



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación experimental de un sistema de ventilación mecánica controlada para minimizar la concentración de radón en un despacho del CUD-ENM

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Sergio Rojo Rodríguez
DIRECTORES: Arturo González Gil
Pablo Falcón Oubiña
CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación experimental de un sistema de ventilación mecánica controlada para minimizar la concentración de radón en un despacho del CUD-ENM

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En diversos estudios anteriores se ha determinado la existencia de radón en los despachos de la planta baja del edificio del CUD, en particular en el despacho 114. Según la bibliografía, una de las técnicas más idóneas para renovar el aire contaminado y mantener unos adecuados niveles de radón en edificios existentes es la ventilación.

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado es realizar una caracterización experimental del sistema de ventilación instalado en la planta baja del edificio del CUD con el fin de evaluar la capacidad de renovación del aire en el despacho objeto de estudio, y determinar si esta es adecuada para mantener los niveles recomendados de radón.

Se han analizado los resultados atendiendo a las siguientes actividades realizadas: determinación experimental de los caudales de funcionamiento del sistema de ventilación, estudio de la capacidad de renovación del aire y evaluación del comportamiento del radón frente al sistema de ventilación; concluyéndose que, el sistema de ventilación no es suficiente para renovar el aire adecuadamente. Sin embargo, se realizaron ciertas pruebas experimentales en las que se mantuvieron los márgenes recomendados del radón, según distintas configuraciones de ventilación.

Finalmente, se han establecido una serie de recomendaciones para mejorar las condiciones de ventilación del sistema existente para los usuarios del edificio.

PALABRAS CLAVE

Radón, Ventilación, Renovaciones de aire, UTA, Fancoil, Extractor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y en lo que respecta al presente TFG, me gustaría agradecer a los dos tutores, Arturo y Pablo, por el tiempo dedicado y por el continuo apoyo tanto académico como moral durante todo el desarrollo del trabajo. Gracias a sus recomendaciones y consejos he podido disfrutar de la realización de lo que supone el fin de mis pasos por la Escuela Naval Militar en calidad de alumno. No puedo olvidarme también del señor Antón Cacabelos, cuya ayuda en ciertas partes del trabajo fue de gran valor y merece su reconocimiento.

En segundo lugar, quiero hacer mención al Colegio Leonés Jesús Maestro, lugar en el que crecí y me formé hasta llegar exitosamente a la ENM. En especial me gustaría dedicar estas palabras a mis profesores Miguel y José Eusebio, pues sin ellos y su dedicación no habría llegado a donde estoy hoy en día. Parte de mis logros y éxitos va dedicada a ellos.

En tercer lugar, agradecer a la Promoción 422-152, por todos los buenos momentos disfrutados y los malos momentos superados. En especial me gustaría dedicar este trabajo al apoyo y ayuda prestados por el “Piso Franco” y al estudio 210. Ha sido un privilegio compartir estos cinco años con vosotros.

En último lugar, quiero agradecer a toda mi familia por todo el apoyo recibido. Siempre han sido y serán la mejor referencia para mi vida personal y profesional. Gracias a la educación que me habéis inculcado, con valores como la humildad o el espíritu de sacrificio, me han permitido alcanzar los diferentes éxitos que he ido consiguiendo, a falta de cumplir el sueño de ser Oficial de la Armada Española. Agradecer a mi padre por enseñarme desde temprana edad el significado de ser militar, el amor por mi país y por el servicio bien cumplido; a mi madre, que ha dedicado su vida para mi educación y bienestar, y me ha enseñado a seguir luchando por mis sueños contra toda adversidad; y a mi hermana, pues me ha guiado incondicionalmente en mi vida personal y académica con mucha paciencia, dedicación y cariño. Gracias a vosotros tres, mis sueños se han cumplido con éxito. También agradecer al resto de mi familia por la ayuda y consejo que he recibido de ellos, en especial a mi abuelo Luis, al que le dedico especialmente, con mucha alegría y emoción, mi futuro despacho de Alférez de Navío. Durante todos estos años en la ENM he podido apreciar lo que significa estar lejos de casa, y de la fortuna que tengo de poder disfrutar de vosotros. Gracias familia por estar siempre a mi lado.

“Estudia, trabaja duro, y sé humilde. Tú eres capaz de todo hijo mío”

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Importancia de la ventilación en espacios interiores	9
1.1.1 Calidad del aire	9
1.1.2 El gas radón	9
1.1.3 Concentración de radón en espacios interiores.....	11
1.1.4 La ventilación	13
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Metodología y planificación general.....	14
2 Estado del arte	15
2.1 Normativas sobre radón, ventilación y calidad del aire	15
2.1.1 Recomendación Organización Mundial de la Salud.....	15
2.1.2 Directiva 2013/59/EURATOM	15
2.1.3 Código Técnico de la Edificación (CTE)	16
2.1.4 Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)	17
2.2 Sistemas de ventilación.....	21
2.2.1 Clasificación de la ventilación.....	21
2.2.2 Ventilación Mecánica Controlada (VMC).....	23
2.2.3 Unidades de Tratamiento de Aire (UTA)	25
3 Materiales y métodos.....	27
3.1 Descripción del recinto de objeto de estudio	27
3.2 Descripción del sistema de ventilación y climatización	30
3.2.1 Sistema de distribución del aire	30
3.2.2 Sistema de climatización	35
3.3 Sistema complementario de extracción de aire.....	38
3.4 Esquema del sistema de la ventilación y climatización en el despacho 114.....	40
3.5 Equipos de medición.....	41
3.5.1 Anemómetro Térmico.....	41
3.5.2 Monitor de calidad del aire Temtop M2000C	43
3.5.3 RadonEye.....	44

3.6 Procedimiento experimental	45
3.6.1 Metodología de mediciones de caudales	45
3.6.2 Metodología para cálculo de la tasa de renovaciones de aire	49
3.6.3 Evaluación del sistema de ventilación frente al radón.....	53
4 Resultados	55
4.1 Determinación de caudales de la instalación	55
4.1.1 Caudales totales impulsados por la UTA.....	55
4.1.2 Caudales de aire fresco introducidos en el falso techo del despacho	56
4.1.3 Caudales del fancoil.....	57
4.1.4 Caudales del extractor.....	58
4.2 Determinación del número de renovaciones de aire	59
4.3 Evaluación de la capacidad de la ventilación contra el radón.....	62
5 Conclusiones y líneas futuras	67
5.1 Conclusiones	67
5.2 Recomendaciones y líneas futuras	68
6 Bibliografía.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [4].....	10
Figura 1-2 Estimación de la contribución de las distintas fuentes de exposición naturales y artificiales [5].....	10
Figura 1-3 Cadena de desintegración del uranio [3].....	11
Figura 1-4 Vías de inserción del radón a los edificios [3].....	12
Figura 1-5 Mapa de potencial de radón en España. En naranja, las zonas más afectadas [10].....	12
Figura 2-1 Esquema del sistema de ventilación mecánica en una vivienda, según el CTE HS 3 [25].....	22
Figura 2-2 Sistema de distribución VMC en estrella [26].....	25
Figura 2-3 Sistema de distribución VMC en árbol [26].....	25
Figura 2-4 Unidad de Tratamiento de Aire compacta [30].....	26
Figura 2-5 Unidad de Tratamiento de Aire modular [31].....	26
Figura 3-1 Vista aérea de la Escuela Naval Militar [33].....	27
Figura 3-2 Ubicación del Edificio del CUD. Captura de pantalla de Google Earth de la Escuela Naval Militar.....	28
Figura 3-3 Plano de la planta baja del Edificio del CUD [34].....	28
Figura 3-4 Plano de la planta baja del CUD con las ubicaciones relevantes.....	29
Figura 3-5 Imagen del despacho 114 en la actualidad.....	29
Figura 3-6 Vista acotada en centímetros de la planta del despacho 114.....	30
Figura 3-7 Unidad de Tratamiento del Aire FMA/HP 036, instalada en el CUD.....	31
Figura 3-8 Controlador del régimen de velocidad de la UTA.....	31
Figura 3-9 Conducto CLIMAVER Plus R [35].....	32
Figura 3-10 Esquema del sistema de conducción de aire desde la UTA a los despachos en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010.....	32
Figura 3-11 Conducto y trampilla abierta de entrada del aire al falso techo.....	32
Figura 3-12 Conducto de entrada del aire al falso techo, con la trampilla cerrada.....	33
Figura 3-13 Conducto de entrada de aire al falso techo.....	33
Figura 3-14 Posiciones de trampilla para paso del aire.....	34
Figura 3-15 Situación del conducto de expulsión del aire procedente de la UTA.....	34
Figura 3-16 Bomba de calor NRL 0650 H AR situada en la azotea del edificio del CUD.....	35
Figura 3-17 Esquema de la red de tuberías de impulsión/retorno del agua de climatización en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010.....	36
Figura 3-18 Sistema fancoil y tuberías de refrigeración en el falso techo del despacho 114.....	36
Figura 3-19 Fancoil FCX42P del despacho 114 [36].....	37
Figura 3-20 Panel de control del fancoil.....	37

Figura 3-21 Ventilador centrífugo del fancoil	37
Figura 3-22 Difusor de fancoil en el techo del despacho 114.....	38
Figura 3-23 Ventilador heliocentrífugo TD-350/125 SILENT [38]	38
Figura 3-24 Montaje del extractor en el despacho 114.....	39
Figura 3-25 Regulador de velocidad del extractor.....	39
Figura 3-26 Diagrama de la instalación completa para ventilación-Vista en planta	40
Figura 3-27 Diagrama de la instalación completa para ventilación – Vista de perfil.....	41
Figura 3-28 Equipo de medición Testo 405i [41]	41
Figura 3-29 Logo de la aplicación Testo Smart [42]	42
Figura 3-30 Captura de pantalla de la aplicación Testo.....	42
Figura 3-31 Captura de pantalla de aplicación Testo. Configuración del programa de caudal volumétrico	43
Figura 3-32 Monitor de calidad del aire Temtop M2000C [43]	44
Figura 3-33 Medidor RadonEye	44
Figura 3-34 Perfil de Velocidades del flujo laminar (arriba) y turbulento (abajo) [45]	45
Figura 3-35 Conducto de fancoil hecho de cartulina manualmente.....	46
Figura 3-36 Montaje del extractor con conducto totalmente recogido	47
Figura 3-37 Montaje del extractor con conducto recogido y admisión a doble altura.....	47
Figura 3-38 Montaje de extractor con conducto totalmente desplegado	48
Figura 3-39 Configuración de extractor con conducto extendido y a doble altura.....	48
Figura 3-40 Montaje de extractor con tubo extendido y en gran altura.....	49
Figura 3-41 Botella de CO ₂ para llenado del despacho	50
Figura 3-42 Situación del medidor durante la experimentación	50
Figura 3-43 Disposición para llenado de CO ₂ desde el exterior del despacho.....	51
Figura 3-44 Gráfica ejemplo de disminución del CO ₂ para cálculo de renovaciones/hora	52
Figura 3-45 Visualizador web del sistema de monitorización de la concentración de radón.....	54
Figura 4-1 Caudales y consumos según potencia de la UTA	55
Figura 4-2 Caudales combinados de potencia de UTA y posiciones de trampilla	56
Figura 4-3 Valores medidos y promedios de cada modo del fancoil.....	57
Figura 4-4 Caudales promedio de cada modo del fancoil.....	57
Figura 4-5 Curvas de caudales del extractor según diferentes configuraciones	58
Figura 4-6 Número de renovaciones/hora según diferentes combinaciones de la instalación sin extractor	61
Figura 4-7 Número de renovaciones/hora según diferentes combinaciones de la instalación con extractor	61
Figura 4-8 Gráfica de concentración de radón, 11-13 de febrero	62
Figura 4-9 Gráfica de concentración de radón, 18-20 de febrero	63

Figura 4-10 Gráfica de concentración de radón, 4-6 de marzo.....63
Figura 4-11 Gráfica de concentración de radón, 9-11 de marzo.....64
Figura 4-12 Gráfica de concentración de radón, 11-13 de marzo.....65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables [20].....	17
Tabla 2-2 Caudales de aire exterior mínimos por el método indirecto	19
Tabla 2-3 Concentraciones de CO2 según categorías de calidad del aire	19
Tabla 2-4 Condiciones interiores de diseño de la IT 1.1.4.1.2 del RITE.....	21
Tabla 3-1 Características de la bomba de calor del CUD	35
Tabla 3-2 Características de operación del extractor de pared [38] [39]	39
Tabla 3-3 Limitaciones de medida del instrumento Testo 405i [40]	43
Tabla 3-4 Fechas de realización de los experimentos de renovaciones de aire	53
Tabla 4-1 Comparación de caudales del fancoil del fabricante y de la experimentación	58
Tabla 4-2 Resultados de renovaciones por hora para las diferentes configuraciones de la ventilación ..	60

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Importancia de la ventilación en espacios interiores

1.1.1 Calidad del aire

La calidad del aire hace referencia a la cantidad de sustancias contaminantes presentes en el aire. Un aire contaminado o “viciado” perjudica notablemente a las personas que se encuentren en el interior de un recinto, ya sea a corto plazo, afectando al estado de ánimo y al rendimiento laboral; o a largo plazo, desembocando en la aparición de enfermedades como el asma crónica o el cáncer de pulmón. Según científicos de la Universidad Técnica de Dinamarca, “una buena calidad del aire puede mejorar la productividad en un 10%” [1]. Los síntomas más habituales de un aire de mala calidad, según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) [2], son los siguientes:

- El agotamiento, sensación de cansancio generalizado, náuseas o mareos.
- Dificultad para concentrarse o dolores de cabeza.
- Aparición de reacciones alérgicas, sequedad, picores y enrojecimiento en la piel.
- Irritación de las vías respiratorias o de la zona ocular.
- Opresión torácica o sensación de ahogo.

Los principales contaminantes del aire son los compuestos orgánicos volátiles, virus, bacterias u hongos, fruto de procesos naturales o por la propia actividad humana. Un claro ejemplo es la situación actual de pandemia del virus del Covid-19, cuyas partículas de aerosoles en suspensión degradan la calidad del aire ayudando a que se transmitan con mayor facilidad, hecho que se agrava si ese aire no es renovado. Entre otros contaminantes se encuentra el gas radón, un elemento químico capaz de acumularse en recintos cerrados que provoca serios problemas en el sistema respiratorio humano durante una exposición prolongada y repetitiva.

Conseguir por tanto un aire de óptima calidad es un objetivo de vital importancia, el cual se puede alcanzar por medio de técnicas de ventilación que renueven el aire de un espacio cerrado y elimine el contaminado al exterior.

1.1.2 El gas radón

El gas radón es un gas perteneciente al grupo de los gases nobles, situados en la columna número 18 de la tabla periódica de los elementos (Figura 1-1). Se caracteriza fundamentalmente porque es un gas inerte radiactivo de origen natural, incoloro, insípido, inodoro, de muy alta densidad (ocho veces más pesado que el aire) y con una gran estabilidad química [3].

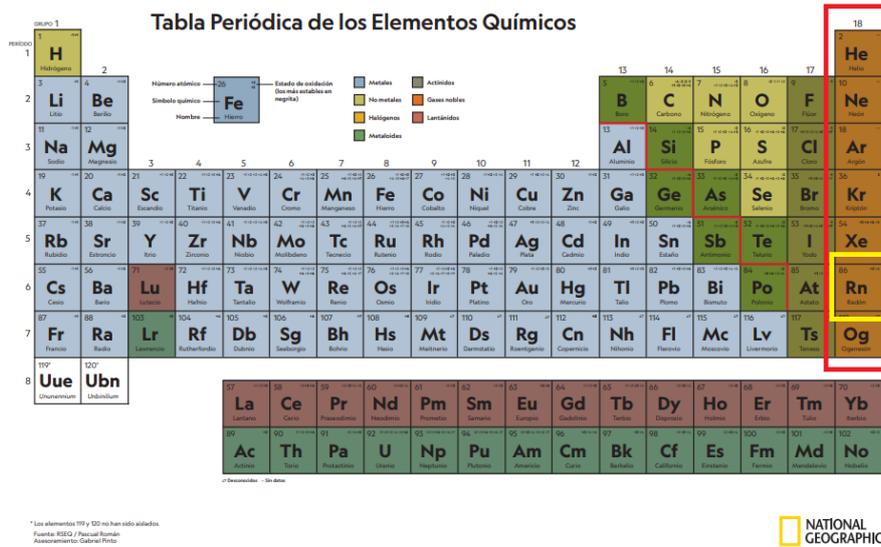


Figura 1-1 Tabla periódica de los elementos [4]

La propiedad de mayor preocupación del radón es su gran capacidad radiactiva ionizante, constituyendo un gran porcentaje de la radiación natural que absorbe el ser humano (Figura 1-2) [5].

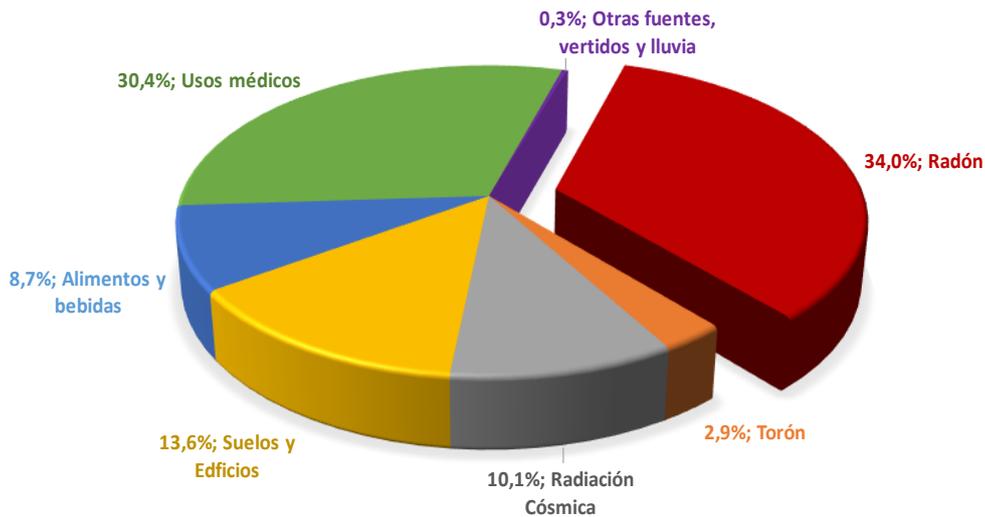


Figura 1-2 Estimación de la contribución de las distintas fuentes de exposición natural y artificiales [5]

El isótopo de radón más estable procede de la cadena natural de desintegración del uranio (Figura 1-3), presente principalmente en terrenos graníticos, pizarrosos o incluso en el agua. El uranio se desintegra a lo largo del tiempo en diversos isótopos como el radio (Ra 226). Derivado de este último, aparece el Rn 222, el cual se nombrará a partir de ahora como radón [6], palabra procedente de la combinación en latín “*radiation emanation*”.

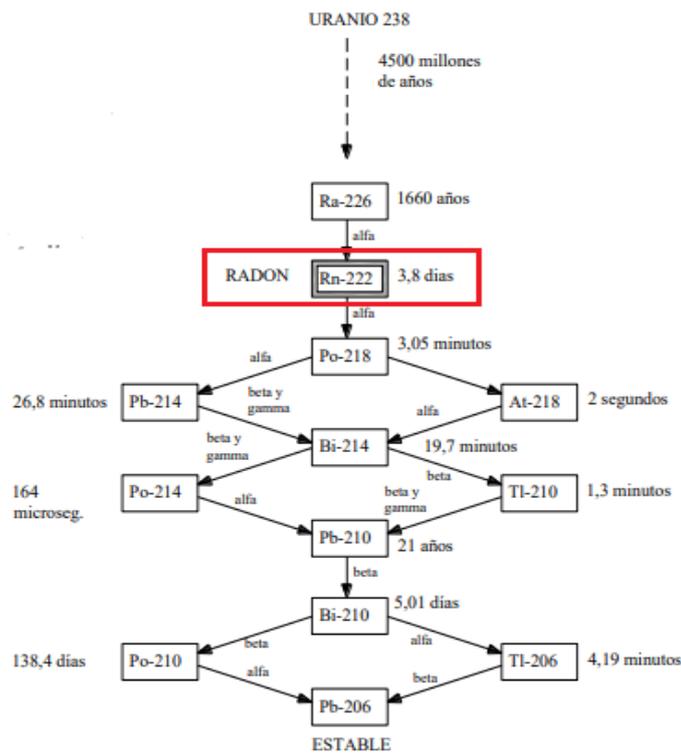


Figura 1-3 Cadena de desintegración del uranio [3]

La unidad con la que se define la actividad radiactiva del radón es el Becquerel (Bq), que equivale a una desintegración nuclear por segundo. Si bien, la presencia de este elemento químico en un volumen cerrado o un espacio interior se mide normalmente en términos de concentración, es decir, en Becquereles por metro cúbico (Bq/m³).

El radón, debido a su radiactividad y contaminación ionizante, es considerado como un potente agente cancerígeno por la OMS [7]. En concreto, el principal impacto del radón es el cáncer de pulmón, pues las partículas procedentes de su desintegración, en su mayoría de tipo alfa, son inhaladas por el ser humano, interaccionando con los tejidos del aparato respiratorio de manera directa y continuada en el tiempo. Todo ello conduce a alteraciones del ADN o apariciones de tumores en el tracto respiratorio y tejidos traqueo-bronquiales [8].

1.1.3 Concentración de radón en espacios interiores

El radón es un gas con una gran movilidad y permeabilidad a través de la corteza terrestre y diversos materiales de construcción de edificios. De hecho, la concentración de radón suele alcanzar altos niveles en sótanos o plantas bajas, pues penetra fácilmente por orificios y grietas que aparecen en el suelo (Figura 1-4) [7]. La concentración del radón en espacios interiores también depende de factores meteorológicos, como la temperatura, la presión atmosférica o la humedad [9]. Todos estos componentes que provocan la acumulación de radón afectan directamente a la calidad del aire de los espacios interiores.

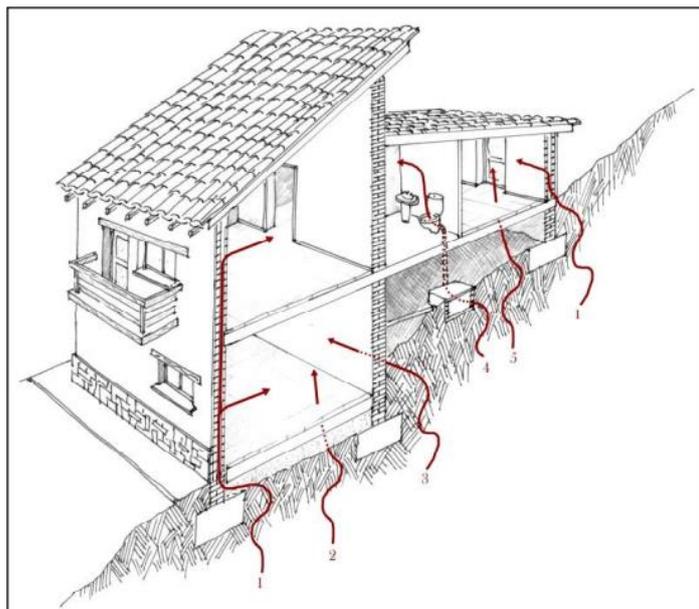


Figura 1-4 Vías de inserción del radón a los edificios [3]

Es por esto que el campo de la medición sobre la concentración del radón ha avanzado tecnológicamente a ritmo acrecentado, con nuevos sistemas y equipos de medición más precisos que llegan desde simplemente medir dicha acumulación hasta proporcionarnos el lugar o los puntos donde mayor filtración existe en un espacio cerrado. Cada vez se descubren más zonas afectadas por sobrepasar los valores recomendados de concentración de radón, como se muestra en el mapa del potencial del radón en España (Figura 1-5), elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear [10].

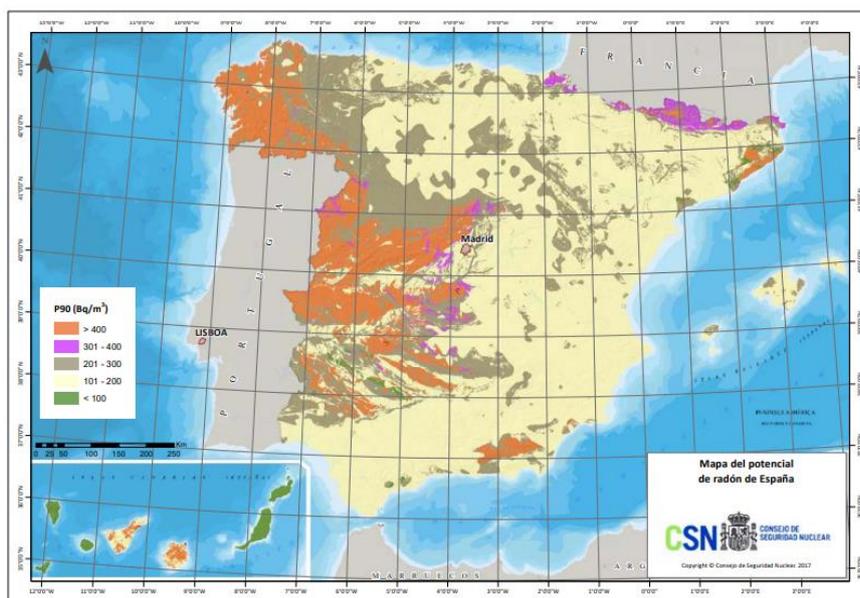


Figura 1-5 Mapa de potencial de radón en España. En naranja, las zonas más afectadas [10]

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el promedio anual de exposición al radón en ambientes de trabajo sea inferior a 300 Bq/m^3 , siendo óptimo el valor de 100 Bq/m^3 , por debajo de los cuales los riesgos para la salud son ínfimos [7]. Además, los diferentes organismos e instituciones llevan desarrollando durante los últimos años los documentos informativos y normativos para dar a conocer la existencia del radón, sus características y efectos y como controlarlo en espacios interiores.

Actualmente, la normativa vigente, la Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo [11], especifica un nivel de referencia para las concentraciones de radón en interiores equivalente a 300 Bq/m^3 de promedio anual. Existen otras normativas o recomendaciones, como la sección HS6 del Código técnico de Edificación (CTE) [12], las cuales se expondrán en el capítulo 2. Sin embargo, la concentración de radón en espacios interiores en territorio español sobrepasa de manera considerable estos valores en numerosos lugares (ver mapa Figura 1-5), por lo que es necesario disponer de técnicas para remediar este problema. Una de las técnicas más adecuadas para controlar y reducir la concentración de radón es la ventilación en espacios interiores.

1.1.4 La ventilación

Ventilar es, por definición, el proceso de carácter vital por el cual se consigue renovar el aire del interior de un recinto con el fin de limitar el deterioro de su calidad y composición.

La ventilación es la medida más adecuada, eficiente y de sencilla implementación destinada a conseguir una calidad de aire óptima, a la vez que reduce las concentraciones de radón en los recintos cerrados. Cualquier alternativa de ventilación: natural, forzada (mecánica) o híbrida, es lo suficientemente válida para proteger la salud humana frente a la exposición al radón y a un aire contaminado.

La ventilación y la calidad del aire siguen las normativas del CTE y del Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE), dependiendo del tipo de edificio o espacio donde se aplique el proceso de ventilación [13]. Estas normativas se focalizan particularmente en la ventilación mecánica controlada, con el fin de renovar el aire de un volumen cerrado, con una mayor eficacia y eficiencia energética. Esta documentación técnica se expondrá en el capítulo de Estado del arte del presente Trabajo de Fin de Grado (TFG).

Es en el uso y optimización de la ventilación como medio de mitigación del radón donde reside la importancia de este TFG.

1.2 Justificación

En la Escuela Naval Militar de Marín (ENM) (Pontevedra, España), se ha seguido una línea de investigación y estudio sobre la presencia del radón en diversos Trabajos de Fin de Grado en cursos anteriores. Los análisis realizados comenzaron detectando la presencia del radón en diferentes edificios de la ENM, especialmente en las plantas bajas de los mismos [14].

En estudios posteriores se detectó que uno de los edificios donde la presencia de radón era bastante significativa: el edificio del Centro Universitario de la Defensa (CUD) [15]. Los resultados mostraron que los despachos de la planta baja, concretamente, el despacho 114, presentaban elevadas concentraciones de radón. Tanto es así, que el despacho 114 dejó de utilizarse como tal, pasando actualmente a utilizarse como almacén y lugar de estudio e investigación sobre el comportamiento del gas radón y las posibles medidas de mitigación.

Por último, en estudios más recientes, se investigaron en profundidad los diferentes factores por los que el radón se filtraba hacia la superficie (geológicos, meteorológicos o deficiencias del edificio) y porque se acumula en las plantas bajas de los edificios, en particular, en los despachos de la planta baja del CUD [16].

En los mencionados trabajos se llegó a la conclusión que, de todas las alternativas existentes para paliar la acumulación del radón, la ventilación es de las más adecuadas. La ventilación es un método lo suficientemente eficiente y sencillo de implementar para reducir la acumulación de radón en lugares de trabajo y cumplir así con las normativas y recomendaciones vigentes. Simplemente con abrir las ventanas o instalar sencillos equipos que creen un flujo de aire suficiente para renovarlo ya se estaría ventilando, por lo que es el método más usado para disminuir el radón.

En investigaciones paralelas se consignaron las relaciones entre la ventilación y la calidad del aire que se exige en las normativas españolas de salubridad [17]. Asimismo, en otro TFG se describieron y analizaron someramente las instalaciones de ventilación y climatización del CUD [18]. Esta instalación consiste en un sistema de ventilación mecánica controlada indirecta, pues una unidad aporta aire fresco al falso techo de los despachos. Además, en el falso techo de cada despacho existe un fancoil que, en funcionamiento, impulsa aire desde el falso techo hacia el despacho, al mismo tiempo que lo acondiciona térmicamente.

Se trata de un sistema de ventilación y climatización relativamente poco frecuente, cuya efectividad y rendimiento son difíciles de predecir. Por ello resulta necesario realizar una caracterización experimental sobre su funcionamiento, con el objetivo de comprobar su capacidad real de ventilación, renovación de aire y reducción de la acumulación de radón en el propio despacho.

1.3 Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es evaluar, de forma experimental, las capacidades de funcionamiento y minimización de la concentración de radón del sistema de ventilación mecánica en el despacho 114 de la planta baja del edificio del CUD.

En particular, se establecen los siguientes objetivos:

1. Realizar una revisión bibliográfica de la normativa aplicable sobre la ventilación de edificios y de los sistemas de ventilación mecánica más habituales.
2. Descripción técnica y caracterización experimental del sistema de ventilación incluyendo todos sus componentes (UTA, fancoil, extractor, etc.), además de complementar y comparar la información expuesta por las fichas de producto de los fabricantes.
3. Determinar la capacidad del sistema de ventilación para renovar el aire en el despacho de estudio, atendiendo a las diferentes configuraciones de los subsistemas que lo forman.
4. Estudio experimental del comportamiento del gas radón bajo diferentes configuraciones de la instalación de ventilación.

1.4 Metodología y planificación general

Para comenzar, en el capítulo del “Estado del Arte” se realiza una búsqueda bibliográfica en profundidad sobre distintos estudios, artículos técnicos y normativas que rigen los sistemas de ventilación, la calidad del aire y la concentración de radón en recintos cerrados de edificios existentes.

Seguidamente, en el capítulo de “Materiales y Métodos”, se describe técnicamente la instalación y subsistemas presentes en el sistema de ventilación de la planta baja del CUD, y más concretamente, del despacho 114. También se determinan los equipos de medición usados en los experimentos, así como los procedimientos experimentales y metodologías para cumplir cada uno de los objetivos.

En tercer lugar, en el capítulo de “Resultados”, se realiza un análisis y una discusión técnica sobre todos los datos obtenidos de cada una de las fases de experimentación.

A partir de los resultados obtenidos, en el capítulo titulado como “Conclusiones y líneas futuras”, se detallan las conclusiones principales sobre la discusión de los resultados, y se proponen ciertas recomendaciones y líneas futuras para continuar las investigaciones.

Para concluir, en el capítulo “Bibliografía” se dispone de la documentación técnica empleada para el desarrollo del TFG.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Normativas sobre radón, ventilación y calidad del aire

2.1.1 Recomendación Organización Mundial de la Salud

Tanto la web de la OMS [6] como el Manual de la OMS [7] sobre el radón en interiores presentan varias medidas con el fin de reducir los efectos negativos para la salud debidos a la exposición en viviendas o lugares de trabajo. Algunas de estas recomendaciones son las siguientes:

- Establecer un valor promedio anual en todos los países que sea de referencia global, de 100 Bq/m³. Si por circunstancias concretas, este valor fuese inalcanzable, se fijará un nivel que nunca supere un promedio anual de exposición de 300 Bq/m³.
- Los países deberán informar a su población sobre los lugares donde el radón afecte peligrosamente a la salud.
- Los gobiernos de los países deberán redactar y aplicar programas de protección contra la alta exposición al radón de la población.

2.1.2 Directiva 2013/59/EURATOM

Esta Directiva publicada en 2013 es la última en vigor en el ámbito europeo, y establece las normas básicas de seguridad que los Estados miembros de la Unión Europea deben llevar a cabo para la protección del radón en los edificios [11].

Dentro de esta Directiva, los siguientes artículos hacen referencia a las diferentes limitaciones para la concentración de radón:

- Artículo 54, punto 1, del “Radón en los lugares de trabajo”:
“Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados en los lugares de trabajo. El nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superará los 300 Bq/m³, a menos que esté justificado por circunstancias existentes a nivel nacional.”
- Artículo 74, punto 1, de la “Exposición al radón en recintos cerrados”:
“Los Estados miembros establecerán niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no superarán los 300 Bq/m³. ”
- El artículo 103, del “Plan de acción para el radón”, acude a la obligatoriedad de que los Estados miembros...

“...establecerán un plan de acción a nivel nacional para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo... garantizarán que se adopten las medidas adecuadas para impedir que el radón entre en los edificios de nueva construcción... identificarán aquellas zonas en las que se espere que el promedio anual de concentración de radón en un número significativo de edificios supere el nivel de referencia nacional correspondiente.”

- Por último, es de gran interés el conocimiento del anexo XVIII de la normativa, que constituye un listado de los aspectos más generales a considerar para que los Estados miembros elaboren sus planes de acción para hacer frente a las exposiciones de radón y sus riesgos derivados, refiriéndose y basándose en los artículos 54, 74 y 103 anteriormente expuestos.

A pesar de que en España se sigue sin disponer de un plan nacional contra el radón, recientemente se han desarrollado normativas y medidas para el sector de la edificación residencial, de oficinas y de docencia.

2.1.3 Código Técnico de la Edificación (CTE)

En España, la normativa general de edificaciones es el Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado por el Real Decreto 314/2006 y modificado en diferentes ocasiones hasta el día de hoy.

El CTE incluye las exigencias que los edificios deben cumplir en el ámbito de la seguridad y habitabilidad con una serie de requisitos básicos. El presente Trabajo de Fin de Grado se centrará en el Documento Básico DB HS de Salubridad. Concretamente en las secciones HS 6, nombrada como “*Protección frente a la exposición del radón*” [12]; y la HS 3, nombrada “*Calidad del aire interior*” [19].

DB HS 6 “Protección frente a la exposición del radón”

En trasposición de la Directiva 2013/59/EURATOM, aparece la sección DB HS 6 del CTE. La exigencia básica obliga a los edificios de disponer de medios adecuados para limitar el riesgo previsible a la exposición de radón en espacios cerrados, incluso de implementar medidas concretas en aquellas zonas donde la probabilidad de exposición sea significativa. En ella, además, se establecen los siguientes puntos:

- El nivel de referencia de promedio anual de concentración de radón en el interior de los edificios será menos de 300 Bq/m³.
- Se clasificarán los municipios en dos zonas en función del potencial de radón, según las estimaciones realizadas por el CSN [10].

Zona I:

El riesgo de exposición es medio y se actuarán con medidas básicas de protección, tales como instalar una barrera de protección entre el terreno y la zona habitable para limitar el paso de gases o disponer de cámaras de aire ventiladas entre las dos zonas.

Zona II:

El riesgo a la exposición es alto por lo que las medidas de protección deberán ser más estrictas, incluyendo las medidas de la Zona I. Las alternativas son disponer de una barrera de protección unida a la cámara de ventilación entre el terreno y el edificio, o bien instalar la barrera de protección junto con un sistema de despresurización del propio terreno.

- Quedan definidos los medios y estrategias para la protección que se debe realizar en el interior de los edificios con el fin de limitar la concentración de este gas.

Esta sección será de aplicación en los casos de: edificios habitables de nueva construcción o intervenciones en edificios existentes (tales como ampliaciones, reformas o modificaciones con el fin de aumentar la seguridad y protección frente a la exposición al radón en el interior). No será ejercida en locales no habitables o aquellos habitables que tengan medios que, de manera efectiva, separen el terreno de la propia edificación.

DB HS 3 “Calidad del aire interior”

La normativa que reglamenta que la calidad de aire interior se encuentre entre unos valores aceptables en viviendas o lugares de trabajo es la sección DB HS 3 del Código Técnico de la Edificación, en función del uso que tiene cada tipo de los espacios cerrados. Por este motivo, esta sección dicta numerosos factores para garantizar cierta calidad de aire en locales, tales como: caudal de aire de ventilación, la carga total de polución según los materiales del edificio, la actividad realizada en el local o la cantidad de personas que ocupan el lugar.

Esta normativa es de aplicación en viviendas, aparcamientos, garajes en los edificios, trasteros o almacenes de residuos. Para locales de otro tipo, se deben adoptar demostraciones conformes a las exigencias básicas que caracterizan las condiciones de esta sección o tener en cuenta el RITE.

La sección HS 3 establece el caudal mínimo de aire que se debe suministrar a un recinto mediante un sistema de ventilación de caudal constante. Cuando estos no se encuentren ocupados, el caudal mínimo debe ser de 1,5 l/s. Para el resto de periodos donde se habiten los espacios, se hace uso de la siguiente tabla (Tabla 2-1), extraída del propio documento DB HS 3 [20].

Nº de dormitorios	Locales secos ^{(1) (2)}			Locales húmedos ⁽²⁾	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores ⁽³⁾	Mínimo en total	Mínimo por local
0 o 1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

Tabla 2-1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables [20]

- (1) En los locales secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor.
- (2) Cuando en un mismo local se den usos de local seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente.
- (3) Otros locales pertenecientes a la vivienda de usos similares (salas de juego, despachos, etc.).

2.1.4 Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)

Mediante el Real Decreto 1027/2007, del 20 de julio, se aprueba el RITE, aunque existe una versión consolidada de 2013 en la que se basa este apartado [21]. Además, en el año 2021, según el Real Decreto 178/2021 se establece una modificación del RITE de algunos artículos e instrucciones técnicas.

La finalidad del RITE es establecer las exigencias de eficiencia energética y seguridad que toda instalación térmica debe cumplir en los edificios, y deben tenerse en consideración sobre el bienestar e higiene de las personas con el fin de que estas instalaciones dispongan de un buen diseño, instalación, uso y mantenimiento.

En cuanto al ámbito de aplicación, el RITE será considerado para instalaciones fijas de climatización, o aquellas que pertenezcan a edificios de nueva construcción o sean fruto de reformas en edificios existentes, en locales del sector edificación como despachos, oficinas, zonas de trabajo, etc. Del mismo modo, también se aplica a todo lo relativo al mantenimiento, uso e inspección de las instalaciones y sus propias limitaciones. De manera general, el RITE controlará los edificios que no se engloben en la normativa DB HS 3 del CTE.

Dentro del contenido del RITE, se encuentran varios artículos e instrucciones técnicas relevantes para el desarrollo de este TFG, expuestas a continuación:

Artículo 11 “Bienestar e higiene”

Las instalaciones térmicas deben dimensionarse y utilizarse de forma que se obtenga una determinada calidad térmica, calidad de aire y calidad de higiene, que sean lo suficientemente aceptables para los usuarios de los edificios.

Artículo 12 “Eficiencia energética, energías renovables y energías residuales”

Según el Real Decreto 178/2021 del 23 de marzo, por el que se modifica la versión consolidada del RITE de 2013, las instalaciones térmicas deben ser diseñadas con objeto de mejorar la eficiencia energética, reducir la emisión de gases y contaminantes y promover el uso energías renovables cumpliendo una serie de requisitos operacionales (regulación y control, contabilización de consumo, aislamiento, etc.) [22].

Instrucción Técnica IT 1.1.4.2 “Exigencia de calidad del aire interior”

Esta instrucción técnica se subdivide en diversos apartados:

• IT 1.1.4.2.1 “Generalidades”

El conjunto de edificaciones no contempladas dentro del ámbito de aplicación del CTE deberán disponer de un sistema de ventilación que evite la concentración de contaminantes, de acuerdo a lo establecido en el apartado IT 1.1.4.2.2 y posteriores. El despacho 114 del CUD es, por tanto, de aplicación para el RITE.

• IT 1.1.4.2.2 “Categorías de calidad de aire interior en función del uso de los edificios”

En función del uso del edificio o local, la categoría de calidad de aire interior (IDA) que deberán tener como valor mínimo serán las siguientes:

- IDA 1: aire de óptima calidad para hospitales, clínicas, laboratorios o guarderías.
- IDA 2: aire de buena calidad para oficinas, residencias, salas de ocio o aulas de enseñanza. El despacho 114 del CUD debe cumplir este nivel de calidad de aire.
- IDA 3: aire de calidad media para edificios comerciales, cines, restaurantes u hostelería, gimnasios o salas de fiesta.
- IDA 4: aire de baja calidad, no recomendable para ningún tipo de local o edificio que sea habitable.

• IT 1.1.4.2.3 “Caudal mínimo del aire exterior de ventilación”

El caudal mínimo de aire exterior en procesos de ventilación que debe ser necesario para alcanzar las calidades IDA se calculará con alguno de los cinco métodos siguientes:

- Método indirecto de caudal de aire exterior por persona.

Es el método mayormente utilizado y el más sencillo de calcular, ya que tiene en cuenta una cierta actividad metabólica humana, pero sin presencia de sustancias contaminantes por fuentes que no son fruto del ser humano. También se puede usar en recintos donde no se permita fumar. Mediante la siguiente tabla (Tabla 2-2), se determinan los valores de caudales mínimos para este método [21]:

Caudales de aire exterior, en dm^3/s por persona

Categoría	Valor de caudal
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

Tabla 2-2 Caudales de aire exterior mínimos por el método indirecto

Esta tabla puede ver sus valores modificados si, en casos concretos, se aplicase a recintos donde haya fumadores. En estos casos, los valores de la tabla se multiplicarán como mínimo, por el doble de los indicados, además de que estas zonas específicas de fumadores deben estar limitadas por cerramientos estancos al aire, y en depresión con respecto a los locales contiguos. Sin embargo, no implica esto que sea el método más eficiente ya que los métodos dependen de la aplicación para la que esté pensado.

- Método directo por calidad del aire percibido.

Basado en métodos olfativos No es de aplicación habitual, ya que aporta escasa fiabilidad en comparación con los otros métodos.

- Método directo por concentración de CO_2 .

Establecido para locales con una elevada actividad metabólica humana o de alta producción de contaminantes, como salas de fiestas, locales cerrados de actividades físicas, restaurantes, bares, piscinas, etc. Si se conociese la composición y el caudal de estos contaminantes, se recomienda usar el método de dilución, expuesto más adelante.

Los valores máximos de concentración de CO_2 que aseguren cada calidad del aire se muestran en la siguiente tabla (Tabla 2-3):

Concentración de CO_2 en locales

Categoría	PPM (partes por millón en volumen)
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1200

Tabla 2-3 Concentraciones de CO_2 según categorías de calidad del aire

- Método indirecto de caudal de aire por unidad de superficie.

Para locales que no estén dedicados a ocupación humana permanente o sean de uso muy ocasional. No es aplicable al caso del presente TFG.

- Método de dilución.

Este método se emplea cuando existe la certeza de que en el interior de un recinto cerrado hay presencia de sustancias contaminantes específicas, como lo es la acumulación de radón. Los límites de estas sustancias y sus concentraciones deberán estar reguladas por normativas ajenas al RITE, como ocurre con las normativas anteriormente mencionadas para controlar la acumulación del gas radón, en donde se establece que el mejor método es la ventilación.

Método del cálculo de renovaciones/hora del aire

Existe un sexto sistema de cálculo de caudal del aire, más simple y rápido de aplicar para obtener una primera aproximación sobre la calidad del aire que habría supuestamente en un recinto cerrado. Este sistema es el cálculo de las renovaciones del aire por hora, es decir, cuantas veces se puede sustituir el volumen total de aire de un local en el periodo de una hora. Es un método sencillo pero muy utilizado en procesos de investigación, para saber si se cumplen las normativas, aprobar los controles de calidad o incluso para establecer un punto de inicio para futuros proyectos de reforma o mejoras de las instalaciones de ventilación.

El RITE establece un mínimo de unas 6 renovaciones por hora de todo el volumen del aire en recintos como aulas de enseñanza, despachos u oficinas. De esta manera se podría asegurar una calidad de aire suficiente para evitar afecciones o malestares en las personas.

Hay dos maneras diferentes para calcular las renovaciones por hora:

- 1) Multiplicar 6 veces por el volumen total del espacio a ventilar, lo cual nos ofrece un flujo volumétrico de ventilación en m³/hora. (Ejemplo: Un recinto de 250 m³ necesita de 250*6= 1500 m³/h de flujo para cumplir este método). Tiene un gran inconveniente, y es que puede darse el caso que no exista manera de saber cuánto caudal se pueda introducir/extraer en el recinto, como ocurre con los sistemas de ventilación indirecta (caso de la ventilación del despacho objeto de estudio).
- 2) Emplear la estimación de las renovaciones/hora con ventilación a partir de la disminución de la concentración de CO₂, tal y como lo expone el Colegio de Salud Pública Harvard T.H. Chan [23], y comparar lo obtenido con las exigencias del RITE. El inconveniente de este método es que no tiene en cuenta el volumen del recinto a ventilar. Este método se expondrá posteriormente en el capítulo 3, ya que será el utilizado en el presente TFG para calcular la capacidad de renovaciones horarias de aire que posee la instalación de ventilación en un despacho del edificio del CUD.

Este sexto método, con sus dos variantes, tiene una grave discrepancia, pues no tiene en cuenta la actividad metabólica de las personas, o incluso el número de personas que habiten el recinto, lo cual modificaría los valores de las renovaciones por hora necesarias para asegurar la adecuada calidad de aire. A pesar de todo, si el número de 6 renovaciones por hora es el mínimo recomendado, y la ventilación de un recinto no asegura de por sí este valor, difícilmente podrá cumplirlo con restricciones mayores. Por eso este sistema, dentro de su simpleza, es de gran importancia para asegurar la mínima capacidad de cualquier sistema de ventilación.

• IT 1.1.4.1.2 “Temperatura operativa y humedad relativa”

El confort térmico, depende fundamentalmente de la actividad metabólica y física de cada persona, la vestimenta, la humedad y la temperatura del espacio en el que se encuentran, la velocidad del aire en circulación en el lugar y el porcentaje estimado de personas insatisfechas [21]. Los dos factores que más afectan a la calidad térmica de las personas son la temperatura y la humedad, que pueden tener diferentes valores estándares dependiendo de la época del año, atendiendo a la siguiente tabla (Tabla 2-4):

Condiciones interiores de diseño

Estación	Temperatura operativa en °C	Humedad relativa %
Verano	23-25	45-60
Invierno	21-23	40-50

Tabla 2-4 Condiciones interiores de diseño de la IT 1.1.4.1.2 del RITE

Existen modificaciones sobre esta tabla estándar:

- En caso de condiciones extremas en el exterior, la temperatura operativa puede sufrir variaciones respecto a los valores de la tabla.
- Se admite un 35% de humedad relativa en condiciones de invierno extremas, durante cortos periodos de tiempo.

Seguida de la IT 1.1.4.1.2, la IT 1.1.4.1.3 “*Velocidad media del aire*”, establece que la velocidad del aire en zonas ocupadas se mantendrá dentro de los límites de bienestar, según actividad de las personas, su vestimenta, la temperatura y la humedad y la intensidad de la turbulencia del aire.

También es de interés hacer mención a la Nota Técnica de Prevención 243, “Ambientes cerrados: calidad del aire” [24], ya que ofrece un apartado específico sobre la relación que tiene la ventilación con el confort térmico y su importancia. En ese apartado se reseña que la mayor parte de las quejas de las personas es a causa de un confort no alcanzado, debido a una ventilación deficiente.

Una ventilación incorrecta, ya sea por falta de aporte de aire renovado o por una ventilación excesiva, podría desembocar en una acumulación de contaminantes en el aire, provocando afecciones y molestias en los ocupantes, como sucede con el radón o el Covid-19. Para paliar y eliminar la presencia de estas sustancias contaminantes en el aire, esta NTP establece que es necesario emplear el método de dilución del RITE [21].

2.2 Sistemas de ventilación

Ventilar consiste en renovar el aire de un recinto interior, pero existen diferentes tipos de ventilación y sistemas que consiguen efectuar este proceso.

2.2.1 Clasificación de la ventilación

Existen numerosas maneras de clasificar los diferentes tipos de ventilación y todas sus combinaciones. Este TFG se centrará particularmente en las que se regulan en las normativas principales: la sección DB HS 3 del CTE y el RITE.

Aunque el despacho 114 del CUD, lugar de estudio del presente Trabajo de Fin de Grado, queda bajo el ámbito de aplicación del RITE, es de interés mencionar cómo el CTE también hace diferencias en los distintos tipos de ventilación. En general, la sección HS 3 del CTE suele ser de más fácil aplicación, ya que está destinada a viviendas, y los sistemas e instalaciones que expone son más asequibles para su manejo e instalación.

Las condiciones de ventilación de las viviendas siempre consisten en introducir aire a los locales secos (dormitorios, salas de estar, etc.) y extraerlo de los húmedos (cocinas, baños, etc.) dentro de una vivienda, independientemente de la instalación que se utilice. Los tipos de ventilación recogidos en el HS 3 son:

- Ventilación exclusivamente natural

Se produce simplemente abriendo las ventanas o huecos que haya en las fachadas para permitir el paso del aire. Este tipo de ventilación no está aceptado por la HS 3 si actúa en solitario, por lo que no se puede utilizar en viviendas, ya que el caudal no se puede controlar y se pierde también el control

sobre la calidad del aire y el confort térmico en el recinto. Lo que sí es posible es medir y conocer el caudal obtenido mediante la ventilación natural si se hace uso de ella, que tendrá que cumplir como mínimo los valores de la tabla de caudales de la HS 3 (Tabla 2-1).

- Ventilación mecánica de extracción o forzada

Este método consiste simplemente en una conducción de aire entre zonas húmedas y secas en admisión y extracción (Figura 2-1). El funcionamiento consiste en extraer el aire de los recintos húmedos e introducir aire fresco a las zonas secas, ya sea de manera natural mediante rejillas instaladas en las ventanas o en la fachada, o de manera mecánica. Las secciones de extracción pueden ser menores y no tienen que tener restricciones de verticalidad u horizontalidad, lo que reduce el número de salientes de chimenea en el edificio. Suele ser la opción menos económica por el gasto de la instalación y el propio mantenimiento del montaje, pero tiene una gran ventaja, y es que asegura un flujo de aire correcto en el interior en todo momento, por lo que también nos favorece en mantener una temperatura de confort para las personas.



Figura 2-1 Esquema del sistema de ventilación mecánica en una vivienda, según el CTE HS 3 [25].

- Ventilación híbrida

Este sistema combina la ventilación natural con la activación de la ventilación forzada cuando las condiciones de presión y temperatura no sean apropiadas ni óptimas. Por esta razón, los conductos de extracción de zonas húmedas suelen ser verticales y de mayor sección que los de ventilación exclusivamente mecánica.

Desde otro punto de vista, y dentro de su ámbito de aplicación, el RITE dispone de diversas exigencias o instrucciones técnicas (IT) de obligado cumplimiento en los edificios bajo su entorno de aplicación. Particularmente, la Instrucción IT 1.1.4 “Exigencia de calidad del aire interior”, especifica que se debe contar con un sistema de ventilación que aporte suficiente caudal de aire exterior, de modo que se eviten las concentraciones de sustancias contaminantes en los distintos locales de un edificio.

El RITE obliga también, de igual manera que la sección HS 3 del CTE, a climatizar y ventilar correctamente los edificios que se encuentren en sus ámbitos de aplicación, como es el caso del despacho 114 del CUD. Es por esto que el sistema más habitual que se encuentra en los locales de aplicación del RITE son las Unidades de Tratamiento de Aire (UTA), conocidas popularmente como climatizadores.

En resumen, existen dos métodos diferentes para realizar la ventilación de un edificio, atendiendo a las dos normativas españolas. Aquellos recintos que estén bajo aplicación del CTE HS 3, como la

vivienda, dispondrán de sistemas donde la ventilación se realice por depresión (admisión natural y extracción mecánica). Por otro lado, los de ámbito de aplicación del RITE usarán la ventilación sobre presionada (admisión mecánica y expulsión natural), con los sistemas UTA.

2.2.2 Ventilación Mecánica Controlada (VMC)

Dentro de la ventilación mecánica forzada, se distinguen dos tipos básicos: la exclusivamente forzada, controlada manualmente, y la VMC, pues supone una automatización del propio sistema que lo hace más eficiente e interesante de exponer.

La Ventilación Mecánica Controlada es aquella que ofrece la posibilidad de gestionar de manera inteligente y eficiente el funcionamiento y el consumo energético de un sistema de ventilación, creando espacios de confort y calidad del aire óptimos para las personas, además de lograr el control de los flujos y las corrientes de aire, evitando que se creen descompensaciones térmicas que necesiten de un consumo superior para corregirlas. De hecho, desde el año 2020, todas las construcciones españolas de nueva edificación deben cumplir con una serie de criterios para un consumo “casi nulo”. Este objetivo ha sido capaz de implementarse mediante protocolos y estrategias con el principal fin de aumentar la eficiencia energética. Uno de los mejores ejemplos es la casa pasiva, una construcción centrada en conseguir los mejores estándares de confort y eficiencia energética, lo que supone una mejora de ahorro de más del 70% respecto a una casa tradicional [26].

Es por este motivo que la relación entre ventilación y eficiencia energética pone las bases en los diseños de los proyectos de nueva construcción o reformas, regulados por una serie de normativas como lo son el CTE y el RITE.

La ventilación natural no ofrece la posibilidad de controlar los flujos de aire en la ventilación, por ello, gracias al avance tecnológico de las técnicas de ventilación se pueden generar flujos de aire mediante el uso de ventiladores y conductos. La instalación más sencilla consiste en usar ventiladores extractores y rejillas que permitan la entrada de aire limpio y fresco a los interiores. Existen combinaciones mucho más complejas, que incluyen ventiladores en las entradas o tuberías de conducción del aire, aunque suelen ser instalados en el entorno industrial o comercial.

Los sistemas VMC pueden clasificarse según el flujo del aire en el recinto: simple flujo o doble flujo.

Sistemas de ventilación mecánica de simple flujo

La entrada del aire hacia el interior del espacio se produce por depresión, mediante rejillas en la fachada y el uso de un ventilador que realiza la extracción. Estos sistemas pueden contar con una red de conducción para trasladar el aire del interior hacia el exterior de la vivienda. La garantía de ventilación de estos sistemas es que permanentemente renuevan el aire, eliminan humedades y olores, y, sobre todo, son los más simples de montar.

Con estas instalaciones se extrae el aire del espacio interior y se transporta al exterior por los conductos. Particularmente, en el caso de las viviendas, el aire del interior se extrae de las zonas húmedas (cocinas, baños, etc.) y el aire fresco se envía al resto de espacios dentro de la vivienda por medio de las entradas de aire localizadas en ventanas o paredes.

Estos sistemas incluso ofrecen la posibilidad de combinarse con la ventilación natural, controlar el flujo de aire por ambientes y adaptarse de manera continua a las condiciones climáticas del exterior e interior. Sin embargo, no existe realmente un control sobre el aire fresco que se introduce y su calidad, además de que son más propensos a sufrir pérdidas de eficiencia energética.

Dentro de los sistemas de ventilación mecánica de simple flujo, existen dos subtipos diferenciables: los sistemas autorregulables y los sistemas higroregulables.

- **Sistemas VMC Simple Flujo Autorregulable**

Suelen ser concebidos para caudales constantes de trabajo debido a la sencillez de su sistema e instalación, pero asegura de igual manera una calidad de aire suficiente para los recintos [26]. En estos sistemas las entradas de aire y las bocas de extracción modifican su superficie de paso de manera automática dependiendo de la presión a la que estén sometidos, de manera que la instalación que auto equilibra y se reducen los riesgos que puedan suceder fruto de corrientes de aire por vientos que chocan en las entradas de las admisiones [27].

- **Sistemas VMC Simple Flujo Higrorregulable**

Este sistema, con un mayor control que el anterior, basa su funcionamiento según los valores de humedad de la estancia en donde se ubican, teniendo en cuenta la actividad humana llevada a cabo en el recinto. Los pasos del aire de la entrada y extracción se regulan de manera automática mediante el control constante de la humedad del interior, aportando la cantidad justa de aire fresco y renovado en todo momento. Debido a este control más exhaustivo que en los autorregulables, existe una gran diferencia en relación a las pérdidas energéticas, siendo los higrorregulables más óptimos y eficientes, lo que a su vez nos ofrece una mejor calidad de confort [27].

Sistemas de ventilación mecánica de doble flujo

La persecución de la eficiencia energética sirve de impulso para buscar soluciones y mejorar en todo lo posible la ventilación mecánica de simple flujo. Los sistemas VMC de doble flujo tienen como objetivo reducir los consumos derivados de la ventilación de simple flujo, los cuales son generalmente más elevados.

Este tipo de sistemas son capaces de realizar la extracción y la admisión de aire de manera mecánica, pudiendo llevar una unidad recuperadora de calor en la conexión a la entrada y a la salida, lo que proporciona una mayor eficiencia energética. El aire exterior pasa por procesos de filtrado y climatizado antes de ser impulsado hacia las zonas secas de la vivienda (dormitorios, salón, etc.), evitando el aire viciado; y la extracción se realiza desde las zonas húmedas directamente (baños, cocinas, aseos), de igual modo que los sistemas de simple flujo [27].

Este montaje es capaz de reducir el consumo energético tanto en invierno como en verano. A priori es la mejor solución, pero dado que es un sistema mecánico complejo, debe disponer de un buen diseño y montaje que no afecten a la propia calidad del aire en movimiento, o que provoquen la aparición de efectos ruidosos y afecten al confort acústico del recinto habitable.

Se pueden diferenciar dos sistemas de doble flujo de manera general [28]:

- **Independientes:** los ventiladores de admisión y extracción están separados de la unidad recuperadora de calor, por lo que son más complejos de instalar. No suelen provocar el problema de los ruidos, por lo que sólo es necesario buscar un lugar donde ventiladores y la unidad recuperadora no molesten en el interior de la vivienda, siendo así más generosos con el espacio que los compactos, expuestos a continuación. Debido a la propia independencia de sus elementos internos, se puede incluso instalar la unidad recuperadora en una zona climatizada, evitando pérdidas energéticas debido a las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de la vivienda. Otra gran ventaja es la posibilidad de instalar los ventiladores en diferentes zonas que no sean habitables, como el parking o los sótanos del edificio.
- **Compactos:** ventiladores y unidad recuperadora unidos, lo que los convierte en más sencillos de instalar. Para aumentar su rendimiento, lo ideal es colocar la unidad recuperadora en la zona climatizada, pero conlleva un gran problema: todo el equipo debe montarse junto en esa zona debido a la propia morfología del montaje, lo cual implica tenerlos en interiores de vivienda. Por estas causas, suelen provocar ruido debido a que todos sus elementos van montados juntos, por lo que la solución es ubicarlos donde este ruido sea mínimo o inaudible.

Todos los sistemas de doble flujo tienen la distribución de aire por los conductos de una forma determinada, diferenciándose dos distribuciones principales: en estrella (Figura 2-2), en la que el aire se reparte a cada habitación con redes independientes; o en árbol (Figura 2-3), donde los conductos se ramifican por accesorios que llegan a cada habitación [26].

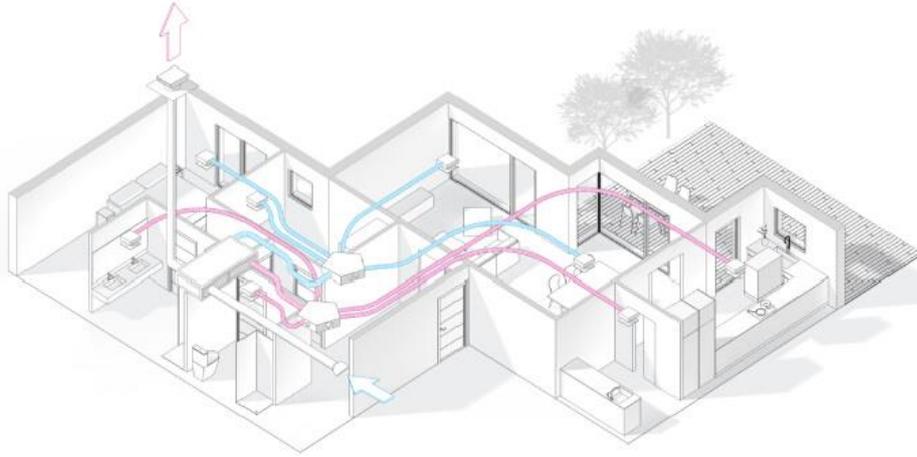


Figura 2-2 Sistema de distribución VMC en estrella [26]



Figura 2-3 Sistema de distribución VMC en árbol [26]

2.2.3 Unidades de Tratamiento de Aire (UTA)

Debido a que el RITE obliga al igual que el CTE a climatizar los edificios en su ámbito de aplicación, los sistemas de ventilación de estos lugares también serán de climatización de manera simultánea. El sistema más ampliamente utilizado en estos casos con unidades de ventilación y climatización llamadas Unidades de Tratamiento de Aire (UTA).

Las UTA no se encargan de producir calor o aire frío, si no que su función es gestionar las sensaciones térmicas en las estancias. Dicho de otro modo, las UTA gestionan el aire que llega a una sala con el objetivo de ofrecer el confort térmico adecuado, prestando especial atención y control sobre la renovación y limpieza del aire, la temperatura y la humedad [29].

El funcionamiento de las UTAs comienza por recoger el aire del exterior que lo conduce al interior, pasando por filtros y zonas de climatizado de frío o calor. Suelen disponer de conductos de admisión y extracción, junto con conductos de agua fría o caliente que ayudan a climatizar al aire. De manera autónoma, una UTA gestiona los siguientes aspectos:

- La admisión del aire exterior para ofrecer una buena ventilación.
- Vigilan el control de la calidad de aire al disponer de filtros para los sistemas de climatización.
- Crean la situación térmica óptima para la habitabilidad del recinto.
- Se adapta a la humedad que existe en el recinto para ofrecer el confort esperado.

Son muchos los factores que condicionan la necesidad de los diferentes tipos de UTA, pero a grandes rasgos se distinguen dos modelos atendiendo al espacio disponible en el hogar o lugar donde se instalen:

- **Unidades de Tratamiento del Aire compactas:** son unidades de un único modulo que incluye todas las etapas para tratar el aire, lo que lo convierte en un equipo de instalación sencilla y económica. Los montajes de este equipo pueden ser situados fuera de la estancia a ventilar o en los falsos techos, siempre que sean accesibles para realizar el mantenimiento de los mismos (Figura 2-4).



Figura 2-4 Unidad de Tratamiento de Aire compacta [30]

- **Unidades de Tratamiento del Aire modulares:** Son agrupaciones de UTA compactas, por lo que su tamaño es bastante más grande y suelen ser instaladas en las cubiertas de los edificios, de modo que se garantice la extracción y admisión del aire. Son más habituales que los sistemas compactos en grandes edificaciones. (Figura 2-5).



Figura 2-5 Unidad de Tratamiento de Aire modular [31]

Una UTA puede ser considerada como una instalación altamente eficiente en términos de energía, ya que suelen ser capaces de regular el caudal de ventilación dependiendo de los niveles de salubridad y confort de la estancia a ventilar.

Existen otros sistemas de aire acondicionado y climatización, como los fancoils o radiadores, pero estos no cumplen el RITE, ya que solo tratan el aire interior y no lo renuevan. Por tanto, el único sistema válido a instalar en locales son las UTA y sus posibles variantes. Se debe recordar que la ventilación natural no está prohibida en el RITE, como sí lo está en el HS 3, por lo que se puede combinar con el uso de una UTA, pero la justificación y experimentación sobre ella y su poca efectividad y eficiencia la convierten en algo prácticamente inviable [32].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del recinto de objeto de estudio

El edificio de estudio en este Trabajo de Fin de Grado es el Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar (Figura 3-1), situada en la localidad de Marín, provincia de Pontevedra.



Figura 3-1 Vista aérea de la Escuela Naval Militar [33]

El Centro Universitario de la Defensa (Figura 3-2) forma una parte del edificio que rodea al “Patio de Aulas” al este de la ENM, edificado entre 1939 y 1943. En sus orígenes, el edificio albergaba aulas de enseñanza, pero tras diversas obras y modernizaciones entre 2009 y 2010, se realizaron las obras para construir más aulas y despachos para los profesores que imparten el Grado de Ingeniería Mecánica.



Figura 3-2 Ubicación del Edificio del CUD. Captura de pantalla de Google Earth de la Escuela Naval Militar

En la planta baja (Figura 3-3) se hallan los despachos de profesorado y seminarios de enseñanza, lugares transitados y habitados durante largos periodos de tiempo. Por ello, surge la necesidad de reducir o eliminar la concentración de radón mediante la ventilación en el lugar.

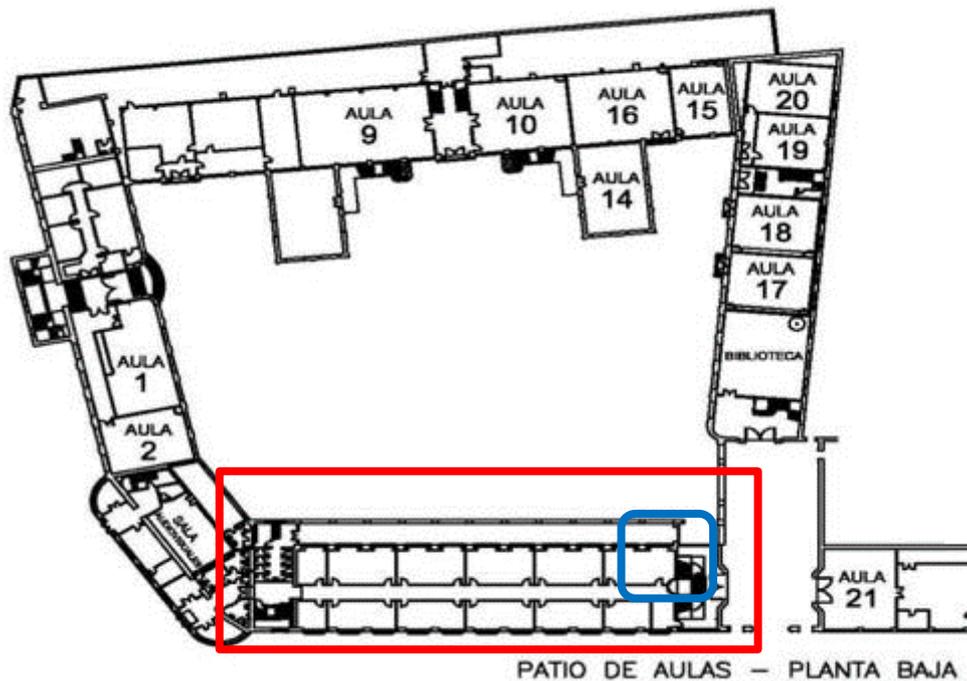


Figura 3-3 Plano de la planta baja del Edificio del CUD [34]

En concreto, este TFG se centra en el estudio del sistema de ventilación en el despacho 114, señalado en azul en la Figura 3-3, situado al final del pasillo de la planta baja del edificio en la cara sur (Figura 3-4), despacho que actualmente no se utiliza por ningún profesor, pues ahora es un recinto que sirve de almacén a la vez que es lugar de estudio, experimentación e investigación del CUD sobre el radón y la ventilación.

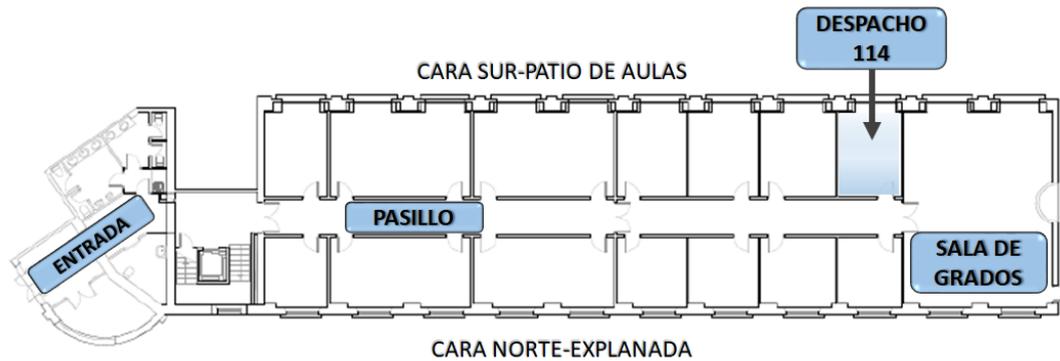


Figura 3-4 Plano de la planta baja del CUD con las ubicaciones relevantes

En este despacho se estudiarán los diferentes sistemas de ventilación que existen en su interior y forman el conjunto de la instalación, caracterizando experimentalmente sus capacidades de aportación de caudal de ventilación para renovación de aire y eliminar o reducir la concentración de radón.

El despacho 114 (Figura 3-5), al igual que el resto de despachos de la planta baja comparten algunas características comunes. La más reseñable es que el volumen total del despacho se divide en dos zonas: una de ellas es el espacio habitable y visible, y otro es el volumen oculto sobre el falso techo. Una serie de planchas multiperforadas separan diferenciadamente las dos zonas, dejando pasar el aire en movimiento entre ambas.



Figura 3-5 Imagen del despacho 114 en la actualidad

Surge aquí una disyuntiva para la continuación del estudio de la ventilación, pues, aunque el despacho se divida en dos volúmenes, el objetivo principal es renovar el aire y eliminar el radón en el volumen habitable, asegurando una salubridad suficiente para las personas que se encuentren en él por periodos prolongados. Teniendo en cuenta la superficie del despacho (17,6 metros cuadrados) (Figura 3-6), y la altura del espacio habitable (3,70 metros), se obtiene un volumen de ventilación de unos 65 metros cúbicos.

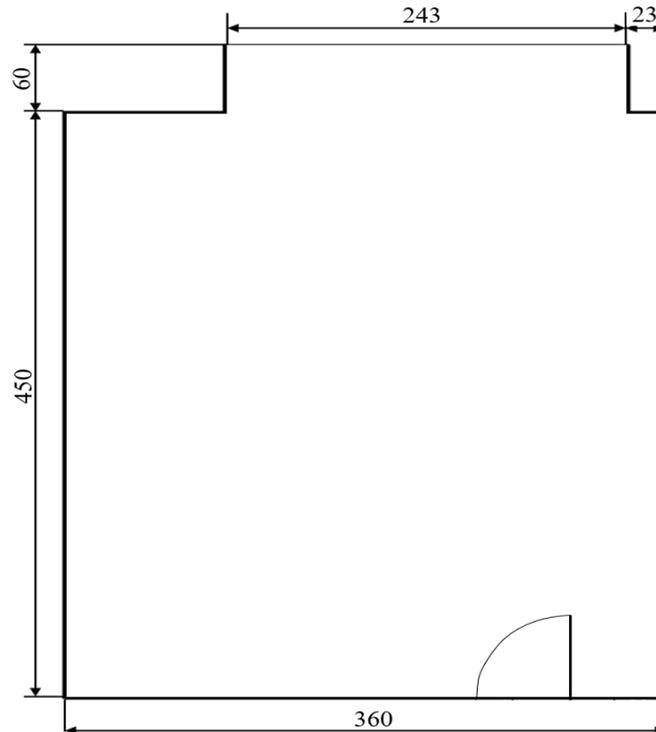


Figura 3-6 Vista acotada en centímetros de la planta del despacho 114

Si de algún modo surgiera un interés en tener en cuenta el falso techo como volumen a ventilar junto con el espacio habitable, hay que tener en cuenta que este tiene una altura de 1,80 metros, por lo que la altura total del despacho en sí es de 5,5 metros.

Otro factor peculiar que tiene es que el falso techo de este despacho se encuentra comunicado directamente con el del despacho adyacente, indicado en el recuadro azul en la Figura 3-3, aunque los espacios habitables están separados por una pared. Esto supone que el aire en movimiento que se encuentra en el falso techo no solo fluye por el despacho 114 y a través de sus planchas perforadas, sino que ese mismo aire es compartido con el despacho consecutivo en su falso techo. Todo esto crea incertidumbre en la caracterización experimental sobre la ventilación en esta parte del despacho de estudio, la cual queda resuelta y especificada más adelante en este TFG.

3.2 Descripción del sistema de ventilación y climatización

El sistema de ventilación y climatización de la planta baja del CUD se compone del Sistema de distribución del aire y del Sistema de Climatización.

3.2.1 Sistema de distribución del aire

En la planta baja del edificio del CUD, al final del pasillo de aulas/despachos, se encuentra la “Sala de Grados”, sobre la cual se encuentra una UTA de simple flujo (no extrae el aire viciado del interior), de la marca AIRLAN Aire acondicionado AERMEC, de la serie FMA/HP, modelo 036 (Figura 3-7).



Figura 3-7 Unidad de Tratamiento del Aire FMA/HP 036, instalada en el CUD

En la instalación del CUD se puede regular el régimen de velocidad de este equipo mediante un controlador (Figura 3-8) situado en la Sala de Grados (ver Figura 3-4).



Figura 3-8 Controlador del régimen de velocidad de la UTA

Esta unidad dispone de una toma para el aire exterior con el fin de suministrar aire renovado y limpio al interior del recinto, mediante conductos de aire de panel rígido de alta densidad de lana de vidrio, revestidos con láminas de aluminio tanto en sus caras interiores como exteriores, y con una malla de vidrio exterior que aporta rigidez al conducto. Estos conductos que monta la instalación son del modelo CLIMAVÉR Plus R (Figura 3-9), de la empresa ISOVER [35]. Este sistema de conducción es el encargado de distribuir el aire impulsado desde la UTA a cada despacho por toda la planta baja, concretamente, a los falsos techos de estos (Figura 3-10).



Figura 3-9 Conducto CLIMAVER Plus R [35]

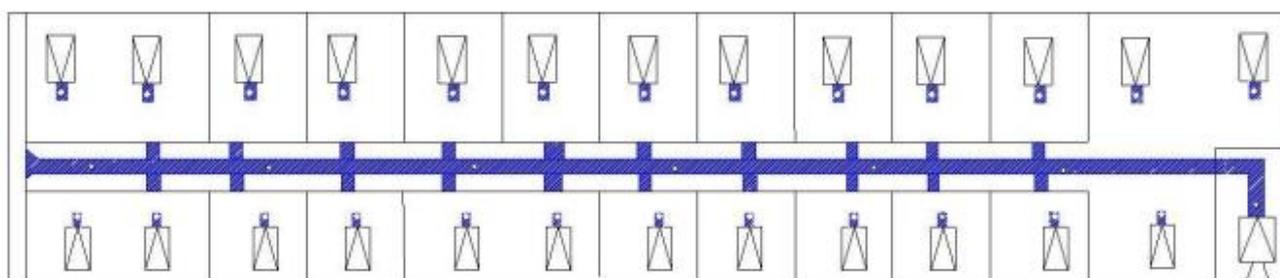


Figura 3-10 Esquema del sistema de conducción de aire desde la UTA a los despachos en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010

En el despacho 114, en el interior de este tubo que llega procedente de los conductos y de la UTA, existe una trampilla o puerta regulada mediante un programa informático que se encarga de modificar las diversas posiciones de apertura para dejar pasar mayor o menor cantidad de aire hacia el falso techo del despacho (Figura 3-11; Figura 3-12; Figura 3-13). Esta trampilla se instaló para experimentar con la eficiencia de la instalación en anteriores TFG.



Figura 3-11 Conducto y trampilla abierta de entrada del aire al falso techo



Figura 3-12 Conducto de entrada del aire al falso techo, con la trampilla cerrada



Figura 3-13 Conducto de entrada de aire al falso techo

Esta trampilla consiste en un disco que rota en cinco posiciones controladas electrónicamente que varían de 0° a 90° , y, con cada posición, se realizarán las mediciones del caudal de aire que la trampilla deja pasar hacia el falso techo. Para facilitar la nomenclatura y la futura experimentación, cada posición angular se referirá a partir de ahora en porcentajes de apertura. Las diferentes posiciones de la trampilla para el paso del aire se muestran a continuación desde una vista de planta del conducto (Figura 3-14).

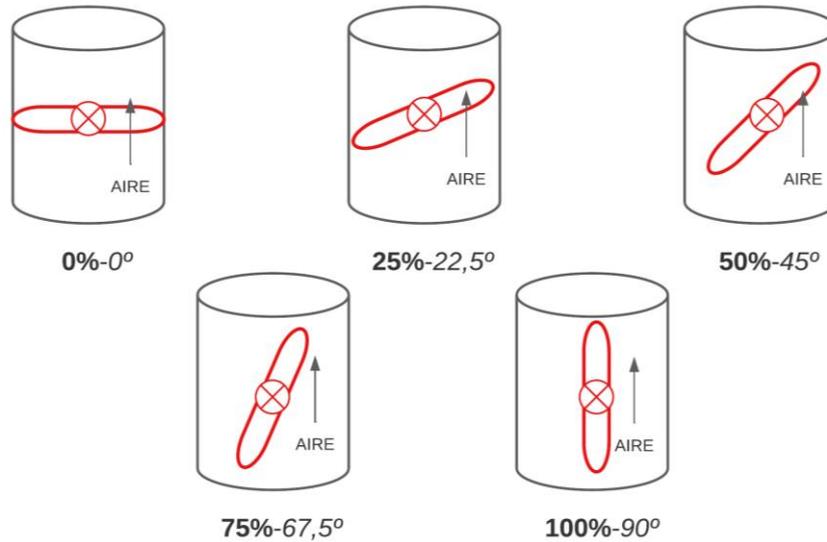


Figura 3-14 Posiciones de trampilla para paso del aire

Viendo la siguiente imagen general del falso techo, se puede apreciar el conducto por el que llega el aire desde la UTA (Figura 3-15).

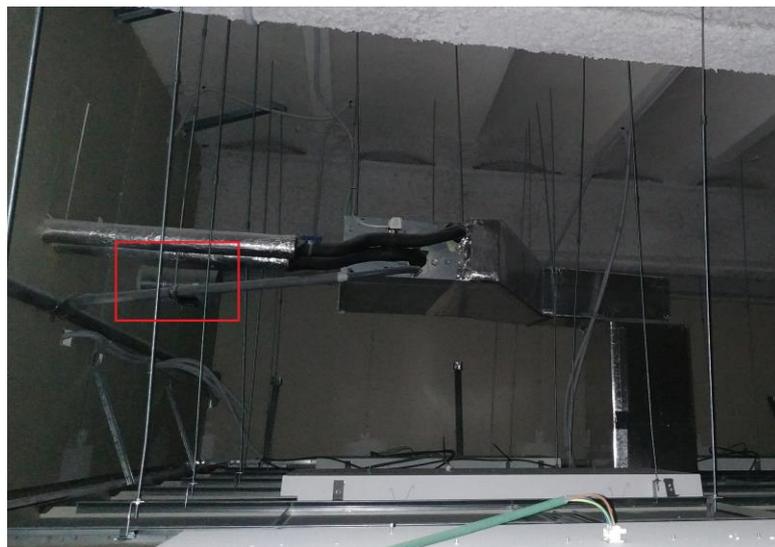


Figura 3-15 Situación del conducto de expulsión del aire procedente de la UTA

El propio aire que sale desde este conducto hacia el falso techo es capaz de penetrar hacia el volumen del despacho, pues este falso techo se compone de planchas microperforadas.

Aunque forma parte del sistema de climatización, en el falso techo de los despachos se encuentra instalado un sistema fancoil que absorbe parte del aire que llega del conducto mencionado, y posteriormente climatiza y recircula el aire impulsándolo hacia el interior del despacho.

Cuenta además con una sección de baterías térmicas a la que llega el agua calentada o enfriada desde la bomba de calor del sistema de climatización, por medio de tuberías de impulsión y retorno. Así se consigue realizar un precalentamiento o pre-enfriamiento del aire que posteriormente se impulsa hacia las diferentes estancias de la planta baja del CUD.

3.2.2 Sistema de climatización

El sistema de climatizado del aire que llega a los despachos y aulas del edificio del CUD se compone de una bomba de calor de tipo aire-agua, una red de tuberías de agua fría o caliente y los fancoils del falso techo de cada aula o despacho.

Bomba de calor

La bomba de calor tiene el cometido de aportar el frío o el calor que sea necesario para adoptar el confort térmico dentro del edificio. El modelo de bomba instalada en el CUD es el NRL 0650 H AR (Figura 3-16) situada en la azotea del edificio. Es un sistema hidráulico compacto de bombas que impulsan agua tratada para refrigerar o calentar el aire de los fancoils.

A este conjunto se le unen diversos sistemas de seguridad para realizar correctamente su funcionamiento, junto con un microprocesador que regula de manera electrónica el funcionamiento y la gestión de los parámetros con los que funciona.



Figura 3-16 Bomba de calor NRL 0650 H AR situada en la azotea del edificio del CUD

En la siguiente tabla se muestra el listado de características de operación de la bomba de calor (Tabla 3-1):

Características bomba de calor NRL 0650 H AR

Capacidad de enfriamiento	138 kW
Poder de enfriamiento total	44,6 kW
Caudal de agua enfriamiento	23740 l/h
Capacidad de calefacción	152 kW
Poder de calefacción total	44,9 kW
Caudal de agua en calefacción	26140 l/h
Capacidad de tanque	500 litros
Índice de Eficiencia Energética (EER)	2,89
Coficiente de rendimiento (COP)	3,39

Tabla 3-1 Características de la bomba de calor del CUD

El agua fría o caliente se dirige a los sistemas fancoil de sala de la planta baja del CUD, mediante una red de tuberías de acero de impulsión (rojo) y retorno (azul), como se muestra en el siguiente plano (Figura 3-17):

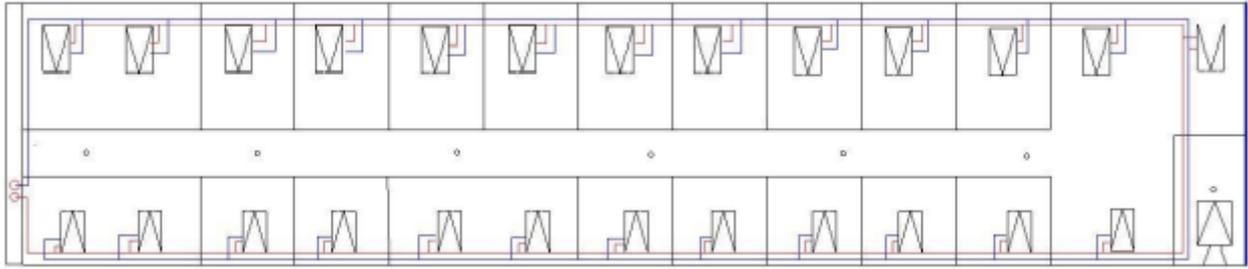


Figura 3-17 Esquema de la red de tuberías de impulsión/retorno del agua de climatización en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010

Fancoil

En cada despacho o aula de la planta baja del CUD se encuentran instalados los fancoils en el falso techo anteriormente mencionado.

Los fancoils se componen básicamente de un filtro, un ventilador y un intercambiador de calor. La función principal de este sistema es climatizar los despachos en invierno o verano, proporcionando aire de diferentes características. Si la intención es refrigerar la estancia, por el circuito correrá agua fría, y aportará un aire seco y limpio. Por el contrario, si el objetivo es calentar el despacho o aula, el agua caliente correrá por los conductos, proporcionando una sensación de calor y un aire limpio para los periodos invernales.

El agua que recorre los circuitos proviene de la bomba de calor, la cual la impulsa hasta llegar a las secciones de baterías de los fancoils. El fancoil absorbe el aire del falso techo mediante un ventilador y posteriormente lo enfría o calienta mediante un intercambio de calor con las tuberías de agua que llegan a él procedentes de la bomba de calor.

A continuación, se muestra de nuevo la imagen del falso techo sobre el despacho 114 del CUD, donde se encuentra el sistema del fancoil y las dos tuberías de agua de refrigeración o calefacción (Figura 3-18).



Figura 3-18 Sistema fancoil y tuberías de refrigeración en el falso techo del despacho 114

En todo el edificio del CUD existen diferentes modelos de fancoils instalados en los techos de cada sala. El fancoil instalado en el despacho 114 es el modelo FCX42P (Figura 3-19), de la empresa AERMEC, con una potencia de refrigeración de 3400 W y de calefacción de 4240 W. Es un equipo que ofrece estabilidad de confort térmico al mantener en bajos valores la fluctuación de temperatura,

además de que el ruido que realiza el ventilador al girar es mucho menor que en otros fancoils tradicionales [36].



Figura 3-19 Fancoil FCX42P del despacho 114 [36]

La regulación del fancoil se realiza mediante un panel de control regulable (Figura 3-20) en temperatura, para climatizar en invierno y verano; y en velocidad, que modifica el régimen de giro al cual el ventilador centrífugo (Figura 3-21) toma aire para impulsarlo hacia el difusor.

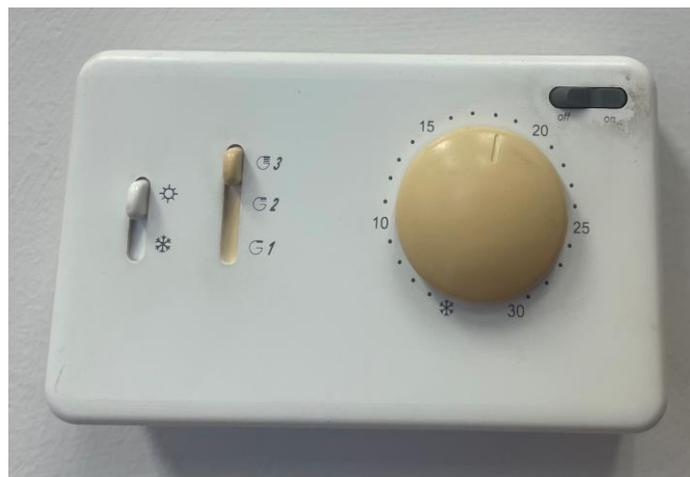


Figura 3-20 Panel de control del fancoil

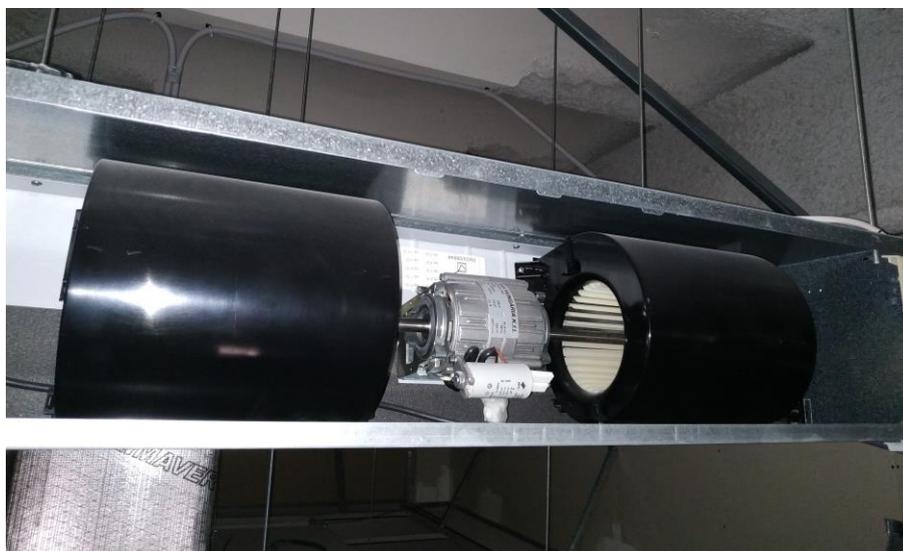


Figura 3-21 Ventilador centrífugo del fancoil

La última pieza clave del fancoil es el difusor de techo (Figura 3-22), modelo TROX ADLR, de la empresa AERMEC, que distribuye el aire que sale del fancoil hacia el despacho de manera uniforme y en toda dirección gracias a su forma radial [37].



Figura 3-22 Difusor de fancoil en el techo del despacho 114

3.3 Sistema complementario de extracción de aire

La instalación que estaba disponible hasta la fecha de realización de este TFG era la expuesta anteriormente, pero tenía dudosa eficiencia por si podría cumplir las normativas de ventilación y mantener los niveles de radón adecuados. Por ello, como complemento al sistema de ventilación descrito se instaló en el despacho 114 un ventilador heliocentrífugo. Uno de los objetivos es analizar la capacidad del sistema de ventilación en solitario, y compararlo con la combinación del mismo y el extractor.

El modelo del ventilador es el TD-350/125 SILENT (Figura 3-23), de la casa Soler & Palau [38]. Su funcionamiento es sencillo: aspira el aire del interior del despacho gracias al giro de un ventilador y un conducto flexible, y lo expulsa hacia el exterior mediante un orificio perforado en la ventana. (Figura 3-24). Debido a este funcionamiento, aparentemente como un método de extracción de aire, se llamará a este sistema a partir de ahora como extractor. El tubo flexible ofrece la posibilidad de realizar diversas mediciones en diferentes posiciones para estudiar el proceso de extracción.



Figura 3-23 Ventilador heliocentrífugo TD-350/125 SILENT [38]



Figura 3-24 Montaje del extractor en el despacho 114

Estos tipos de ventiladores en línea están específicamente diseñados para ser extremadamente silenciosos respecto a la capacidad de mover el aire que tienen, pues su emisión máxima de ruido apenas llega a los 20 decibelios usando su máxima potencia. Consigue esta ventaja gracias una estructura que direcciona las ondas sonoras hacia un aislamiento interior que es fonoabsorbente, amortiguando el ruido y las vibraciones sonoras durante su funcionamiento [38].

Las características más importantes del extractor son las siguientes (Tabla 3-2):

Potencia máxima	30 W
Caudal máximo de aire	360 m ³ /h
Diámetro de conducto de impulsión	125 mm
Tensión-Frecuencia	230V-50Hz

Tabla 3-2 Características de operación del extractor de pared [38] [39]

Como accesorio adicional, este extractor incluye un regulador (Figura 3-25) con el que se puede modificar la velocidad de giro del ventilador, y por tanto el caudal o flujo de aire que este genera.



Figura 3-25 Regulador de velocidad del extractor

Aunque el ventilador se ha montado para extracción de aire, puede también configurarse para que introduzca aire del exterior hacia el despacho. En términos de eficiencia energética, esta opción resulta ser poco adecuada, ya que en épocas frías se estaría introduciendo aire sin climatizar y afectaría al confort térmico del despacho. Además, lo más idóneo para ventilar cualquier espacio cerrado es que exista aire en movimiento de entrada y salida, pues con esta configuración solo habría aire de entrada (sin contar las infiltraciones de ventanas, puertas, suelo...) Por estos motivos, se decidió montar el equipo en modo extracción para la realización y desarrollo del presente TFG.

3.4 Esquema del sistema de la ventilación y climatización en el despacho 114

Resumiendo lo expuesto anteriormente sobre la ventilación de la UTA, la climatización y el extractor, el funcionamiento del conjunto de los sistemas para el despacho 114 es el que a continuación se detalla (Figura 3-26).

El aire es absorbido por la UTA de la planta baja y lo distribuye por unos conductos que llegan a parar a cada sala o despacho de la planta baja. Como ya se ha reseñado, este aire llega por un conducto de 15 centímetros de diámetro actuando como difusor en el falso techo de cada despacho. En el caso del despacho de estudio, este conducto por el que sale el aire impulsado de la UTA dispone de una trampilla o compuerta controlada electrónicamente para gestión del flujo de aire.

El aire que sale del conducto difusor hacia el falso techo puede fluir indirectamente hacia el despacho (mediante las planchas multiperforadas del techo) o bien ser impulsado por el sistema de fancoil. Mediante un ventilador centrífugo, el fancoil succiona el aire del falso techo, y lo climatiza seguidamente mediante dos tuberías por las que le llega agua fría o caliente desde la bomba de calor, bien se programe el fancoil para refrigerar o calentar.

A este conjunto se le une el extractor de pared, que ayudará también a renovar el aire del despacho mediante la extracción del aire del despacho hacia el exterior con diferentes capacidades, según sus modos de potencia.

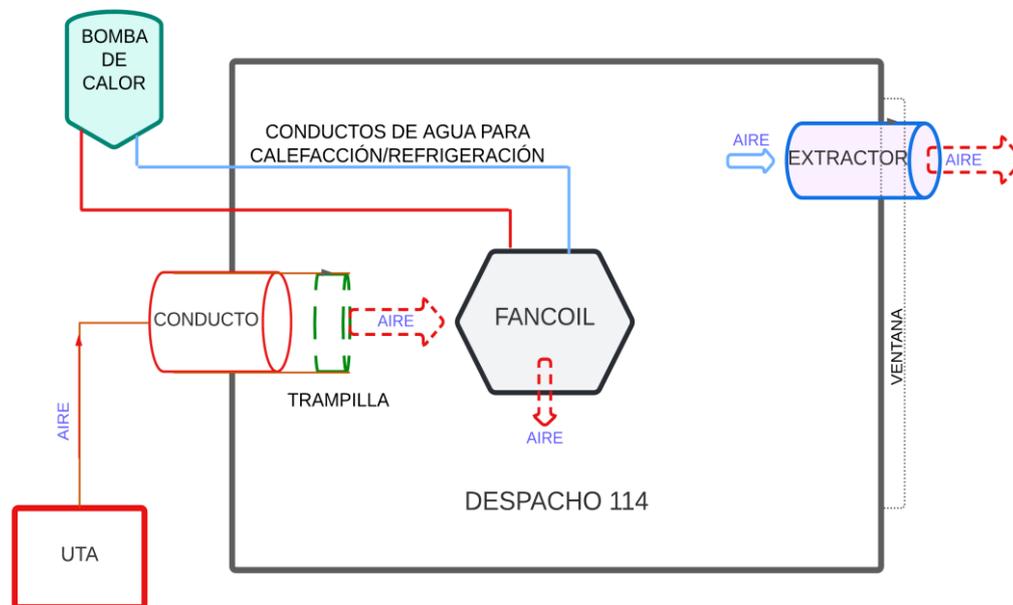


Figura 3-26 Diagrama de la instalación completa para ventilación-Vista en planta

A continuación, se facilita un diagrama del despacho visto desde su perfil (Figura 3-27), de modo que se visualicen las divisiones de falso techo y espacio habitable y en dónde se sitúan cada uno de los subsistemas de la instalación.

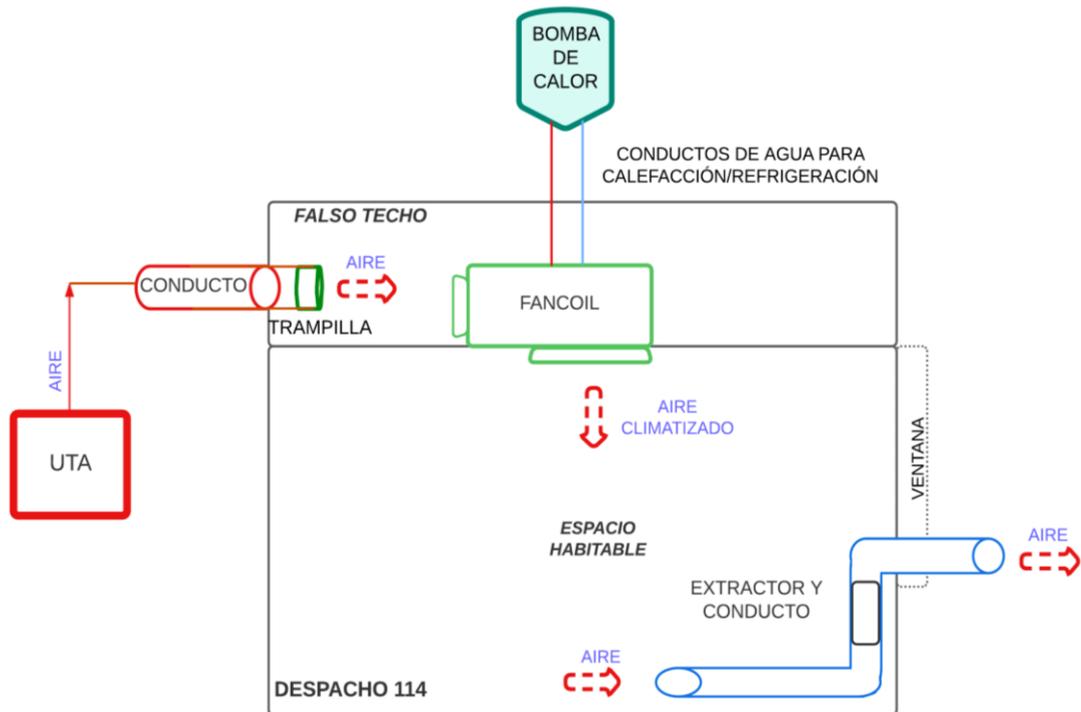


Figura 3-27 Diagrama de la instalación completa para ventilación – Vista de perfil

3.5 Equipos de medición

3.5.1 Anemómetro Térmico

El caudal que nos ofrece cada parte de la instalación de la UTA, así como el extractor de ventana en la planta baja del CUD se medirá con el equipo Testo 405i (Figura 3-28), cuyo funcionamiento y características son expuestas a continuación.

Este equipo es un anemómetro térmico con una sonda de hilo caliente, que, mediante transferencia de calor por convección entre el hilo calentado y el flujo del aire, consigue cuantificar el caudal de aire de los conductos de ventilación introduciendo su brazo extensible en el interior del conducto, además de medir la velocidad lineal del aire en movimiento y su temperatura [40].



Figura 3-28 Equipo de medición Testo 405i [41]

El control de este equipo se realiza mediante una aplicación (Figura 3-29), que envía los datos medidos al teléfono móvil mediante tecnología Bluetooth.



Figura 3-29 Logo de la aplicación Testo Smart [42]

En el menú de la aplicación se encuentra la opción de medición (Figura 3-30), en la que se despliegan una serie de programas de diferentes tipos de mediciones que se pueden realizar con el Testo 405i y otros de la marca. En concreto, se usará el programa de medición de “Caudal volumétrico en conducto”.



Figura 3-30 Captura de pantalla de la aplicación Testo

Dentro de ese programa (Figura 3-31), se puede cambiar la configuración de los siguientes parámetros, dependiendo de dónde se realizan las mediciones:

- Modo de medición: ofrece la posibilidad de seleccionar entre puntual y continua.
- Geometría de la sección del conducto: rectangular, circular, o introducir el área directamente en caso de diferentes secciones del conducto.
- Tipo de aire: si es de impulsión o de retorno.
- Diámetro, altura y anchura o valor de la sección del conducto.
- Factor de corrección por el que se multiplican los valores de medición. Normalmente este valor será de la unidad.



Figura 3-31 Captura de pantalla de aplicación Testo. Configuración del programa de caudal volumétrico

Para cada una de las mediciones que se realicen en los diferentes puntos de la instalación se especificaran las configuraciones de medición adoptadas, atendiendo a los parámetros citados anteriormente.

No obstante, este instrumento tiene sus limitaciones, las cuales se deben tener en cuenta para la ejecución de mediciones y tener una idea de la precisión que nos ofrecen los valores aportados. Los que afectan durante su uso en este Trabajo de Fin de Grado son expuestos a continuación (Tabla 3-3):

Atributo	Valor
Velocidad máxima del aire	30 m/s
Precisión Máxima de la Velocidad del Aire	5%
Resolución de la Velocidad del Aire	0,01 m/s
Rango de temperaturas de funcionamiento	-20°C/50°C

Tabla 3-3 Limitaciones de medida del instrumento Testo 405i [40]

3.5.2 Monitor de calidad del aire Temtop M2000C

Este equipo es un monitor de la calidad del aire multifuncional, capaz de detectar partículas en suspensión en el aire, la concentración de CO₂, la temperatura y la humedad (Figura 3-32). Para realizar estas funciones cuenta con diversos sensores: sensor de partículas láser, sensor infrarrojo para CO₂, sensor electroquímico, y sensor de temperatura y humedad.



Figura 3-32 Monitor de calidad del aire Temtop M2000C [43]

En concreto, la medición que interesa para este Trabajo de Fin de Grado es la concentración de CO₂, aplicada al despacho 114 como un lugar cerrado y habitable. Se debe tener en cuenta, de cara a la fase de experimentación, que este monitor dispone de un rango de medición limitado (5000 partes por millón de concentración de CO₂).

El objetivo a perseguir con el uso de este equipo es determinar la capacidad real de renovaciones del aire en el despacho 114 del CUD, mediante llenado del recinto de CO₂ y posteriormente, aplicando técnicas de ventilación, obtener datos sobre como desciende la concentración de CO₂ en el lugar. Con el medidor Temtop se obtiene una gráfica de valores en pendiente descendente de la que se obtiene el régimen de renovaciones del aire atendiendo a los diferentes modos de los equipos de ventilación del despacho. Estos datos son fácilmente descargables a cualquier ordenador o equipo informático mediante USB.

3.5.3 RadonEye

Este equipo, ampliamente utilizado en anteriores Trabajos de Fin de Grado, permite hacer un seguimiento fácil y rápido de la variación del radón en hogares o lugares de trabajo, como el despacho 114 (Figura 3-33). Esos valores pueden mostrarse en la pantalla del propio medidor o mediante aplicaciones en conexión a un dispositivo electrónico. De manera automática, guarda los niveles cada hora, aunque, para este TFG, este equipo está conectado a un visualizador web que monitoriza gráficamente estas variaciones cada diez minutos. Tiene dos limitaciones características: necesita estar conectado a la corriente permanentemente, y no detecta valores mayores de aproximadamente 3700 Bq/m³.

Este equipo servirá, en el presente TFG, para analizar si los niveles de radón son mantenidos en lo recomendable con el sistema de ventilación en funcionamiento.



Figura 3-33 Medidor RadonEye

3.6 Procedimiento experimental

3.6.1 Metodología de mediciones de caudales

El caudal que fluye en un conducto de ventilación es una magnitud clave para conocer cómo funciona el sistema, pudiéndose medir manualmente o con instrumentos específicos como el Testo 405i. En el caso del uso de instrumentos, es necesario establecer un punto para realizar la medición convenientemente. Existe documentación extensa encargada de resolver este factor. Un buen ejemplo es el documento NTP 668 “*Medición del caudal en sistemas de extracción localizada*” [44], que es una guía que ofrece diferentes recomendaciones para solucionar este problema.

Existen dos diferentes tipos de régimen de fluencia en un conducto, determinados por el número de Reynolds: laminar y turbulento. El régimen turbulento muestra un perfil de velocidades más homogéneo a lo largo de la sección del conducto, todo lo contrario, al perfil más afilado del régimen laminar (Figura 3-34). Es por esto que las medidas que se realicen con un instrumento deberán realizarse justo en la mitad de la sección del conducto independientemente del régimen, de modo que no se cometan valores falsos por medir en los bordes del conducto.

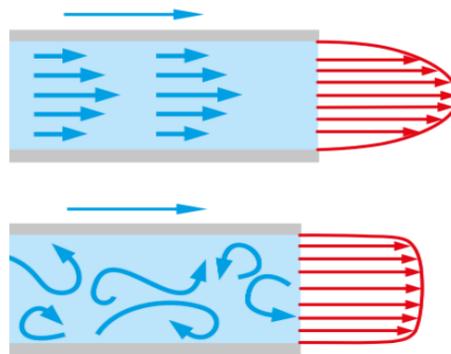


Figura 3-34 Perfil de Velocidades del flujo laminar (arriba) y turbulento (abajo) [45]

Otro factor a considerar es la alteración de estos perfiles de velocidades debido a la existencia de elementos que modifiquen la sección o dirección de flujo, como los codos o las válvulas. Por este motivo y sin tener en cuenta el tipo de régimen, es necesario establecer un punto de medida que se encuentre a una distancia suficiente de cualquier perturbación del conducto que modifique el perfil de velocidad del caudal. Se establece como recomendación general una distancia de 4 veces el diámetro del conducto aguas arriba o entre 7 y 10 diámetros aguas abajo sin perturbaciones desde o hacia un punto crítico, para obtener el punto de medida en el que se introducirá el instrumento de medición.

Definidas las particularidades que requieren estas mediciones, procede clarificar la metodología de las mediciones que se expondrán posteriormente. En toda la instalación existente dentro del despacho 114 (UTA, fancoil y extractor) existen cuatro puntos clave para medir los caudales que llegan al recinto.

El primero de ellos es medir la capacidad de impulsión que tiene la UTA, practicando un agujero en los conductos que salen directamente de ella en el falso techo de la “Sala de Grados” del final de pasillo de la planta baja del edificio del CUD. Además de obtener los caudales con cada régimen de velocidad de la UTA, se realizó también la medida de consumo eléctrico.

El segundo punto a analizar es la llegada de ese caudal impulsado por la UTA hasta el falso techo del despacho, mediante un conducto con una trampilla de apertura variable. En este punto es en el que más variables existen para medir, pues cada posición de la trampilla se puede combinar con cada régimen de velocidad de la UTA. Finalmente se optó por seleccionar 5 regímenes característicos de la UTA (20%, 40%, 60%, 80% y 100%) para combinarlos con cada posición de la trampilla.

El tercer lugar de medición es el caudal que ofrece el fancoil con sus tres modos de potencia. Debido a la dificultad que suponía acceder al sistema por el falso techo, se realizó manualmente un conducto de cartulina gruesa con un diámetro semejante al difusor del techo y con una altura de 175 centímetros aproximadamente, el cual se sujetó al techo con cinta de embalaje (Figura 3-35). Se practicó un orificio al conducto a aproximadamente tres cuartos de la altura del conducto respecto del techo para poder introducir el anemómetro térmico y medir el caudal. Se debe tener en cuenta que el conducto es imperfecto por lo que se realizaron varias mediciones con objeto de descartar los efectos por turbulencias o imperfecciones del montaje.



Figura 3-35 Conducto de fancoil hecho de cartulina manualmente

Las últimas mediciones se centran en el funcionamiento del extractor, teniendo en cuenta sus diferentes modos de velocidad. En el conducto por el cual se aspira el aire hacia el exterior tiene practicado un agujero para introducir el brazo del anemómetro térmico y medir el caudal. Además, gracias a este conducto extensible, se puede situar el punto de extracción del aire a diferentes alturas y longitudes dentro del despacho. Los montajes seleccionados son los siguientes:

- Conducto recogido totalmente en el suelo

La primera medición era ver el conjunto del conducto y el tubo de admisión retraídos lo máximo posible, como se indica en la imagen (Figura 3-36):



Figura 3-36 Montaje del extractor con conducto totalmente recogido

- Conducto recogido con admisión a doble altura

En este montaje se quiso comprobar la capacidad que tiene el extractor de absorber aire si la admisión se sitúa a aproximadamente la misma altura en la que se sitúa el ventilador (aproximadamente 50 centímetros), conservando el conducto de aspiración totalmente retraído. El montaje quedaría a la vista de la siguiente manera (Figura 3-37):



Figura 3-37 Montaje del extractor con conducto recogido y admisión a doble altura

- Conducto extendido completamente en el suelo

La tercera configuración de interés para el extractor fue extender el conducto de admisión del aire a lo largo del despacho y observar las diferencias entre el conducto recogido y este nuevo montaje (Figura 3-38).



Figura 3-38 Montaje de extractor con conducto totalmente desplegado

- Conducto extendido con admisión a doble altura

Esta configuración va enfocada a comparar y mostrar las diferencias con respecto al punto anterior, si bien ahora el conducto de admisión del aire está situado a doble altura (aproximadamente a medio metro, que coincida con la altura de funcionamiento del ventilador), con el tubo totalmente extendido a lo largo del despacho (Figura 3-39).



Figura 3-39 Configuración de extractor con conducto extendido y a doble altura

- Conducto extendido con admisión en gran altura

Tras comprobar que los caudales de aspiración eran más satisfactorios con el tubo completamente extendido, se decidió hacer una medición más variando la altura de la admisión a través del conducto. Esta vez el conducto se apoyó en una balda de una estantería, a aproximadamente 1,5 metros sobre el suelo, para discernir cuan influyente es la altura en la obtención de los caudales, sobre todo si la admisión sobrepasa la altura a la que se sitúa el ventilador. La imagen siguiente muestra la configuración descrita (Figura 3-40).



Figura 3-40 Montaje de extractor con tubo extendido y en gran altura

3.6.2 Metodología para cálculo de la tasa de renovaciones de aire

Obtenidos los caudales de ventilación que aportan todos los equipos existentes en el despacho 114, surge el objetivo de encontrar la combinación o combinaciones más óptimas que aseguren las renovaciones del aire por hora que exigen los documentos del CTE y del RITE. El objetivo es que se consigan realizar 6 renovaciones en una hora del aire que ocupa el volumen del despacho. Caracterizando los valores de los caudales de los equipos y combinándolos se obtienen unos valores teóricos de renovación del aire por hora. Dicho de otro modo, si se combinan diferentes modos de funcionamiento de los equipos se obtiene un número de renovaciones por hora teórico.

Sin embargo, los valores reales de cómo se renueva el aire y cuantas renovaciones por hora tienen lugar en el recinto difieren de los teóricos con un mismo modo de funcionamiento. De esta manera, se ha utilizado la estimación de la ventilación mediante el llenado del recinto con una botella de CO₂ (Figura 3-41) y analizando el descenso de su concentración a lo largo del tiempo.



Figura 3-41 Botella de CO₂ para llenado del despacho

El medidor Temtop estará situado aproximadamente en el centro del despacho y a una altura de un metro y medio, para todos los experimentos. Así se consigue que todas las medidas tengan las mismas condiciones en cuanto a la posición del medidor (Figura 3-42).



Figura 3-42 Situación del medidor durante la experimentación

El procedimiento para estimar la ventilación del aire mediante concentración de CO₂ comienza por el llenado del despacho usando la botella de CO₂, hasta una cantidad que ni exceda el límite de exposición ocupacional ni sature el límite del medidor Temtop (5000 PPM). Para los experimentos realizados, la cantidad máxima de llenado será normalmente de hasta 2500 PPM. Llegados a esta concentración, se cierra la botella y se retira la manguera del despacho desde el exterior por la ventana (Figura 3-43), adaptación que se aprecia en la Figura 3-41 para evitar que nadie tenga que entrar en el despacho durante el procedimiento. Todo el gas suministrado al despacho se trata de distribuir por todo el volumen del mismo con la ayuda de un pequeño ventilador.



Figura 3-43 Disposición para llenado de CO₂ desde el exterior del despacho

Pasados unos minutos tras retirar la botella, la cantidad de CO₂ se estabilizará, por lo que se ponen en funcionamiento los equipos y la configuración de la instalación deseada para iniciar la ventilación.

Una vez se deje el despacho completamente cerrado con los sistemas de ventilación en funcionamiento, se debe esperar a que se reduzca la concentración, como mínimo, hasta que el incremento de CO₂ respecto a la concentración ambiente (aproximadamente 420 PPM) sea del 37% del incremento máximo. La ecuación que delimita este valor es la siguiente (Ecuación 3-1):

$$\text{Conc. final mínima} = (\text{Conc. máxima/inicial} - \text{Conc. ambiente}) * 0.37 + \text{Conc. ambiente}$$

Ecuación 3-1 Determinación de la concentración final mínima para finalizar el experimento [23]

En el instante que se obtenga esta concentración mínima final y reducida respecto a la inicial, se podría finalizar la prueba, aunque para este TFG se ha decidido continuar cada experimento hasta que la concentración final sea lo más cercana posible a la ambiental. Este procedimiento está basado en las recomendaciones para llenado de aulas de CO₂ con hielo seco, tal y como lo especifica el Colegio de Salud Pública Harvard T.H. Chan [23], si bien se ha considerado el mismo método como válido para los experimentos con botella del gas en el presente TFG.

Una vez descargados los datos, se deben identificar gráficamente los siguientes valores:

- Determinar tras el comienzo de la curva de disminución la concentración máxima o inicial (C_{inicial}) que sea proseguida por un descenso claro y constante; y el tiempo de esta medida (t_{inicial}).
- Identificar el final de la curva de descenso con el parámetro del 37% del máximo, marcando este punto como concentración final (C_{final}) y su tiempo correspondiente (t_{final}).
- Tomar como concentración promedio de exteriores la de ambiente indicada anteriormente ($C_{\text{ambiente}} = 420$ PPM).

Para cada configuración de la instalación de ventilación se obtendrán estos datos, y mediante la fórmula que se muestra a continuación (Ecuación 3-2) se puede determinar el número de renovaciones por hora que esa configuración de ventilación es capaz de realizar.

$$N^{\circ} \text{ de renovaciones por hora} = - \frac{\ln \left(\frac{C_{\text{final}} - C_{\text{ambiente}}}{C_{\text{inicial}} - C_{\text{ambiente}}} \right)}{t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}}$$

Ecuación 3-2 Determinación del número de renovaciones por hora [23]

Para caracterizar experimentalmente como se ha realizado todos los experimentos, se redacta un ejemplo del procedimiento a continuación (Figura 3-44).

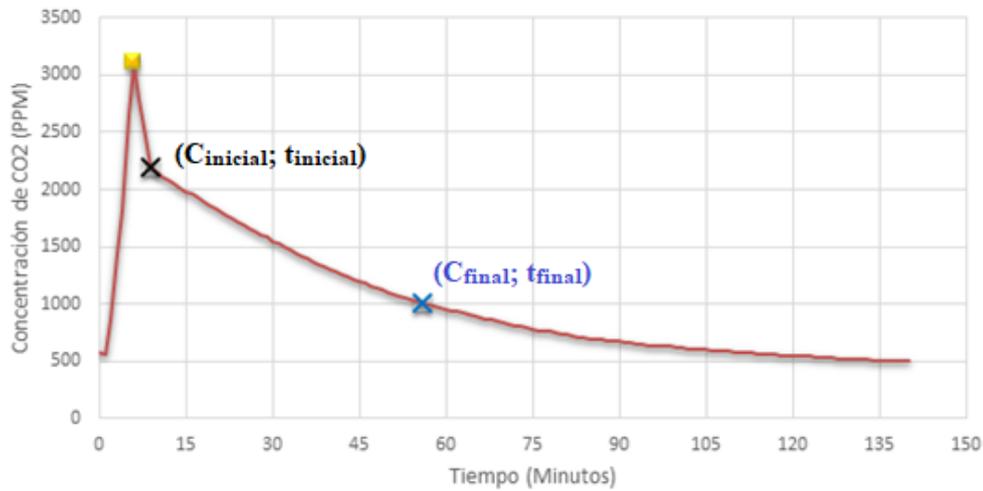


Figura 3-44 Gráfica ejemplo de disminución del CO2 para cálculo de renovaciones/hora

Obtenida la gráfica, se debe identificar claramente el pico máximo de concentración durante el experimento (señalado en amarillo en la gráfica), aunque no interviene en los cálculos de la concentración; el punto $C_{inicial}$, aquel en el que la curva comienza a disminuir de forma clara y constante (marcado con una cruz negra en la gráfica); y el punto C_{final} , valor más próximo a donde el incremento de CO₂ respecto del ambiente sea el 37% del máximo medido (marcado con una cruz azul en la gráfica). También se debe recordar marcar los tiempos de estos dos valores de concentraciones ($t_{inicial}$ y t_{final}), que en la gráfica aparecen en minutos, pero posteriormente se pasarán a horas para el cálculo de las renovaciones por hora.

En este caso, $C_{inicial}$ equivale a 2105 PPM con un $t_{inicial}$ de 11 minutos, y el C_{final} equivale a 1010 PPM con un t_{final} de 56 minutos.

$$\begin{aligned} \text{Conc. final mínima} &= (\text{Conc. máxima/inicial} - \text{Conc. ambiente}) * 0.37 + \text{Conc. ambiente} \\ &= (2105 - 420) * 0.37 + 420 = 1023,5 \text{ PPM} \end{aligned}$$

C_{final} mínima sería 1023,5 PPM, pero con los datos obtenidos el valor más cercano y por debajo de esta concentración es de 1010 PPM.

Con todos los datos caracterizados, y usando la ecuación del número de renovaciones por hora del aire, se obtiene la capacidad real de la configuración de ventilación seleccionada:

$$\begin{aligned} N^{\circ} \text{ de renovaciones por hora} &= - \frac{\ln\left(\frac{C_{final} - C_{ambiente}}{C_{inicial} - C_{ambiente}}\right)}{t_{final} - t_{inicial}} = - \frac{\ln\left(\frac{1010 - 420}{2105 - 420}\right)}{\left(\frac{56}{60}\right) - \left(\frac{11}{60}\right)} \\ &= 1,4 \frac{\text{renovaciones}}{\text{hora}} \end{aligned}$$

Como última labor, se debe comparar este dato con lo que exige el RITE y determinar si la ventilación configurada lo cumple o no. En este caso, no se cumple el RITE (6 renovaciones/hora).

Debido a la cantidad de variables presentes (velocidad de la UTA, posición de la trampilla, etc.), las cuales crean un gran número de combinaciones para funcionamiento de los equipos de ventilación, se argumentan a continuación la selección de las configuraciones estudiadas:

- Los regímenes de velocidad con los que se trabajan en la UTA serán del 50%, del 100% y del 70%, esta última por ser la que recomendó el fabricante al instalar la UTA. Solo en un experimento se dejó la UTA completamente apagada, junto con todos los demás equipos

apagados menos el extractor, con objeto de probar la eficacia del funcionamiento de este en solitario.

- La trampilla del conducto que llega al falso techo siempre se encontrará al 100% abierta para todos los experimentos, pues, tras analizar los datos del caudal, es la posición que muestra menos variaciones por turbulencias y ofrece un flujo de aire más constante.
- El extractor estará apagado o encendido en su potencia máxima (velocidad 10), ya que es un sistema que se ha instalado exclusivamente para este TFG debido a que en años anteriores se sospechaba que la instalación presente no renovaba el aire conforme al RITE. Por esta razón, tenerlo apagado o al máximo sirve además como comparación de cuanto efecto provoca el extractor respecto de la instalación original.
- El fancoil se configura bien apagado totalmente o en sus posiciones 1 y 3, a excepción de las mediciones del 70% de la UTA, donde fue tomado en cuenta a mayores el modo 2 del fancoil.

Atendiendo a todas estas variables descritas, se muestra a continuación una tabla con las fechas en las que tuvieron lugar cada uno de los experimentos (Tabla 3-4). Destacar que, gracias a la medición de temperatura y humedad por parte del monitor Temtop, todos los experimentos se realizaron prácticamente en igualdad de condiciones atendiendo a estos dos parámetros, por lo que no es necesario reseñar cambios en los resultados de los datos obtenidos a causa de temperatura o humedad.

		FANCOIL 0	FANCOIL 1	FANCOIL2	FANCOIL 3
TRAMPILLA 100%/EXTRACTOR MÁX	UTA 100	23 Febrero - Experimento 1	4 Marzo - Experimento 2	-	15 Febrero - Experimento 1
	UTA 70	2 Marzo - Experimento 1	4 Marzo - Experimento 1	2 Marzo - Experimento 3	2 Marzo - Experimento 2
	UTA 50	22 Febrero - Experimento 1	28 Febrero - Experimento 1	-	22 Febrero - Experimento 2
	UTA 0	28 Febrero - Experimento 3	-	-	-
TRAMPILLA 100%/ SIN EXTRACTOR	UTA 100	2 Marzo - Experimento 5	28 Febrero - Experimento 4	-	15 Febrero - Experimento 2
	UTA 70	1 Marzo - Experimento 1	3 Marzo - Experimento 1	3 Marzo - Experimento 2	1 Marzo - Experimento 2
	UTA 50	2 Marzo - Experimento 4	28 Febrero - Experimento 2	-	22 Febrero - Experimento 3

Tabla 3-4 Fechas de realización de los experimentos de renovaciones de aire

3.6.3 Evaluación del sistema de ventilación frente al radón

Una vez obtenidos los datos de los caudales de toda la instalación y la capacidad que esta tiene de renovar el aire, se retoma la importancia y el objetivo principal de este TFG. Si bien anteriormente se estudió la capacidad de renovar el aire usando CO₂, ahora el procedimiento trata de investigar si la instalación es capaz de reducir el radón mientras suceden estas renovaciones de aire.

Los valores de renovaciones del aire por hora que se obtienen del procedimiento de llenado y ventilado con CO₂ muestran si la instalación es capaz de renovar el aire 6 veces por cada hora. Esto podría valer para cumplir las exigencias del RITE, pues es la norma que se exige de salubridad para disponer de un aire limpio y no viciado cuando se habite un recinto como el despacho de estudio.

Sin embargo, que se cumpla la renovación del aire no asegura que la concentración de radón se mantenga de media en los 300 Bq/m³ como establece la normativa. Por esta razón, surge la necesidad de asegurar que la instalación al completo, con sus más idóneas configuraciones, sea capaz de mantener los niveles de concentración dentro de la normativa, sin olvidarse del confort y la calidad de las personas que habitarán el despacho.

Para ello, se ha empleado un visualizador web instalado en un servidor del CUD (Figura 3-45) que monitoriza y muestra parámetros como la concentración de radón en los despachos por medio de los medidores RadonEye, conectados al servidor de la web. Este recurso también ofrece la posibilidad de controlar otros parámetros como el CO₂ con otro tipo de medidores, pero para el presente TFG se decidió utilizar el Temtop descrito anteriormente, por mayor precisión y fiabilidad que los que son registrados en este sistema de monitorización.

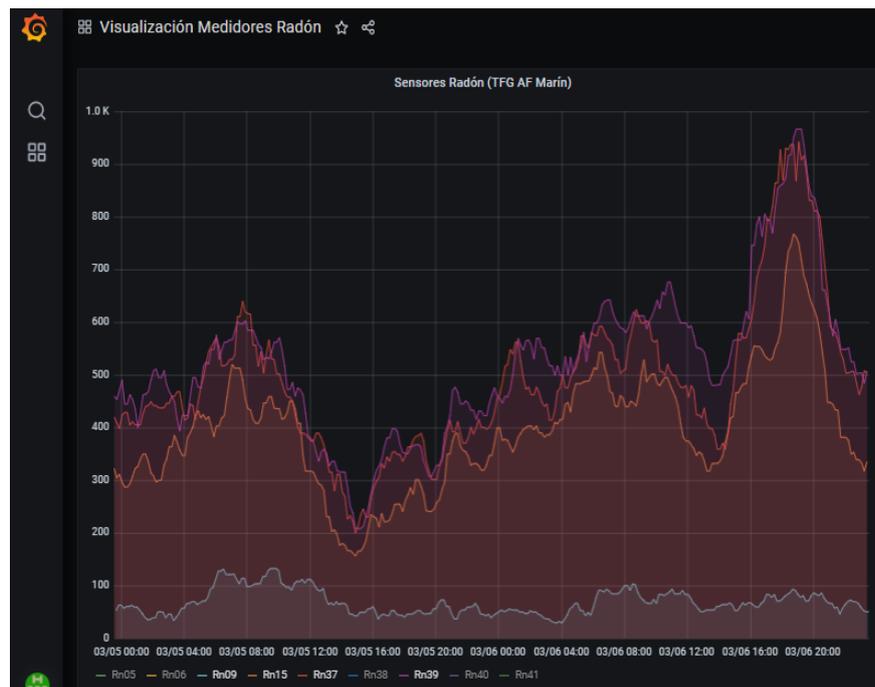


Figura 3-45 Visualizador web del sistema de monitorización de la concentración de radón

La variación en la concentración de radón necesita de un periodo temporal relativamente amplio (semanas o meses), teniendo en cuenta cuantos factores sean posibles, al igual de cómo le afecte la ventilación aplicada en el recinto. Debido a la indisponibilidad de tales periodos para la realización de este TFG, se han realizado mediciones en periodos de aproximadamente 48 horas para cada configuración de los sistemas de ventilación, asumiendo que los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a tal nivel temporal.

Un gran problema de estos experimentos es que no se dispone del control remoto sobre los equipos de ventilación en funcionamiento, pues es una línea futura de este TFG el controlar automáticamente toda la instalación. De igual modo, el visualizador web que recoge los datos del radón puede generar fallos de conexión al servidor, o por el propio medidor. Existen muchos más factores por los que realizar estas estimaciones es particularmente complicado.

El objetivo principal de estos experimentos o estudios consiste en determinar si existe al menos una de las múltiples combinaciones de la ventilación que sea capaz de mantener la media de la concentración de radón por debajo de los límites de la normativa, de cara a que este despacho pueda ser utilizado de nuevo por el profesorado sin que exista peligro por exposición a la radiación para la salud humana.

4 RESULTADOS

4.1 Determinación de caudales de la instalación

4.1.1 Caudales totales impulsados por la UTA

Con objeto de determinar los caudales que ofrecen las distintas potencias de la UTA, se muestra a continuación una gráfica donde se caracterizan los valores obtenidos, ajustados mediante una línea de tendencia de estimación de los mismos (Figura 4-1). Además, como se mencionó en la explicación del procedimiento de medidas de los caudales, se obtuvieron datos del consumo por cada régimen de velocidad, ajustados también por una línea de tendencia polinómica que muestra el consumo esperado en vatios.

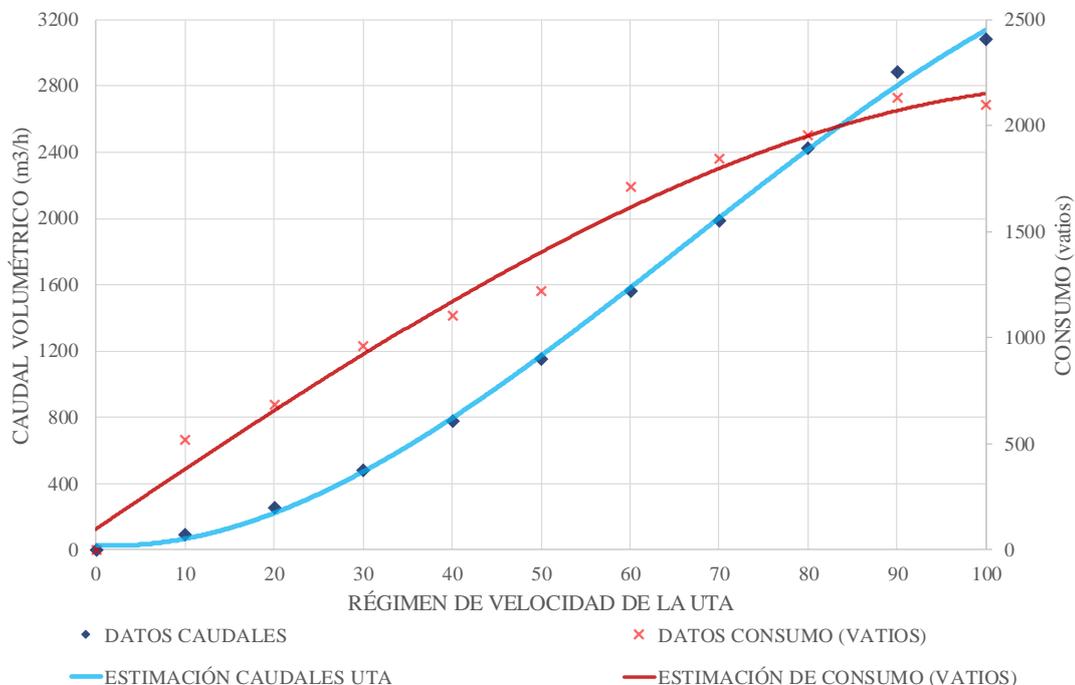


Figura 4-1 Caudales y consumos según potencia de la UTA

Además de los caudales obtenidos, el medidor también proporciona la velocidad frontal del flujo del aire, en metros por segundo. Este dato es de vital importancia para comparar los valores obtenidos en la gráfica anterior con los que teóricamente debería aportar el equipo, atendiendo al propio manual informativo del fabricante [46].

En el mayor régimen de velocidad de la UTA, se ha obtenido en promedio una velocidad frontal de 3,5 m/s. Según el manual, para una velocidad frontal con este valor, el flujo volumétrico aportado en total por este modelo de UTA debería rondar los 4700 m³/h, aunque teniendo en cuenta que las mediciones realizadas no estaban inmediatamente en la salida de la UTA, no se pueden hacer suposiciones válidas, ya que el valor que proporciona el fabricante si se encuentra a la salida del sistema. Por ello, se ha optado por seleccionar el valor promedio de una serie de velocidades frontales que aparecen en el manual (2,8 m/s), con el que se aportaría un flujo de aire de unos 3600 m³/h.

Comparando este promedio del manual con los datos obtenidos, se observa que el caudal máximo que ofrece en realidad la UTA en el CUD es de 3100 m³/h, lo que supone un detrimento del 14% del caudal supuesto.

En la documentación comentada no aparece información alguna sobre los consumos de la UTA, por lo que quedan caracterizados de manera experimental los consumos del sistema para el caso de estudio en la gráfica anterior (Figura 4-1).

4.1.2 Caudales de aire fresco introducidos en el falso techo del despacho

Teniendo en cuenta que ahora están presentes dos variables, se mantiene fija para cada experimento la posición de la trampilla, mientras se varían manual y periódicamente las potencias que ofrece la UTA.

En la siguiente gráfica se muestran en conjunto los caudales que se expulsan por el conducto del falso techo atendiendo a las variables de las posiciones de la trampilla y la potencia de la UTA (Figura 4-2).

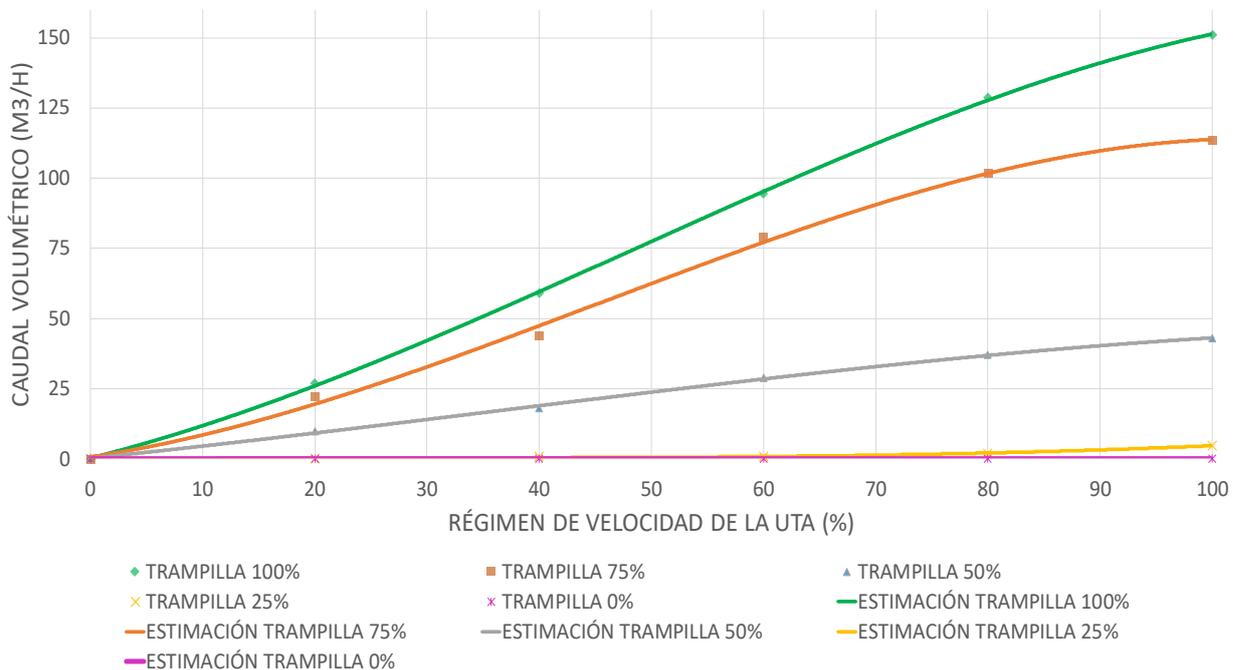


Figura 4-2 Caudales combinados de potencia de UTA y posiciones de trampilla

Es fácilmente apreciable que los caudales que llegan al falso techo del despacho comienzan a ser característicos para una renovación de aire cuando:

- La trampilla está al 50% de su apertura total y la UTA en su máxima potencia, aportando caudales de aproximadamente 40 m³/hora.
- La trampilla está al 75-100% y la UTA sobrepasa el 50% de su potencia, que aportaría caudales en ambos casos de más de 60 m³/h, valores que son ya significativos para una ventilación considerable.

Lo más importante a reseñar es que estos caudales no pueden ser tomados en cuenta para hacer un posible cálculo teórico junto al resto de la instalación con el fin de determinar el número de renovaciones por hora. La razón de ello es que no hay por el momento ningún modo de saber qué porcentaje o transferencia de este aire que llega al falso techo es capaz de atravesar las planchas multiperforadas y llegar al espacio habitable, y por tanto que pueda caracterizarse experimentalmente y ser efectivo para renovar el aire del espacio de trabajo.

4.1.3 Caudales del fancoil

Mediante el orificio practicado al tubo de cartulina del fancoil (ver Figura 3-35), se introdujo el medidor Testo y se obtuvieron los datos de los caudales en los diferentes modos de funcionamiento del fancoil. A continuación, se muestran dos gráficas similares entre sí: la primera de ellas (Figura 4-3) indica las mediciones en bruto y la línea promedio con su valor indicado a la derecha, para cada modo de funcionamiento (FC1, FC2, FC3); la segunda muestra los promedios para cada modo de funcionamiento del fancoil de manera más esquemática (Figura 4-4).

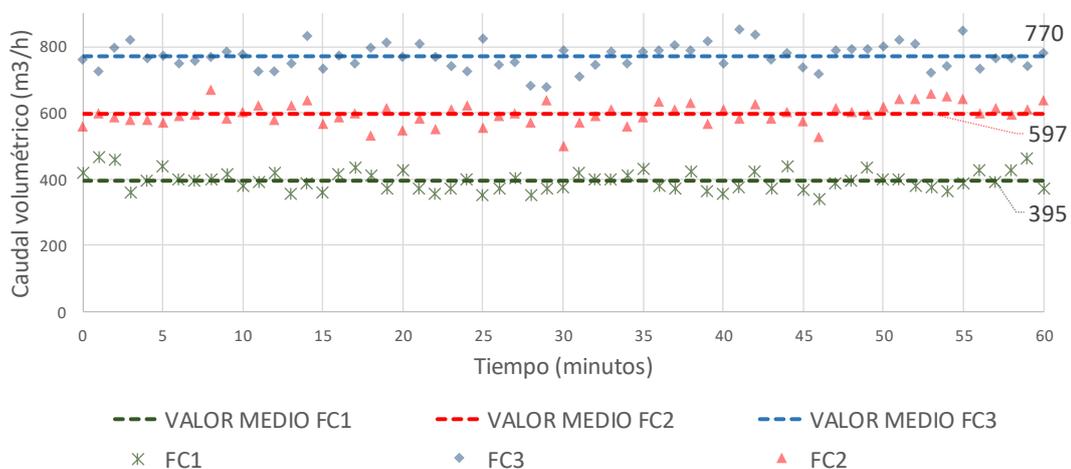


Figura 4-3 Valores medidos y promedios de cada modo del fancoil

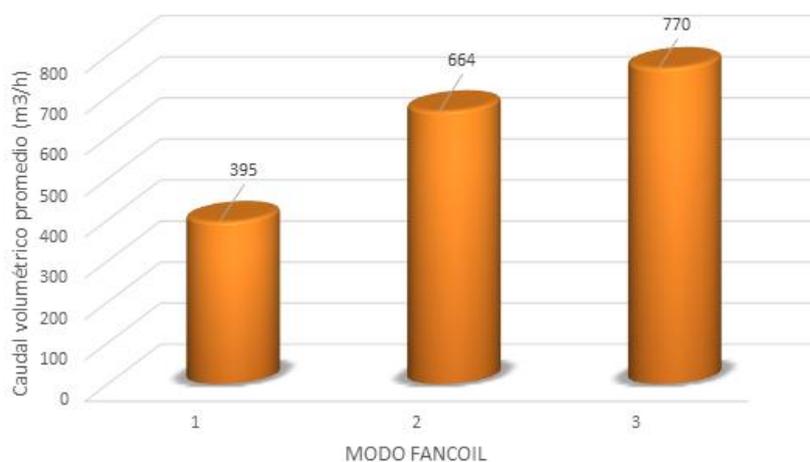


Figura 4-4 Caudales promedio de cada modo del fancoil

Entre los valores de la última gráfica se pueden establecer ciertas relaciones entre los modos del fancoil: considerando que el modo 3 es el 100% de la capacidad para impulsar aire del fancoil, el modo 2 ofrecería aproximadamente el 85% del total, y el modo 1 sería un 50% del modo 3. Visto desde el modo 1, el segundo ofrecería un 68% de mejora, y el modo 3 de casi un 100% respecto al primero.

Otro resultado de importancia es que durante estos experimentos se comprobó, con diversas mediciones, que el fancoil ofrece los mismos caudales de aire en solitario que con la UTA en funcionamiento, proporcionando aire fresco hacia el falso techo del que el fancoil toma parte para funcionar, por lo que son dos equipos cuyos funcionamientos son totalmente independientes entre sí.

Comparando lo analizado respecto al fabricante, el manual del propio fancoil especifica los caudales que debería aportar el equipo [47], expuestos en la siguiente tabla, comparándolos a la vez con los obtenidos en la experimentación (Tabla 4-1):

Modo Fancoil	Caudal de aire de fabricante(m ³ /h)	Caudales de aire medidos (m ³ /h)
Modo 1	330	395
Modo 2	460	664
Modo 3	600	770

Tabla 4-1 Comparación de caudales del fancoil del fabricante y de la experimentación

Al contrario de la UTA, los valores de los caudales obtenidos del fancoil son mayores que los que establece el propio manual del fabricante: el modo 1 muestra una mejora del 20%, el modo 2 del 44%, y el modo 3 del 28%. Esto podría deberse a que se ha medido con un conducto provisional de cartulina como se mostró anteriormente, provocando un flujo de aire directo en lugar de la dispersión de aire que crea el propio difusor del fancoil.

4.1.4 Caudales del extractor

Como ya se expuso anteriormente, las mediciones del extractor se realizaron con cinco montajes del conducto diferentes: retraído, retraído a doble altura, extendido, extendido a doble altura y extendido a gran altura (estantería). Con los datos obtenidos, se obtuvo la siguiente gráfica de caudales de funcionamiento para cada configuración, con los valores ajustados por líneas de tendencia rectilíneas (Figura 4-5):

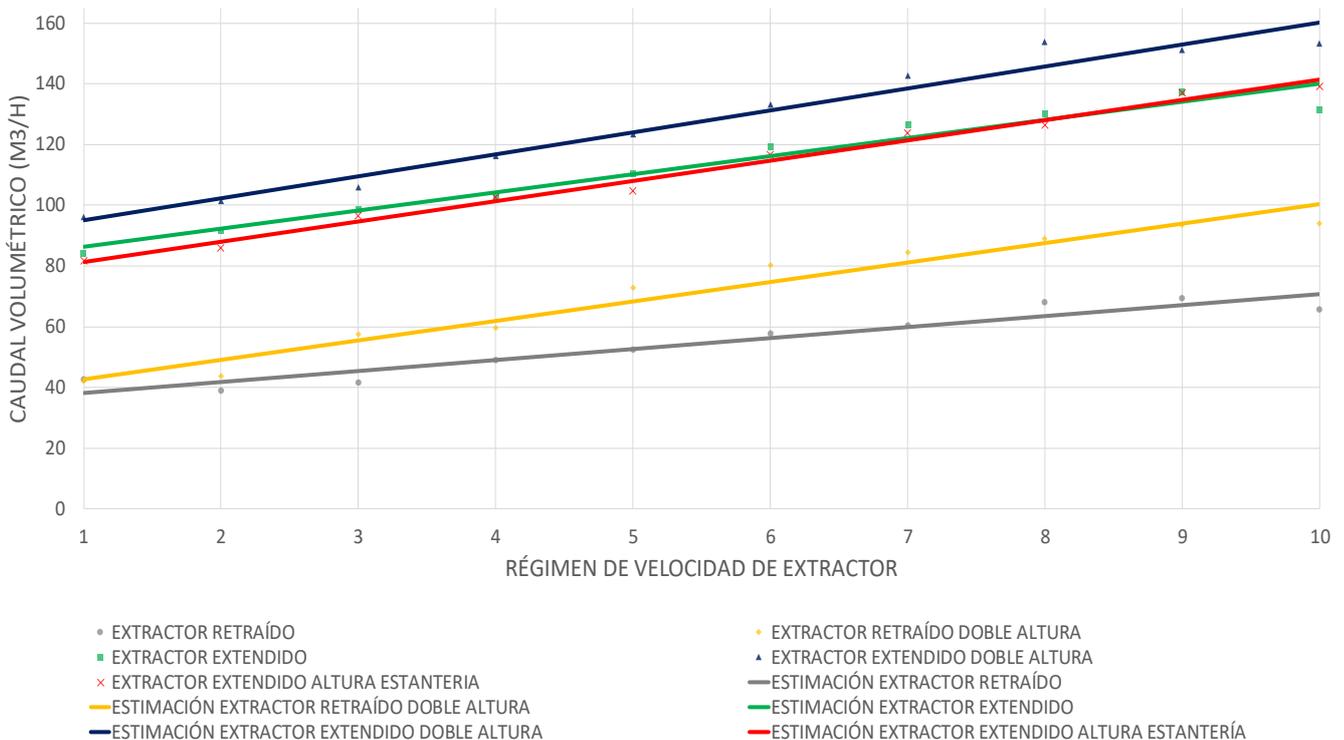


Figura 4-5 Curvas de caudales del extractor según diferentes configuraciones

El resultado obtenido es que el montaje más eficiente y que más caudal extrae es en el que el conducto se extiende completamente y se sitúa la admisión a una altura de aproximadamente medio metro, altura similar a la que se encuentra el ventilador del extractor. Esta configuración del extractor por tanto es la que será utilizada para la fase de cálculo de las renovaciones de aire mediante ventilación, cuyo objetivo es determinar las renovaciones por hora del despacho con diferentes configuraciones.

Según la ficha del producto del extractor, el caudal de aire máximo supuesto que debería ofrecer el equipo es de unos 300 m³/h. Sin embargo, las mediciones han sido realizadas en el extremo del conducto flexible que se mostró en imágenes anteriores, por lo que no tendría sentido compararlo con los datos del fabricante. De todos modos, y teniendo en cuenta este factor, el caudal máximo real que se ha obtenido del montaje en el despacho 114 solo llega a unos 150 m³/h, aproximadamente la mitad del valor de la ficha del producto.

4.2 Determinación del número de renovaciones de aire

Una vez se realizó la caracterización experimental de los datos durante los procedimientos, y tras analizarlos gráficamente, se obtuvieron los resultados del número de renovaciones de aire por hora para configuración de la instalación. Para visualizar rápidamente el resultado unido a las configuraciones de la instalación, se muestra a continuación la siguiente tabla resumen (Tabla 4-2).

Cabe recordar las siguientes consideraciones:

- La trampilla no aparece en la tabla porque en todos los experimentos ha estado al 100% abierta, dejando pasar el máximo caudal de aire.
- Las potencias del extractor utilizadas para estos experimentos serán: apagado (-) o la máxima (máx.).
- Las potencias de la UTA se denotan en porcentajes.
- El fancoil se denota por sus modos de funcionamiento (-,1,2,3).

Configuración de la instalación			N° de renovaciones/hora
Extractor	UTA	Fancoil	
-	-	-	0
Máx.	-	-	2,10
-	100	-	0,67
		1	0,69
		3	1,03
	70	-	0,63
		1	0,85
		2	1,20
	50	3	1,40
		-	0,66
		1	1,05
Máx.	100	3	1,67
		-	2,70
		1	3,13
	70	3	5,12
		-	1,97
		1	2,28
	50	2	3,26
		3	4,49
		-	1,38
50	1	2,16	
	3	3,47	
	-		

Tabla 4-2 Resultados de renovaciones por hora para las diferentes configuraciones de la ventilación

Analizando los resultados, se observa que ninguna configuración de la ventilación es capaz de cumplir adecuadamente el RITE. Todas se encuentran por debajo de 6 renovaciones por hora, por lo que, atendiendo a lo experimentado, se concluye que el aire en el despacho 114 no se renueva adecuadamente con la instalación actual.

Con objeto de visualizar rápidamente los resultados, se han graficado los valores en las dos figuras mostradas a continuación (Figura 4-6; Figura 4-7), comparando los datos entre la instalación original con la adición del extractor, y variando las diferentes potencias de la UTA y fancoil. Cabe destacar que los valores que no se han experimentado, como los casos con el fancoil en su modo 2 de potencia, se han interpolado entre los datos que sí se han podido caracterizar. De este modo, se obtiene una estimación fiable para cada configuración de funcionamiento.

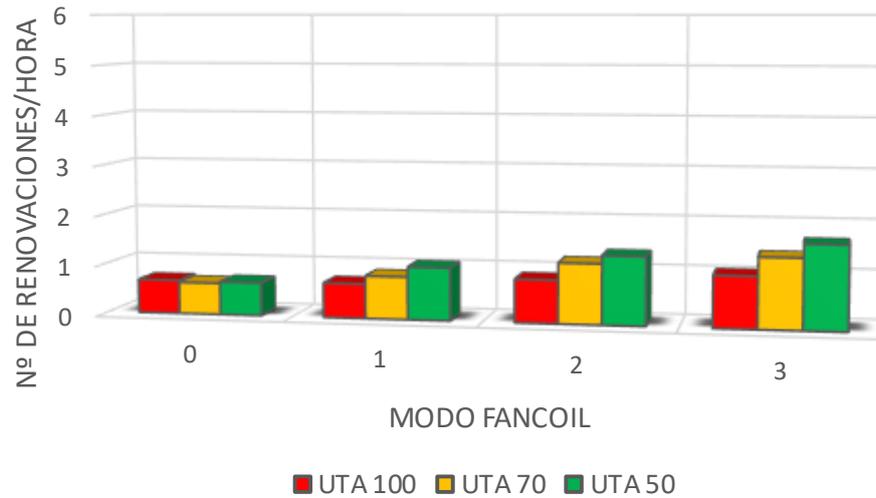


Figura 4-6 Número de renovaciones/hora según diferentes combinaciones de la instalación sin extractor

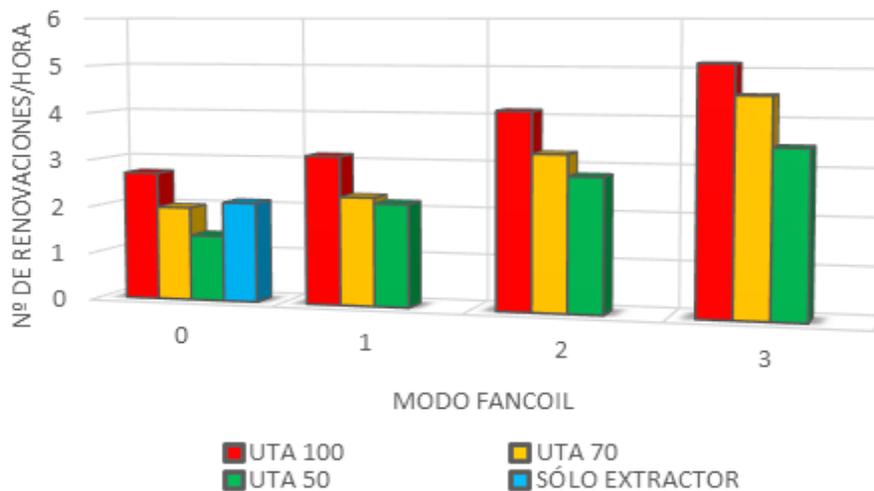


Figura 4-7 Número de renovaciones/hora según diferentes combinaciones de la instalación con extractor

Se identifica de la primera gráfica (Figura 4-6) que sin el uso del extractor, el número de renovaciones horarias es insuficiente para cumplir con las normativas y proporcionar una calidad del aire óptima. Ni siquiera con la instalación original, es decir, sin el extractor y con la UTA al máximo o al 70% como recomendó el fabricante, se obtendrían las 6 renovaciones de aire horarias que se exigen en la normativa.

En esta misma gráfica se observa una importante discrepancia. Con potencias de UTA menores se han obtenido valores de renovaciones más altos. Este fenómeno es de difícil explicación debido a las incertidumbres de la transferencia de aire entre el falso techo y el propio despacho, y al hecho de compartir este falso techo con el despacho adyacente. Sin embargo, estos valores se pueden considerar no significativos por depender de otros parámetros que no se ciñen a lo estudiado y experimentado en este TFG. De todos modos, entre los diferentes valores de esta gráfica no existe una diferencia notable entre los valores de renovaciones, y todos se encuentran lejos de los valores objetivo de renovación de este procedimiento.

Centrando ahora el análisis en la segunda gráfica (Figura 4-7), se aprecia que cuando existen caudales de aire de entrada y salida, como es en estos casos de uso de la instalación junto con el extractor, el número de renovaciones horarias crece favorablemente, a pesar de que ninguna de las combinaciones cumpla con lo expuesto en el RITE. Comparando ambas gráficas, el uso del extractor

ofrece unos niveles de mejora de entre 2,5 y 4 veces el número de renovaciones respecto al no uso del extractor.

Por tanto, se puede afirmar que el uso del extractor favorece en gran medida la renovación del aire dentro del despacho ya que se está generando un canal de salida, y, en contraparte, se concluye que la instalación sin el extractor carece de eficiencia y no cumple rigurosamente con las normativas.

4.3 Evaluación de la capacidad de la ventilación contra el radón

El objetivo de este apartado es determinar la variación de la concentración de radón atendiendo únicamente a las diferentes configuraciones de la ventilación en el despacho 114, de manera que se pueda afirmar que al menos existe un modo de ventilación que mantenga los niveles adecuados. Es cierto que la concentración de radón depende de muchos factores diferentes que no son objetivo de este estudio, por lo que los resultados mostrados a continuación serán exclusivamente dependientes de la ventilación.

En diferentes periodos con escasa actividad humana se han obtenido los datos del radón con configuraciones diversas de ventilación, para estudiar si el valor promedio de las concentraciones se mantiene en los 300 Bq/m³ o menos. La obtención de estos datos se consiguió mediante un RadonEye situado a media altura, conectado al visualizador web de monitorización.

A continuación, se muestran los resultados de las acumulaciones de radón para cada configuración de ventilación, donde la línea roja muestra el valor promedio, y la naranja los niveles de la normativa.

- **Del 11 de febrero al 13 de febrero; Sólo extractor**

Según los datos obtenidos en este periodo de tiempo (Figura 4-8), y utilizando solamente el extractor en su máximo régimen de velocidad (con una capacidad de 2,1 renovaciones/hora), se obtiene un valor promediado de unos 520 Bq/m³, por lo que no se cumple la normativa vigente sobre la concentración de radón.

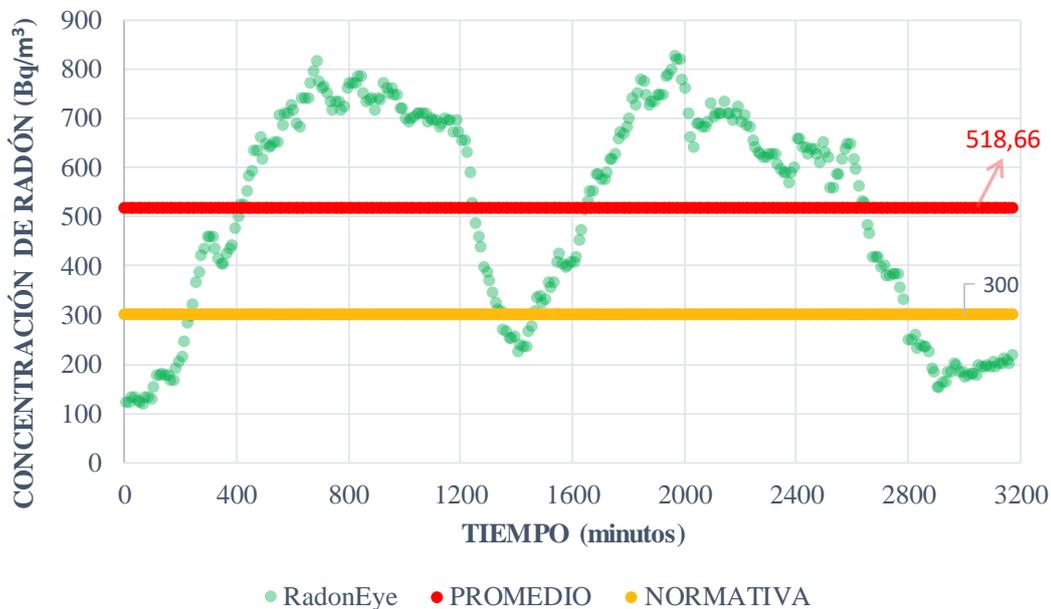


Figura 4-8 Gráfica de concentración de radón, 11-13 de febrero

- **Del 18 de febrero al 20 de febrero; UTA 50 - Extractor MÁX. – Sin fancoil**

En este periodo de tiempo se obtiene un valor medio de aproximadamente 630 Bq/m³ con la configuración seleccionada (capacidad de 1,38 renovaciones/hora), por lo que se deduce que tampoco se cumple la normativa con esta configuración de ventilación (Figura 4-9).

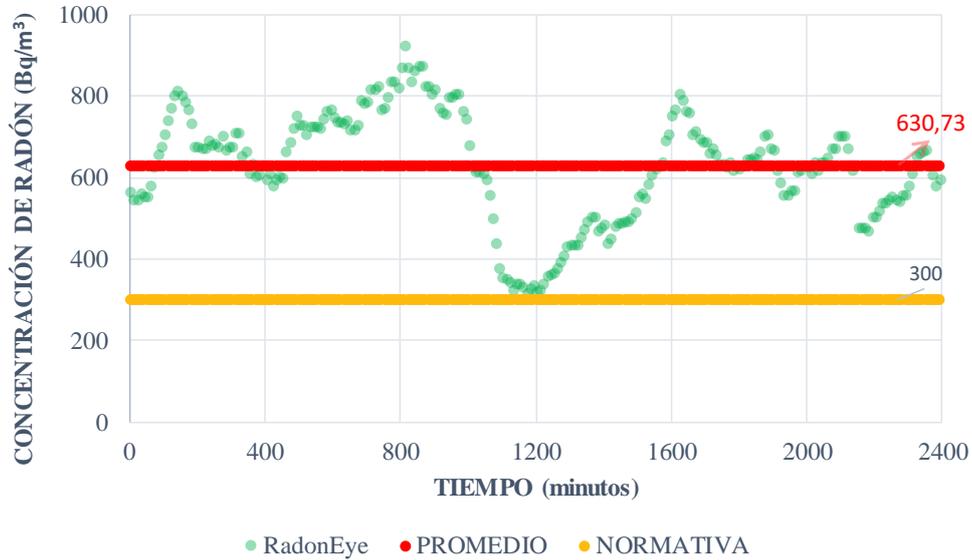


Figura 4-9 Gráfica de concentración de radón, 18-20 de febrero

- **Del 4 de marzo al 6 de marzo, UTA70 – Extractor MÁX. – Sin fancoil**

En este fin de semana las concentraciones de radón fueron menores por variación de la meteorología en Marín, pero se observa en la gráfica que, con este modo de ventilación (con capacidad de 1,97 renovaciones/hora), el promedio de radón obtenido (aproximadamente 390 Bq/m³) no es lo suficientemente bajo como para cumplir la normativa (Figura 4-10).

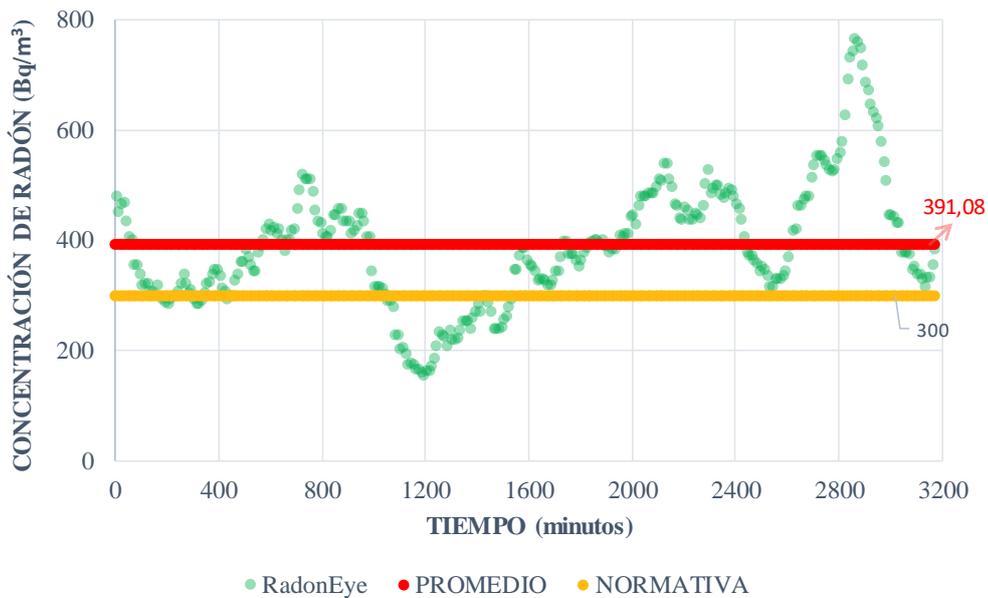


Figura 4-10 Gráfica de concentración de radón, 4-6 de marzo

• **Del 9 de marzo al 11 de marzo; UTA70 – FC3 – Sin extractor**

Esta configuración de la instalación es la que originalmente se encontraba en el despacho 114, al igual que es la presente en el resto de despachos de la planta baja del CUD, pues el extractor es un equipo añadido para uso exclusivo del presente TFG. Cumple además con lo recomendado por el fabricante para disponer de una ventilación eficiente. Su capacidad de renovación de aire ofrece 1,4 renovaciones/hora.

Como complemento para este experimento, se usaron dos medidores RadonEye, situados en diferentes alturas. El número 15 se situó aproximadamente a la altura de la cabeza una persona sentada en una silla (media altura), y el número 37 en el suelo, obteniéndose la gráfica de los datos obtenidos mostrada a continuación (Figura 4-11).

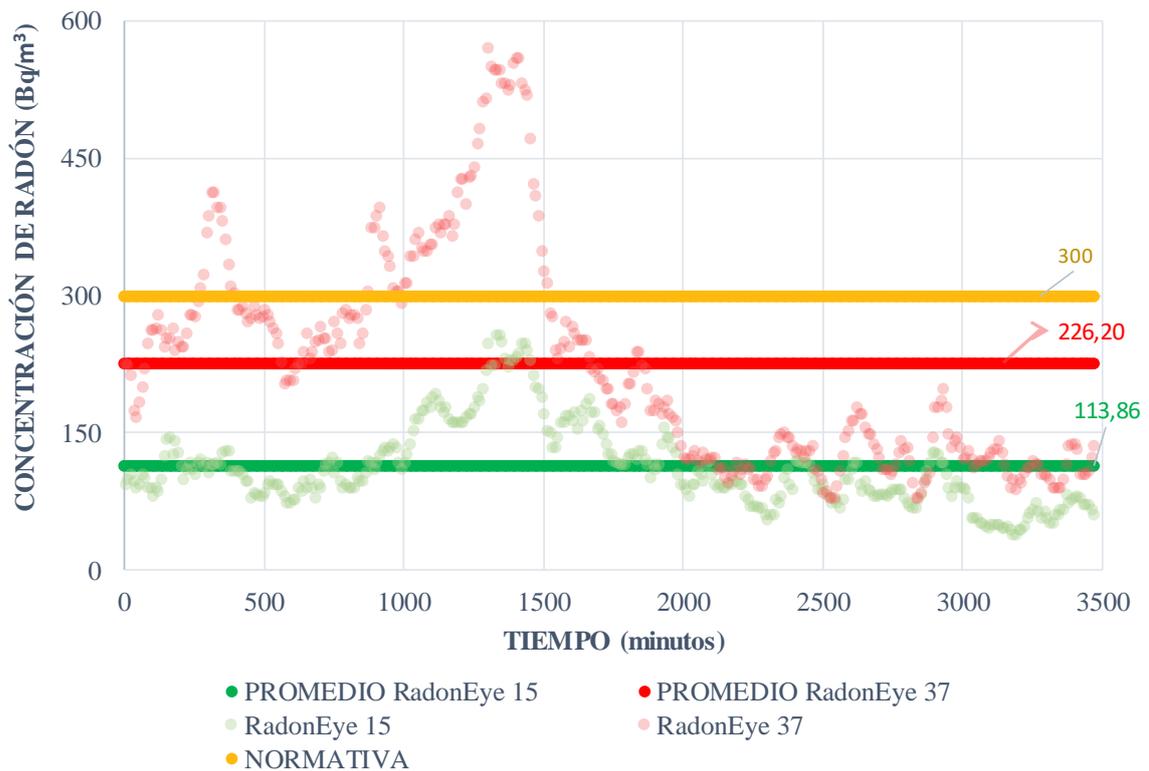


Figura 4-11 Gráfica de concentración de radón, 9-11 de marzo

Siguiendo los parámetros de comportamiento del radón, se observa que el RadonEye 37, situado en el suelo, obtiene valores más altos que el 15, pues los niveles de concentración serán siempre mayores en los suelos, lugares por donde emana el radón. Además, el uso simultaneo de los dos medidores permite observar que tanto el aire que se aporta al falso techo como el del fancoil empuja el volumen de aire del despacho hacia el suelo, lo cual demuestra de igual manera que el medidor 37 tenga valores más altos a la altura del suelo. En resumen, la ventilación empuja el volumen de aire y el radón hacia el suelo.

Como principal resultado, se obtiene que este modo de ventilación sí es capaz de mantener la concentración de radón dentro de la normativa incluso en ambas alturas, pues interesa particularmente que la concentración de radón se la adecuada a la altura del tracto respiratorio humano, evitando así futuros problemas en la salud por inhalación.

• **Del 11 de marzo al 13 de marzo; UTA 70 – FC1 – Sin extractor**

Del mismo modo que el experimento anterior, se han utilizado dos medidores de radón simultáneamente, obteniéndose datos muy similares (Figura 4-12). La configuración seleccionada tiene una capacidad de 0,85 renovaciones/hora.

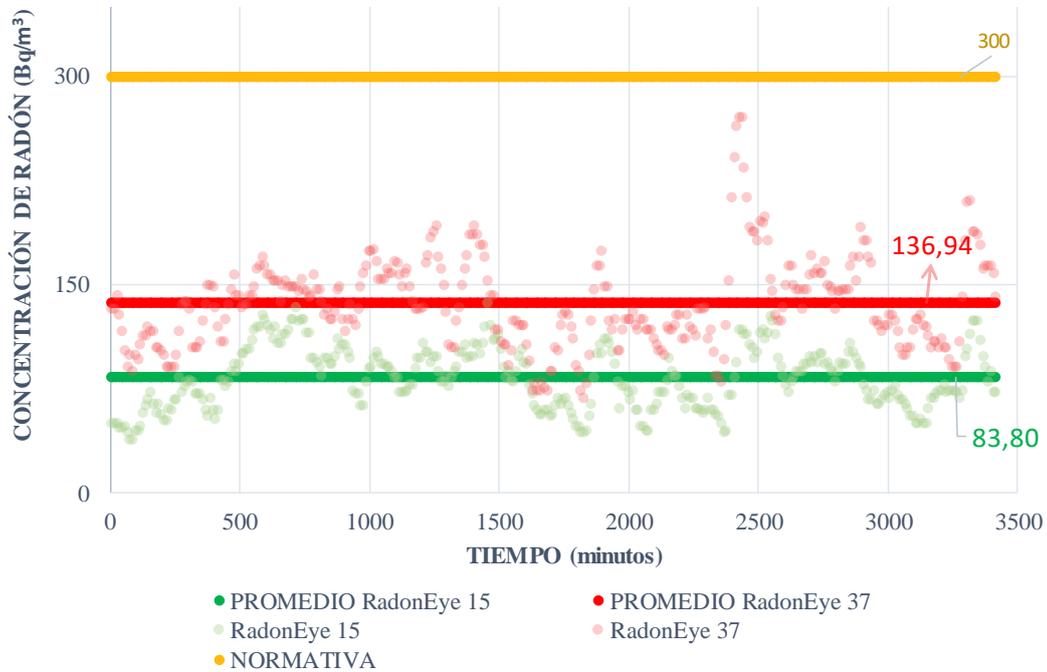


Figura 4-12 Gráfica de concentración de radón, 11-13 de marzo

El RadonEye número 15 tiene niveles más bajos que el 37, pues se debe recordar que este último se sitúa en el suelo. Esto refuta la teoría de que la ventilación aplicada empuja el aire hacia el suelo mientras reduce a la vez la concentración de radón a la altura teórica del tracto respiratorio de una persona.

Como resultado principal, se obtiene, del mismo modo que el experimento anterior, que la configuración del sistema de ventilación aplicado en este experimento también es válida para mantener los niveles del radón dentro de la normativa. Además, se obtienen valores más bajos que en el experimento anterior, por lo que se puede afirmar que esta configuración de ventilación tiene mayor capacidad de mitigación frente a la concentración de radón.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Se han analizado por separado las diferentes experimentaciones realizadas para evaluar la capacidad del sistema de ventilación para renovar el aire y mantener los niveles de radón en los niveles adecuados, con el objetivo de que la instalación sea optimizada en el futuro atendiendo a las diferentes conclusiones que se exponen a continuación.

En relación con el estudio experimental sobre el funcionamiento de la instalación, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- ✓ En la caracterización experimental sobre el funcionamiento de la Unidad de Tratamiento del Aire se han obtenido caudales diferentes a los recogidos por la ficha técnica del fabricante, aunque se debe tener en cuenta que el lugar de medición no es exactamente a la salida del equipo. En la misma experimentación se ha conseguido caracterizar los consumos en vatios de la UTA, valores que no se encontraban expuestos en la mencionada ficha técnica.
- ✓ La trampilla del conducto que aporta aire al falso techo tiene su máxima eficiencia en las posiciones de 75% o 100% abierta, siendo esta última la más recomendable. Para el resto de posiciones más cerradas, los caudales de aire fresco aportados son muy bajos, por lo que no se recomienda el uso de estas posiciones para unas condiciones normales de funcionamiento.
- ✓ El fancoil aporta aparentemente más flujo de aire que lo especificado por el fabricante, y se ha establecido una relación de funcionamiento entre los tres modos del fancoil. Además, se ha conseguido determinar que el aire fresco que llega al falso techo desde la UTA no afecta a los flujos de aire que aporta el fancoil, por lo que son considerados totalmente independientes entre sí.
- ✓ El montaje más eficiente del extractor instalado en la ventana del despacho es en el que se extiende al completo el conducto flexible y se sitúa la admisión a una altura similar respecto a la del propio ventilador, pues es capaz de extraer el aire con un mayor caudal que el resto de los distintos montajes probados.
- ✓ No se puede caracterizar cual es la transferencia de aire que atraviesa las planchas perforadas desde el falso techo al volumen habitable, por lo que el caudal de aire que se aporta al falso techo no es efectivo en la actualidad para renovar el aire.

Con respecto a la fase de cálculo del número de renovaciones de aire, se determinan las siguientes conclusiones:

- ✓ Con la fase de experimentación para la caracterización del número de renovaciones del aire se ha determinado que ninguno de los modos configurados de la instalación es capaz de cumplir con lo establecido por el RITE, el cual recomienda un mínimo de 6 renovaciones del aire por hora. Se ha determinado que el máximo que se puede obtener con la instalación actual es de aproximadamente 5 renovaciones por hora (UTA al 100%, fancoil en modo 3, trampilla al 100% y extractor al máximo). Por tanto, ninguna de las demás configuraciones cumplirá con el RITE.
- ✓ Se concluye además que, sin usar el fancoil y el extractor, y solo aportando aire con la UTA al falso techo, las renovaciones son claramente insuficientes (en torno a 0,5 renovaciones por hora), debido a que la transferencia de aire entre el falso techo y el propio despacho es deficiente y de difícil caracterización. Se ve necesario por tanto el uso del fancoil y, en especial, del extractor, el cual aporta una gran mejora a la capacidad de renovación del aire de la instalación.

En relación a las pruebas experimentales sobre el comportamiento y la variación de los niveles de radón bajo efectos de ventilación, se debe tener en cuenta que los periodos de muestreo son relativamente cortos para extraer conclusiones definitivas. De todos modos, se observa que:

- ✓ El extractor por sí solo no consigue mantener los niveles de radón dentro de las normativas.
- ✓ La combinación UTA y extractor, sin el fancoil en funcionamiento, tampoco consiguen reducir el promedio de radón en los niveles adecuados, pues el flujo de aire del falso techo seguramente no tenga efecto sobre el espacio habitable del despacho.
- ✓ El conjunto UTA y fancoil, al 70% y modo 3 o modo 1 respectivamente, sí consiguen mantener el radón en los márgenes recomendados.
- ✓ Los niveles de radón son mayores a la altura del suelo que a una altura media, ya que la ventilación impulsa el aire desde arriba intentando vencer la emanación del radón, que se produce en sentido contrario.
- ✓ Se concluye que el fancoil es estrictamente necesario, pues impulsa aire fresco desde la parte superior del despacho hacia el suelo empujando el aire hacia el suelo y manteniendo los niveles de radón en valores adecuados.

5.2 Recomendaciones y líneas futuras

En base a las conclusiones, se establecen las siguientes recomendaciones líneas futuras de investigación:

- (1) Realizar un estudio detallado de la distribución de aire mediante la ventilación en el despacho 114, con el fin de resolver la incertidumbre del aire en movimiento entre el falso techo y el espacio habitable.
- (2) Una posible solución a tener en cuenta sería conseguir un aporte directo al despacho, es decir, alargar el conducto que llega al falso techo desde la UTA directamente hasta el espacio habitable. Incluso podría realizarse una bifurcación del conducto en diferentes ramales que bien lleguen al despacho de manera directa, bien conectando con el fancoil, o al falso techo (como actualmente) o una combinación de los tres, incrementando así la efectividad de la instalación.
- (3) Realizar una investigación más profunda, detallada y alargada, en un periodo más prolongado, sobre la capacidad de la ventilación contra el radón, teniendo en cuenta además factores como la temperatura interior o la humedad, de modo que se pueda tener datos más fiables sobre que configuración de la instalación es la idónea para que el radón deje de ser motivo de preocupación.

- (4) Llevar a cabo un estudio de comprobación sobre la viabilidad y funcionamiento del extractor trabajando como equipo de introducción de aire al despacho en lugar del modo extracción.
- (5) Automatizar el funcionamiento de la instalación y del extractor con los modos que mantengan con certeza los niveles de radón dentro de la normativa, manteniendo niveles altos de eficiencia energética y confort.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Siberzone, «Web de la Ventilación en el lugar de trabajo: seguridad y productividad,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/ventilacion-trabajo/#:~:text=La%20calidad%20del%20aire%20en%20interiores%20en%20entornos,aire%20de%20mala%20calidad%20en%20el%20trabajo%20son%3A>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [2] Solerpalau, «Web de Solerpalau de la Calidad de aire interior,» S&P Blog, Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/calidad-del-aire-interior/>. [Último acceso: 28 Enero 2022].
- [3] Borja Frutos Vázquez, «Diseño de soluciones constructivas frente a radón. Experiencias en aplicaciones y optimización.,» *Jornada Técnica Diseño de Soluciones Constructivas frente al radón de 2019*, 2019.
- [4] N. GEOGRAPHIC, «Web de la tabla periódica de los elementos,» 23 Noviembre 2021. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/tabla-periodica-forma-ordenar-elementos-quimicos_15988. [Último acceso: 4 Enero 2022].
- [5] Intituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud,» 1999.
- [6] Organización Mundial de la Salud, Manual OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública., Geneva, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2015.
- [7] «Web de la OMS El radón y sus efectos nocivos en la salud,» O.M.S, 2 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. [Último acceso: 2 Enero 2022].
- [8] Intituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, «NTP 440: Radón en ambientes interiores,» 1999.
- [9] Pilar Linares Alemparte y Sonia García Ortega, «Guía de rehabilitación frente al radón,» Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica, 2020. [En línea]. Available: https://www.codigotecnico.org/pdf/GuiasyOtros/GuiaRadon/Guia_de_rehabilitacion_frente_al_r

- adon+Fichas.pdf. [Último acceso: 19 Enero 2022].
- [10] Francisco Javier López Acevedo, Marta García-Talavera San Miguel, «Cartografía del potencial de radón de España,» Colección de Informes Técnicos, Consejo de Seguridad Nuclear, 2019.
- [11] EURATOM, «Web de la Directiva 2013/29/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>. [Último acceso: 20 Enero 2022].
- [12] CTE, «Web de CTE Sección DB-HS-6 Protección frente a la exposición al radón,» 20 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DcmHS.pdf>. [Último acceso: 21 Enero 2022].
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» 24 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2021/03/24/pdfs/BOE-A-2021-4572.pdf>. [Último acceso: 19 Enero 2022].
- [14] G. Muñoz Yébenes, *Análisis preliminar d epresencia de radón en edificios de la Escuela Naval Militar*, Marín: Centro Universitario de la Defensa en la ENM, 2019.
- [15] Á. García Denia, *Medición de la concentración de radón en el Centro Universitario de la Defensa y propuesta de medidas de mitigación*, Marín: Centro Universitario de la Defensa en la ENM, 2020.
- [16] C. Lázaro Benavides, *Evaluación de factores determinantes en la concentración de radón en espacios interiores*, Marín: Centro Universitario de la Defensa en la ENM, 2021.
- [17] J. Ruiz Fontán, *Sistema de evaluación y control de la renovación de aire para prevenir la transmisión del COVID-19 en aulas*, Marín: Centro Universitario de la Defensa de la ENM, 2021.
- [18] L. Gómez de Olea Martín, *Determinación de parámetros de funcionamiento y control de una UTA y diseño de un sistema de adquisición de datos*, Marín: Centro Universitario de la Defensa en la ENM, 2021.
- [19] CTE, «Web de Sección DB-HS-3 Calidad del aire interior,» 20 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DcmHS.pdf>. [Último acceso: 19 Enero 2022].
- [20] CTE, «Web de los documentos del CTE,» 20 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [21] BOE, «Web del BOE para el Real Decreto 238/2013 del 5 de abril, por el que se modifica el RITE del Real Decreto 1027/2007 del 20 de julio.,» 5 Abril 2013. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-3905>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [22] B. Boletín Oficial del Estado, «Web de la Agencia Estatal del Boletín Oficial del Estado para el Real Decreto 178/2021 del 23 de Marzo.,» 23 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [23] Harvard T.H. Chan, School of Public Health, «Documento Web de Schools for Health sobre Guía en 5 pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas,» [En línea]. Available: <https://andefil.com/wp->

content/uploads/2020/09/guia_ventilacion.pdf#:~:text=Gu%C3%ADa%20en%20%20pasos%20para%20medir%20la%20tasa,exterior%20%28usando%20uno%20de%20los%20cuatro%20m%C3%A9todos%29%204.. [Último acceso: 01 Marzo 2022].

- [24] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «NTP 243 "Ambientes cerrados: Calidad del Aire",» 1999.
- [25] M. Murillo Peña, *El Futuro del Ahorro Energético*, Madrid: Trabajo FIn de Grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [26] Solerpalau, «Web de Solerpalau de Ventilación Mecánica Controlada (VMC),» Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilacion-mecanica-controlada/>. [Último acceso: 31 Enero 2022].
- [27] Santiago P.Sola, «Web de Departamento de Desarrollo SIBer de Ventilación Mecánica Controlada y la Eficiencia Energética,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.conaif.es/dinamico/editor/ventilacion.pdf>. [Último acceso: 30 Enero 2022].
- [28] Siberzone, «Web de Siberzone de Sistemas de ventilación de doble flujo, cómo optimizarlos,» Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sistemas-de-ventilacion-de-doble-flujo/>. [Último acceso: 29 Enero 2022].
- [29] Siberzone, «Web de Unidades de tratamiento del aire: ¿qué son y cómo instalarlas?,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/unidades-de-tratamiento-del-aire/>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [30] A. E. AERMEC, «Web de la Unidad de tratamiento de aire compacta TS,» [En línea]. Available: <https://www.archiexpo.es/prod/aermec/product-291-246248.html>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [31] A. ROCHEGGIANI SPA, «Web de Unidad de tratamiento de aire CTA,» [En línea]. Available: <https://www.archiexpo.es/prod/roccheggiani-spa/product-73372-1087879.html>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [32] Certicalia, «Web de Las renovaciones de aire según el RITE,» 30 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.certicalia.com/blog/renovaciones-aire-segun-rite#:~:text=Las%20renovaciones%20por%20hora%20del%20aire%20Existe%20un,m.%20El%20volumen%20total%20ser%C3%A1%20de%20250%20m%C2%B3..> [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [33] Armada Española, «Web de la Armada Española para la Escuela Naval Militar,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/multimeddiagaleria/prefLang-es/18escuelas--02enm-es?showVolver=1>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [34] Escuela Naval Militar, Catorce Botones, Manual del Aspirante, Marín: ENM, 2015.
- [35] I. SAINT-GOBAIN, «Web del conducto CLIMAVER Plus R,» [En línea]. Available: <https://www.isover.es/productos/climaver-plus-r>. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [36] AERMEC, «Web de FCX USP USPO,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.aermec.us/products-2/fancoils/fcx-usp-uspo/?hsCtaTracking=7a242603-97f8-422d-9cc2-03af4e936f7c%7C5add052b-3a02-4ad0-9ce8-09ec9e4dfb54>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].

- [37] TROX, «Documento de Difusores de techo TROX Serie ADLR/ADLR-Q,» [En línea]. Available: https://www.trox.es/downloads/e44e5e8f1ac1b4a9/2_16_1_sp_3_adlr_adlr-q.pdf?type=product_info. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [38] S. & Palau, «Web de Ventiladores heliocentrífugos in-line ultrasilenciosos Serie TD-SILENT,» [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/ventiladores-en-linea-para-conductos-circulares-td-silent-94-serie/>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [39] Easyvent, «Web de TD-350/125 SILENT,» [En línea]. Available: <https://easyvent.solerpalau.com/fan-info/view/00005/0/94/p/5211360400/1/TD-350%7C125%20SILENT?includeNonERP=false>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [40] RS, «Web del Anemómetro Testo 405i, medición de Velocidad del aire, Temperatura,» [En línea]. Available: [https://es.rs-online.com/web/p/anemometros/9132575?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_Prueba_y_Medida_Whoop-_- \(ES:Whoop!\)+Anem%C3%B3metros+\(2\)-_-9132575&matchtype=&pla-334250026209&gclid=Cj0KCQiA-aGCBhCwARIsAHD15x_djI9VESEc6EumUJApZE-6iyBqWGBbEw1zpX](https://es.rs-online.com/web/p/anemometros/9132575?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_Prueba_y_Medida_Whoop-_- (ES:Whoop!)+Anem%C3%B3metros+(2)-_-9132575&matchtype=&pla-334250026209&gclid=Cj0KCQiA-aGCBhCwARIsAHD15x_djI9VESEc6EumUJApZE-6iyBqWGBbEw1zpX). [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [41] «Web de Testo,» [En línea]. Available: <https://www.testo.com/es-ES/anemometro-testo-405i/p/0560-1405>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [42] Apple Store, «Web de la Apple Store,» [En línea]. Available: <https://apps.apple.com/us/app/testo-smart-probes/id1026721981?l=es>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [43] Temtop, «Web de Temtop M2000C Monitor de Calidad del Aire,» [En línea]. Available: <https://temtopus.com/products/temtop-m2000c-air-quality-detector-professional-co2-pm2-5-pm10-monitor>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [44] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, «NTP 668: Medición del caudal en sistemas de extracción localizada,» 2004.
- [45] G. Hamburg, «Web del Flujo laminar y turbulento,» 2020. [En línea]. Available: <https://elearn-hm250-es.gunt.de/flujo-en-tuber%C3%ADa/flujo-laminar-y-turbulento>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [46] A. AERMEC, «Especificaciones técnicas de Unidades de Tratamiento de Aire FMA/HP,» 2017.
- [47] A. AERMEC y EUROVENT, «Ficha de producto Fancoils FCX P,» 2018.
- [48] A. Galicia, «Tabaco y radón, alianza mortal,» 17 Agosto 2020. [En línea]. Available: https://www.abc.es/espana/galicia/abci-tabaco-y-radon-alianza-mortal-202008170124_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fespana%2Fgalicia%2Fabci-tabaco-y-radon-alianza-mortal-202008170124_noticia.html. [Último acceso: 17 Enero 2022].
- [49] BOE, «Web de la Agencia Estatal del Boletín Oficial del Estado de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación,» 6 Noviembre 1999. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1999/BOE-A-1999-21567-consolidado.pdf>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [50] CTE, «Web del Código Técnico de la Edificación,» Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España, 2020. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/QueEsElCTE.html>. [Último acceso: 24 Enero 2022].

- [51] Siberzone, «Web de Siberzone de el Aire viciado, aquello que está contaminando en nuestros hogares.,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/aire-viciado/>. [Último acceso: 28 Enero 2022].
- [52] Siberzone, «Web de Siberzone de Sistemas de Ventilación para oficinas y negocios,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/sistemas-ventilacion-oficinas-negocios/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [53] Solerpalau, «Web de Solerpalau de los Edificios verdes: edificios eficientes y sostenibles,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/edificios-verdes/>. [Último acceso: 1 Enero 2022].
- [54] Solerpalau, «Web de Solerpalau de ¿Cómo influye la ventilación mecánica en la eficiencia energética de un edificio?,» Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilacion-mecanica-eficiencia-energetica/>. [Último acceso: 28 Enero 2022].
- [55] RadonFTLab, «Web del SMART Radon Detector RadonEye RD2000,» 30 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <http://radonftlab.com/radon-sensor-product/radon-detector/rd200/>. [Último acceso: 01 Marzo 2022].

