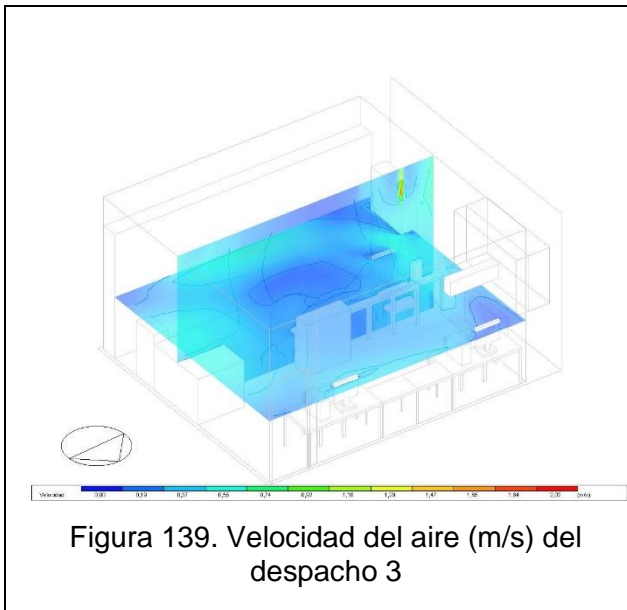


Figura 138. Confort CFD: PPD del despacho 2

5.1.2.3. Despacho 3



En cuanto a las velocidades del aire, los resultados de la propuesta están menor que los del modelo original.

En las simulaciones del proyecto nuevo se ha podido observar que la edad del aire es superior que el edificio original, ya que el caudal de aire puede ser controlada por los usuarios, y se considera un caudal de entrante de 14 l/s*persona que es un valor inferior

que los casos de ventilación natural. Sin embargo, estos resultados cumplen con la antigüedad del aire límite establecida.

Analizando los índices de confort PMV y PPD, se puede observar que ha conseguido una mejora de cerca de 50% respecto al modelo antiguo. Pero aun ha no conseguido el confort térmico, ya que tanto el índice PMV como PPD está fuera del límite establecido según la norma UNE ISO EN 7730-2006.

En la siguiente tabla se muestran los índices PMV y PPD promedio calculados. Se puede ver que estos valores han mejorado mucho respecto a los resultados del modelo inicial.

	PMV promedio (%)	PPD promedio (%)
Sala de lectura	-1,359	38,2
Despacho 1	-1,314	35,75
Despacho 2	-1,279	37,75
Despacho 3	-1,752	61,002

Tabla 49. Promedio de PMV y PPD del modelo actual

A continuación, se muestran los valores de mejora conseguidos en los índices de PPD y PMV.

En cuanto los resultados de PPD, se puede observar que las mejoras alcanzadas en el despacho son mayores que otras zonas.

	Mejora de PPD (%)			
	Febrero	Marzo	Mayo	Diciembre
Sala de lectura	58,26%	57,98%	58,75%	58,11%
Despacho 1	61,74%	61,48%	62,00%	61,55%
Despacho 2	61,19%	61,10%	61,34%	61,13%
Despacho 3	37,87%	37,87%	38,05%	37,90%

Tabla 50. Mejoras obtenidas en PPD

La mejora en los índices PMV aplicando las estrategias correctoras es más mayor en el despacho 2.

	Mejora de PMV (%)			
	Febrero	Marzo	Mayo	Diciembre
Sala de lectura	65,58%	65,72%	65,68%	65,39%
Despacho 1	65,98%	66,31%	67,27%	65,73%
Despacho 2	68,18%	68,23%	69,26%	67,87%
Despacho 3	57,90%	58,07%	59,25%	57,79%

Tabla 51. Mejoras obtenidas en PMV

5.2. DEMANDA ENERGÉTICA

5.2.1. Simulación

En este apartado se realiza la simulación HVAC del modelo actualizado, donde se tienen en cuenta la recuperación de calor a la hora del cálculo.

- Consumo desglosado

La energía consumida en el sistema de calefacción es mayor. El funcionamiento de la calefacción se inicia en el mes de octubre y se termina en mayo. Mientras que el consumo de gas natural va incrementando según va pasando el tiempo en invierno, hasta el mes enero, cuando se alcanza el mayor gasto de 1750kWh. A partir de enero, el consumo decrece hasta mayo, el mes que se apaga la calefacción. La energía consumida en la refrigeración no ha tenido una modificación respecto a la del edificio inicial.

El uso de la energía eléctrica destinada a la iluminación y a los aparatos electrónicos tiene una tendencia constante y no presentan ninguna mejora con las estrategias de mejora.

1630,28
EnergyPlus

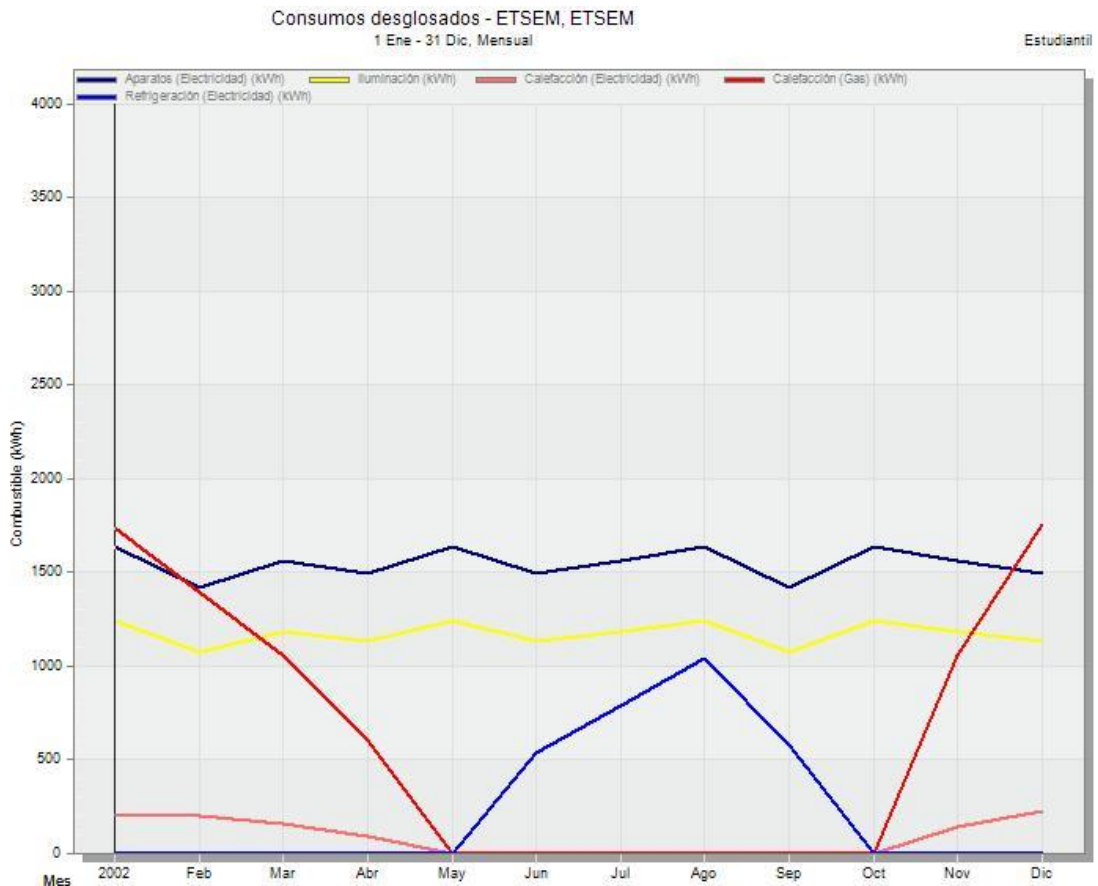


Figura 143. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): consumos desglosados

- Consumo total

Las fuentes de energía que consume el edificio son electricidad y gas natural. En los meses de enero y diciembre, el consumo energético de gas es mayor con un gasto de 1737,06kWh y 1752,96 kWh respectivamente. El mes de enero es el periodo con mayor gasto energético, ya que cuenta con un consumo de energía de casi 4700kWh. Y los meses con menos kWh consumidos son mayo y octubre.

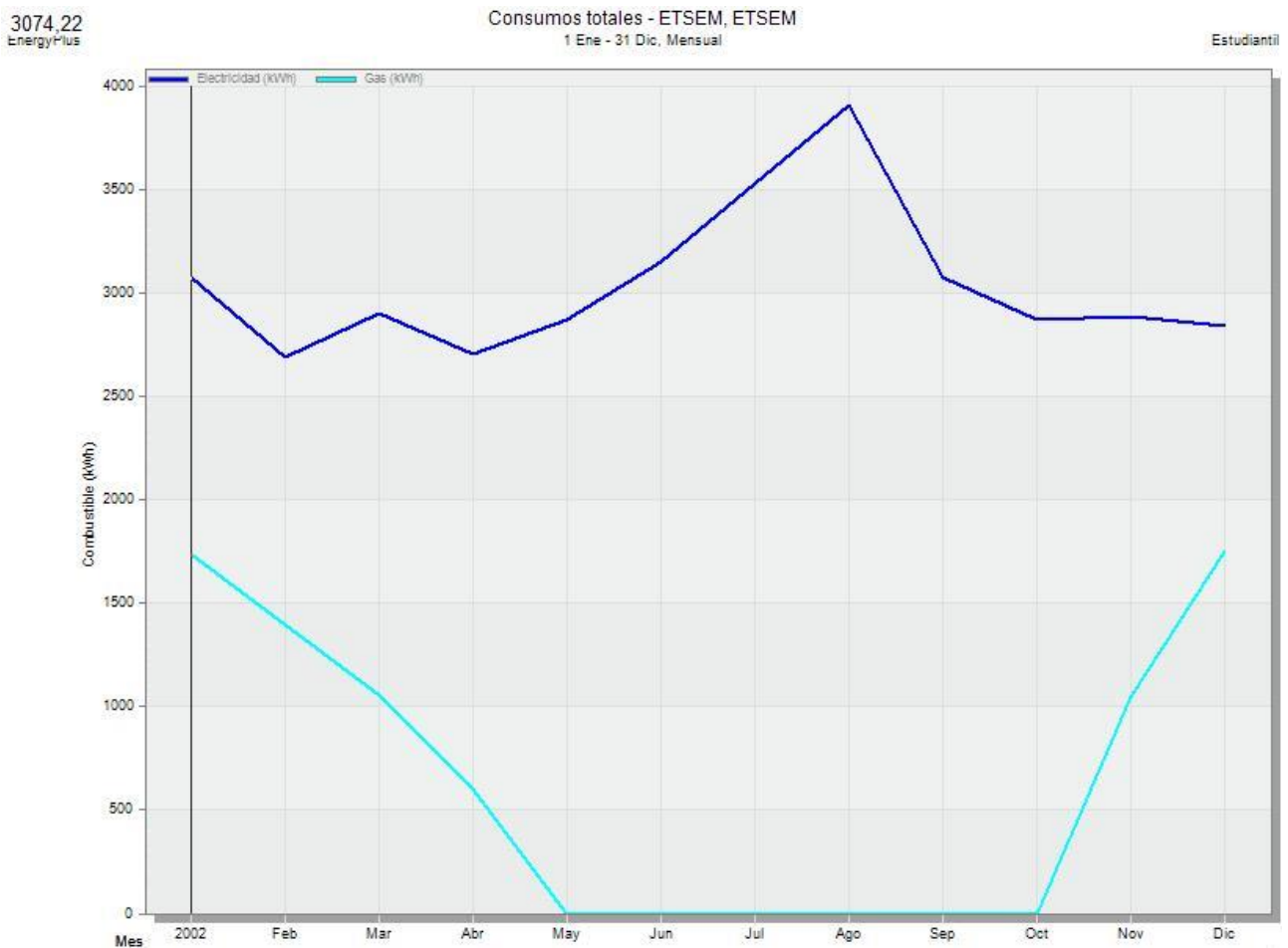


Figura 144. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): consumos totales

- Emisiones de CO₂

Los meses con mayores emisiones de CO₂ coinciden con los meses de mayor consumo energético, que son enero, agosto y diciembre, como el modelo inicial. Los períodos con menores emisiones de dióxido de carbono son mayo y octubre, con una emisión de CO₂ de 1737,47 kg y 1737,47 kg respectivamente.

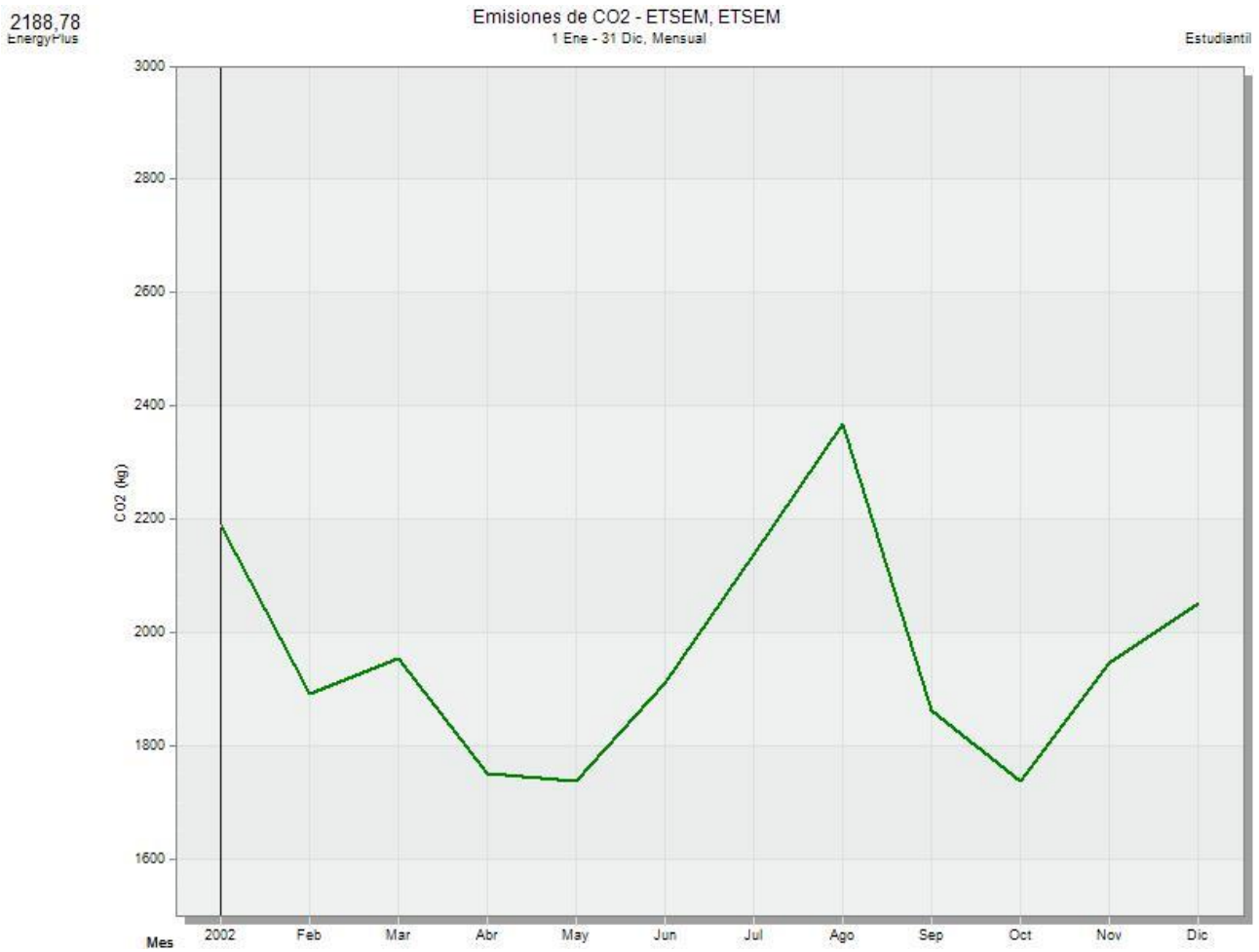


Figura 145. Resultado de simulación HVAC (con estrategias de mejora): emisiones de CO₂

	Calefacción (gas) (kWh)	Refrigeración (electricidad) (kWh)	Emisiones de CO ₂ (kg)
Modelo original	22019,32	2907,98	25898,89
Modelo propuesta	7590,64	2933,27	23539
Mejora conseguido	65,53%	-0,87%	9,11%

Figura 146. Comparación de los resultados energéticos de los dos modelos

Analizando los resultados del comportamiento energético de los dos modelos se puede observar que se produce una gran pérdida de energía en los meses en los que está encendida la calefacción debido al sistema de ventilación natural.

En la figura anterior se presenta el porcentaje de reducción de energía conseguida con las nuevas propuestas. Se puede ver que alcanza a un 65,3% del gas natural destinado a la calefacción, y que hay un pequeño incremento del 0,87% de electricidad en cuanto a la refrigeración.

Con el nuevo modelo, se han disminuido las emisiones de CO₂, por lo que contribuye en a una mejora de la sostenibilidad del recinto.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se requiere hacer un análisis del exterior, teniendo en cuenta la geometría del edificio completo y los elementos que hay a su alrededor, ya que la orientación de las ventanas es determinante con respecto a la dirección dominante del flujo del aire. La velocidad del viento que entra por cada hueco también debe ser calculada con cierta precisión porque es un dato que condiciona el caudal que entra por cada ventana. Es un paso previo importante para que el análisis de calidad ambiental interior sea más fiable y realista.

La ventilación natural puede garantizar un buen nivel de renovación del aire, sin embargo, no puede asegurar la pureza de este, ya que depende de las condiciones del aire exterior que se encuentre en el edificio. Además, este sistema desfavorece el nivel de confort térmico, y produce una mayor pérdida de energía por la apertura de las ventanas.

La nueva propuesta del proyecto con las medidas correctoras pasivas y activas mejora el comportamiento del confort, y al mismo tiempo garantiza una buena calidad interior del aire:

- Desde el punto de vista energético, se produce un gran ahorro de energía, ya que el consumo destinado al sistema de la climatización es menor. Sobre todo, en la época del invierno se observa que se produce una reducción del 65,5% en la calefacción. Sin embargo, el consumo en refrigeración ha aumentado un 0,8% respecto al modelo original.
- También se han mejorado los índices de confort: PMV y PPD con la incorporación de las medidas correctoras.
- Los resultados de PPD alcanzan una mejora del 58% en la sala de lectura, casi un 62% en los despachos 1 y 2, y un 38% en el despacho 3.
- Las mejoras en PMV con respecto al modelo inicial presentan un porcentaje del 65% en la sala principal de la planta sótano 2, un 66% en el despacho 1, un 68% en el despacho 2 y una mejora de 58% en la oficina 3.
- La calidad del aire está garantizada y la sensación térmica es mejor para los ocupantes, porque el caudal del aire que entra está controlado y además está precalentado por el intercambiador de calor en invierno. Las estrategias de mejora en el mes de diciembre han funcionado mejor con respecto a la antigüedad del aire,

ya que en el modelo inicial se cuenta con un caudal insuficiente para la zona estudiada.

- Los resultados de las simulaciones de los despachos muestran una edad del aire mayor que en el modelo original, y una velocidad del aire menor. Y esta situación es concordante, ya que una menor velocidad determina un menor caudal y, por lo tanto, una antigüedad del aire mayor. Aunque los valores resultantes son peores que en el modelo inicial, pero se cumple con el valor límite exigido en la situación actual. Además, se puede ver que con el sistema de ventilación mecánica se puede controlar un caudal de aire adecuado para la zona.
- Con la incorporación de la ventilación mecánica en el techo del recinto mejora el estancamiento de aire en la zona de entrada, donde el aire no se renueva fácilmente con la ventilación natural.

Por último, con el nuevo proyecto también se pueden conseguir mejoras en el aspecto acústico, ya que con la sustitución del sistema de ventilación natural por el mecánico se evita la apertura de las ventanas y las puertas, por donde entran los ruidos exteriores; y también con la mejora de la fachada exterior, el nuevo acristalamiento y la sustitución de la partición de vidrio se puede aumentar el nivel de aislamiento acústico del recinto.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Valenzuela Sanhueza, "Ética de la tierra y justicia ambiental: reflexiones en torno a la responsabilidad del ser humano en el devenir actual, desde un enfoque social y filosófico," *Atenea (Concepción)*, (517), pp. 167-180, 2018. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-04622018000100167&lng=es&nrm=iso&tlng=es. DOI: 10.4067/S0718-04622018000100167.
- [2] G. Kroll, "The "Silent Springs" of Rachel Carson: Mass media and the origins of modern environmentalism," *Public Understanding of Science (Bristol, England)*, vol. 10, pp. 403-20, 2001. . DOI: 10.1088/0963-6625/10/4/304.
- [3] F. Mayor Zaragoza, "Los límites del crecimiento," *Temas Para El Debate*, (181), pp. 10-16, 2009. Available: <https://enviromigration.files.wordpress.com/2013/01/limites-crecimiento.pdf>.
- [4] P. Jackson, "De Estocolmo a Kyoto: Breve historia del cambio climático," *Naciones Unidas*, .
- [5] G. H. Brundtland *et al*, "Our common future," 1987.
- [6] P. Froy, "Agenda 21: desarrollo sostenible: un programa para la acción." 1998.
- [7] UNFCCC, "Kyoto Protocol Reference Manual. On accounting of emissions and assigned amount," 2008.
- [8] UNFCCC, "Doha amendment to the Kyoto Protocol," 2012.
- [9] Naciones Unidas, "Objetivos de desarrollo sostenible," 2015.
- [10] J. García Navarro, "Sostenibilidad, construcción sostenible e I+D+i," unpublished.
- [11] A. Lamela, "La sostenibilidad, un reto global ineludible," *Informes De La Construcción*, vol. 57, (499-500), 2002.
- [12] E. M. Cisneros Calero, "Edificación Passivhaus," 2011. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13331>.
- [13] B. Rodríguez Soria *et al*, "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 78-90, 2014. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400166X>. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.009.

- [14] J. Zhou *et al*, "Investigating the impact of building's facade on the building's energy performance—a case study," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3144-3151, 2019. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219310689?via%3Dihub>.
- [15] I. Udrea *et al*, "Thermal bridges evaluation for a Passive House building in Romanian Southern climate," *8th International Conference on Energy and Environment*, pp. 456-459, 2017.
- [16] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria and J. M. Marín, "Air infiltrations and energy demand for residential low energy buildings in warm climates," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, pp. 109469, 2019. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109469>. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109469.
- [17] W. J. Hee *et al*, "The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 323-343, 2015. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020>. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.020.
- [18] H. Ye *et al*, "The energy saving index and the performance evaluation of thermochromic windows in passive buildings," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 215-221, 2014. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.008>.
- [19] D. Ben Ghidja, "Heat Recovery Ventilation for Energy-Efficient Buildings: Design, Operation and Maintenance," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, 2019. Available: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v9i1/A4795119119.pdf>.
- [20] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria and J. M. Marín, "Control strategies for Energy Recovery Ventilators in the South of Europe for residential nZEB—Quantitative analysis of the air conditioning demand," *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 271-282, 2017. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.058>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.058.
- [21] X. Cao, X. Dai and J. Liu, "Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 198-213, 2016. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.
- [22] H. Saldaña Márquez *et al*, "The passivhaus standard in the mediterranean climate: evaluation comparison and profitability," *Journal of Greenbuilding*, pp. 55-72, 2015. Available: <https://doi.org/10.3992/jgb.10.4.55>.
- [23] T. Hatt *et al*, "High indoor comfort and very low energy consumption through the implementation of the Passive House standard in Chile," *Revista De La Construcción*, pp. 123-134, 2012.

- [24] V. Corrado *et al*, "A new procedure of energy audit and cost analysis for the transformation of a school into a nearly zero-energy building," vol. 140, pp. 325-338, 2017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.146>.
- [25] A. Merabtine *et al*, "Building energy audit, thermal comfort, and IAQ assessment of a school building: A case study," *Building and Environment*, vol. 145, pp. 62-76, 2018. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.015>. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.015.
- [26] Y. Y. Ghadi and A. M. Baniyounes, "Energy audit and analysis of an institutional building under subtropical climate," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, pp. 845-852, 2018. Available: <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i2.pp845-852>.
- [27] G. Dermentzis *et al*, "A comprehensive evaluation of a monthly-based energy auditing tool through dynamic simulations, and monitoring in a renovation case study," *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 713-726, 2019. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.046>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.046.
- [28] J. Woo and T. Moore, "An End-User-Focused Building Energy Audit: A High-Density Multi-residential Development in Melbourne, Australia," *Energy Performance in the Australian Built Environment*, pp. 75-90, 2018.
- [29] A. Persily, "Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62," *Building and Environment*, vol. 91, pp. 61-69, 2015. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000839>.
- [30] Ministerio de Fomento, "Documento Básico de Salubridad," 2019.
- [31] Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios," Marzo, 2021.
- [32] AENOR, "Calidad ambiental en interiores. Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior," 2008.
- [33] AENOR, "Calidad ambiental en interiores. Parte 2: Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior," 2014.
- [34] AENOR, "Calidad ambiental en interiores. Parte 3: Sistema de gestión de los ambientes interiores," 2010.
- [35] T. Higuero *et al*, "Guía de Calidad del Aire Interior," *Dirección General De Industria, Energía Y Minas De La Comunidad De Madrid*, Septiembre, 2016.
- [36] I. Marta Morales, V. Blanco Acevedo and A. García Nieto, "Calidad del Ambiente Interior en edificios de uso público," *Dirección General De Salud Pública*, Julio, 2018.

- [37] X. Guardino Solá, Ed., *Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajo*. 2012.
- [38] C. Viñas Arrebola and C. Porrás Amores, "Modelización y análisis del comportamiento de confort y ahorro energético de sistemas pasivos avanzados," unpublished.
- [39] D. Etheridge, "A perspective on fifty years of natural ventilation research," *Building and Environment*, vol. 91, pp. 51-60, 2015. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000906>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>.
- [40] S. N. Ma'bdeh *et al*, "Simulation study for natural ventilation retrofitting techniques in educational classrooms – A case study," *Heliyon*, vol. 6, (10), pp. e05171, 2020. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05171>. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05171.
- [41] L. Yang *et al*, "Ventilation effect on different position of classrooms in "line" type teaching building," *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 886-902, 2019. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.228>. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.228.
- [42] B. J. Wachenfeldt, M. Mysen and P. G. Schild, "Air flow rates and energy saving potential in schools with demand-controlled displacement ventilation," *Energy and Buildings*, vol. 39, (10), pp. 1073-1079, 2007. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.018>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.10.018.
- [43] M. Mysen *et al*, "Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools," *Energy and Buildings*, vol. 37, (12), pp. 1234-1240, 2005. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.01.003>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.01.003.
- [44] B. Merema *et al*, "Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies," *Energy and Buildings*, vol. 172, pp. 349-360, 2018. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.065>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.04.065.
- [45] K. Ahmed, J. Kurnitski and P. Sormunen, "Demand controlled ventilation indoor climate and energy performance in a high performance building with air flow rate controlled chilled beams," *Energy and Buildings*, vol. 109, pp. 115-126, 2015. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.052>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.052.
- [46] J. Roset Calzada, R. A. Vásquez Paredes and L. M. Barajas Saldaña, "Uso eficiente de programas informáticos en arquitectura: DesignBuilder y Dialux," *Jornadas Sobre Innovación Docente En Arquitectura*, 2014.
- [47] M. Cruz Minguillón *et al*, "Guía para ventilación en aulas," 2020. Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/221538/14/guia_ventilacion_aulas_CSIC-Mesura_v4.pdf.

- [48] J. Allen *et al*, "5 step guide to checking ventilation rates in classrooms," *Harvard Healthy Buildings Program*, 2020. Available: <https://schools.forhealth.org/ventilation-guide/>.
- [49] C. Sáez, "Medir el CO2 en las aulas permite ajustar la ventilación sin pasar frío," *La Vanguardia*, 2021. Available: <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20210202/6183278/medir-co2-aulas-permite-ajustar-ventilacion-pasar-frio.html>.
- [50] CSIC, "La calidad del aire en las escuelas," Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/221538/11/cuento_calidad_aire_escuelas_Final.pdf.
- [51] Ministerio de Sanidad *et al*, "Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención y la propagación del SARS-CoV-2," Julio, 2020.
- [52] Ministerio de Sanidad and Ministerio de Educación y Formación Profesional, "Medidas de prevención, higiene y promoción de la salud frente a COVID-19 para centros educativos en el curso 2020-2021," Junio, 2020.
- [53] Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid, "Recomendaciones para la prevención y control del nuevo coronavirus (SARS-Cov-2) en el ámbito educativo," Octubre, 2020.
- [54] ABC Educación, "Esta es la manera correcta de ventilar las aulas este invierno," *ABC Educación*, 2020. Available: https://www.abc.es/familia/educacion/abci-esta-manera-correcta-ventilar-aulas-este-invierno-202011271033_noticia.html.
- [55] J. Ruiz-Tagle, "Madrid recomienda ventilar aulas entre 4 y 6 veces a la hora para evitar al Covid," *elEconomista*, 2020. Available: <https://www.eleconomista.es/sanidad/noticias/10869552/11/20/Madrid-recomienda-ventilar-aulas-entre-4-y-6-veces-a-la-hora-para-evitar-al-Covid.html>.

CAPÍTULO 8. ANEXOS

8.1. CATÁLOGO Y FICHA TÉCNICA DE SGG PLANITHERM 4S

SGG PLANITHERM® 4S

CONFORT Y AHORRO



LAS CUATRO ESTACIONES DEL AÑO

SGG PLANITHERM 4S, de Saint-Gobain Building Glass, **es la apuesta más segura para ahorrar energía y lograr el máximo confort todo el año**. Gracias a sus prestaciones permite disfrutar de la luz, y de una temperatura ideal, durante las cuatro estaciones del año, teniendo un gasto mínimo en calefacción y en aire acondicionado.

SGG PLANITHERM 4S colabora para que su casa sea más respetuosa con el medio ambiente, haciendo posible la reducción de las emisiones contaminantes producidas por la calefacción y el aire acondicionado.

DESCRIPCIÓN

Con el fin de dar una respuesta efectiva a las necesidades de confort de los países mediterráneos, Saint-Gobain Building Glass ha reinventado la capa magnetronica SGG PLANITHERM 4S. Con la tecnología más exclusiva, ha conseguido una nueva generación de vidrios con un excelente nivel de aislamiento térmico para las estaciones frías ($U = 1,0W/m^2 K$) y una protección solar optimizada para las estaciones calurosas ($g=0,42$): SGG PLANITHERM 4S es un vidrio selectivo que permite el paso de la luz, bloqueando la entrada de calor y evitando así el sobrecalentamiento de la estancia.

SGG PLANITHERM 4S mantiene nuestra casa luminosa, a una temperatura confortable, durante todo el año y ofrece buenas prestaciones desde el punto de vista estético, ya que su ligero reflejo neutro confiere estilo al vidrio y crea un ambiente agradable.

Está disponible la versión "a templar" SGG PLANITHERM 4S II que, una vez templado, posee las mismas prestaciones energéticas y estéticas que la versión sin templar, idónea para su instalación en porches, terrazas...

APLICACIONES

SGG CLIMALIT PLUS con SGG PLANITHERM 4S es el acristalamiento ideal para asegurar el control solar y el aislamiento térmico de los edificios modernos o de los rehabilitados, destinado principalmente al sector residencial (casas privadas, apartamentos, áticos, terrazas acristaladas, etc), siendo apto también para el sector terciario (colegios, hospitales, etc...). SGG CLIMALIT PLUS con

SGG PLANITHERM 4S se puede instalar con cualquier tipo de marco⁽¹⁾ (PVC, madera, aluminio, mixtos, etc).

La instalación del doble acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS con SGG PLANITHERM 4S cumple con la normativa establecida en el Código Técnico de la Edificación (CTE).



1. ⁽¹⁾ Consulte a su instalador de confianza y exija el auténtico SGG CLIMALIT PLUS.

VENTAJAS



Primavera

Los repentinos cambios de temperatura asociados al cambio de temporada, tan nocivos para la salud, ya no serán un problema. Disfrute de la primavera confortablemente en su hogar acristalado con **SGG CLIMALIT PLUS** con **SGG PLANITHERM 4S**.



Verano

El **SGG PLANITHERM 4S** refleja un alto porcentaje de la energía solar, ayudando a conseguir:

- **Una temperatura más homogénea y agradable.** El interior de la vivienda permanece a una temperatura confortable incluso durante los días más calurosos.
- **Menor gasto energético y más ahorro.** Al emplear menos el aire acondicionado se consigue un doble ahorro, tanto de dinero como de energía.



Otoño

Con **SGG PLANITHERM 4S** no se dará cuenta de la llegada de los primeros días de frío.

Gracias a **SGG PLANITHERM 4S** podrá retrasar el encendido de la calefacción y reducir sus horas de uso, manteniendo una temperatura confortable dentro de la estancia.



Invierno

SGG CLIMALIT PLUS con **SGG PLANITHERM 4S** proporciona el mejor aislamiento térmico del mercado, aislando hasta tres veces más que un doble acristalamiento con vidrio básico. Usted ganará en:

- **Calor y confort.** Minimiza las pérdidas de calor a través de las ventanas, reduce el riesgo de condensaciones y posibilita el máximo confort en el espacio habitable, incluso cerca de las ventanas.
- **Importantes ahorros.** Protege su economía, ayudando a reducir la necesidad de calefacción.

TRANSFORMACIÓN

SGG PLANITHERM 4S debe ensamblarse siempre en un doble acristalamiento **SGG CLIMALIT PLUS**, con la cara capa hacia el interior en posición 2. La capa debe desbordarse perimetralmente antes de su ensamblado en **SGG CLIMALIT PLUS**.

SGG PLANITHERM 4S II debe templarse para obtener las prestaciones declaradas y ambos productos **SGG PLANITHERM 4S** y **SGG PLANITHERM 4S II** pueden laminarse antes del ensamblado en el doble acristalamiento. Por favor, consulte la sección de transformación en los catálogos de los productos **SGG PLANITHERM** en nuestra web: es.saint-gobain-building-glass.com.

EL VIDRIO MÁS ADECUADO

*Para determinar el vidrio más adecuado para su hogar y calcular el posible ahorro al usar **SGG PLANITHERM 4S** en sus ventanas, descargue en su smartphone o tablet. www.glass-compass.com*



GAMA

sss PLANITHERM 4S y sss PLANITHERM 4S II están disponibles sobre vidrio incoloro sss PLANICLEAR en 4 y 6 mm, en PLF (6000x3210mm) y en DLF (3210x2550mm). Para otros sustratos o dimensiones, consultar.

Gracias a la versatilidad de nuestra gama sss CLIMALIT PLUS, usted puede añadir otras prestaciones al control solar y aislamiento térmico reforzado que aporta el vidrio sss PLANITHERM 4S. escoja la solución que más se adapte a sus necesidades.

Prestaciones	sss CLIMALIT PLUS		Prestaciones adicionales
	Vidrio Exterior	Vidrio Interior	
Control Solar 	sss PLANITHERM 4S* <small>*Monolítico ó Laminado</small>	sss DECORGLASS sss MASTERGLASS sss SATINOVO	Diseño y privacidad 
+ Aislamiento Térmico 		sss STADIP sss STADIP PROTECT	Protección personas y objetos 
+ Ahorro 		sss STADIP SILENCE	Protección y Aislamiento acústico 

*Prestaciones principales de un doble acristalamiento sss CLIMALIT PLUS con sss PLANITHERM 4S en el vidrio exterior y sss PLANICLEAR en el vidrio interior.

Vidrio Exterior	Composición mm	sss PLANITHERM 4S / sss PLANICLEAR			
		4 (12) 4	4 (16) 4	6 (12) 6	6 (16) 6
Factores luminosos					
TL (Transmisión luminosa)	%	66	66	65	65
RL _e (Reflexión luminosa exterior)	%	27	27	27	27
RL _i (Reflexión luminosa interior)	%	24	24	24	24
Factores energéticos					
T (Transmisión energética)	%	41	41	40	40
R _e (Reflexión energética exterior)	%	43	43	41	41
A _e (absorción del vidrio exterior)	%	14	14	17	17
A _i (absorción del vidrio interior)	%	2	2	2	2
Factor solar g EN40		0,43	0,43	0,42	0,42
Valor U					
Aire	W/(m ² K)	1,6	1,3	1,5	1,5
Argón 90%	W/(m ² K)	1,2	1,0	1,2	1,0

sss PLANITHERM 4S cumple con los requisitos de durabilidad "Clase C" de la Normativa Europea EN1096. Dispone de Mercado CE como todos los vidrios de Saint-Gobain Glass.



www.calumenlive.com



Glass Compass



Glass Facade



DB Station



El blog de Climalit
<http://climalit.es/blog/>


SAINT-GOBAIN

Building Glass España

c/ Príncipe de Vergara, 132
28002 Madrid
es.saint-gobain-building-glass.com
www.climalit.es

Todas las marcas que aparecen son marcas registradas por Saint-Gobain.

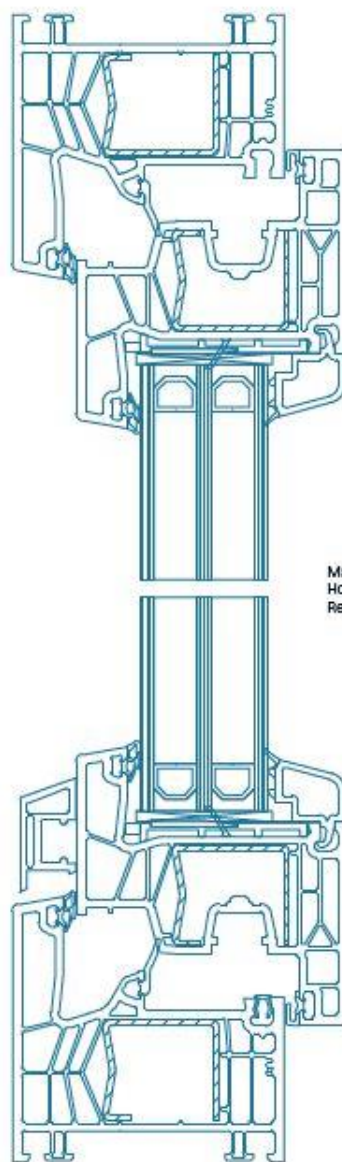
8.2. FICHA TÉCNICA DE KÖMMERLING



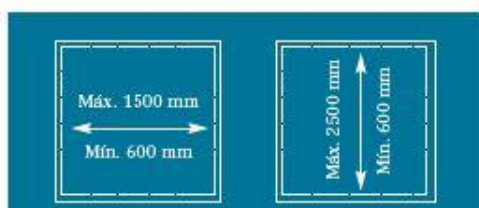
KÖMMERLING®
Sistemas de ventanas

DESCRIPCIÓN

- Sistema de 76 mm con **6 cámaras estancas y triple junta central.**
- Diseño de líneas rectas y hoja retranqueada en un perfil con una estética muy cuidada.
- Transmitancia térmica de la carpintería desde $U_{f=1,00 W/m^2K}$.
- Transmitancia térmica de la ventana a partir de $U_{w=0,79 W/m^2K}$.
- Reducción acústica de **hasta 47 dB.**
- Refuerzo de acero zincado de alta inercia con gran desarrollo que permite aumentar la rigidez del sistema y que conforma una cámara adicional incrementando el aislamiento del conjunto.
- Profundidad del galce de entre **16 y 48 mm.**
- Canal de herraje estándar con un rebeje que facilita el montaje y estabilidad de las piezas.
- Junquillos con juntas coextrusionadas con cuidada apariencia visual y de fácil limpieza.
- **Innovadora cuarta junta en la hoja que reduce los movimientos de aire en la cámara del vidrio,** contribuyendo a la mejora de la transmisión térmica del conjunto.
- Unión de las esquinas soldadas que aumenta la estabilidad mecánica del conjunto.
- Disponible en blanco y en diferentes foliados de KÖMMERLING. Otros colores, consultar.
- Perfil greenline®, 100% reciclable y libre de plomo.



Marco 76171
Hoja 76271
Refuerzo V306



OPCIÓN CERTIFICADA



- Ventana certificada por el Instituto Passivhaus para Clima Templado, como el de la Península Ibérica.
- Apta para proyectos Passivhaus y Edificios de Energía Casi Nula (EECN).
- Incorpora un relleno de neopor en el marco que refuerza el aislamiento térmico.
- Mantiene la máxima inercia ya que conserva los refuerzos de acero zincado en la hoja.
- Apta para cerramientos de grandes dimensiones.



$$U_w = 0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ENSAYOS

TIPO VIDRIO	CÁLCULO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO. Según UNE EN 14351:2005+A1:2011		
	R _w (C,Ctr)	Ventana sin persiana R _w (C,Ctr)	Ventana con RolsPlus R _w (C,Ctr)
VIDRIO 4/16arg/4	30 (-1,-4)	33 (-1,-5)*	33 (-1,-5)
VIDRIO 4/12arg/4/12arg/4	32 (-1,-5)	33 (-2,-6)*	33 (-2,-6)
VIDRIO 66.25I20Arg44.25I	48 (-2,-8)	47 (-2,-5)*	42 (-2,-5)

* Ventana ensayada 1230x1480 mm.
Los vidrios son orientativos y los valores pueden variar en función del fabricante.

TIPO VIDRIO	CÁLCULO DE TRANSMITANCIA TÉRMICA. Según UNE EN 10077-2			
	SISTEMA U _f W/m ² K	VIDRIO U _g W/m ² K		Ventana sin persiana U _f W/m ² K
KÖMMERLING 76 MD	1,1	1	0,06	1,18
		0,8	0,06	1,04
		0,6	0,032	0,84
KÖMMERLING 76 MD Certificada	0,98	0,6	0,032	0,8

* Cálculo ventana 1230x1480 mm.
Los vidrios son orientativos y los valores pueden variar en función del fabricante.

CÁLCULO VALORES FÍSICOS Ventana 1 hojas 1176x2576.		
Resistencia al viento	UNE EN 12211:2000	Clase C5
Estanqueidad al agua	UNE EN 1027:2000	9 A
Permeabilidad al aire	UNE EN 1026:2000	Clase 4

M A T E R I A P R I M A

Los productos KÖMMERLING están fabricados con **Kömalit Z**, formulación propia. Los perfiles se obtienen mediante extrusión y el control de fabricación permanente asegura la calidad y la precisión de formas.

®Kömalit Z	DIN EN ISO 1163	Blanco y color PVC-U, E, 0B2 - 50 - T 28, similar al RAL 9016
Densidad	DIN EN ISO 1183	1,45 g/cm ³
Resistencia al impacto hasta -40°C	DIN 53453 (varilla normal pequeña)	Sin rotura
Deformación al impacto (para clima normal de 23 °C)	DIN EN ISO 179 (Ensayo 1fc)	≥40 kJ/m ²
Resistencia a la penetración de bola (30 segundos)	DIN ISO 239	100 N/mm ²
Dureza a la penetración de bola	DIN EN ISO 527	≥40 N/mm ²
Módulo de elasticidad en tracción (Módulo E)	DIN EN ISO 527	≥2500 N/mm ²
Temperatura de reblandecimiento Vicat Estabilidad dimensional al calor - Vicat VST/B (medido en aceite) - ISO R 75/A (medido en aceite)	DIN ISO 306 DIN 53461	≥80 °C ≥69 °C
Coefficiente de dilatación lineal -30°C hasta +50°C		0,8 x 10 ⁻⁴ K ⁻¹
Conductividad térmica	DIN 52612	0,16 W/mK ²
Resistencia específica a la transmisión	DIN VBE 0303 T3	10 ¹⁶ Ω cm
Constante relativa a la dielectricidad	DIN 53483	3,3 a 50 Hz; 2,9 a 10 ⁶ Hz
Comportamiento ante el fuego	DIN 4102	Difícilmente inflamable, autoextinguible.
Estabilidad ante los agentes atmosféricos	DIN ISO 105-A03	Después de 12 GJ/m ² (climas cálidos RAL-GZ 716/1 (S)) de exposición, valor inferior a grado 3 de la escala de grises.
Resistencia a los agentes atmosféricos		Después de 12 GJ/m ² (climas cálidos RAL-GZ 716/1 (S)) de exposición, la disminución de la resistencia al impacto es <30% ó >28 KJ/m ² .
Comportamiento fisiológico		Inerte, Neutro. Su estabilidad a la intemperie, así como su resistencia ante los agentes químicos y al pudrimiento, garantizan que su manipulación no imponga riesgo para la salud ni para el medio ambiente.
Limpieza y mantenimiento		Se recomienda el uso de Koraclean (blanco o color) o en su defecto agua y un jabón sin disolventes o abrasivos. Engrase de los herrajes una vez al año.

8.3. FICHA TÉCNICA DE SIBERDUO TM

GAMA TERCIARIO
VMC DOBLE FLUJO

SIBERDUO TM

NOVEDAD

Tecnología

Ventilación mecánica controlada de doble flujo con recuperación de calor

Proyectos

Obra nueva

Edificios

Terciario

Caudal

máx. 2.400 m³/h



Unidad de ventilación de doble flujo equipada con un intercambiador a contracorriente de calor de alta eficiencia y motores de corriente continua (EC) conmutados electrónicamente que proporcionan SFP entre los más eficientes del mercado.

Renovación de aire en edificios con recuperación de energía, operación bypass verano / invierno, ajuste del caudal mediante potenciómetro. Filtración y purificación del aire.

Rendimiento superior al 90% (EN308), conforme con RT2012 y la directiva ErP 2009/125 / EC.

- ✓ Recuperador de flujos cruzados
- ✓ Eficiencia > 90%
- ✓ By-pass 100% automático
- ✓ Ventiladores EC
- ✓ Purificación del aire (Filtro F7 de serie impulsión)
- ✓ Plug & Play

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MODELO	Potencia Eléctrica motor W	Temp. Servicio °C	Índice de protección	Protección térmica*	Tensión V / Ph / Hz	Intensidad de protección A
SIBERDUO TM 600	2x100	-20/80	IP54/B	PTI	230 / 1 / 50	2,8
SIBERDUO TM 900	2x220	-20/80	IP44/B	PTI	230 / 1 / 50	3,4
SIBERDUO TM 1300	2x400	-20/40	IP44/F	PTI	230 / 1 / 50	8,6
SIBERDUO TM 1800	2x400	-20/40	IP44/F	PTI	230 / 1 / 50	8,6
SIBERDUO TM 2500	2x400	-20/40	IP44/F	PTI	230 / 1 / 50	8,6

*PTI: Protección Térmica Integrada

DIMENSIONES Y CONFIGURACIÓN

MODELO SIBERDUO TM	Ø	A	B	C	D	E	F1	F2	F3	G	G1	G2	J	K	M	M1	M2	M3	T	T1	Peso
	mm																			Ø	kg
SIBERDUO TM 600	250	1700	780	330	160	370	-	-	-	150	50	145	170	645	640	-	-	-	1/2	1/2	120
SIBERDUO TM 900	315	2020	965	415	210	480	-	-	-	150	50	145	250	790	770	-	-	-	1/2	1/2	180
SIBERDUO TM 1300	355	2190	1220	415	195	600	795	735	680	430	50	425	250	690	950	1170	510	510	1/2	1/2	255
SIBERDUO TM 1800	400	2270	1220	495	245	600	915	725	630	430	50	425	330	685	950	1110	580	580	1/2	1/2	275
SIBERDUO TM 2500	400	2365	1740	495	245	910	640	785	770	430	50	425	330	965	1350	1235	580	580	3/4	1/2	380

SIBERDUO TM						
Espacio mantenimiento (mm)	-	600	900	1300	1800	2500
Acceso filtro / Armario eléctrico	L1	275	375	520	520	690
Acceso ventiladores	L2	225	320	380	435	435
Acceso ventiladores / Intercambiador	L2	470	560	670	670	1020

