



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la estanqueidad al aire de las fachadas de recintos
del edificio del CUD*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pablo Rosano Bernal

DIRECTORES: Arturo González Gil
Francisco Javier Rodríguez Rodríguez

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de la estanqueidad al aire de las fachadas de recintos
del edificio del CUD*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

La ventilación no controlada de los edificios representa uno de los parámetros de mayor impacto en el diseño de los equipos de climatización y de su consumo energético. Con este trabajo se pretende evaluar de forma experimental el intercambio de aire entre el interior y el exterior de dos despachos de la planta baja del Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM). Para ello, primeramente, se estimarán las renovaciones totales en las salas objeto de estudio con los equipos de ventilación apagados a partir de la concentración de CO₂. En segundo lugar, evaluaremos las renovaciones de aire por hora a través de la ventana y otros elementos que delimitan el recinto en uno de los despachos. Además, se empleará el equipo de acústica avanzada “*Scan & Paint*” para determinar cualitativamente las zonas donde la estanqueidad es más deficiente. De los resultados obtenidos se deduce que los dos despachos analizados presentan en torno a 0,65 renovaciones por hora. Asimismo, se ha estimado que aproximadamente el 30% de estas se produce a través de la ventana. Las mediciones realizadas con el equipo de acústica avanzada nos muestran que aquellas zonas donde existen mayores infiltraciones de aire son los railes superiores e inferiores de la ventana.

A partir de estos resultados, se podrán proponer una serie de medidas con la intención de reducir las infiltraciones y de esta manera optimizar la ventilación reduciendo así el consumo energético.

PALABRAS CLAVE

Infiltraciones, Estanqueidad, Acústica avanzada, Velocidad de partículas, Renovaciones por hora

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el colofón a cinco años de escuela, con el que se cierra una etapa de mi vida. Por ella han pasado muchas personas que me han ayudado a seguir hacia delante. Querría empezar a agradecer a toda mi familia por el apoyo constante que me han brindado. Gracias a ellos he podido superar muchas dificultades que se me han presentado. A mis padres y hermana por motivarme y cuidarme cuando ha sido necesario. A mis abuelos por confiar siempre en mí, pero en especial a mi abuelo materno Rafael Bernal Pavón. Gracias a su apoyo, allá donde esté, he podido salir adelante en duras y difíciles ocasiones.

No puedo olvidarme de mis compañeros quienes han hecho de estos cinco largos años una aventura digna de vivir, con los que me llevo de mis mejores recuerdos de estos últimos años.

Además, por último y por eso no menos importante, agradecer a mis tutores por todo el apoyo y el tiempo que me han dedicado para poder sacar el trabajo. Asimismo, debo agradecer a Don Cástor Rodríguez por la maravillosa explicación sobre el empleo y las capacidades del equipo empleado de acústica avanzada.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
Índice De Gráficas.....	7
1 Motivación y Objetivos	9
1.1 Motivación	9
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura del Trabajo	9
2 Estado del arte	11
2.1 Técnicas para la estimación de las renovaciones del aire	11
2.2 Conceptos acústicos	14
2.2.1 Generación de la onda sonora	14
2.2.1 Propiedades de la onda sonora.....	15
2.2.2 Intensidad, potencia y presión sonora.....	15
2.2.3 Velocidad de partícula.	16
2.3 Técnicas de acústica avanzada: “ <i>Scan & Paint</i> ”	17
2.3.1 “ <i>Scan & Paint</i> ”: Hardware	18
2.3.2 <i>Scan & Paint</i> : Proceso para la obtención de los datos acústicos	19
2.3.3 Aplicaciones de las técnicas de acústica avanzada relativas a la ingeniería industrial y edificación	21
2.4 Tipos de ventanas en edificios	23
2.5 Técnicas para realizar sellados de ventanas en edificios	25
3 Materiales y métodos.....	27
3.1 Localización y descripción del edificio	27
3.2 Procedimiento experimental	31
3.2.1 Primera Fase experimental: Determinación de las renovaciones de aire totales	31
3.2.2 Segunda Fase experimental: Determinación de las renovaciones de aire a través de los diferentes elementos.	32
3.2.3 Tercera Fase Experimental: Implementación de técnicas de acústica avanzada	34
4 Resultados y Discusión	39
4.1 Determinación de las renovaciones de aire totales en los despachos 114 y 110	39
4.1.1 Despacho 114.....	39
4.1.2 Despacho 110.....	44

4.2 Determinación de las renovaciones de aire a través de los diferentes elementos	46
4.3 Análisis de resultados frente a variables meteorológicas.....	52
4.4 Implementación de técnicas de acústica avanzada.....	54
5 Conclusiones y Líneas Futuras.....	63
5.1 Conclusiones	63
5.2 Líneas Futuras	64
6 Bibliografía.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Medidor de CO ₂	11
Figura 2-2 Infiltraciones no controladas en una edificación [8]	13
Figura 2-3 Componentes equipo Blower Door [8].....	13
Figura 2-4 Zonas de una onda sonora [10].....	14
Figura 2-5 Parámetros físicos de la onda sonora [11]	15
Figura 2-6 Intensidad acústica [12].....	16
Figura 2-7 Desarrollo de la teoría acústica [13]	17
Figura 2-8 Comparación sonda p-u y sonda p-p [13]	18
Figura 2-9 Elementos de Scan & Paint [15].....	19
Figura 2-10 Método de medición de Scan & Paint [17].....	19
Figura 2-11 Proceso de discretización espacial [16]	20
Figura 2-12 División en celdas del área [18].....	20
Figura 2-13 Scan & Paint Rolls Royce [20].....	22
Figura 2-14 Ejemplo aplicación en vehículos [22].....	22
Figura 2-15 Ventana perfil madera	23
Figura 2-16 Ventana perfil aluminio	24
Figura 2-17 Ventana perfil PVC	24
Figura 2-18 Burlete [27].....	26
Figura 3-1 Emplazamiento Centro Universitario de la Defensa	27
Figura 3-2 Localización despacho 114 y 110 en la planta baja del CUD	28
Figura 3-3 Dimensiones despacho 114	28
Figura 3-4 Dimensiones despacho 110	29
Figura 3-5 Sistema de ventilación despacho 114	30
Figura 3-6 Dimensiones ventana	30
Figura 3-7 Montaje para realizar las pruebas.	32
Figura 3-8 Monitor de CO ₂ Temtop M2000C	32
Figura 3-9 Lona plástico para recubrir el despacho [28].....	33
Figura 3-10 Falso techo cubierto con plástico.....	34
Figura 3-11 Puerta cubierta con plástico	34
Figura 3-12 Montaje del equipo.	35
Figura 3-13 Conexiones entre módulo de adquisición de datos y acondicionador de señal.	36
Figura 3-14 Interfaz software Microflown Vela [3].....	36
Figura 4-1 Ejemplo de datos en formato .csv.....	39

Figura 4-2 Conversión de datos en columnas	40
Figura 4-3 Visualización datos en columnas y representación gráfica	40
Figura 4-5 Sonda P-U con protector de viento rojo.	55
Figura 4-6 Pestaña de procesamiento de las medidas.	55
Figura 4-7 División en cuadrículas de la ventana.	56
Figura 4-8 Ejemplo de mapa sonoro	56
Figura 4-9 Mapa sonoro por cuadrícula (izquierda) y por punto (derecha) con apertura de ventana	58
Figura 4-10 Mapa sonoro mediante método por punto.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de la Sonda Microflowm [2].....	19
Tabla 4-1 Resumen datos de renovaciones del despacho 114 en diferentes estados	52
Tabla 4-2 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 114 sin lona	52
Tabla 4-3 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 110 sin lona	53
Tabla 4-4 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 114 con lona.....	53

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1 Prime experimento en el despacho 114	41
Gráfica 4-2 Segundo experimento en el despacho 114.....	42
Gráfica 4-3 Tercer experimento en el despacho 114.....	43
Gráfica 4-4 Primer experimento en el despacho 110	44
Gráfica 4-5 Segundo experimento en el despacho 110	45
Gráfica 4-6 Primer experimento con lona en el despacho 114	46
Gráfica 4-7 Segundo experimento con la lona en el despacho 114	47
Gráfica 4-8 Tercer experimento con lona en el despacho 114.....	48
Gráfica 4-9 Cuarto experimento con lona en el despacho 114	49
Gráfica 4-10 Primer experimento sin lona en la puerta en el despacho 114.....	50
Gráfica 4-11 Segundo experimento sin la lona en la puerta en el despacho 114.....	51
Gráfica 4-12 Resumen visual datos de renovaciones del despacho 114 en diferentes estados.....	52
Gráfica 4-13 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la presión	53
Gráfica 4-14 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la temperatura exterior .54	
Gráfica 4-15 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la velocidad del viento .54	
Gráfica 4-17 Ejemplo velocidad de partículas en función de las frecuencias.....	57
Gráfica 4-18 Superposición de resultados de diferentes áreas seleccionadas	57
Gráfica 4-19 Comparación valores de velocidad de partículas entre el cristal y la apertura de la ventana .58	
Gráfica 4-20 Comparación zona railes inferiores derecha con cristal	59
Gráfica 4-21 Comparación zona railes superior derecha con cristal.....	59
Gráfica 4-22 Comparación zona railes inferior izquierda con cristal	60
Gráfica 4-23 Comparación zona railes superior izquierda con cristal	60
Gráfica 4-24 Comparación entre marco central y cristal	61

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

La estanqueidad o estanquidad es una propiedad que se basa en la capacidad que posee un objeto, en nuestro caso un edificio, para evitar que entre aire o cualquier tipo de partículas. Un edificio es casi imposible que sea estanco completamente, por lo que se producirán infiltraciones. Esta ventilación no controlada está directamente relacionada con el consumo energético del edificio. Se estima que un exceso de esta puede llegar a suponer hasta un 60% de las pérdidas energéticas.

Los sistemas de ventilación del edificio del Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM) no están optimizado debido a las infiltraciones de aire que existen. Este trabajo nace tras haberse comprobado en numerosos estudios los diferentes niveles de partículas contaminantes que existen en los despachos, en particular el gas Radón. Esto provocó una línea de investigación sobre la ventilación de estos despachos. Se están desarrollando una serie de Trabajos Fin de Grados estudiando cómo afecta las diferentes ventilaciones a la atmósfera del interior del recinto y con que frecuencia se renueva el aire.

Con la finalidad de realizar un estudio de optimización de la ventilación, minimizando los contaminantes de la atmósfera y el consumo energético, con nuestro proyecto pretendemos centrarnos en la ventilación no controlada a través de los cerramientos de los despachos para averiguar el flujo de aire entre los diferentes elementos del recinto.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la determinación de infiltraciones de aire en dos despachos del CUD-ENM con los sistemas de ventilación apagados y las puertas y ventanas cerradas. En particular, se pretende:

- Estudiar diferentes técnicas para la caracterización de las renovaciones de aire.
- Cuantificar y comparar las renovaciones de aire en los despachos 110 y 114.
- Cuantificar las renovaciones de aire debido a las infiltraciones por la ventana del despacho 114 por un lado, así como por el resto de sus cerramientos (falso techo y puerta).
- Realizar un estudio cualitativo de infiltraciones de la ventana del despacho 114 mediante técnicas de acústica avanzada.

1.3 Estructura del Trabajo

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha estructurado en seis capítulos con la intención de desarrollar el estudio sobre la estanqueidad de la fachada del edificio del CUD.

En el Capítulo 1, se pretende, de manera breve y concisa, que el lector sea capaz de situarse ante la problemática y entienda el motivo que ha llevado a desarrollar este trabajo.

A continuación, en el Capítulo 2 se revisa el estado del arte, comenzando con una valoración de las posibles técnicas que se podrían implementar para la caracterización de las renovaciones del aire. Se expondrán también ciertos conocimientos sobre las ondas y el sonido, que facilitarán el entendimiento sobre las técnicas de acústica avanzada. Se seguiría este capítulo introduciendo el equipo de acústica avanzada que se empleará (“*Scan & Paint*”) para terminar con una relación de los posibles tipos de ventanas que nos podemos encontrar hoy en día en el mercado así como diferentes manera de mejorar su sellado.

En el Capítulo 3, se expondrá el escenario que se ha seguido para desarrollar este trabajo, identificando los elementos que dispone, así como sus medidas, y de que manera procederemos a implementar el equipo ya mencionado de acústica avanzada.

En el Capítulo 4, se explicará la forma en la que hemos obtenido los datos, los problemas a los que nos hemos tenido que enfrentar, así como una visión gráfica sobre las medidas obtenidas. Además, se analizarán todos los resultados que se han calculado uno y por uno para posteriormente, en capítulos siguientes, poder obtener las conclusiones.

En el Capítulo 5 se terminará con las conclusiones que se han llegado de este Trabajo Fin de Grado. Además, se plantearán las posibles líneas futuras de investigación que se pueden desarrollar en los proyectos de los años venideros.

En el Capítulo 6, se reflejan todas las referencias bibliográficas consultadas para el desarrollo de este estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Técnicas para la estimación de las renovaciones del aire

- Estimación de la ventilación de aire a partir de la concentración de CO₂.

Esta técnica consiste en aumentar la concentración de dióxido de carbono en un recinto y registrar cómo evoluciona su concentración con el tiempo sin introducir más gas. Para ello será necesario un sensor de dióxido de carbono parecido al que se muestra en la Figura 2-1.

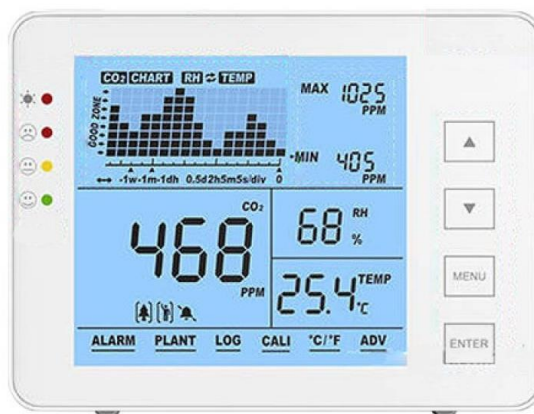


Figura 2-1 Medidor de CO₂

Se realiza una medición de concentración de CO₂ de manera continua; es decir, se colocará al menos un dispositivo en un punto de la sala con la intención de que tome medidas cada cierto tiempo, por ejemplo, cada minuto (para ello se tendrá que programar). De esta manera podremos apreciar cómo evoluciona la concentración del gas en el recinto. Tomaremos como fuente una botella de gas o bien un contenedor de hielo seco [1].

El medidor marcará una concentración mínima de 420 ppm cuando aun no se haya liberado el gas, e irá incrementándose su valor hasta que llegue a saturarse en 5000 ppm (máxima concentración de CO₂). En el momento que se deje de introducir gas, se empezará a cronometrar para poder saber cuánto tiempo tendría que transcurrir hasta que el medidor vuelva a marcar las 420 ppm. Entonces se habrá renovado el aire de la sala, obteniéndose así las renovaciones por hora que hay en la habitación que estudiamos [1].

Se utilizará un software para controlar las concentraciones y saber cuando todo el gas ha salido tanto por las ventanas, como por la puerta, o cualquier orificio. Para conocer el flujo existente a través de un único elemento, se realizaría todo de la misma forma con la excepción que habría que lograr la estanqueidad del resto de elementos. De esta manera obtendremos la cantidad de aire que se escapa por dicho lugar [1].

- **Evaluación de las fugas de aire mediante técnicas de acústica avanzada.**

Esta técnica es una de las más innovadoras, pues se empezó a desarrollar hace no muchos años. Con dicha técnica podríamos llegar a averiguar las zonas por donde la estanquidad es menor. Su funcionamiento se desarrollará en apartado siguientes del desarrollo del trabajo. [2]

El equipo empleado es el de “*Scan and Paint*”. Este se empezó empleando para determinar fuentes de ruidos. Algunos alumnos ya egresados implementaron esta técnica como medida predictiva para el mantenimiento de algunos medios de la Flota de la Armada, como por ejemplo los motores de las lanchas de instrucción de los que dispone la ENM [3] [4].

Posteriormente se empezó a emplear como método para la evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en las edificaciones. Para nuestro caso, según el trabajo que estamos desarrollando, tendríamos que descubrir cuales son las zonas de los cerramientos de la fachada con menos aislamiento acústico. Colocamos una fuente sonora en el interior de la sala que queremos evaluar, y desde fuera llevaríamos a cabo mediciones para determinar por qué zonas de la ventana es capaz de salir mayor ruido. Nos estamos basando en la hipótesis de que el aire saldrá de la misma manera que lo hace el ruido [5].

Después de realizar las mediciones con el equipo obtendríamos una imagen con una serie de colores, conocido como mapas sonoros, en función del ruido traspasado, pudiendo así afirmar la ubicación de las pérdidas.

- **Evaluación de las fugas de aire mediante el uso de termografía infrarroja**

El objetivo de esta técnica es evaluar el potencial de la termografía infrarroja (IRT) como herramienta para la localización cualitativa como la comparación cuantitativa relativa de las fugas de aire. Los patrones térmicos se evalúan a diferentes presiones, en un intento de relacionar las temperaturas de la superficie con las magnitudes relativas de los tamaños y posiciones de las grietas [6].

Para realizar este método, se necesitaría una cámara de infrarrojos, sensores de temperatura y una herramienta que sea capaz de medir la velocidad del viento (anemómetro). Antes de llevar a cabo cualquier medición, todos los equipos que se vayan a emplear en la práctica se calibrarán de acuerdo con las especificaciones de los fabricantes. Mientras nos encontremos en el proceso de calibración de la cámara IR, se medirá la temperatura reflejada y se definirán los valores de emisividad de los materiales antes de las pruebas [6].

- **Ensayo Blower Door**

El ensayo Blower Door es un ensayo para comprobar la estanqueidad de un edificio. Tiene la función de poder detectar las infiltraciones de aire no controladas que pueda haber tanto en juntas, puertas, ventanas, enchufes, falsos techos, cubiertas, etc.... (Figura 2-2) y así poder sellarlas y conseguir un recinto estanco. Este ensayo es obligatorio en países de Europa central para las obras nuevas que se realicen, además también es obligatorio para poder conseguir los certificados tipo Passivhaus (es una certificación energética para los edificios de obra nueva y rehabilitados, para cualquier tipo de clima, que busca un máximo confort para los ocupantes, buena calidad del aire, y con un consume energético casi nulo [6]). En el caso de España, por ley aún no es obligatorio para construcciones nuevas [7].

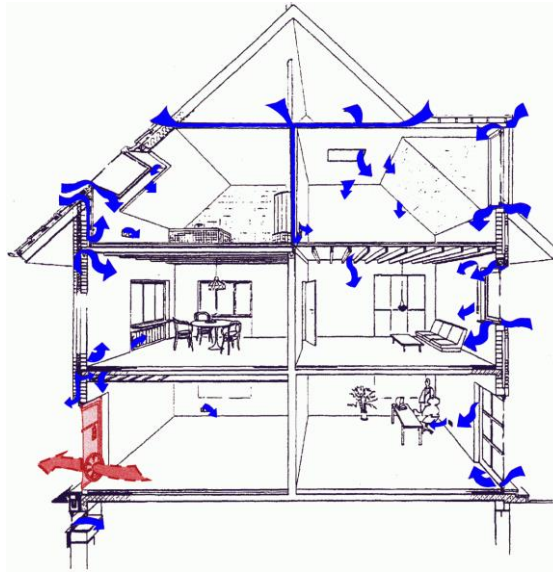


Figura 2-2 Infiltraciones no controladas en una edificación [8]

Para realizar esta técnica sería necesario una lona que se encuentra unida un ventilador calibrado tal como se ve en la Figura 2-3. Este está conectado a un ordenador con un software de control para la medida de diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la sala. Además, es capaz de medir el caudal de aire que fluye a través del ventilador. El procedimiento completo para conocer cómo de estanco es un edificio, mediante el test de Blower Door, se describe en la normativa UNE-EN 13829:2002 [8].



Figura 2-3 Componentes equipo Blower Door [8]

Para empezar a aplicar esta técnica, y con el volumen medido de la sala que queremos evaluar, habría que cerrar puertas y ventanas exteriores, además de recubrir cualquier rendija de ventilación, o cualquier posible entrada de aire, como los enchufes. Posteriormente se colocaría la lona con el ventilador, bien en la puerta o en la ventana, y se mediría la presión natural existente [8].

El ventilador de la lona tendría integrado un manómetro, lo que permitiría presurizar o despresurizar, mediante la extracción o la introducción de aire. La finalidad es conseguir que la diferencia de presiones entre el interior y el exterior sea de 50 pascales [8].

Conforme se realiza la prueba, podremos ir comprobando el índice de renovaciones del aire en un ordenador con un software especial de control, lo que nos permitiría verificar la existencia de infiltraciones. Si este valor fuese muy alto significa que la sala no es lo suficientemente hermética [8].

Con este test podemos obtener como conclusión el área total de infiltraciones, haciéndonos ver los espacios que habría que sellar. Para poder localizarlas de forma más directa, esta prueba debería complementarse con un anemómetro (nos permitiría ubicar las fugas, mediante la medición de la velocidad a la que circula el aire en ciertas zonas) o con un generador de humo (la colocación de este equipo cerca de las áreas más vulnerables nos mostraría a través de la salida del humo la existencia de flujo de aire) [9].

2.2 Conceptos acústicos

2.2.1 Generación de la onda sonora

La onda sonora es una onda acústica de carácter longitudinal. Dicha onda es producida por una perturbación inicial. Una superficie en vibración transmitirá el movimiento armónico de las partículas que están alrededor debido a una variación en la presión o densidad, que se transmite en forma de onda esférica periódica o cuasi periódica [2].

Dichas partículas, las cuales están oscilando en torno a su posición de equilibrio, interactúan con otras que se encuentran contiguas. Estas, a su vez, sufrirán las mismas contracciones y dilataciones transmitiéndoselas a las partículas cercanas. De esta manera, debido a que se encuentran una gran cantidad de moléculas agrupadas, se crearán incrementos de presiones locales respecto a la atmosférica, que se conoce como zonas de compresión. Su desplazamiento generará en otras un decremento de la presión comparada con la atmosférica. Estas últimas se encontrarán dentro de las zonas de rarefacción. Este fenómeno se podrá observar en la Figura 2-4 [3].

A esta variación de la presión se le denomina presión acústica o presión sonora, y se le define como la diferencia existente en un cierto momento entre la presión instantánea y la atmosférica. La presión acústica varía bastante con el tiempo y estas variaciones son percibidas por el oído humano, creando así la sensación auditiva [10].

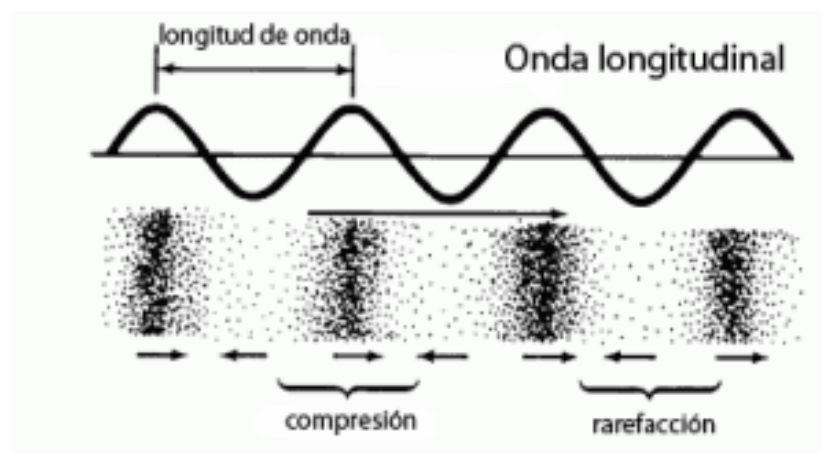


Figura 2-4 Zonas de una onda sonora [10]

2.2.1 Propiedades de la onda sonora.

Entre las propiedades de las ondas sonoras encontramos la amplitud, la frecuencia, la longitud de onda y el periodo:

La Amplitud (A) de la onda nos indica la cantidad de variaciones en la presión del aire. Puede expresarse como la distancia vertical máxima desde una presión de aire cero, es decir, la amplitud es la distancia entre el eje horizontal y el valor más alto que toma la onda, o el valor más bajo de la depresión de la onda [11].

Además, la Frecuencia (f) se define como el número de ciclos completos por unidad de tiempo. El ciclo será el recorrido descrito por la partícula desde el origen hasta el siguiente mismo punto. La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda (λ), distancia entre dos picos, de forma que la frecuencia es la velocidad de desplazamiento de la onda entre la longitud de onda. Podemos afirmar entonces que cuanto más elevada sea la frecuencia, menor será la longitud de onda. El Periodo (T) es la magnitud inversa de la frecuencia; es decir, el tiempo que tarda en finalizar una revolución completa de un ciclo de onda. Por lo tanto, cuanto más elevada y rápida sea la frecuencia, menor será el periodo de la onda [11].

Si los valores para la amplitud y la frecuencia se mantienen constantes, la onda sonora (periódica) se comportará como un movimiento armónico simple. Estas son de las más sencillas que podremos encontrar, aunque son poco usuales. Normalmente, el sonido suele tener una naturaleza más compleja; es decir, el sonido suele estar compuesto por un número indefinido de distintos movimientos vibratorios simples con amplitudes y frecuencias diferentes. Los sonidos reales, que provienen de unas vibraciones complejas, tienen una frecuencia fundamental que tienen relacionado un determinado tono y timbre (el timbre es aquella cualidad con el podemos diferenciar los sonidos producidos por diferentes instrumentos musicales o incluso diferenciar la voz de cada persona) [11].

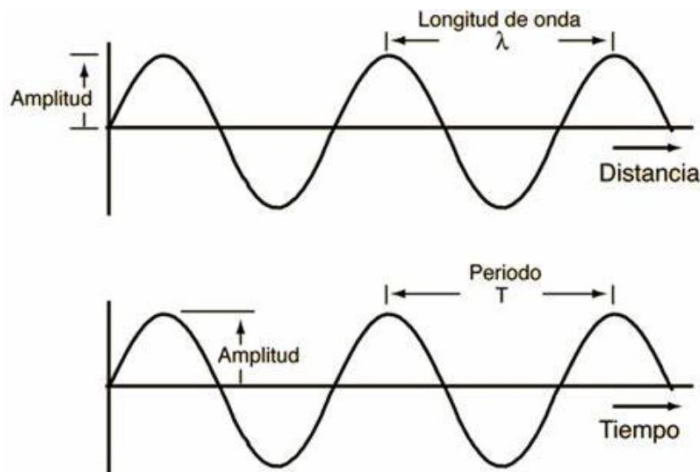


Figura 2-5 Parámetros físicos de la onda sonora [11]

2.2.2 Intensidad, potencia y presión sonora.

- **Intensidad acústica o intensidad sonora:** expresada en W/m^2 , es la cantidad de energía que es transmitida por una fuente sonora por unidad de tiempo y que atraviesa una superficie S; o lo que viene a ser lo mismo, la potencia acústica por unidad de superficie. La expresión matemática de la intensidad acústica sería $I = W/S$. Podemos intuir que cuanto más lejos estemos de la fuente sonora, menor será la intensidad del sonido que oigamos, ya que la misma potencia sonora se reparte entre un área más grande [12].

Tal vez se comprenda de un modo menos confusa si nos fijamos en la Figura 2-6.

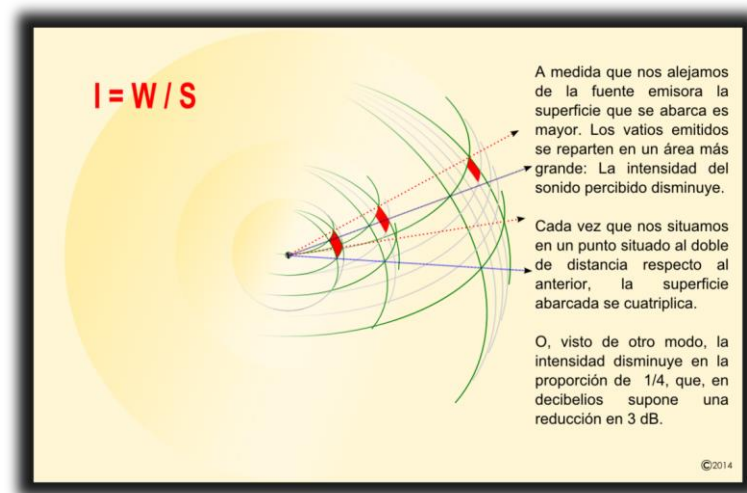


Figura 2-6 Intensidad acústica [12]

- **Potencia acústica o potencia sonora:** esta magnitud se define como la cantidad de energía que emite una fuente sonora por unidad de tiempo. Es directamente proporcional a la amplitud de la onda emitida. Es expresada en vatios (W) y podría despejarse de la ecuación vista en el apartado anterior. Cada fuente tiene su propia potencia, sin influir el lugar o espacio en el que se encuentre, por lo que será un parámetro característico [12].
- **Presión sonora o presión acústica:** Como hemos visto, las vibraciones de las ondas sonoras producen modificaciones de la presión en el aire que lo rodea. La presión sonora se puede definir como la diferencia entre la presión instantánea en un punto; es decir, la producida debido a las vibraciones, y la presión ambiental estática o fija para ese punto. La unidad de medida es el microbar (μBar), aunque también es usual el uso del Pascal (Pa) [12].

Para cuantificar las magnitudes que hemos explicado con anterioridad utilizaremos el decibelio (dB). Esto es debido a que las unidades naturales que se han mencionado adquieren valores complejos de manejar debido al gran rango sobre el que varían. El decibelio expresa una razón entre cantidades y no una cantidad.

2.2.3 Velocidad de partícula.

Entendemos como velocidad de partícula a la *velocidad de un fluido en movimiento provocada por el desplazamiento de una superficie en contacto con dicho fluido* [5]. Por lo tanto, esta magnitud es proporcional al desplazamiento de la fuente excitante.

Podemos encontrarnos con dos métodos distintos para obtener la velocidad de partícula: directamente, empleando un Microflown, teniendo la capacidad de medir el espectro audible completo con precisión; o de forma indirecta, calculando el gradiente de presión entre dos micrófonos en una parte reducida del espectro [5].

Existen ciertos recintos que son muy reverberantes (cerrados y con mucha reflexión), por lo que el mapa de niveles sonoros obtenidos varía en un margen pequeño en decibelios (los niveles de presión son muy parecidos en los puntos sondeados) y, además, se incluye las reflexiones que llegan a cada punto en las medidas, por lo que en algún punto que aparezca como muy ruidoso no necesariamente tiene que ser así. Aunque está bien saber qué niveles de presión existen.

Sin embargo, los resultados de los mapas de velocidad de partículas (al medir solo la vibración en sentido perpendicular al paramento o elemento vibrante) no se ven afectados por la reflexión que proviene de otras partes del recinto y por tanto caracterizan mejor el problema, al indicar lo que proviene exactamente de cada punto sondeado, detectando mejor un posible fallo.

2.3 Técnicas de acústica avanzada: “Scan & Paint”

Durante la historia, el progreso de los instrumentos para las medidas acústicas y el desarrollo teórico relacionado no han progresado de forma paralela. [13]

El nacimiento de la electrónica en el comienzo del pasado siglo fue un hecho importante que impulsó significativamente el desarrollo de los instrumentos de medida. Los elementos claves fueron: el amplificador de triodo diseñado por L. Forest en el año 1906 y el primer micrófono de condensador inventado por E.C. Wentle en 1915. Las primeras medidas de intensidad sonora se llevaron a cabo en el año 1932, momento en el que H.F. Olson patentó su primera medida. Sin embargo, el invento tuvo ciertas limitaciones técnicas que dificultaron su utilización fuera del laboratorio y, por consiguiente, su uso comercial [13].

Desde 1932 hasta finales de la década de los años setenta no hubo ninguna innovación tecnológica. Siendo el desarrollo de la tecnología digital lo que marcó un salto técnico, poniéndose fin a la entonces imperante tecnología analógica. Con el progreso que hubo en la tecnología digital fue posible la utilización de equipos multicanal para procesar señales en tiempo real, consiguiendo, por lo tanto, medir la intensidad sonora con una precisión aceptable [13].

En el año 1977 tuvo lugar la primera medida fiable, en la que se usó un par de micrófonos enfrentados y obteniéndose la primera sonda de intensidad.

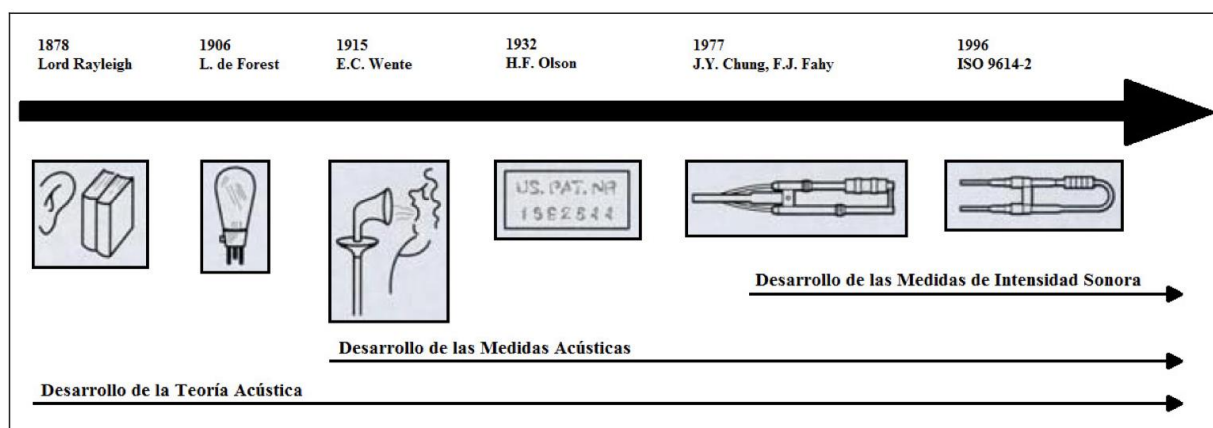


Figura 2-7 Desarrollo de la teoría acústica [13]

La puesta en marcha de esta técnica en la investigación se realiza rápidamente, aunque tuvo una aplicación más lenta en la industria, debido sobre todo a su coste tan elevado y a que es una tecnología complejo de utilizar. La medida mediante sonda de intensidad constituye una técnica muy utilizada hoy en día para realizar el cálculo de la potencia acústica de máquinas y para la localización de fuentes de ruido de forma generalizada [13].

Con la finalidad de reducir el coste de la tecnología enfocada a la medida de la intensidad sonora, se plantean algunas alternativas a los métodos de medida utilizados. A finales del siglo XX, en el año 1994, se desarrolla un transductor conocido como Microflown. Su principio de funcionamiento es totalmente distinto al método de los dos micrófonos. Con esta sonda de intensidad se mide de forma directa la intensidad de las partículas del aire empleando una tecnología parecida a la usada por los anemómetros de hilo caliente. La sonda p-u esta comercializada desde 2003 como competencia con la sonda p-p [13]. Ambas se pueden ver en la Figura 2-8.

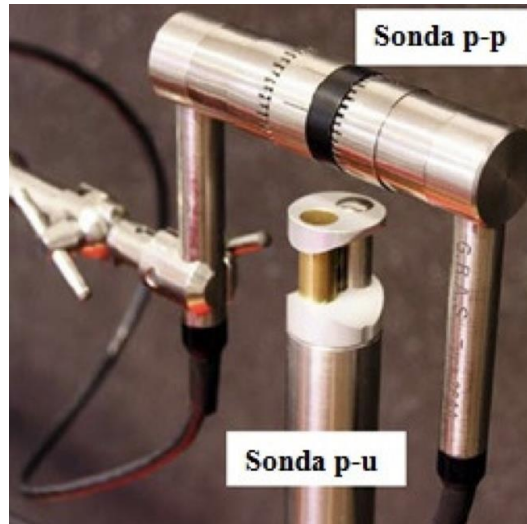


Figura 2-8 Comparación sonda p-u y sonda p-p [13]

“*Scan & Paint*” es una nueva herramienta para visualizar campos sonoros estacionarios en una amplia gama de frecuencias de forma fácil y rápida. Las mediciones de intensidad sonora basadas en la sonda PU (incluida en “*Scan & Paint*”), que capturan tanto la presión sonora como la velocidad de las partículas acústicas, no se ven muy afectadas por el ruido de fondo o las reflexiones y son adecuadas en situaciones con una elevada relación entre presión e intensidad sonoras [14].

Para evaluar la calidad en términos de intensidad sonora radiada, a menudo se requiere un gran número de puntos de medición. El método “*Scan & Paint*” es muy sencillo; después de grabar y sincronizar el vídeo y el audio, los datos se procesan posteriormente. Para cada fotograma del vídeo se extrae la posición de la sonda [5].

La función de seguimiento automático del software permite reconocer automáticamente la sonda por el color. En cada punto de medición, la velocidad, la intensidad y la presión se calculan a partir del bloque de tiempo relativo de los datos de audio. El resultado es un mapa de color del sonido de alta resolución. El software tiene muchas más funciones, como, por ejemplo: visualización en diferentes bandas de octava, reproducción de audio en posición local filtrada por frecuencia, espectro, espectrograma, cálculo de la potencia del sonido y muchas más [5].

2.3.1 “*Scan & Paint*”: Hardware

Este equipo de acústica avanzada sobre el que estamos tratando está formado por 5 elementos como se aprecia en la Figura 2-9 [15]:

- Cámara (1): Seguimiento automático en tiempo real de la posición y orientación del sensor mediante una cámara de infrarrojos.
- Módulo de adquisición de datos (2): Adquisición de datos de alta precisión de 24 bits y 4 canales. El dispositivo se alimenta por USB, por lo que no se necesitan cables de alimentación adicionales.
- Acondicionador de señal (3): Unidad de acondicionamiento de la señal para las sondas PU que suministra energía y preamplificación.
- Sonda Microflown (PU) (4): Sonda de intensidad 3D de banda ancha (20Hz-10kHz). Compuesto por un sensor de velocidad de partículas y un micrófono.

Rendimiento de la sonda	Presión sonora Velocidad de partícula
Sensibilidad	65 mV / Pa 30 V (m / s)

Rango de frecuencia (1 dB)	40 – 8000 Hz
Rango de frecuencia (2 dB)	20 - 10000 Hz
Nivel máximo	112 dB 130 dB

Tabla 2-1 Características de la Sonda Microflown [2]

- Marca de color (5): Pequeña marca de color en la sonda de PU que se utiliza para el seguimiento automático de las posiciones de los sensores mediante el reconocimiento de colores.

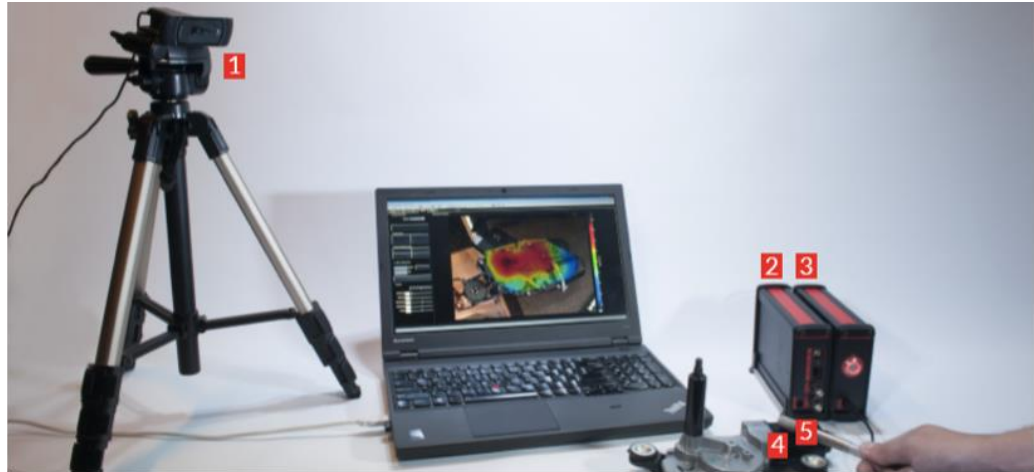


Figura 2-9 Elementos de Scan & Paint [15]

2.3.2 Scan & Paint: Proceso para la obtención de los datos acústicos

La técnica de visualización del sonido propuesta se basa en la técnica de escaneo de “Scan & Paint” [16]. Las señales acústicas del campo sonoro se adquieren moviendo manualmente un único transductor a través del plano de medición mientras se filma el evento con una cámara. En la fase de posprocesamiento la posición del sensor se extrae aplicando la detección automática del color a cada fotograma del vídeo [17]. El proceso seguido se muestra en la Figura 2-10.

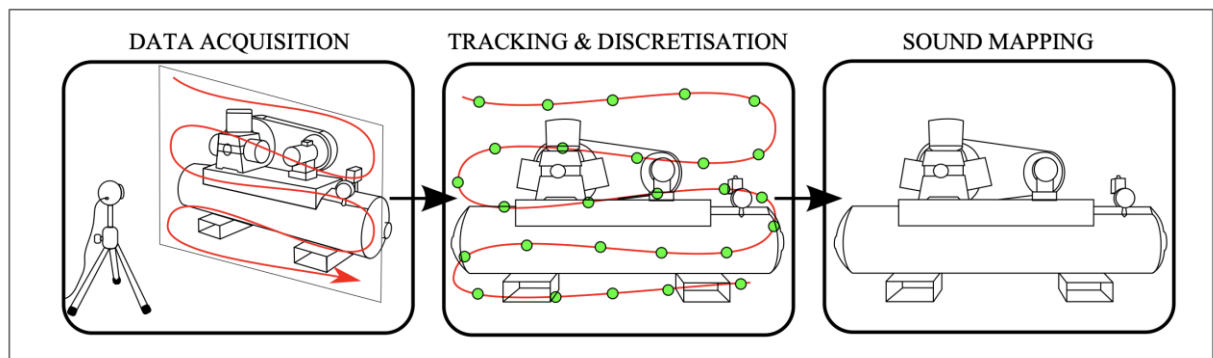


Figura 2-10 Método de medición de Scan & Paint [17]

A continuación, es posible dividir la grabación en varios segmentos aplicando un algoritmo de cuadrícula espacial. Cada fragmento de la señal se vinculará a una celda de la cuadrícula, según la posición de la sonda durante la medición. En la Figura 2-11 se muestra un esquema del proceso de discretización [16].

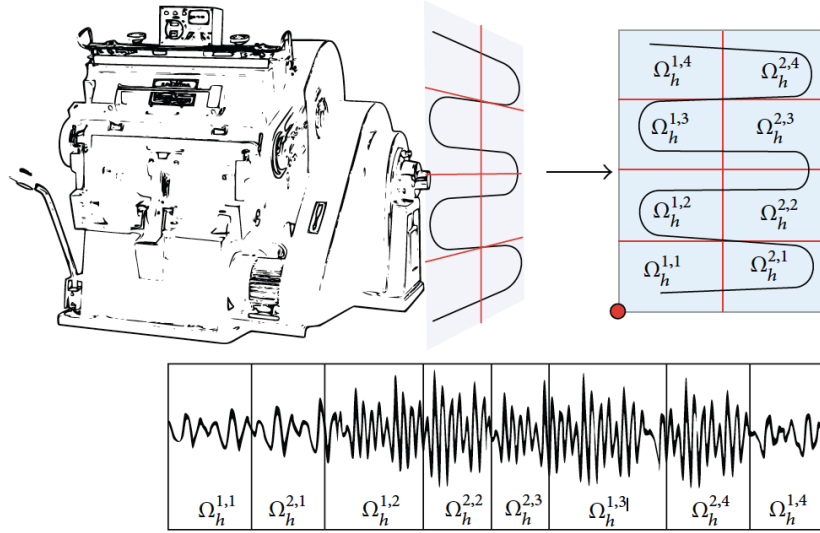


Figura 2-11 Proceso de discretización espacial [16]

Para analizar los datos adquiridos durante la etapa de medición y poder así representar una imagen del sonido, será necesario establecer un método para dividir la información. La técnica que estudiamos empleará dos posibles métodos: uno de ellos es el método cuadrícula, mediante la división de la superficie que medimos, y el otro es el método por puntos, empleando una división del recorrido seguido [18].

- **Método Cuadrícula:** permite tomar una superficie continua y dividirla en un número finito de fragmentos con un mismo tamaño como el ejemplo mostrado en la Figura 2-12, obteniendo de esta manera un análisis de forma homogénea. El sistema de seguimiento que ha sido implementado en “Scan & Paint” proporciona la ubicación del sensor mediante el análisis de fotogramas individuales del vídeo, en otras palabras, imágenes que contienen una proyección del entorno en un espacio bidimensional. Poder conseguir la ubicación exacta de la sonda resultaría imposible, ya que las pequeñas variaciones a lo largo del eje de la cámara no pueden percibirse. Los errores de seguimiento pueden tener una importante repercusión a la hora de obtener los mapas acústicos, pero esto puede reducirse mediante la colocación perpendicular de la cámara a la superficie de medición, manteniéndose constante la distancia con la que se mide [18].

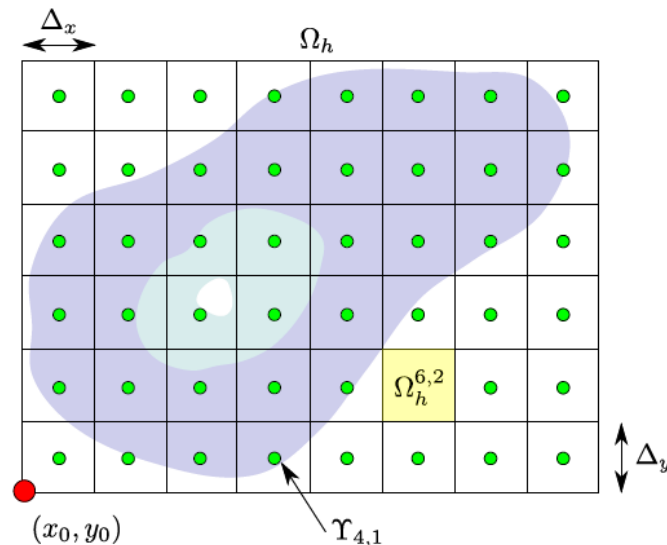


Figura 2-12 División en celdas del área [18]

- **Método por puntos:** este método es un proceso alternativo de discretización que se basa en la segmentación de los datos disponibles a lo largo de la trayectoria de exploración. Se utiliza un enfoque unidimensional en lugar de la descomposición bidimensional del espacio cartesiano implementado en el método de cuadrícula. Dado que se registra un número finito de puntos de seguimiento, es posible definir un conjunto de posiciones " T_i " asociadas a la señal de audio adquirida. Por último, se obtiene una malla de datos dispersa con una cantidad de puntos igual al número total de fotogramas de vídeo. El método de puntos no requiere que se establezca un vínculo entre la imagen espacial y el entorno real de medición [18].

2.3.3 Aplicaciones de las técnicas de acústica avanzada relativas a la ingeniería industrial y edificación

La tecnología *Microflown* ofrece un gran número de interesantes métodos de pruebas vibroacústicas para la industria aeroespacial para una variedad de aviones de ala fija, helicópteros y UAV. Tanto la reducción del ruido interior de la cabina (percibido por los pasajeros y la tripulación) como la reducción del ruido exterior percibido en tierra son temas de intensa investigación [19].

La empresa participa de forma proactiva en un gran número de proyectos de I+D nacionales e internacionales. Dentro del programa *JU Clean Sky*, *Microflown* participa en dos plataformas. Una de ellas es la de *Green Rotorcraft*, liderada por *Agusta Westland* y *Eurocopter*, donde se centra tanto en la evaluación del ruido de las trayectorias del vuelo, respetuosas con el medio ambiente, como en las pruebas en el túnel del viento. La segunda de ellas es la de *Smart Fixed Wing*, liderada por Airbus. En esta se evalúa el impacto acústico de nuevos tipos de motores (rotores abiertos contra rotantes) y los efectos de la instalación en el ruido interior y exterior [19].

En la actualidad, existen muy pocos procedimientos de medición in situ para evaluar las emisiones de ruido de la maquinaria de gran tamaño. Las técnicas basadas en la presión suelen tener dificultades para adaptarse a los escenarios industriales a partir de experimentos controlados en el laboratorio. La presencia de altos niveles de ruido de fondo generados por los equipos circundantes, junto con las características reverberantes de la mayoría de los emplazamientos industriales, impide la aplicación de las técnicas estándar de caracterización del sonido. Por el contrario, las mediciones de la velocidad de partículas realizadas cerca de una superficie radiante rígida se ven menos afectadas por el ruido de fondo y pueden utilizarse potencialmente para abordar los problemas de ruido incluso en esas condiciones. La naturaleza vectorial de la velocidad de partículas, una dependencia intrínseca del desplazamiento de la superficie y la directividad del sensor, son las principales ventajas sobre las soluciones basadas en la presión sonora. Estas características permiten identificar y cuantificar las emisiones de ruido de los elementos problemáticos, a pesar de los altos niveles de ruido de fondo [20].



Figura 2-13 Scan & Paint Rolls Royce [20]

Esta tecnología cobrará también mucha importancia en el mundo automovilístico tal como se muestra en la Figura 2-14. Las propiedades vibroacústicas del habitáculo de un coche desempeñan un papel fundamental en la percepción de la calidad del vehículo. Todos los vehículos incluyen un paquete acústico compuesto por diversos componentes, como absorbentes, barreras, amortiguadores y aislantes, cuyo objetivo es mejorar el rendimiento acústico. La creciente presión que ejercen los objetivos de peso y emisiones hace que los fabricantes de automóviles se enfrenten al reto de satisfacer las expectativas de los clientes en cuanto a rendimiento NHS (*Noise, Vibration and Harshness*) de forma cada vez más eficiente. Los sensores de velocidad de partículas han demostrado ser adecuados para realizar mediciones de vibración sin contacto. Estos estudios darán la oportunidad de aumentar el confort haciendo el coche más silencioso y mejorar de esta manera la calidad del producto. Algunas marcas conocidas que recurren a esta tecnología son: Bugatti, Porsche, Audi, Wolvswagen, Bentley, Mercedes Benz y Toyota entre otros [21].



Figura 2-14 Ejemplo aplicación en vehículos [22]

Tal como se han desarrollado en numerosos estudios por la empresa de Microflown, esta tecnología también ha sido empleada para caracterizar la radiación de distintos paneles y estructuras para detectar la presencia de elementos constructivos con alguna pérdida de aislamiento o fuga acústica. El desarrollo de su experimentación será similar a lo que se pretende conseguir con este trabajo. En estas publicaciones se pudo conseguir averiguar, mediante el empleo de las mismas herramientas que utilizaremos nosotros y que se verán explicadas con posterioridad, las zonas por donde una puerta y una cristalera es sensiblemente deficiente en términos de aislamiento. Alguno de ellos, como es “*Evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en edificación*” [5], será la base que tomaremos.

2.4 Tipos de ventanas en edificios

A la hora de elegir una ventana nos encontramos con una amplia gama que varían desde el tipo de perfil, acristalamiento, tipo de apertura, la forma de estas, y un largo etcétera [23].

La primera clasificación sobre la que trataremos es el tipo de perfil que poseen. Para ello las dividiremos en tres grupos [23] :

- Ventanas de madera: Esta puede que sea la opción más tradicional a la hora de elegir una ventana. Este material es un buen aislante térmico, además de que se pueden trabajar con cierta facilidad. Sin embargo, tiene inconvenientes. La madera absorbe humedad, provocando que se hinche, se agriete y curve, y se ve afectada por la contaminación. Esto producirá que sus propiedades aislantes empeoren (Figura 2-15).



Figura 2-15 Ventana perfil madera

- Ventanas de aluminio: Este tipo de ventanas posee una amplia gama de acabados, colores y lacados, pero, como metal, el aluminio es un buen conductor, viéndose reducidas sus propiedades aislantes y su eficiencia energética. Además, este perfil tiene la necesidad de atornillar las esquinas ya que es imposible soldarlas herméticamente. Esto causará la entrada de aire y de ruido. (Figura 2-16)



Figura 2-16 Ventana perfil aluminio

- Ventanas de PVC: Este perfil es de los más recientes, haciendo su entrada en Europa hace cerca de 30 años por sus mayores propiedades de aislamiento y eficiencia. Estas ventanas se caracterizan por su buen aislamiento térmico y sonoro. El PVC se trata de un material de altísima durabilidad y muy bajo coste de mantenimiento (Figura 2-17).



Figura 2-17 Ventana perfil PVC

Otro aspecto importante en las ventanas será el tipo de vidrio que posee. Podemos encontrar varios tipos de vidrios entre lo que destacamos [24]:

- Vidrios monolíticos: Son cristales sencillos de escasa calidad, por eso están prácticamente obsoletos. Estos cristales tienen pocas propiedades aislantes, por lo que no se recomienda para ventanas exteriores.
- Vidrios laminados: es el resultado de unir varias planchas de vidrio intercalando entre ellas una serie de láminas de polivinilo butiral (PVB). Esto le proporcionará mayor resistencia. Por esta razón serán empleados como vidrios de seguridad o blindados.
- Vidrios con cámara o doble acristalamiento: Está formado por dos planchas de cristal separadas por una cámara de aire cuya función es la reducción de la transferencia de calor entre el exterior e interior. En determinadas ocasiones se le podría aumentar el número de planchas de cristal a tres, repercutiendo por lo tanto en el aislamiento térmico.
- Vidrios bajo emisivos: También son conocidos como vidrios low-e o de baja emisividad. Están caracterizados por tener una emisividad muy baja y un doble acristalamiento. Este producto es

de alta calidad mejorando la eficiencia energética, el aislamiento térmico, y todo esto sin reducir la cantidad de luz que es capaz de pasar.

Otro aspecto importante que tendremos que considerar de las ventanas es si son con rotura de puente térmico o no lo son. Antes que nada, empezaremos definiendo el concepto de rotura de puente térmico. El puente térmico es la zona donde se transmite el calor con mayor facilidad. Para evitar dicha transmisión se utiliza la rotura del puente térmico mediante el empleo de un material que no sea conductor entre la cara interior y exterior. No en todas las ventanas tiene por qué utilizarse. Es comúnmente usado en los cerramientos de aluminio, sin embargo, en las ventanas de PVC no necesitan dicho elemento [25].

2.5 Técnicas para realizar sellados de ventanas en edificios

El sellamiento correcto de ventanas favorecerá la protección de una edificación contra las humedades, filtraciones de aire, e incluso temperaturas extremas. Para ello será necesario sellar los cristales, burletes y alfeizares de las ventanas. Además, el buen aislamiento hará que se mantenga un bajo consumo energético debido a la reducción de la calefacción o aire acondicionado [26].

Para llevar a cabo el aislamiento del marco de la ventana será necesario una pistola de sellado. Es recomendable que posea una varilla lisa y un buen sistema antigoteo. El mecanismo de carga con muelle será útil para la fácil aplicación de presión sobre los cartuchos de sellado [26].

Otro material, que será el más importante, es el tipo de sellador que querremos usar dependiendo la utilidad que le demos. Generalmente, suelen ser de látex acrílico, látex de silicona o poliuretano. A continuación, desarrollaremos brevemente cada una de ellas [26]:

- Sellador acrílico tiene una base acuosa; es decir, su limpieza será más fácil. Este producto no será muy resistente al clima o a las temperaturas, por lo que su utilidad será mayor en interiores.
- Sellador de silicona es similar anterior, pero con el añadido de silano, lo que hace que tenga mayor resistencia al clima creando una adhesión más duradera. Este tipo de sellador puede ser neutro o acético. Este último será ideal para materiales no porosos como vidrio, mientras que la silicona neutra va muy bien para materiales como madera, metal o plástico, al igual que con aquellos que tengan un recubrimiento de vinilo.
- Sellador de poliuretano tiene una base reactiva diferente, por tanto, sus características serán otras. Suelen ser más complejos de aplicar y su resistencia a la radiación ultravioleta a lo largo del tiempo es baja.
- Polímeros de silano modificado son adhesivos excelentes en los que se han combinado las propiedades de la silicona y del poliuretano. Proporcionará un fijado firme y elástico en los marcos de la ventana con la pared, siendo más resistentes al clima, la contaminación, radiación y polvo.

Para realizar un buen aislamiento en los railes de la ventana, de manera barata y sencilla, será necesario entonces un burlete. Este producto no deja de ser una junta adhesiva que se coloca en el canto de las hojas para que cerrarlas selle herméticamente. Estos pueden ser de distintos materiales y formas encontrándonos en el mercado lo siguiente [27]:

- Burlete de espuma, material blando y flexible preferible para cavidades pequeñas. Su recomiendo su uso para ventanas abatibles ya que al cerrar se golpea el marco con menos fuerza (Figura 2-18).
- Burletes de caucho tienen más resistencias a las inclemencias del tiempo y están indicados para huecos mayores que los anteriores. Son más resistentes que los burletes de espuma, por lo que son válidos para ventanas correderas y abatibles.

- Burletes de silicona, es de las mejores opciones entre todos los tipos de burletes. Mayor resistencia a la climatología y al desgaste. Además, la flexibilidad e impermeabilidad serán mayores.



Figura 2-18 Burlete [27]

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización y descripción del edificio

El objetivo de este trabajo es calcular la estanqueidad al aire de las fachadas de recintos del edificio del CUD. Para ello, se tomará como locales principales de estudio un par de despachos de profesores en la planta baja del edificio del Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM). Esta instalación se encuentra dentro de la base de la Escuela Naval Militar, en la zona sureste (Figura 3-1). El edificio en cuestión fue construido entre los años 1939-1943, y no fue hasta 2009 cuando se realizaron obras en las que se reformó la estructura.



Figura 3-1 Emplazamiento Centro Universitario de la Defensa

El edificio consta de dos plantas. En la planta superior podremos encontrar parte de los despachos de los profesores, la secretaría del CUD y la sala de juntas. Por otro lado, en la planta inferior, se sitúan el resto de los despachos de los profesores, un local de almacén, el salón de grados y varios seminarios para impartir clases a los alumnos, tal como se aprecia en la Figura 3-2. Fueron en dos despachos de esta última planta, el local de almacén de material (Despacho 114) y el despacho 110 donde se realizarán los experimentos.

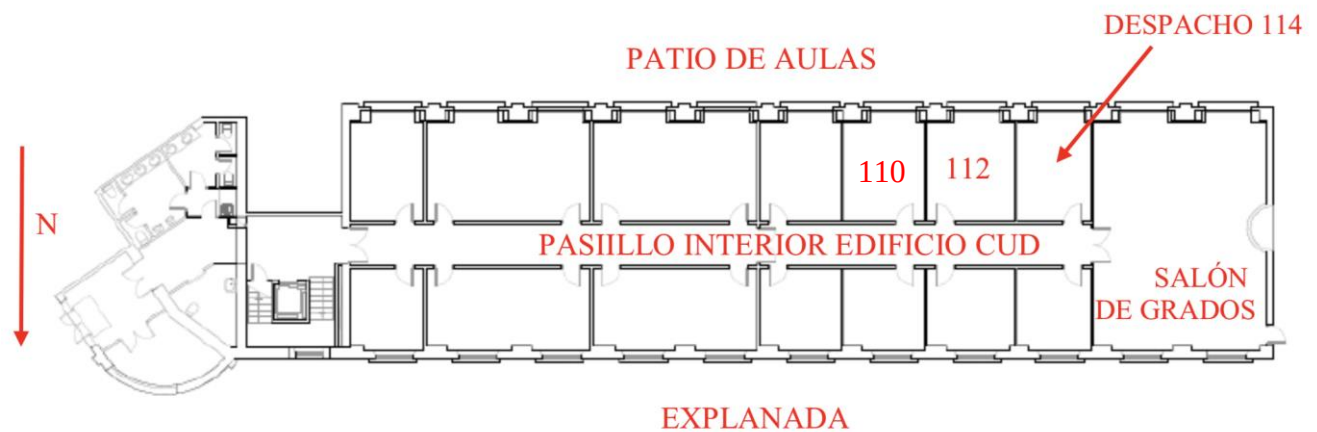


Figura 3-2 Localización despacho 114 y 110 en la planta baja del CUD

El despacho 114 tiene solo una ventana con salida al Patio de Aulas y en el tabique contrario encontraremos la puerta de acceso que da al pasillo interior de la planta baja del CUD. En la cara Oeste del despacho se encuentra el Salón de Grados, en la cara opuesta está el despacho 112. Tiene una longitud total en planta de 5,10 metros, un ancho de 3,53 metros y una altura de 3,7 metros (véase la planta del despacho en la Figura 3-3).

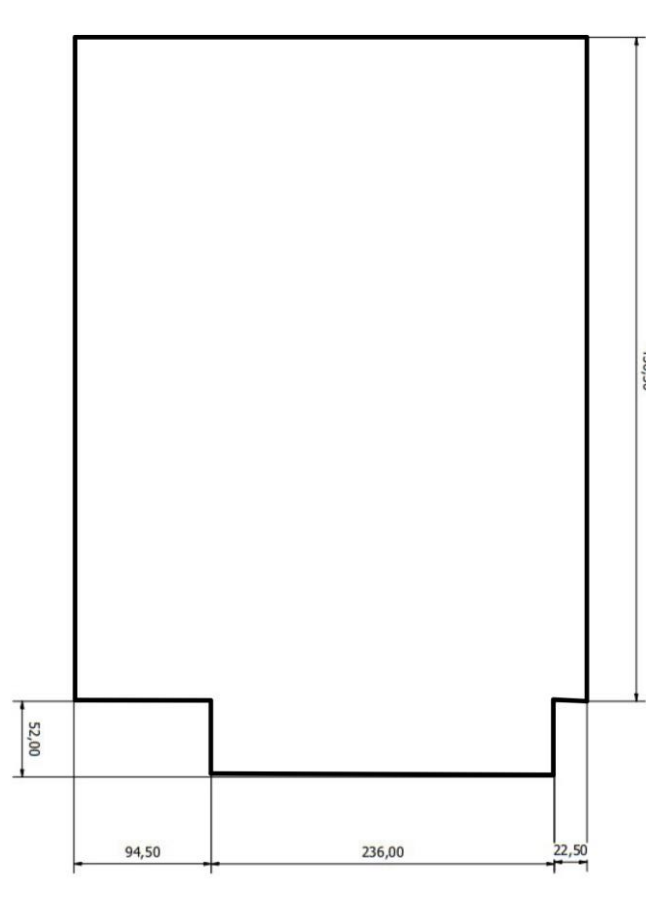


Figura 3-3 Dimensiones despacho 114

En cuanto al despacho 110, también ubicado en la planta baja, tiene también una única ventana orientada al mismo sitio que el 114 (Patio de Aulas), por lo que, de igual manera, en la cara contraria nos encontramos con la puerta hacia el pasillo interior. En este caso, en la cara Este estará el despacho 112. Este despacho tiene una planta ligeramente distinta a la anterior, con una longitud en planta de 5,10

metros, una anchura total de 3,78 metros, manteniéndose la misma altura para todos los despachos. La planta de este despacho se puede ver en la Figura 3-4.

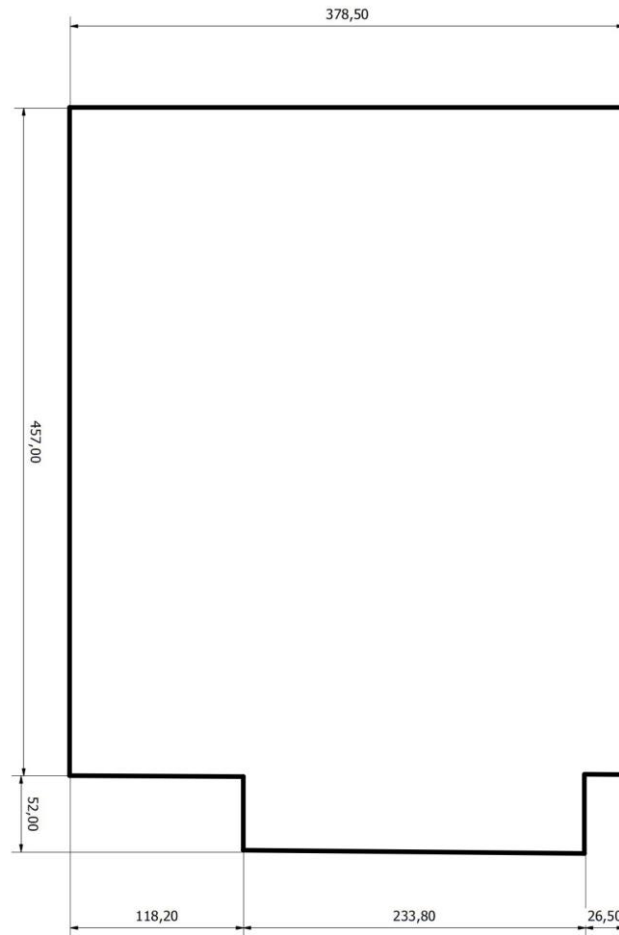


Figura 3-4 Dimensiones despacho 110

Un elemento común para todos ellos es el falso techo. Este está fabricado por bandejas metálicas de aluminio perforado con fieltro acústico. Por encima del falso techo tenemos 1,8 metros donde todos los despachos están comunicados a partir de una altura de 1,5 metros. En este lugar están instaladas una serie de aparatos de ventilación. El primero de ellos es la UTA (Unidad de Tratamiento del Aire). Esta unidad dispone de una toma exterior de aire, lo impulsa hacia la cavidad superior al falso techo después de haberlo renovado y limpiado. En el interior del tubo que va hacia el despacho 114, podremos encontrar una trampilla cuya apertura es regulable mediante un programa para controlar el flujo de aire entrante. Además, en cada sala existe un Fancoil con la función de introducir y acondicionar el aire de la UTA al despacho. Este está compuesto por un filtro, un ventilador y un intercambiador de calor (utilizando agua fría o caliente en función de la temperatura que se quiera conseguir).

A mayores, exclusivamente en el despacho 114 como se puede ver en la Figura 3-5, se ha colocado un extractor de pared, cuyo cometido es aspirar el aire del interior del despacho mediante el giro de un ventilador y lo expulsa hacia el exterior a través de un conducto retráctil.

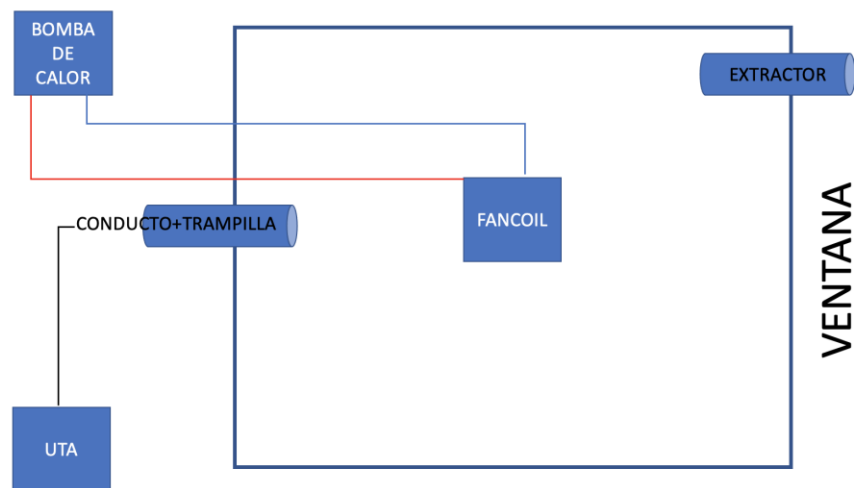


Figura 3-5 Sistema de ventilación despacho 114

La ventana sobre la que realizaremos los ensayos es de aluminio lacrado verde, de hoja simple sin rotura de puente térmico cuya apertura es de tipo corredera. Esta colocada a 1 metro del suelo. Sus dimensiones se podrán ver en la Figura 3-6, con un ancho de 2,2 metros y una altura de 1,84 metros. Encima de la ventana corredera encontraremos un arco de cristal de 1,1 metro de radio.

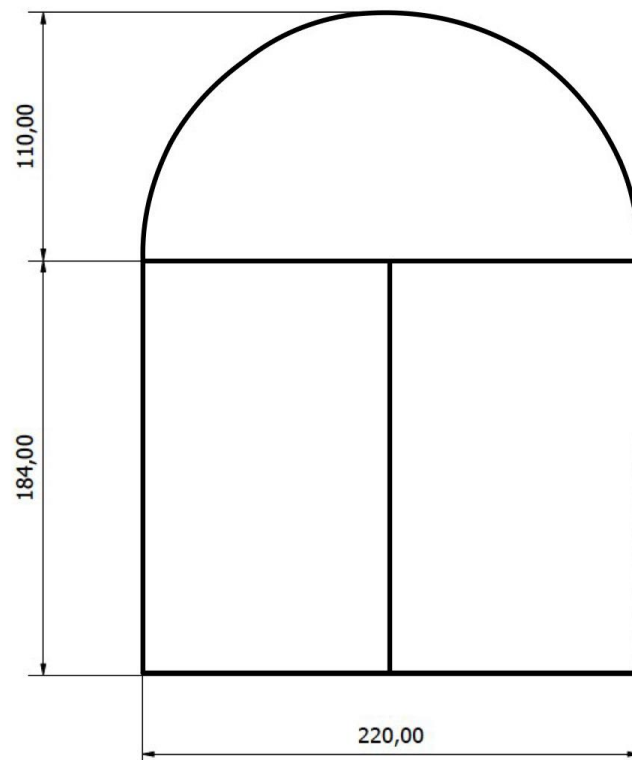


Figura 3-6 Dimensiones ventana

3.2 Procedimiento experimental

En este apartado se describirán las diferentes fases en las que se ha dividido el trabajo experimental, explicando en cada una de ellas los métodos y los procedimientos que se han seguido. En la primera fase calcularemos las renovaciones totales de los dos despachos, mientras que en la segunda fase, nos centraremos en el despacho 114 para determinar las renovaciones que hay a través de los diferentes elementos de cerramiento (puerta, ventana y falso techo). En la última fase, en la que emplearemos el equipo de acústica, nos centraremos en el empleo de “Scan & Paint” e indicaremos la forma de empleo de este.

3.2.1 Primera Fase experimental: Determinación de las renovaciones de aire totales

Para esta primera fase de experimentación tenemos como objetivo la determinación cuantitativa del flujo de aire que existe en los despachos 114 y 110 de la planta baja del CUD. Para ello se empleará el método de evaluación mediante CO₂.

Empezaremos colocando la botella en el exterior, exactamente en el patio de aulas, para que pueda estar en las cercanías de los diferentes despachos. A esta le colocaremos un tubo de tres o cuatro metros de longitud, medida suficiente para que pueda transportar el gas desde la bombona hasta una zona céntrica de la habitación que estemos estudiando. Es importante que esta goma no tenga nada cerca que pueda impedir su retirada por la ventana (quizás algunas vueltas a alguna mesa o silla, por ejemplo). Justo a la salida del conducto será necesario colocar un ventilador. Su uso, básicamente, es para que cuando el gas este siendo liberado en la habitación, sea el ventilador el que facilite la dispersión de este haciendo homogénea la atmósfera.

A esta altura nos surge el inconveniente de como activar y desactivar dicho ventilador sin entrar en el recinto, pues con nuestras exhalaciones y con el intercambio de aire que podría haber al abrir la puerta podríamos interferir a las medidas tomadas por el sensor de concentración. Decidimos entonces emplear un enchufe inteligente que pudiésemos encenderlo y apagarlo a distancia

A continuación, tuvimos que realizar la instalación del sensor de concentración de dióxido de carbono. El inconveniente del aparato del que disponemos es que no se puede visualizar en tiempo real la evolución de las medidas que va tomando mediante ninguna aplicación. Será al final de la realización de la prueba cuando podamos descargar los datos. Optamos entonces a colocar este dispositivo cerca de la ventana, pudiendo tener visual desde ella hacia la pantalla, consiguiendo de esta manera poder comprobar los datos que va midiendo.

Como podemos apreciar en la Figura 3-7, el elemento marcado con el número 1 es el ventilador utilizado para remover el CO₂, siendo el elemento 2 el sensor de CO₂. Esta imagen es tomada del despacho 114, en el cual se están llevando varios experimentos para distintos Trabajos Fin de Grado.

El sensor de CO₂ Temtop M2000C (Figura 3-8), que utilizaremos para nuestras mediciones, es capaz de detectar también partículas que se encuentran suspendidas en el aire, además de la temperatura y la humedad. Para poder realizar mediciones de estos parámetros, este dispositivo dispone de múltiples sensores como sensores de partículas láser, infrarrojo, electroquímico de humedad y temperatura. Para realizar las medidas de concentración de CO₂ que al nivel de 5000 ppm el equipo se satura, por lo que no deberemos sobrepasar dicho umbral.

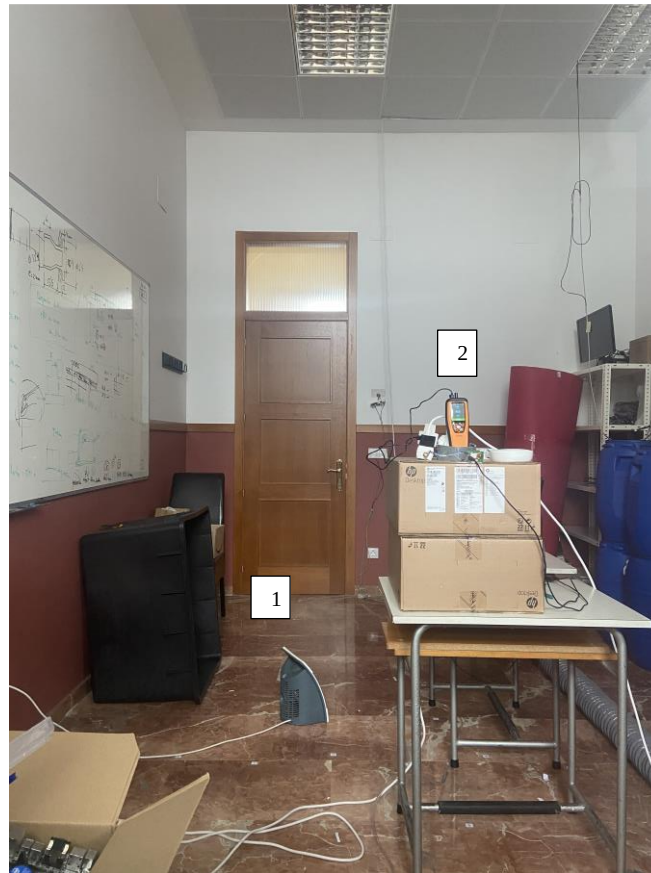


Figura 3-7 Montaje para realizar las pruebas.



Figura 3-8 Monitor de CO₂ Temtop M2000C

Para la ejecución del TFG del AF Sergio Rojo Rodríguez se empleará la misma sala, realizando experimentos parecidos con gas CO₂, pero con ventilación controlada de Fancoils, y extractores. Para ello ha necesitado instalar en los cristales un extractor de aire, quedando así comunicado el interior con el exterior. Es importante reseñar este detalle, pues para el desarrollo de este trabajo será necesario sellarlo de manera que no pueda haber ningún intercambio de aire con el exterior.

3.2.2 Segunda Fase experimental: Determinación de las renovaciones de aire a través de los diferentes elementos.

Cuando se finalizó esa primera fase de experimentación, se taparán todas las posibles salidas del aire, excepto el de la ventana, mediante lonas de plásticos. Estas salidas pueden ser los extractores, el falso techos de los despachos, la puerta e incluso los enchufes.

Para conseguir este escenario fue necesario la adquisición de una lona de plástico como la que aparece en la Figura 3-9 lo suficientemente extensa como para poder tapar todo el techo con una misma pieza de plástico además de la puerta y los enchufes de la pared. Optamos entonces por un plástico resistente compuesto por resinas poliméricas con gran resistencia mecánica. El inconveniente que tiene es el gramaje, el cual llega a los 200 gramos cada metro cuadrado de superficie.

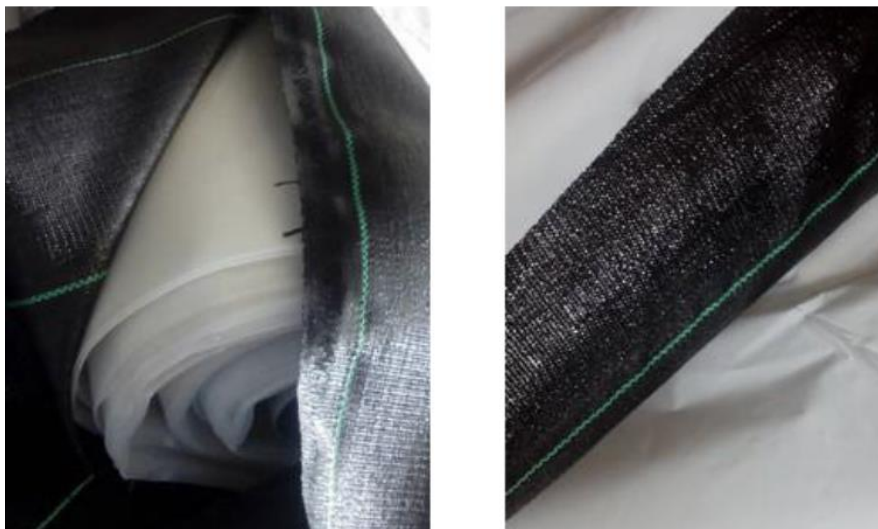


Figura 3-9 Lona plástico para recubrir el despacho [28].

Para proceder a su instalación, primeramente, cortamos el plástico según las medidas de las bandejas metálicas que nos encontramos a la altura del falso techo dejándole un margen suficiente por cada lado para poder pegarlo con cinta adhesiva. A continuación, para extender dicha lona sobre la estructura metálica, se cedieron una serie de imanes de distinta fuerza magnética.

Hubo bastante dificultades para su colocación, debido a la altura. Empezamos por la zona cercana a la ventana para terminar, de esta manera, por la zona de la puerta. Utilizamos 10 imanes redondos, colocándose en parejas, para sujetar la lona al metal mientras que con una cinta adhesiva se unía la misma con el techo de escayola. A su vez, para reducir el peso que tendría que soportar los imanes, una tercera persona sujetaba la lona con un listón de madera, de longitud similar a la altura del techo, sobre la parte central del aula. Una vez que estuvo el comienzo bien pegado y, tras comprobar que la cinta podría aguantar, se fueron desplazando los imanes en dirección a la puerta mientras se seguía añadiendo cinta.

Con toda la extensión del techo ya cubierta, nos dimos cuenta de que esta lona presentaba una curvatura por la parte centra, lo que podría hacer que se despegasen los extremos. Por este motivo se decidió colocar los imanes, que estaban cercanos a la puerta, alrededor de la salida del Fancoil (recordamos que se encuentra en el centro del despacho) quedando tal como aparece en la Figura 3-10.



Figura 3-10 Falso techo cubierto con plástico

Tras haber conseguido cubrir la parte alta del despacho, continuamos con la puerta de acceso a este. Antes de su colocación tuvimos que hacer recortes a lo que había sobrado anteriormente, pues las medidas eran mayores. Se tuvo en cuenta la altura de la puerta junto con la de la cristalera que posee esta y, además, los interruptores y enchufes del lado derecho de la puerta, pues por esta vía podría existir una mínima infiltración de aire. Su colocación empezó por la parte superior del marco de la cristalera para luego ir bajando hacia el suelo quedando como en la Figura 3-11. Tras realizar ambas acciones podemos considerar que la única infiltración que puede llegar a existir en el despacho 114 ocurrirán por la ventana.



Figura 3-11 Puerta cubierta con plástico

3.2.3 Tercera Fase Experimental: Implementación de técnicas de acústica avanzada

Para el desarrollo del trabajo, hubiesen sido varios los posibles métodos que utilizar para comprobar las infiltraciones de aire. Finalmente se optó por esta técnica ya que se trata de un equipo novedoso que no lleva mucho tiempo en el mercado. Además, se pretende explorar las capacidades del equipo ya que se ha empleado en diversas ocasiones para determinar las fugas acústicas, pero pocas veces para relacionar las fugas acústicas con infiltraciones de aire.

Para esta prueba instalamos la cámara y el ordenador dentro del despacho con la intención de medir la cantidad de ruido que es capaz de entrar desde fuera. Colocamos en el Patio de Aulas tres altavoces de la marca MEGABOOM, que estaban conectados entre sí mediante una aplicación móvil para que sonasen de forma simultánea. El audio que reproducimos fue un ruido blanco, ya que según los documentos de referencia que consultamos era el más idóneo [5].

Cuando empezamos a medir por primera vez nos dimos cuenta de varios errores que seguramente terminarían con el cambio de situación de los diferentes elementos. Pues tal como estaba planteado el escenario sería imposible concluir con unas medidas fiables.

Para empezar, nos dimos cuenta de que la claridad que entraba por la ventana era capaz de hacer que en la imagen no se diferenciases los colores con claridad. El software necesita captar la sonda P-U que utilizamos para realizar las medidas y seguir su trayectoria, y lo hace mediante la captación del color de esta y su posterior seguimiento. Por lo que, si en el video no se puede distinguir la sonda del resto de elementos del aula va a resultar imposible que el software pueda identificar la sonda.

Este fue un hecho de suficiente peso como para buscar una alternativa a la posición de la cámara de video. Además, los tres altavoces, aunque aparentemente reproducían el ruido bastante fuerte no era bastante como para que entrase a través de la ventana con suficiente intensidad. Este se disipaba en el exterior.

Al poco ruido que era capaz de entrar del exterior, se le suma que en el interior del despacho se encontraba una torre de ordenador que estaba encendida y que no había opción a apagarla. Entonces detectaría con mayor probabilidad el ruido procedente de la torre del ordenador que el ruido blanco externo.

Aún así realizamos una prueba para familiarizarnos con el programa y el equipo, y como era de esperar no pudimos obtener ningún resultado fiable y nos tuvimos que plantear el llevar hacia el exterior el equipo y hacerlo a la inversa tal como aparece en la Figura 3-12.



Figura 3-12 Montaje del equipo.

Para el montaje del equipo se han de conectar el acondicionador de señal y el módulo de adquisición de datos entre sí (correspondencia con el número 2 en la imagen). Además de acoplarle al acondicionador de señal en sensor PU al “MFPA-2” (correspondencia con el número 3 en la imagen) y al módulo de adquisición de datos un cable USB, en nuestro caso será blanco, al ordenador (correspondencia con el número 1 en la imagen). Este montaje lo podremos ver en la Figura 3-13.

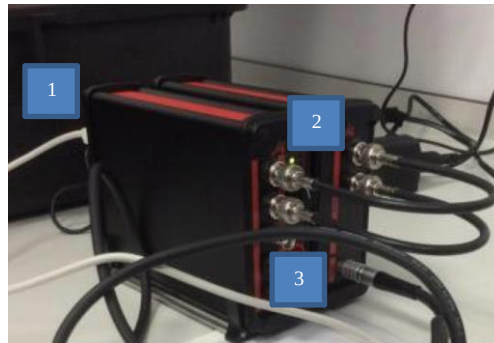


Figura 3-13 Conexiones entre módulo de adquisición de datos y acondicionador de señal.

Una vez colocada la parte principal del equipo, nos centraremos en que la ubicación de la cámara sea la idónea. Para ello tiene que cumplirse que desde ella se pueda grabar toda la ventana que queremos estudiar, tiene que estar en una zona desde la que no se vean zonas oscuras y además tiene que estar cubierta en caso de lluvia. Esto último es debido a que una vez que se empieza a grabar no se podrá modificar su situación, por lo que si se moviese por la lluvia se anularía todos los resultados obtenidos teniendo que empezar de nuevo.

Con todo montado, para iniciar las medidas, habrá que comprobar los siguientes aspectos:

- Debemos disponer un ordenador con el software “*Microflow Vela*”. En caso de no disponer de él, dentro del maletín donde se guarda el equipo existe un pen-drive blanco con el programa para que se pueda descargar. Luego, con el botón derecho, lo ejecutaremos como administrador y abriremos el “*Scan & Paint*”. Se deberá encender una luz verde de comprobación de que todo está correcto en el módulo de adquisición de datos.
- Se abrirá la pantalla del programa (Figura 3-14) y nos dirigiremos primeramente al apartado de “*HW Setup*”. Desde ahí se podrán modificar las condiciones ambientales y los ajustes de adquisición de señales. En la parte derecha de la ventana añadiremos la base de datos del sensor que vamos a emplear, la cual nos la podremos encontrar dentro del citado pen-drive.

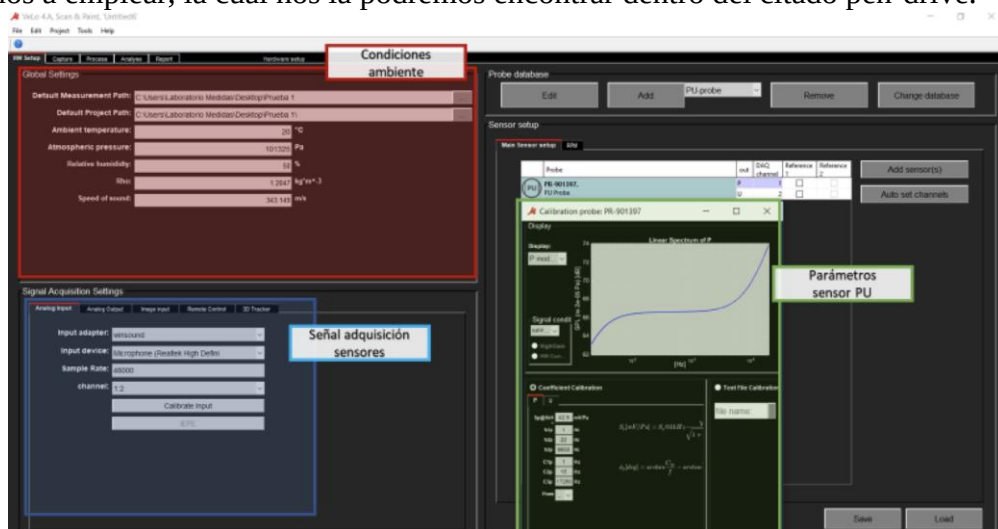


Figura 3-14 Interfaz software Microflow Vela [3].

- En el apartado de los ajustes de adquisición de señales habrá que asegurarse que en “*Analog-Input*”, en la pestaña “*input adapter*”, está seleccionada la opción “*Dtol*”. Esto significa que extrae el sonido del micrófono. En caso de que se hubiese seleccionado “*windsound*”, estaríamos extrayendo el sonido de la tarjeta de sonido del ordenador.

Cuando todos estos parámetros se hayan modificado en el software, seguiremos con la ventana de “*Capture*”. Desde ella se nos permitirá ver lo que está enfocando la cámara. Este será el momento en el que terminemos de ajustar la posición de ella. Pues una vez que se comience a grabar no se podrá modificar. En el posterior procesado se podrá realizar utilizando varios videos, enlazando las medidas de unos con otros. Es por eso por lo que no se puede mover la cámara porque sino estaríamos modificando el plano de medición.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de las renovaciones de aire totales en los despachos 114 y 110

4.1.1 Despacho 114

Para la obtención de los resultados de la renovación de aire por hora que existen en los despachos en esta primera fase (sin llegar a tapar ningún posible acceso de aire) se realizarán una serie de pruebas en cada uno de los despachos. De esta manera se podría comparar resultados.

Se empezó a tomar datos en la mañana del 15 de febrero en el despacho 114. Se encontraban todos los ventiladores apagados. Procedemos entonces a obtener los datos que se encontraban almacenados en el medidor de CO₂. Para ello fue necesario conectarlo mediante un USB al ordenador y descargar los archivos, los cuales están en formato “.csv” (Figura 4-1).

	A	B	C	D	E
1	DATE,PM2.5,PM10,CO2,TEMPERATURE,HUMIDITY				
2	2022-03-09 00:00:18,005.3,008.3,405,022.8,045.8,				
3	2022-03-09 00:01:19,004.8,007.6,405,022.8,045.8,				
4	2022-03-09 00:02:18,005.0,007.7,406,022.8,045.8,				
5	2022-03-09 00:03:18,004.9,007.8,406,022.8,045.8,				
6	2022-03-09 00:04:18,004.8,007.9,405,022.8,045.8,				
7	2022-03-09 00:05:18,004.9,008.0,404,022.7,045.8,				
8	2022-03-09 00:06:19,005.6,009.4,405,022.7,045.8,				
9	2022-03-09 00:07:19,005.1,008.4,405,022.8,045.9,				
10	2022-03-09 00:08:19,005.1,008.1,405,022.8,045.9,				
11	2022-03-09 00:09:19,004.5,006.9,404,022.8,045.9,				
12	2022-03-09 00:10:19,005.2,008.4,404,022.8,045.9,				
13	2022-03-09 00:11:18,004.5,007.2,403,022.8,045.9,				
14	2022-03-09 00:12:18,005.4,008.8,403,022.7,045.9,				
15	2022-03-09 00:13:18,005.3,008.1,403,022.8,045.9,				
16	2022-03-09 00:14:19,005.2,007.6,405,022.8,045.9,				
17	2022-03-09 00:15:19,006.3,010.6,405,022.8,045.9,				
18	2022-03-09 00:16:19,004.9,007.9,405,022.8,045.9,				
19	2022-03-09 00:17:19,005.1,008.7,404,022.8,045.9,				
20	2022-03-09 00:18:19,004.8,007.8,403,022.8,045.9,				
21	2022-03-09 00:19:19,004.4,007.3,404,022.8,045.9,				
22	2022-03-09 00:20:19,005.5,009.1,404,022.7,045.9,				
23	2022-03-09 00:21:18,004.9,007.9,404,022.7,045.9,				
24	2022-03-09 00:22:18,005.6,009.5,404,022.7,045.9,				
25	2022-03-09 00:23:19,005.8,009.9,404,022.8,045.9,				

Figura 4-1 Ejemplo de datos en formato .csv

Para poder manejar los datos de una manera más cómoda, y posteriormente plasmarlos en una gráfica, abrimos el documento con Microsoft Excel y nos dirigimos a la pestaña Datos (barra de herramientas superior). Seleccionaremos la primera columna de datos y clicaremos sobre “texto en columna”. Cuando nos aparezca la ventana de “asistente para convertir texto en columna”,

seleccionaremos los cuatro delimitadores (tabulación, punto y coma, coma y espacio). Esto hará que cada vez que se encuentre con alguno de estos lo interprete como una columna nueva. En la Figura 4-2 se puede ver el aspecto de dicha ventana.

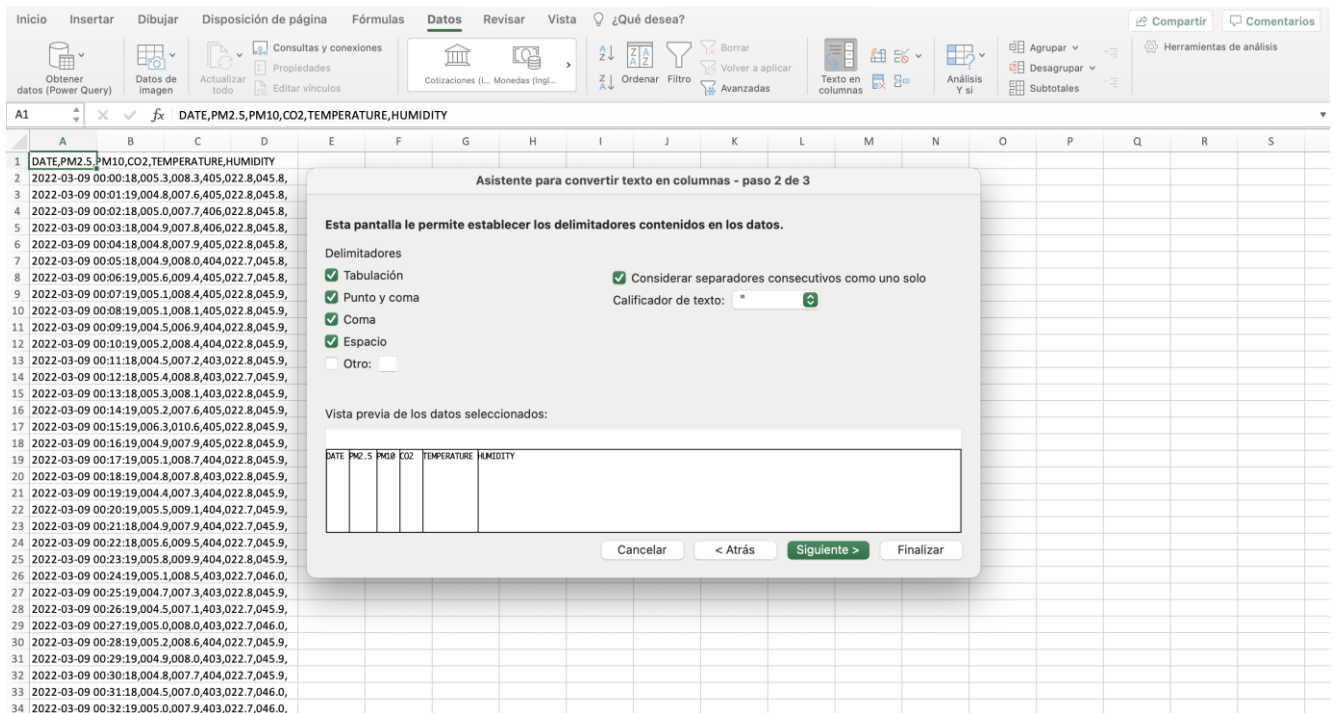


Figura 4-2 Conversión de datos en columnas

Con esta operación finalizada, se nos mostrarán los datos agrupados en columnas según los parámetros que nos mide el aparato (concentración de CO₂, temperatura, humedad, etc). De esta manera seremos capaces de visualizar los datos y representarlos en una gráfica de manera más sencilla (Figura 4-3).

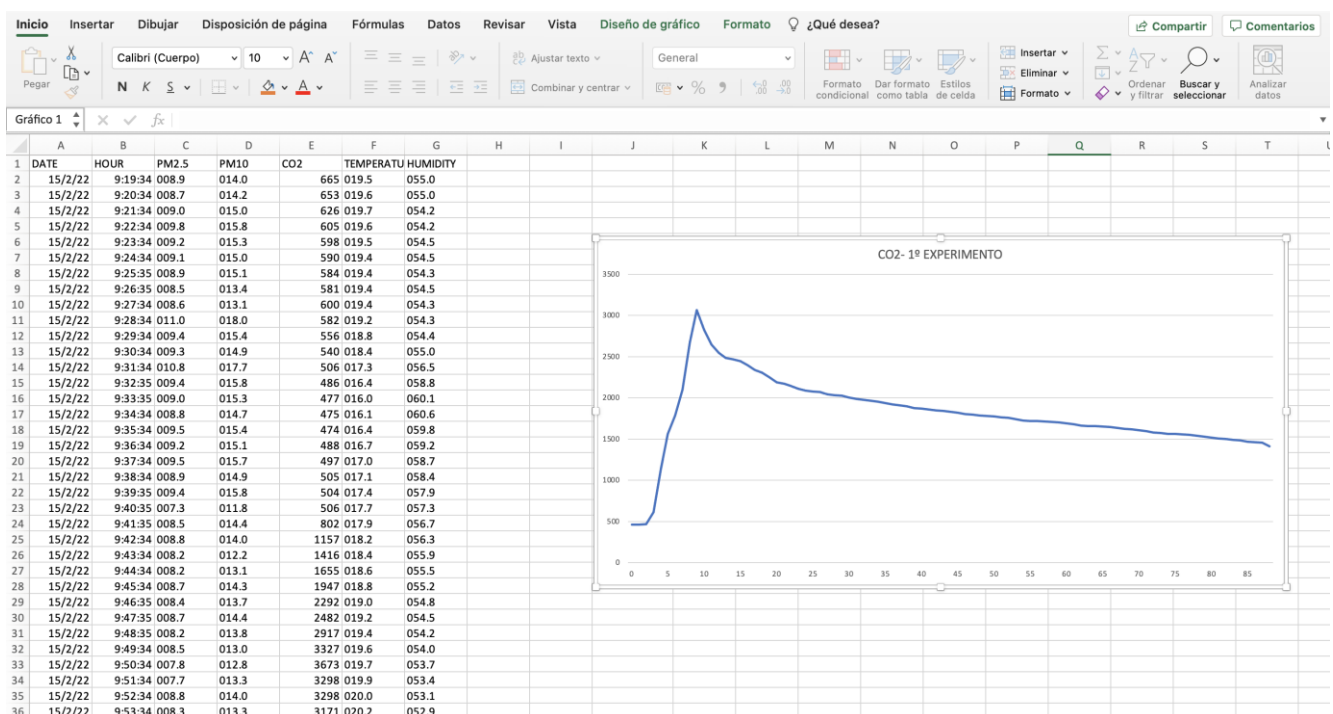
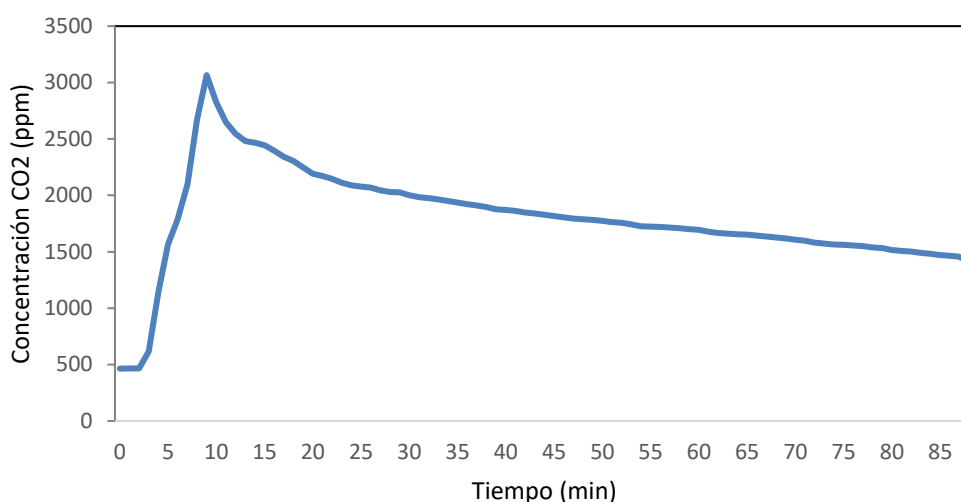


Figura 4-3 Visualización datos en columnas y representación gráfica

Cuando se empezó a registrar los datos del primer experimento, marcaba una concentración mínima de 464 ppm de CO₂. Trascurrió en torno a 6 minutos en ascender desde esos niveles hasta las 2065 ppm. En ese momento se cerró la botella de gas y se extrajo el tubo por la ventana, quedando así esta totalmente cerrada. Aún no se apagó el ventilador, con la idea de que siguiese moviendo el CO₂ que había sido introducido. No fue hasta las 10:17, seis minutos después de que se hubiese cerrado la botella, cuando se llegó al máximo de la concentración obteniéndose el valor de 3075 ppm.

Tras llegar a estos niveles hay que esperar un periodo de tiempo, denominado tiempo de transición, para poder alcanzar una estabilidad en los datos obtenidos. Es a partir de la concentración de 2545 ppm cuando entra en dicha región. A continuación de esta marca, el descenso en los niveles fue CO₂ fue más lenta, dando por finalizada el experimento con las 1400 ppm. Podemos apreciar en la Gráfica 4-1 las zonas que hemos comentado representando la concentración de CO₂ (ppm) con respecto al tiempo (min). Para calcular las renovaciones por hora se aplicará la siguiente fórmula:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \frac{(C_{end} - C_{ambient})}{(C_{start} - C_{ambient})}}{t_{end} - t_{start}}$$



Gráfica 4-1 Prime experimento en el despacho 114

Para calcular las renovaciones de aire se harán según el estudio que hizo Harvard, y tal como viene reflejado en el documento “Guía en 5 pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas” [1], el dato de concentración inicial será cuando termine la etapa de transición. Para obtener la concentración final habrá que “dejar que la concentración de CO₂ en el aula se reduzca hasta que el incremento de CO₂ con respecto a la concentración inicial sea ~ 37% del incremento máximo que se ha conseguido con el CO₂”.

Para la primera prueba, podremos empezar a tomar muestras a partir del minuto 12, pues será cuando haya acabado la etapa de transición y la recta se estabilice. Para dicho tiempo la concentración será de 2545 ppm. Calculamos la concentración final necesaria para introducir en la formula ACH.

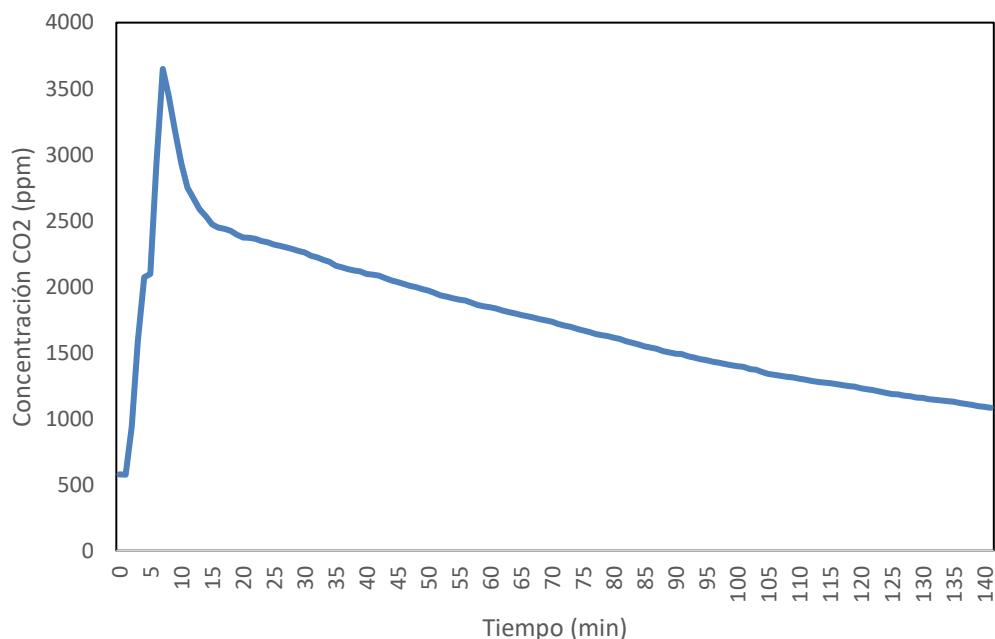
$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2545 - 420) * 0,37 + 420 = 1206 \text{ ppm}$$

Con este dato, entramos en la gráfica y podremos observar que no se llegó a medir hasta esa concentración, por lo que utilizaremos la última medida registrada en el minuto 88 de 1410 ppm de concentración final.

$$ACH = \frac{-1 * \ln \frac{(C_{end} - C_{ambient})}{(C_{start} - C_{ambient})}}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1410 - 420}{2545 - 420} \right)}{\frac{88 - 12}{60}} = \frac{-1 * \ln 0.466}{1,27} = 0,6 \text{ renovaciones por hora}$$

Una vez analizado el primer experimento del despacho 114, continuamos obteniendo los valores de los distintos ensayos empleando el mismo procedimiento.

El siguiente gráfico (Gráfica 4-2) nos muestra el segundo de los experimentos que se realizaron en el despacho 114. Este se hizo con un par de días de diferencia con respecto al primero por lo que las condiciones atmosféricas no eran las mismas, con la posible variación de las muestras obtenidas. Además, podemos apreciar como la subida en los niveles de dióxido de carbono es más brusca, y esto es debido a que fue mayor la apertura de la botella de gas, dejando escapar de esta manera mayor cantidad por unidad de tiempo. Como consecuencia de esto, y como se puede distinguir en la gráfica, se llegó a niveles superiores de concentración que en el primero de los casos y requiso mayor tiempo para alcanzar la concentración ambiente.



Gráfica 4-2 Segundo experimento en el despacho 114

Para el segundo caso, podremos tener en cuenta los datos a partir del minuto 15. Para este tiempo la concentración inicial será de 2472 ppm. Calculamos la concentración final:

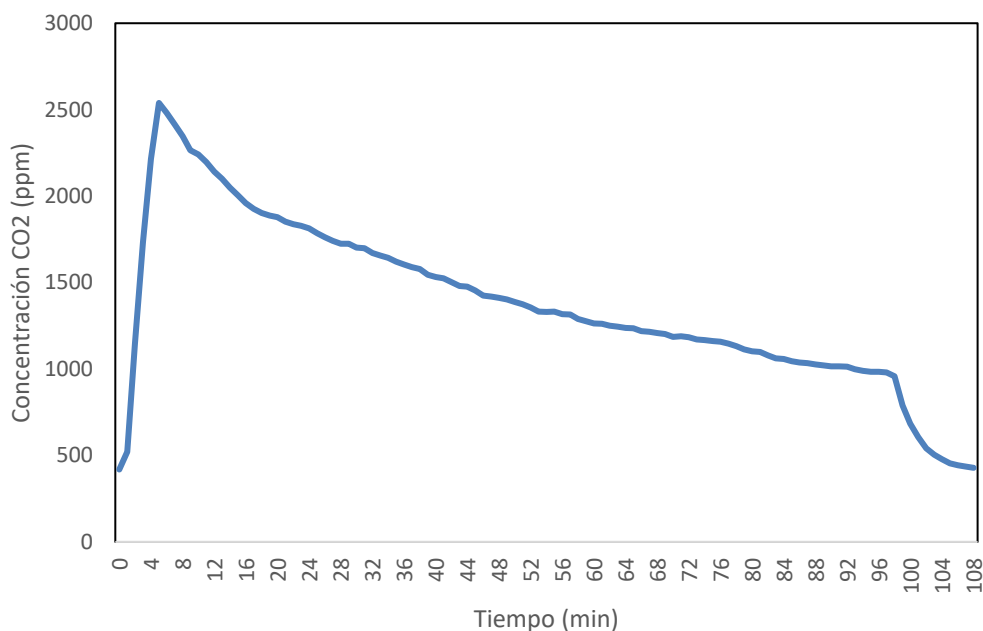
$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2472 - 420) * 0,37 + 420 = 1179 \text{ ppm}$$

Esta concentración calculada ocurrirá en torno al minuto 127 del ensayo. Calculamos las renovaciones de aire por hora:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1179 - 420}{2472 - 420} \right)}{\frac{127 - 15}{60}} = \frac{-1 * \ln 0.37}{1,87}$$

$$= 0,53 \text{ renovaciones por hora}$$

Para terminar esta fase de experimentación en el despacho 114, realizaremos una última medida transcurrido 14 días desde la última prueba. Con estas tres gráficas podremos hacer una media y determinar las renovaciones de CO₂ en dicha aula. Para esta prueba en el despacho 114, si nos fijamos en la Gráfica 4-3, la Cstart son 1902 ppm en el minuto 18.



Gráfica 4-3 Tercer experimento en el despacho 114

Calculamos la concentración final:

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (1902 - 420) * 0,37 + 420 = 968 \text{ ppm}$$

Para este valor de concentración podremos consultar la base de datos y ver que tuvo lugar en el minuto 97 de ensayo. Calculamos las renovaciones de aire por hora:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{968 - 420}{1902 - 420} \right)}{\frac{97 - 18}{60}} = \frac{-1 * \ln 0.37}{1,32}$$

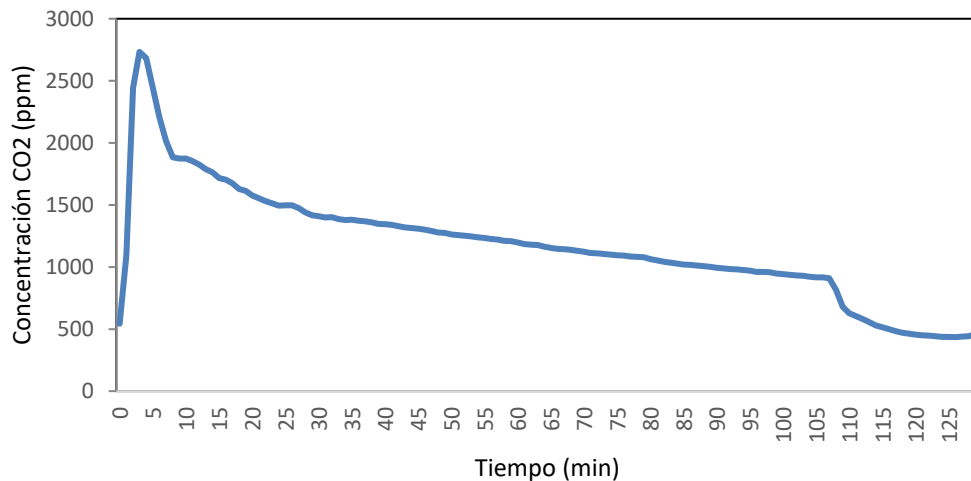
$$= 0,76 \text{ renovaciones por hora}$$

Podremos entonces concluir esta primera fase en el despacho 114 con la renovación por hora total como la media de las tres que hemos obtenidos, quedando de la siguiente manera:

$$ACH = \frac{0,6+0,53+0,76}{3} = 0,63 \text{ renovaciones por hora}$$

4.1.2 Despacho 110

La primera prueba de CO₂ en el despacho 110 se hizo horas después de la primera prueba en el despacho 114. Por lo que las condiciones atmosféricas serán parecidas. Si vemos la Gráfica 4-4, apreciaremos que es muy similar a las anteriores, con una leve diferencia en la cola de esta. Esto fue debido a que una tercera persona entró en el despacho a ventilarlo sin ser conocedor del experimento que se estaba desarrollando. Este es el motivo del descenso en la concentración hasta valores ambientales.



Gráfica 4-4 Primer experimento en el despacho 110

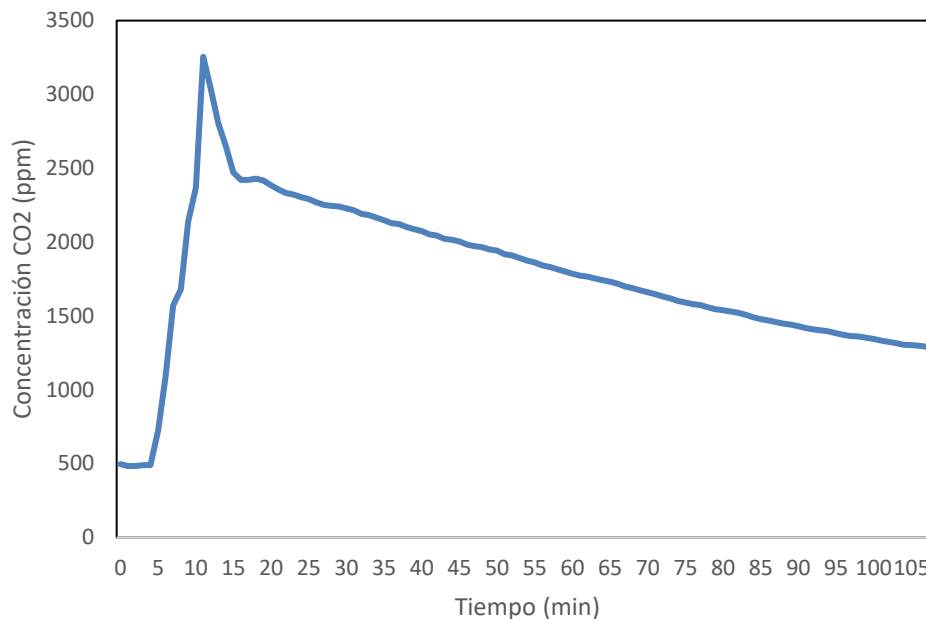
Para esta primera prueba que se hizo en el despacho 110 podremos empezar a coger los datos a partir del minuto 8 donde la concentración inicial es de 1883. Calculamos entonces la concentración final:

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (1883 - 420) * 0,37 + 420 = 961 \text{ ppm}$$

Será en el minuto 96 cuando la gráfica nos muestre la concentración calculada. Obtendremos ACH:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \frac{(C_{end} - C_{ambient})}{(C_{start} - C_{ambient})}}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{961 - 420}{1883 - 420} \right)}{\frac{96 - 8}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,37}{1,47} = 0,67 \text{ renovaciones por hora}$$

Para concluir con esta primera fase de experimentación realizaremos el último experimento en este despacho de la planta baja reflejando los datos en la Gráfica 4-5. Obteniendo aparentemente resultados similares a los anteriores.



Gráfica 4-5 Segundo experimento en el despacho 110

Tomaremos como concentración inicial la de 2471 en el minuto 14. Por lo tanto, la concentración final que obtendremos a partir de este dato es la siguiente:

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2647 - 420) * 0,37 + 420 = 1244 \text{ ppm}$$

La concentración calculada se alcanzará en el minuto 108. Para dicha concentración las renovaciones de aire serán:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \frac{(C_{end} - C_{ambient})}{(C_{start} - C_{ambient})}}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1244 - 420}{2647 - 420} \right)}{(108 - 14)/60} = \frac{-1 * \ln 0,37}{1,57} = 0,63 \text{ renovaciones por hora}$$

Para esta prueba los resultados tienen una diferencia es mínima, siendo la renovación final como la media de ambos resultados.

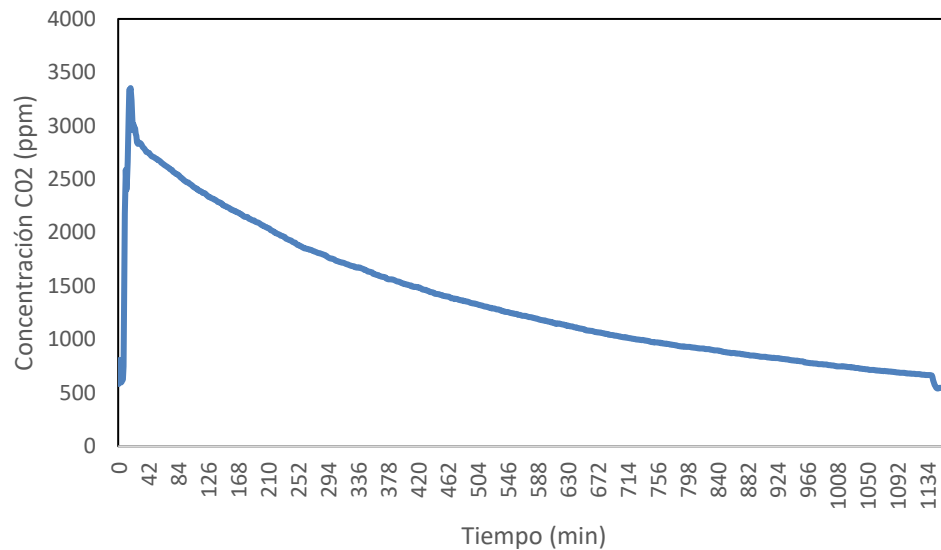
$$ACH = \frac{0,67 + 0,63}{2} = 0,65 \text{ renovaciones por hora}$$

Tras calcular las renovaciones en ambos despachos podemos asumir que ambos se comportan de manera similar, ya que los datos obtenidos son muy parecidos. En consecuencia, nos centraremos en el despacho 114 suponiendo que el resto de las salas se comportarán de manera similar

4.2 Determinación de las renovaciones de aire a través de los diferentes elementos

Tras la colocación del plástico tal como se ha indicado en el apartado 3.2.2, se introdujo de nuevo CO₂ en el despacho con la misma forma de actuación que los experimentos de la primera fase. En esta etapa realizamos cuatro pruebas en el despacho 114. El primero de ellos se realizó a media mañana y, necesitó cerca de 24 horas para volver a bajar a los valores iniciales de 420 partículas por millón (ppm).

A continuación, mostraremos una nueva gráfica (Gráfica 4-6) en el que se apreciará que el pico de concentración se alcanzó a los 17 minutos después de empezar a introducir el gas, tomando un valor cercano a los 3500 ppm. Esta concentración unida a la disminución de zonas de escape del aire (como la puerta y el falso techo) fueron los mayores motivos por lo que se alargó tanto la toma de muestras.



Gráfica 4-6 Primer experimento con lona en el despacho 114

Podemos ver que la zona de estabilidad, que en repetidas ocasiones hemos nombrado, comienza el minuto 33. En ese momento la concentración inicial será de 2813 ppm. Calculamos la concentración final:

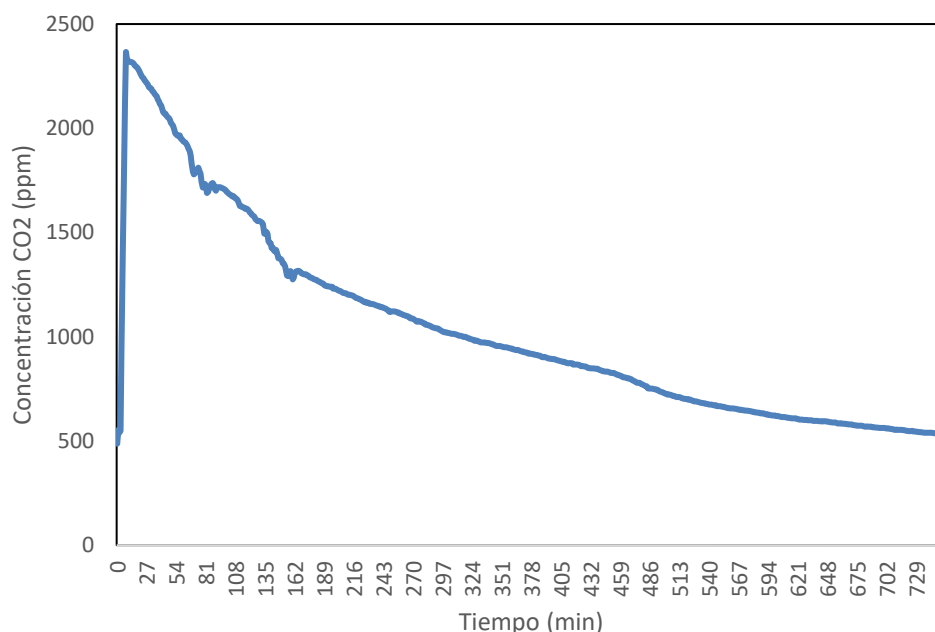
$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2813 - 420) * 0,37 + 420 = 1305 \text{ ppm}$$

La concentración final obtenida (1305 ppm) corresponde al minuto 517 del experimento. En este momento se podría haber dado por finalizado en ensayo (tras nueve horas después de su inicio) en vez de haber esperado casi 24 horas. Con estos datos, obtendremos las renovaciones:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1305 - 420}{2813 - 420} \right)}{\frac{517 - 33}{60}} = \frac{-1 * \ln 0.3698}{8,07} = 0,12 \text{ renovaciones por hora}$$

Tras este, se realizó otro un par de días después. En esta ocasión, reducimos la cantidad de dióxido de carbono introducido hasta las 2300 ppm, y, de esta manera, reducir el tiempo de ensayo. El valor pico no se obtuvo hasta haber transcurrido 17 minutos con una concentración de 2318 ppm. Sin embargo,

para esta prueba el tiempo de transición también fue más largo. El primer dato; es decir, la concentración inicial, la tomaremos como 1282 ppm después de 161 minutos. Se muestra la gráfica de este experimento (Gráfica 4-7).



Gráfica 4-7 Segundo experimento con la lona en el despacho 114

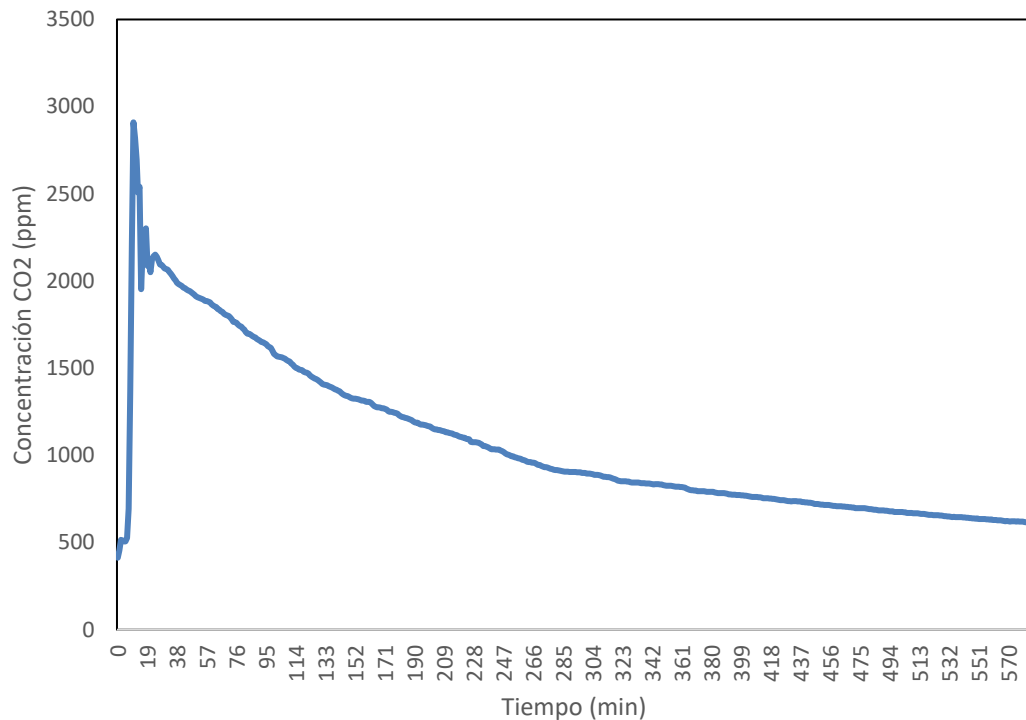
Seguimos manteniendo la misma secuencia de cálculos. Calculamos la concentración final a partir de los 1282 ppm a los 161 minutos.

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (1282 - 420) * 0,37 + 420 = 739 \text{ ppm}$$

Para el valor calculado, buscamos el tiempo que tuvo que transcurrir para alcanzar esa concentración y obtenemos el dato de 494 minutos. Ambos los utilizaremos para calcular las renovaciones por hora:

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{739 - 420}{1282 - 420} \right)}{\frac{494 - 161}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,37}{5,55} = 0,18 \text{ renovaciones por hora}$$

Otra muestra fue tomada al día siguiente. Para esta, el valor máximo de concentración de CO₂ ronda las 3000 ppm a los 11 minutos después de empezar. Para alcanzar la zona de estabilidad tuvieron que pasar 20 minutos, con respecto al valor pico, con una concentración de 2050 ppm. En la Gráfica 4-8 se mostrarán los datos representados en una nueva gráfica.



Gráfica 4-8 Tercer experimento con lona en el despacho 114

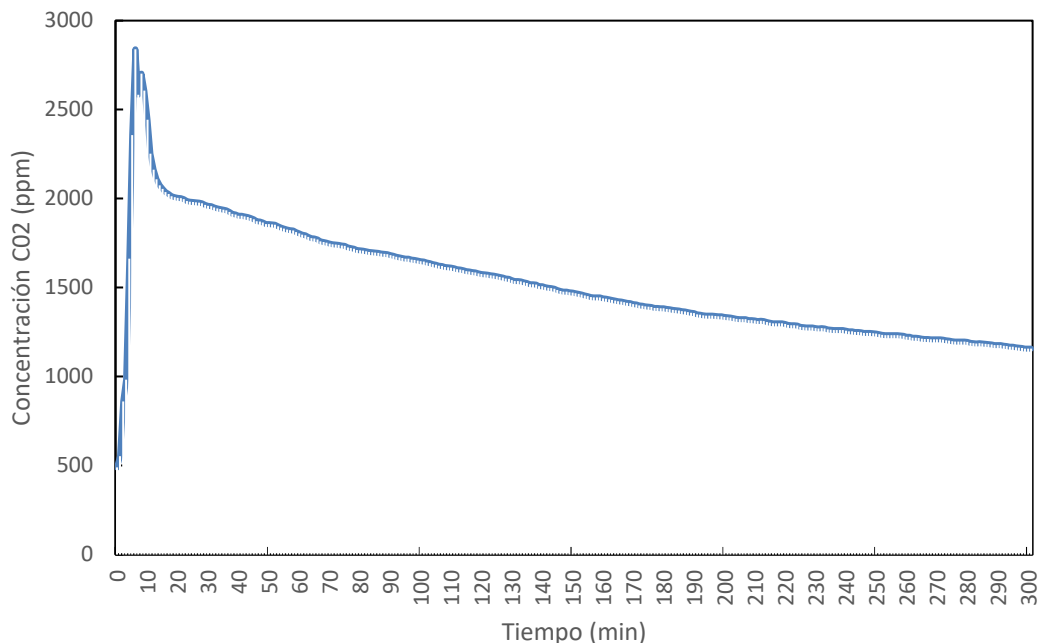
Para el tercer ensayo, empezamos calculando la concentración final tomando como C_{start} igual a 2072 a los 30 minutos.

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2072 - 420) * 0,37 + 420 = 1031 \text{ ppm}$$

Según la concentración final calculada, tras averiguar el tiempo que tuvo que transcurrir, calcularemos las renovaciones de aire del despacho.

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1031 - 420}{2072 - 420} \right)}{\frac{242 - 30}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,3699}{3,53} = 0,28 \text{ renovaciones por hora}$$

En el último ensayo que se realizó con la lona puesta obtuvimos la gráfica que veremos a continuación (Gráfica 4-9).



Gráfica 4-9 Cuarto experimento con lona en el despacho 114

Aplicando las fórmulas que hemos estado utilizando, con una concentración inicial de 2108 ppm en el minuto 13, obtendremos la concentración final:

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2108 - 420) * 0,37 + 420 = 1045 \text{ ppm}$$

Este ensayo finalizó antes de alcanzar dicha concentración, por lo que emplearemos como concentración final la última medida que hemos tomado con su respectivo tiempo. En este caso será una concentración de 1157 ppm en el minuto 301.

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1157 - 420}{2108 - 420} \right)}{\frac{301 - 13}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,44}{4,8}$$

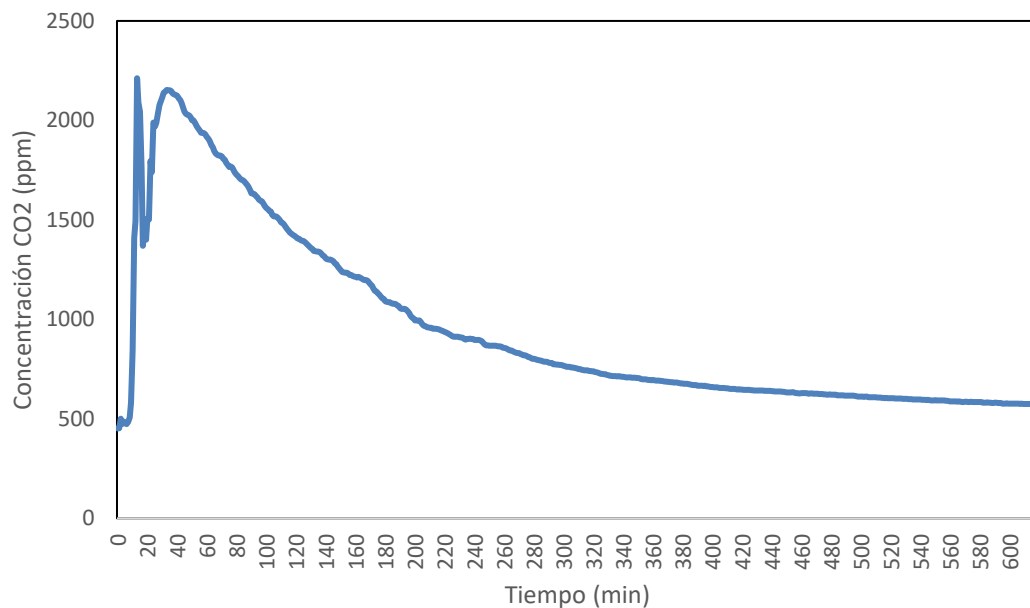
$$= 0,17 \text{ renovaciones por hora}$$

Para finalizar, y concluir con una renovación de aire total para esta fase de experimentación, realizaremos la media de los cuatro resultados obtenidos:

$$ACH = \frac{0,12+0,18+0,28+0,17}{4} = 0,19 \text{ renovaciones por hora}$$

Tras haber obtenido las renovaciones que tienen lugar por la ventana del despacho 114, se pueden relacionar con las renovaciones totales del despacho (si recordamos de apartados anteriores era de 0,63), pues estas supondrían en torno a un 30% de las totales. Para terminar de caracterizar el despacho y tener conocimiento del aire que sale a través de todos los elementos, nos hemos propuesto realizar una serie de experimentos a mayores en los que retiramos la lona que recubría la puerta. De esta manera, podremos comprobar el reparto de las renovaciones entre puerta, ventana y falso techo.

El primer ensayo que se hizo sin la lona en la puerta de acceso se muestra en la Gráfica 4-10. Para este ensayo redujimos la cantidad de CO₂ introducido tomando como valor pico de concentración en torno a los 2200 ppm.



Gráfica 4-10 Primer experimento sin lona en la puerta en el despacho 114

Como hemos venido haciendo hasta ahora, procederemos a calcular la concentración final a partir de la que hemos considerado como inicial (2135 ppm en el minuto 37).

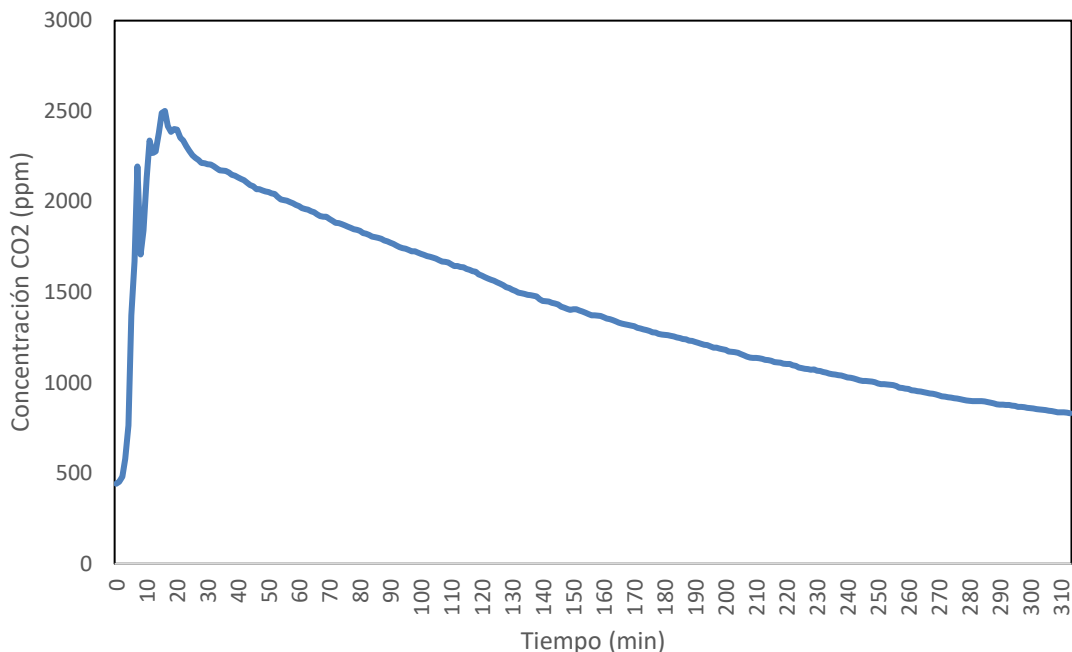
$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2135 - 420) * 0,37 + 420 = 1054 \text{ ppm}$$

A la concentración calculada se llegará sobre el minuto 191, dando entonces por finalizado el ensayo. Se obtendrá el valore de renovaciones por hora según estos últimos datos.

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1054 - 420}{2135 - 420} \right)}{\frac{191 - 37}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,3697}{2,56}$$

$$= 0,389 \text{ renovaciones por hora}$$

Al día siguiente, pusimos en marcha otra prueba más sin la lona en la puerta quedando los datos representados en la Gráfica 4-11. En este caso el pico de CO₂ alcanza los 2400 ppm a los 20 minutos.



Gráfica 4-11 Segundo experimento sin la lona en la puerta en el despacho 114

La concentración inicial que tomaremos será de 2206 ppm a los 30 minutos y con esta calcularemos la concentración final.

$$C_{end} = (C_{start} - C_{ambient}) * 37\% + C_{ambient} = (2206 - 420) * 0,37 + 420 = 1081 \text{ ppm}$$

Una vez que ya hemos obtenido dicha concentración, pasaremos a calcular las renovaciones de aire sabiendo que las 1081 ppm se alcanzó a los 224 minutos.

$$ACH = \frac{-1 * \ln \left(\frac{C_{end} - C_{ambient}}{C_{start} - C_{ambient}} \right)}{t_{end} - t_{start}} = -1 * \frac{\ln \left(\frac{1081 - 420}{2206 - 420} \right)}{\frac{224 - 30}{60}} = \frac{-1 * \ln 0,36998}{3,23} = 0,31 \text{ renovaciones por hora}$$

Después de haber obtenido las renovaciones de cada uno de los experimentos sin lona en la puerta, continuaremos calculando la media para obtener así las renovaciones totales.

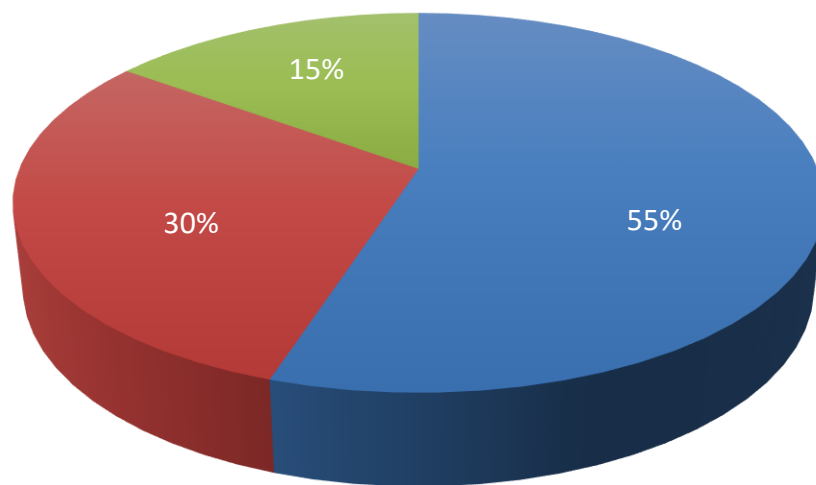
$$ACH = \frac{0,389 + 0,31}{4} = 0,35 \text{ renovaciones por hora}$$

Tras haber obtenido distintos resultados de renovaciones en diferentes estados del despacho, procederemos a insertar una tabla (Tabla 4-1) donde se recojan numéricamente un resumen de estos, y posteriormente, se mostrará con una gráfica para tener una representación más visual.

Estado del despacho 114	Renovaciones por hora
Sin ningún recubrimiento	0,63
Falso techo recubierto con la lona	0,35
Falso techo y puerta recubierto con la lona	0,19

Tabla 4-1 Resumen datos de renovaciones del despacho 114 en diferentes estados

Se puede observar con el resumen que, tras los ensayos realizados, parece ser que las infiltraciones existentes a través de la ventana forman en torno a un 30% de las globales, siendo las infiltraciones por la puerta sobre un 15%. Por ello, por donde mayor intercambio de aire es por el falso techo, rondando el 55%. Estos porcentajes se pueden ver representados en la Gráfica 4-12 que se muestra a continuación.



Gráfica 4-12 Resumen visual datos de renovaciones del despacho 114 en diferentes estados

4.3 Análisis de resultados frente a variables meteorológicas

Se puede apreciar que los resultados de las renovaciones de aire por hora presentan cierta variabilidad. Buscando alguna razón a dicha variabilidad, se pensó en recurrir a la base de datos de la estación meteorológica del puerto de Marín (Meteogalicia) donde se pudiese encontrar los datos meteorológicos para cada periodo de medición. Fuimos recogiendo los valores medios de temperatura exterior, viento y presión durante el experimento tal como se muestran en las tablas. La Tabla 4-2 nos muestra los valores meteorológicos para cada ensayo realizado en el aula 114 cuando aún no se había colocado la lona, mostrándose en la Tabla 4-4 los datos estando el despacho 114 recubierto totalmente con la lona. En la Tabla 4-3 mostraremos los parámetros climatológicos en el despacho 110.

Renovaciones por hora	Temperatura (°C)	Viento (m/s)	Presión (hPa)
0,53	10,8	4,11	1021,3
0,6	10	2,14	1028,3
0,76	12,3	5,78	1013,3

Tabla 4-2 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 114 sin lona

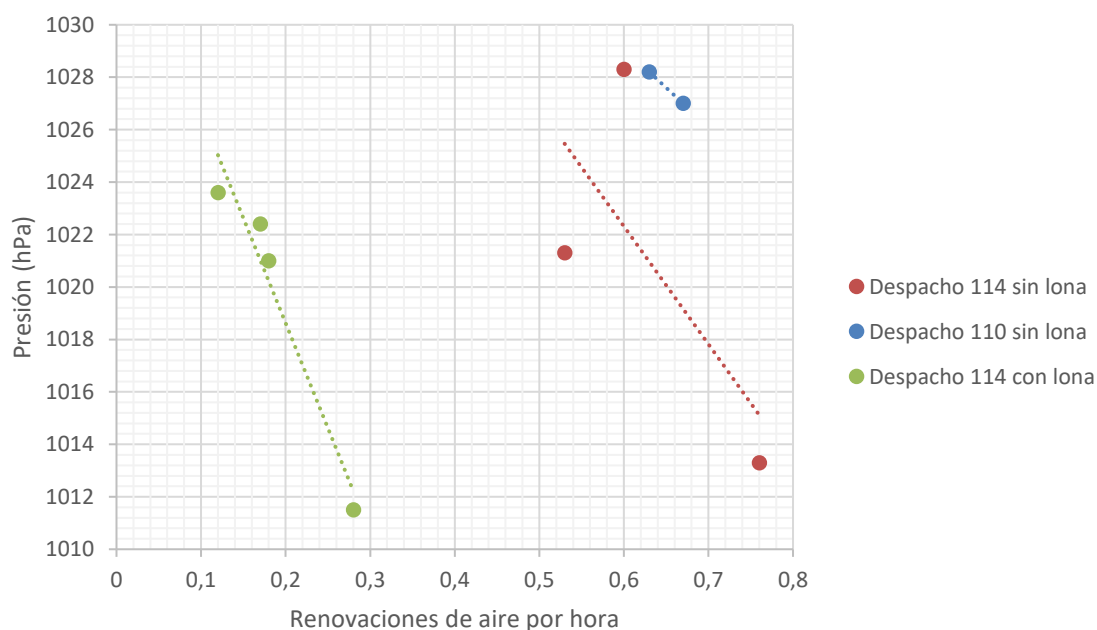
Renovaciones por hora	Temperatura (°C)	Viento (m/s)	Presión (hPa)
0,63	13	7,44	1028,2
0,67	14,2	7,58	1027

Tabla 4-3 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 110 sin lona

Renovaciones por hora	Temperatura (°C)	Viento (m/s)	Presión (hPa)
0,12	15	3,43	1023,6
0,17	14,5	5,5	1022,4
0,18	13,6	9,7	1021
0,28	17,4	8,8	1011,5

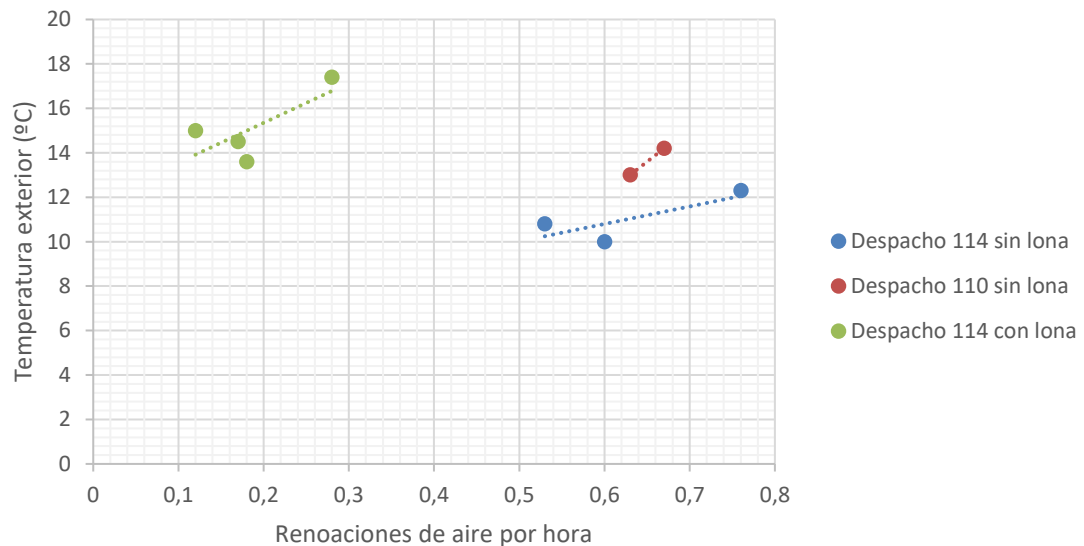
Tabla 4-4 Medidas meteorológicas para los ensayos realizados en el despacho 114 con lona

A continuación, se irán representando en distintas gráficas los valores de cada parámetro según las renovaciones de aire por hora. Empezaremos mostrando la Gráfica 4-13, donde apreciamos que los valores de presión guardan una relación indirectamente proporcional con las renovaciones, pues cuanto mayor ha sido la presión, las renovaciones disminuían.



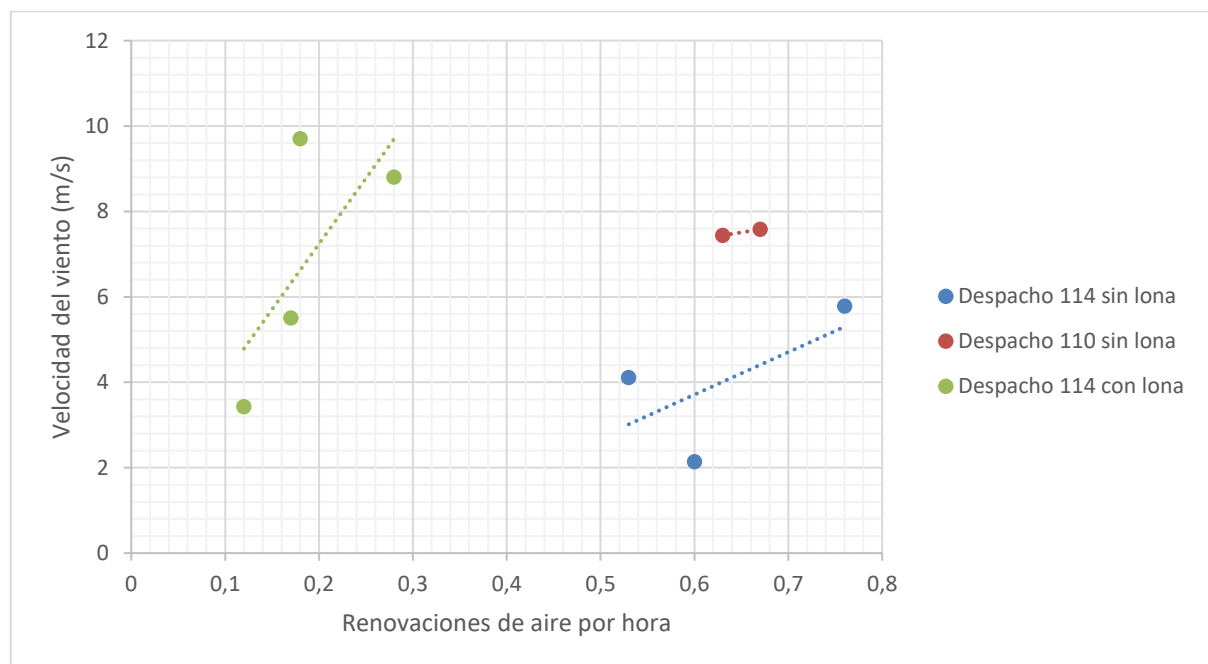
Gráfica 4-13 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la presión

Posteriormente, analizaremos en la Gráfica 4-14 los datos representados y veremos que, en este caso, parece que las renovaciones muestran una relación directamente proporcional con la temperatura media exterior durante todo el tiempo del ensayo.



Gráfica 4-14 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la temperatura exterior

Por último, compararemos en la Gráfica 4-15 los valores de renovaciones con respecto a la velocidad del viento para cada periodo de ensayo. Podemos ver que asemeja a una relación directamente proporcional como en la gráfica expuesta anteriormente, pues cuanto mayor ha sido la velocidad del viento, mayor serían las renovaciones registradas.



Gráfica 4-15 Representación de las renovaciones de aire por hora en función de la velocidad del viento

4.4 Implementación de técnicas de acústica avanzada

Teniendo el programa configurado tal como se ha indicado en el apartado 3.2.3, se comenzará con la toma de datos. Para ello, con el ratón presionaremos sobre “Start” mientras que otro usuario, con el sensor P-U en la mano realiza un barrido por la ventana, prestando más atención en las juntas de unión. A esta sonda le colocaremos un protector de viento rojo tal como podemos ver en la Figura 4-4. Si apreciamos la sonda, podremos ver que tiene grabado un pequeño punto rojo. Para realizar las mediciones este ha de estar en el lado más cercano a la superficie que nos disponemos a estudiar.



Figura 4-4 Sonda P-U con protector de viento rojo.

Las pasadas se ejecutarán de forma pausada. Además, por facilidad a la hora de la medición, podremos detener la grabación cuantas veces sea necesaria. Para este ensayo, por las dimensiones y la altura a la que se encuentra la ventana, dividimos la grabación en una decena de muestras. Luego se podrán procesar como una única medida. De ahí la importancia de no poder mover la cámara de emplazamiento.

En la pestaña de “*Process*” se cargarán los distintos archivos (“*Load measurement*”) y se procesarán uno a uno (Figura 4-5). Para cada una de las medidas habrá que seleccionar el color de la sonda mediante el botón de “*Select probe color*”, y así el software sea capaz de hacer un seguimiento de su recorrido. El programa nos daría la opción de ampliar el rango de tonalidades de la sonda para facilitar su seguimiento.



Figura 4-5 Pestaña de procesamiento de las medidas.

Con todas las pruebas ya procesadas, después de habernos asegurado que en todo momento la sonda ha sido identificada, continuamos hacia la pestaña de “*Analyse*”. En ella, primeramente, tendremos que elegir el método con el que queremos que lo analice: método por punto o método por cuadrícula.

En la siguiente imagen (Figura 4-6) podremos ver como ha sido dividida la superficie que queremos estudiar en caso de que eligiésemos método por cuadrículas. Las líneas de diferentes colores nos muestran los recorridos que ha seguido la sonda en cada una de las medidas que hemos procesado.

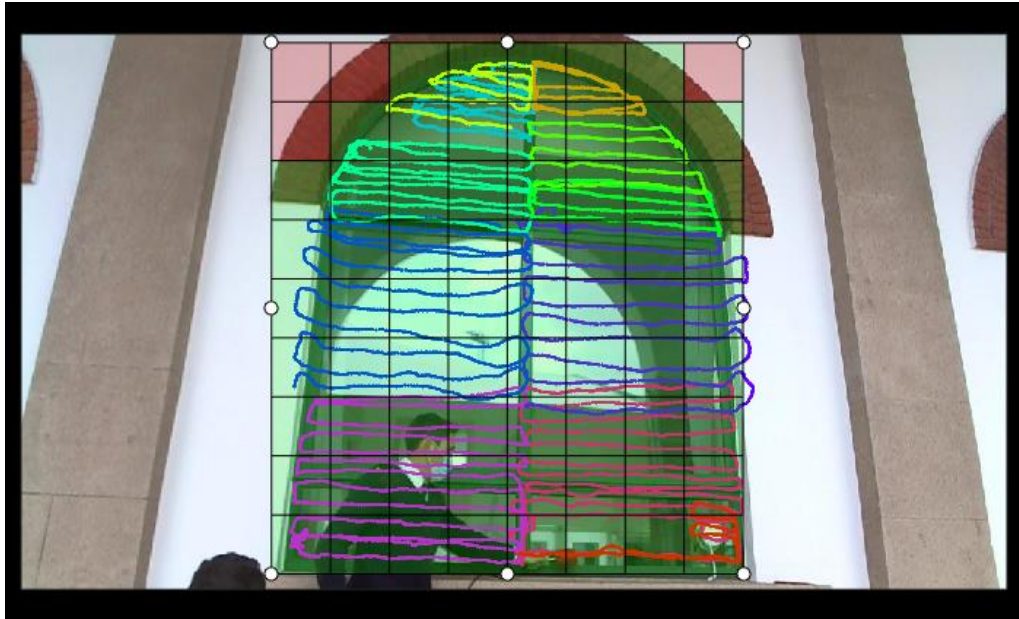


Figura 4-6 División en cuadrículas de la ventana.

En la barra superior del programa, se dispone un desplegable en el que seleccionaremos una serie de propiedades que queremos que nos muestre (velocidad de partículas o presión). Para nuestro trabajo, nos centraremos en la propiedad de velocidad de partículas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de mapas sonoros (Figura 4-7) en función de dicha propiedad que se analizarán a continuación.

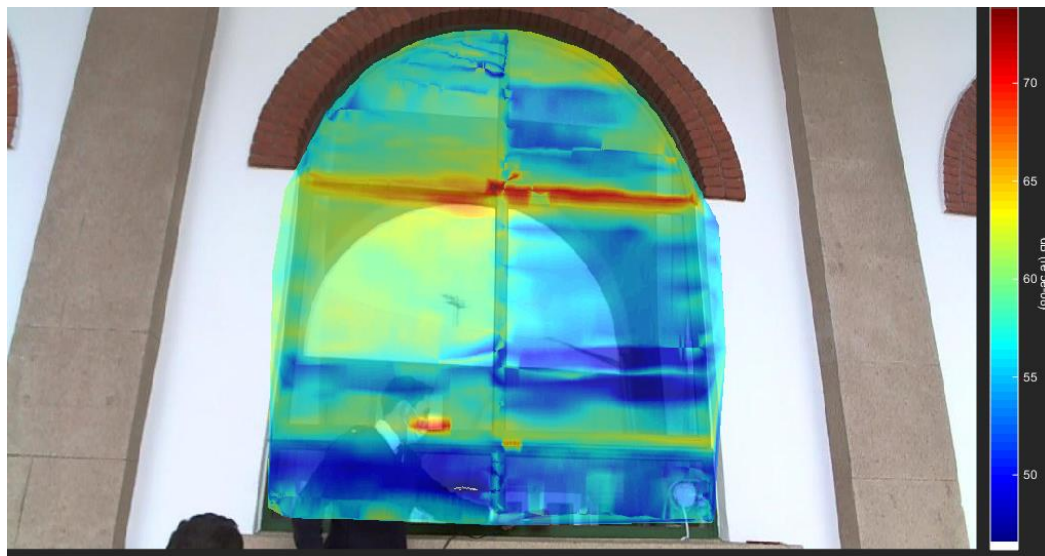
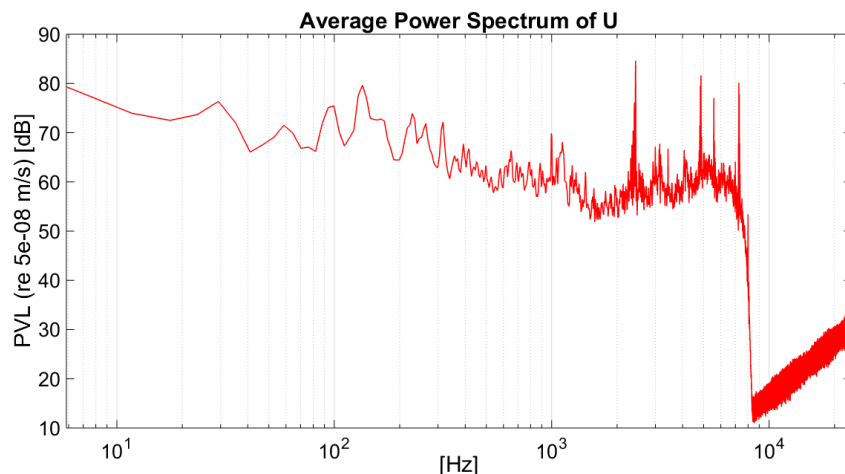


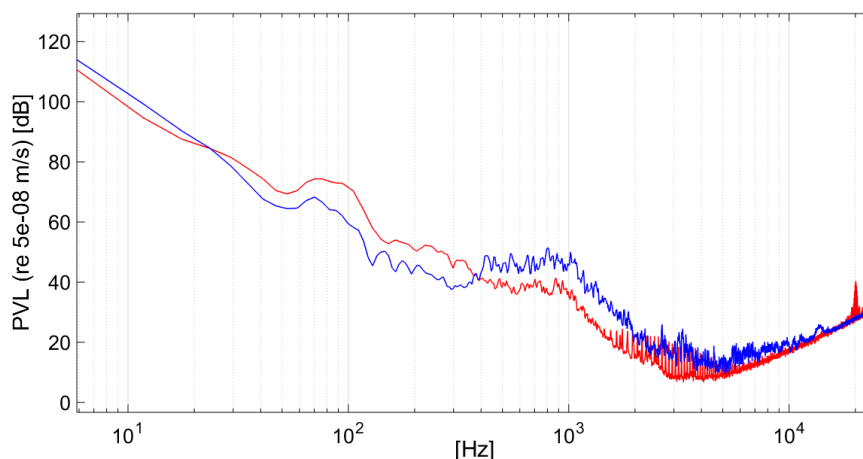
Figura 4-7 Ejemplo de mapa sonoro

Para nuestro estudio, nos interesa conocer el análisis acústico de varias determinadas áreas que pensamos puede haber mayores infiltraciones. En la pestaña de “Analyse” nos da la opción de “Select Area”. En ella podremos seleccionar la zona que queramos estudiar, se interpolarán los valores y nos lo representará en una gráfica en función de las diferentes frecuencias. Un ejemplo de ellas son las que vemos en la Gráfica 4-16.



Gráfica 4-16 Ejemplo velocidad de partículas en función de las frecuencias

Además, para comparar varias zonas que queremos estudiar, podremos superponer una con otra y de esta manera saber cual de ellas presenta más salida de ruido. Para ello obtendremos las gráficas por zona que necesitemos, con el botón derecho cambiaremos el color de esta para que sea más fácil distinguirla. Para finalizar, volviendo al botón derecho, copiaremos la gráfica y la pegaremos todas juntas, quedando tal como queda en la Gráfica 4-17.



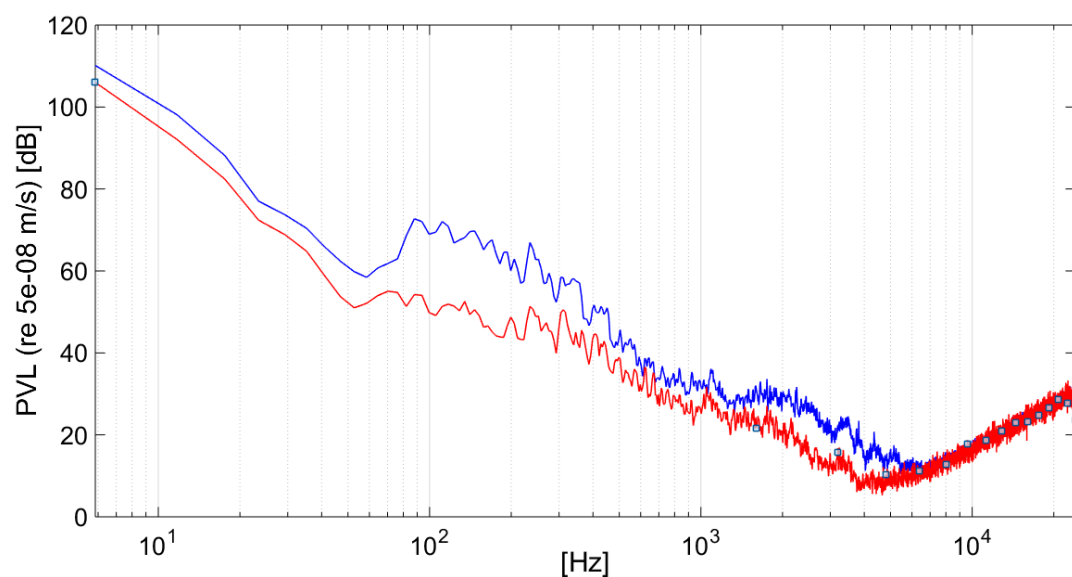
Gráfica 4-17 Superposición de resultados de diferentes áreas seleccionadas

Antes de realizar los ensayos acústicos en toda la ventana, y con intención de tener una referencia para cuando se vayan a analizar las diferentes gráficas obtenidas, se decidió llevar a cabo un experimento con una ranura de la ventana de un par de centímetros abierta. En el mapa sonoro (Figura 4-8) podremos comprobar como la zona de la apertura muestra unos valores mucho más elevados que los que marca en el cristal.

Además de las imágenes de los mapas sonoros, mostraremos una gráfica (Gráfica 4-18) en la que obtendremos los valores, en todo el rango frecuencial, de la velocidad de partículas, comparando entre una zona del cristal y toda la apertura de la ventana.



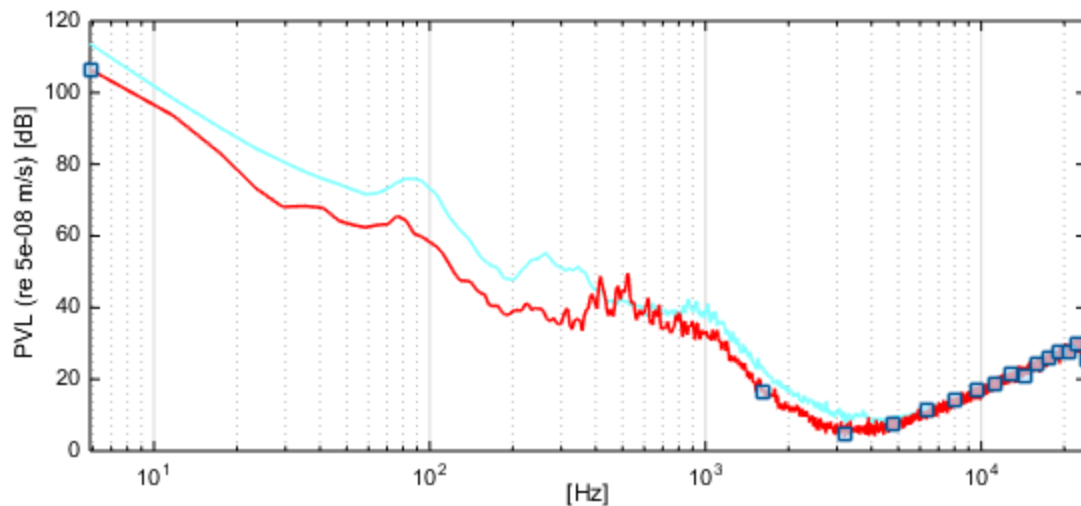
Figura 4-8 Mapa sonoro por cuadrícula (izquierda) y por punto (derecha) con apertura de ventana



Gráfica 4-18 Comparación valores de velocidad de partículas entre el cristal y la apertura de la ventana

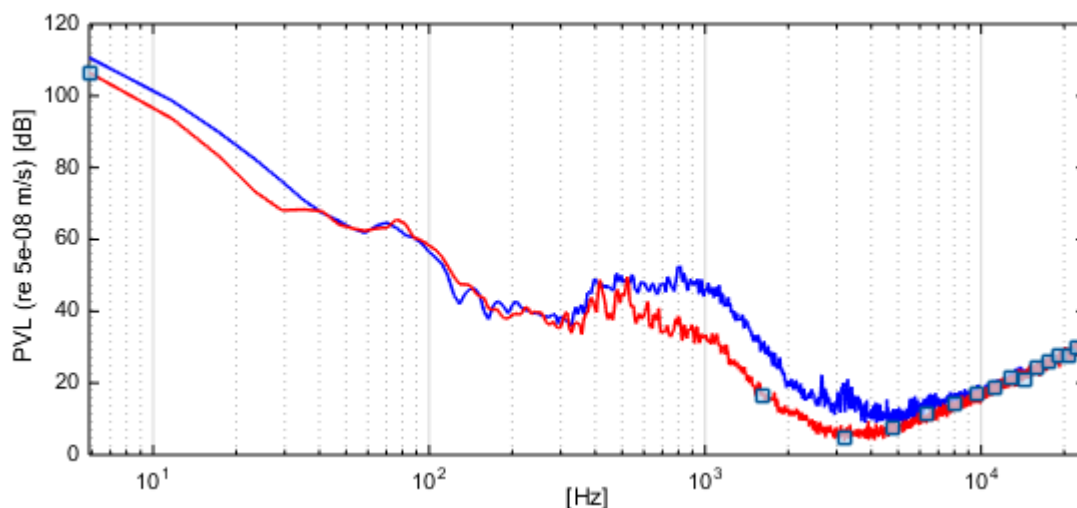
En ambas, tanto la figura como en la gráfica, se puede apreciar que dicha ranura es una zona de altas fugas acústicas, relacionada con zona de infiltraciones. A continuación, procederemos a realizar un ensayo en toda la ventana con esta cerrada.

Tras haber procesado los datos acústicos del ensayo, comenzamos comparando el área seleccionada sobre los railes inferiores de la hoja derecha de la ventana con el área del centro del cristal. El motivo es que, teóricamente, por el cristal no debería existir ninguna fuga mientras que por los railes hay más probabilidades. Efectivamente, en la Gráfica 4-19, podremos ver como los niveles de velocidad de partículas (PVL) es mayoritariamente superior en los railes que en cristal. Cuando no es así, puede ser debido a que, para esa frecuencia determinada, el material vibre y lleve a resultados que puedan dar lugar a confusión.



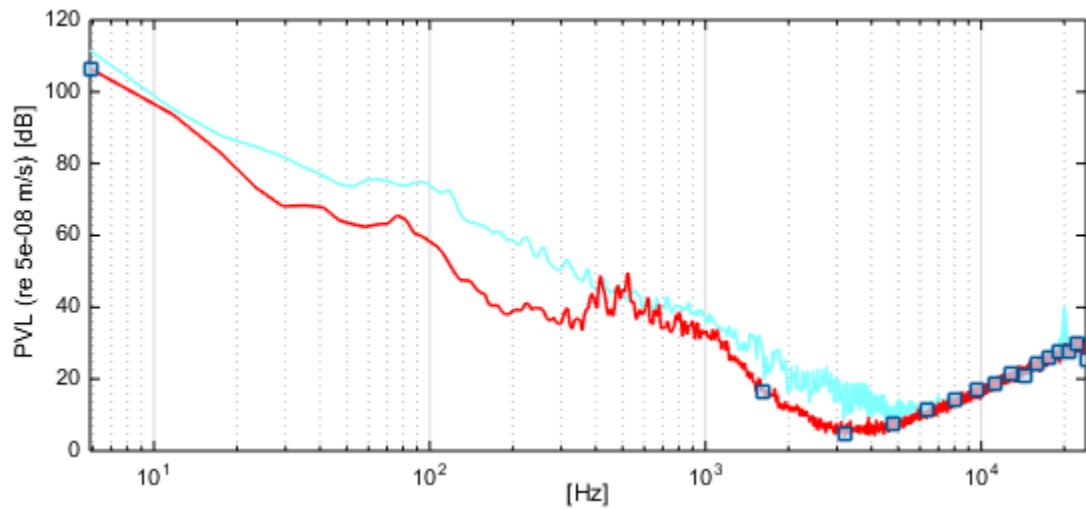
Gráfica 4-19 Comparación zona railes inferiores derecha con cristal

Luego compararemos el rail inferior con la misma zona del cristal. Para ello se obtiene otra gráfica nueva similar a la anterior (Gráfica 4-20).



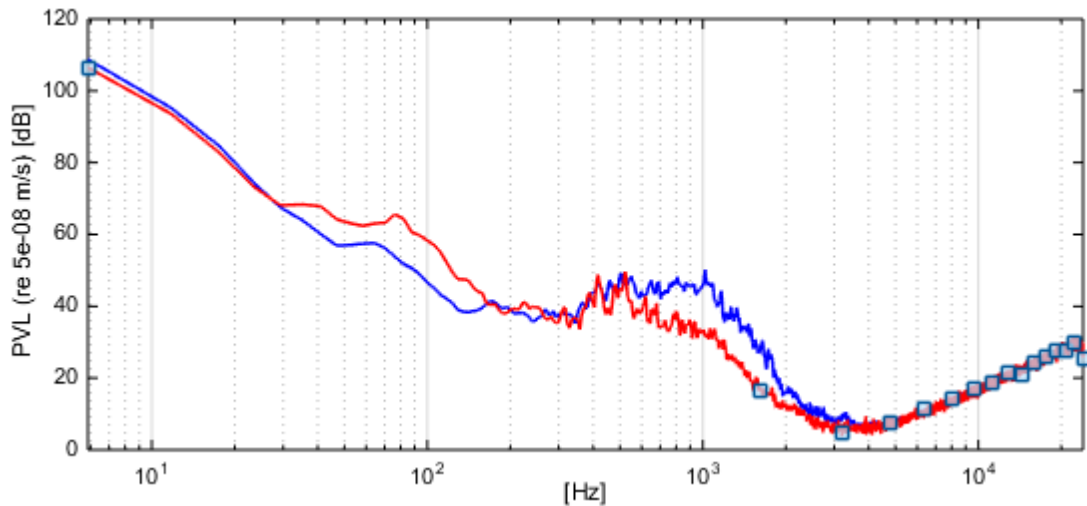
Gráfica 4-20 Comparación zona railes superior derecha con cristal

El análisis que realizaremos para la zona izquierda de la ventana seguirá el mismo patrón que el seguido anteriormente. Indicaremos, primeramente, una comparación entre railes inferiores con el cristal, luego entre los railes superiores con la misma zona de cristal, para acabar con la comparación entre ambos railes.



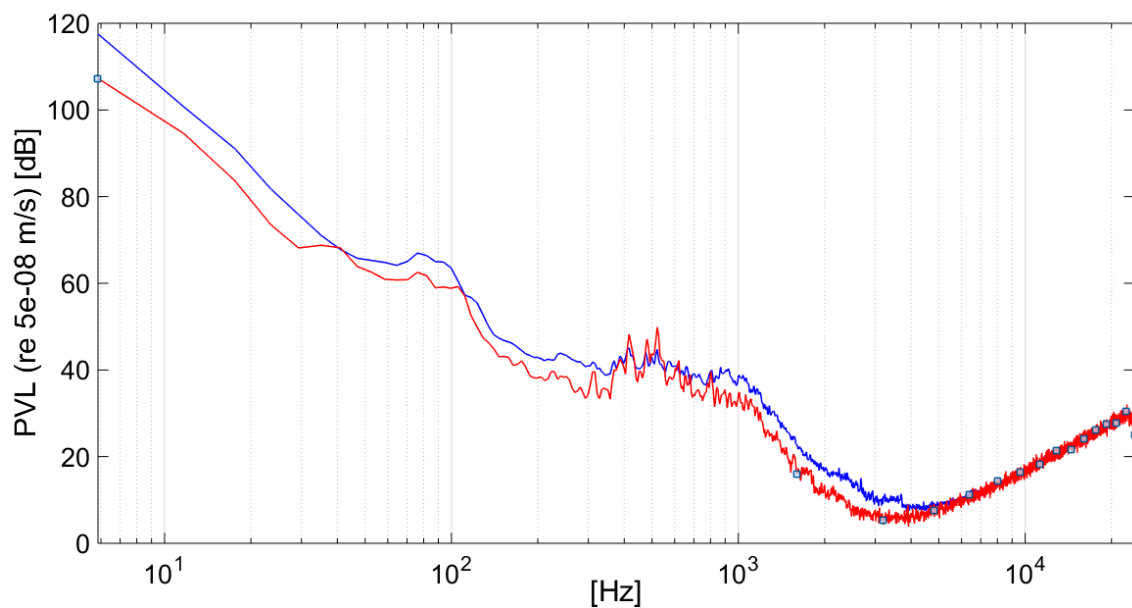
Gráfica 4-21 Comparación zona railes inferior izquierda con cristal

Para la Gráfica 4-21 vemos que se comporta de una zona parecida a la Gráfica 4-19. Lo mismo pasa para la Gráfica 4-22, que tomará valores parecidos.



Gráfica 4-22 Comparación zona railes superior izquierda con cristal

La última zona que compararemos por donde podría existir fugas acústicas, es el marco central. Sin embargo, como podemos ver en la Gráfica 4-23, La diferencia cuando comparamos dicha zona con una zona del cristal es muy pequeño, por lo que podremos deducir que el sellado que posee está en buenas condiciones no dejando pasar el aire.



Gráfica 4-23 Comparación entre marco central y cristal

Para representar mediante un mapa sonoro las zonas por las que dichas fugas son mayores, nos basaremos en el análisis de las gráficas superiores. Seleccionaremos las frecuencias donde la diferencia sea clara, para realizar un análisis de las zonas críticas más visual. En la Figura 4-9 se puede apreciar como las tonalidades de los railes tanto superiores como inferiores son mayores al resto de la imagen. A su vez, Los valores del rail superior serán superiores a aquellos del rail inferior. Esto nos puede dar a pensar que las zonas por donde existe mayores fugas acústicas (por lo que también existirá fugas de aire) son los railes tanto superiores como inferiores y, además, por los railes superiores parece ser que saldrá más aire que por los inferiores.

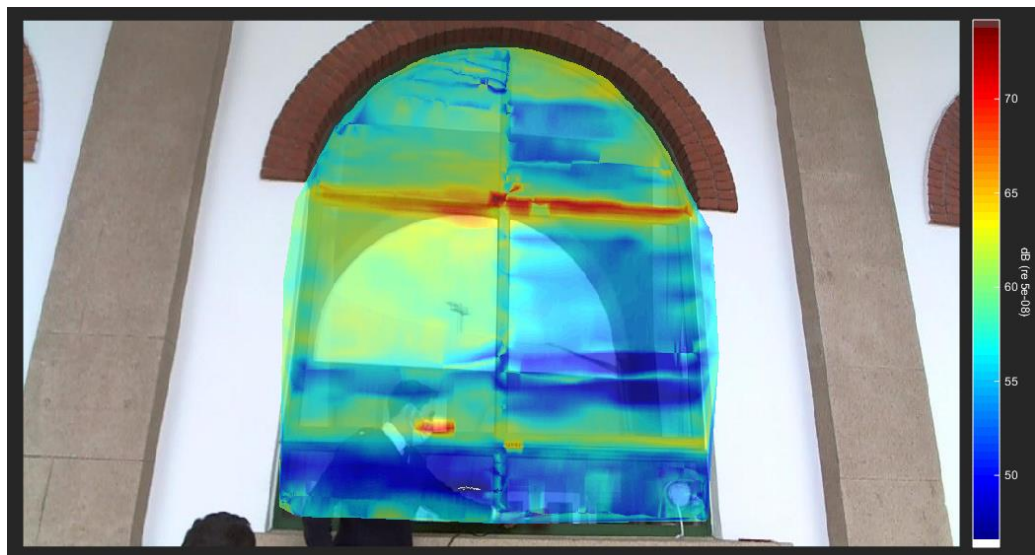


Figura 4-9 Mapa sonoro mediante método por punto.

Tras haber analizado las zonas donde el sellado es de peor calidad, y después de estudiar las formas de sellamiento, una manera sencilla de reducir las infiltraciones sería renovando los burletes de los railes de las ventanas. Quizás, con el paso del tiempo y las inclemencias meteorológicas, se hayan desgastado y necesiten una renovación.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En este proyecto se ha cuantificado las renovaciones de aire existentes de forma natural en los despachos 114 y 110 del CUD-ENM, además de las existentes a través de la ventana del despacho 114. También se pudo caracterizar mediante la ayuda de mapas y gráficas sonoras aquellas zonas por donde ocurrirán en mayor medida estos intercambios. A partir de los datos obtenidos y su posterior análisis se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre diferentes técnicas para estimar de forma experimental las infiltraciones de aire en recintos cerrados, concluyéndose que la evaluación mediante concentración de CO₂ es la más adecuada para alcanzar los objetivos de este trabajo. Asimismo, se ha comprobado que el equipo de acústica avanzada “*Scan & Paint*” presenta un cierto potencial para localizar zonas con mayores infiltraciones a través de cerramientos.
2. Se han realizado diferentes experimentos para evaluar las infiltraciones en los despachos 110 y 114 y se han obtenido los siguientes valores promedio: 0,63 y 0,65 renovaciones de aire por hora, respectivamente. Por lo que se puede concluir de que su estanqueidad es prácticamente la misma.
3. Como las renovaciones eran prácticamente las mismas, nos hemos centrado en el despacho 114 para estimar las que se producen a través de la ventana, siendo esta de 0,17 renovaciones por hora. Este valor representa casi un 30% de las renovaciones totales. Además, mediante experimentos adicionales, se concluye que en este mismo despacho un 15% de las renovaciones totales se producen por la ventana y un 55 % por el falso techo.
4. Se ha relacionado la variabilidad de los resultados obtenidos en los diferentes días con los distintos datos meteorológicos. Se ha podido concluir que las renovaciones por hora son directamente proporcionales a la temperatura exterior y a la velocidad del viento, e indirectamente proporcionales a la presión.
5. Mediante el equipo de “*Scan & Paint*” hemos obtenido mapas y gráficas sonoras de la ventana del despacho 114, con las que hemos podido identificar que, por todo el rail, tanto superior como inferior, su sellado es más deficiente. Además, se ha conseguido llegar al detalle de determinar que por el rail superior el sellado es aún peor que por el inferior.
6. De forma preliminar, se puede concluir que la metodología “*Scan & Paint*” es válida para localizar infiltraciones de aire a través de los cerramientos, si bien serían necesarios un mayor número de ensayos que realizar.

7. Tras tener conocimiento de las zonas por donde hay más infiltraciones de aire, sería conveniente modificar los elementos de sellado de los railes a unos burletes de silicona. Estos son resistentes al desgaste y a la climatología, además de ser flexibles.

5.2 Líneas Futuras

Los resultados que hemos obtenido a lo largo de este proyecto sirven como motivación para realizar las siguientes líneas futuras:

1. Realizar un estudio de la manera que afectaría a las infiltraciones de aire por la ventana habiéndose sellado, empleando diferentes materiales de distintas calidades.
2. Emplear otras técnicas estudiadas con el fin de cuantificar las renovaciones de aire por hora en los despachos, siendo una de las recomendadas la técnica de Blower Door.
3. Aumentar el número de ensayos que realizar con el equipo de acústica avanzada para corroborar las conclusiones obtenidas, así como emplearlo para nuevos elementos y descubrir nuevas capacidades.
4. Estudio más detallado de la relación existente entre las renovaciones de aire por hora y los datos meteorológicos durante la medición para poder obtener un modelo matemático y ver como afectará a las infiltraciones en un periodo a corto-medio plazo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] harvard, «Guía en 5 pasos para medir la tasa de renovación de aire en aulas,» [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [2] R. P. d. Riquelme, «Protocolo para el mantenimiento predictivo de la Flota de la Armada mediante Software de acústica avanzada,» [En línea]. [Último acceso: 04 febrero 2022].
- [3] F. J. A. Viseras, «Implementación del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM) en los motores de las lanchas de instrucción,» 2019. [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [4] J. J. T. Sierra, «Elaboración de documentación técnica para el desarrollo del alcance establecido en un protocolo para el mantenimiento de la Flota de la Armada basada en un equipo de acústica avanzada,» 2020. [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [5] D. F. Comesaña, «Evaluación y detección de pérdidas de aislamiento acústico en edificación,» [En línea]. Available: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Caceres11/Caceres11_AED003.pdf. [Último acceso: 03 febrero 2022].
- [6] Asociación Española de Tecnología Infrarroja, «Guía de la termografía infrarroja,» [En línea]. Available: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>.
- [7] o. style, «¿Qué es el certificado Passivhaus? Claves de las casas Passivhaus,» [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/casas-pasivas-y-edificios-energia-casi-nulo/que-es-el-certificado-passivhaus-casas-passivhaus.html>. [Último acceso: 2022].
- [8] Aisla, «como medir y mejorar la estanqueidad de los edificios,» [En línea]. Available: <https://www.aisla.org/mejorar-estanqueidad/>. [Último acceso: 2022].
- [9] V. ezquerra, «Test de Blower Door,» [En línea]. Available: <https://www.vanesaezquerra.com/test-de-blower-door/>. [Último acceso: 2022].
- [10] Curiosoando, «Como se propaga el ruido,» [En línea]. Available: <https://curiosoando.com/como-se-propaga-el-sonido>.

- [11] apple, «otras propiedades de las ondas,» [En línea]. Available: <https://support.apple.com/es-es/guide/mainstage/lgsife418f71/mac>. [Último acceso: 20 enero 2022].
- [12] musicalecer, «propiedades acústicas y magnitudes,» [En línea]. Available: <https://musicalecer.com/el-sonido/propiedades-acusticas-y-magnitudes/>. [Último acceso: 16 enero 2022].
- [13] I. A. N. Sevilla, «TÉCNICAS ACÚSTICAS AVANZADAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS FUNCIONALES EN EQUIPOS DINÁMICOS,» [En línea]. Available: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-FSC-Ianieto/Nieto_Sevilla_Isabel_Ainhua_TFM.pdf. [Último acceso: 3 febrero 2022].
- [14] Scan & Paint, «Scan & Paint,» [En línea]. Available: <http://www.schallmessung.com/scan-paint/>. [Último acceso: 3 febrero 2022].
- [15] microflown, «Product Leaflet SCAN & PAINT,» [En línea]. Available: <https://www.norsonic.ch/wordpress/wp-content/uploads/scan-paint-product-leaflet-en.pdf>. [Último acceso: 04 febrero 2022].
- [16] Hindawi, «Scan and Paint: theory and practice of a sound field visualization method,» [En línea]. [Último acceso: 05 febrero 2022].
- [17] D. F. Comesaña, «Exploring the properties of acoustic particle velocity sensors for near-field noise source localisation applications,» 2014. [En línea]. Available: https://eprints.soton.ac.uk/368655/1/Forum_2014_Exploring%2520the%2520properties%2520of%2520particle%2520velocity%2520sensors%2520for%2520near%2520field%2520source%2520localisation.pdf. [Último acceso: 05 febrero 2022].
- [18] D. F. Comesaña, «SCAN-BASED SOUND VISUALISATION METHODS USING SOUND PRESSURE AND PARTICLE VELOCITY,» [En línea]. [Último acceso: 05 febrero 2022].
- [19] Microflown Technologies, «Scan & Paint: Aerospace and aviation,» [En línea]. Available: <https://www.microflown.com/markets/aerospace-aviation>. [Último acceso: marzo 2022].
- [20] Microflown Technologies, «Scan & Paint: Heavy industry and machinery,» [En línea]. Available: <https://www.microflown.com/markets/industry-machinery>. [Último acceso: 2022 marzo].
- [21] Microflown Technologies, «Scan & Paint: Automotive NVH & Ground vehicles,» [En línea]. Available: <https://www.microflown.com/markets/automotive-nvh-ground-vehicles>. [Último acceso: marzo 2022].
- [22] D. F. Comesaña, «Designing the damping treatment of a vehicle body based on scanning particle velocity measurements,» [En línea]. [Último acceso: marzo 2022].
- [23] ECO VEN PLUS, «Guía completa para elegir el tipo de ventanas que puedes poner en tu casa,» [En línea]. Available: <https://ecovenplus.com/guia-tipos-de-ventanas-para-casa/>. [Último acceso: 22 febrero 2022].
- [24] MEGAGLASS, «Tipos de vidreos para ventanas,» [En línea]. Available: <https://www.megaglass.com.mx/blog/tipos-de-vidrios-ventanas/>.
- [25] KOMMERLING, «Qué es la rotura de puente térmico,» [En línea]. Available: <https://www.kommerling.es/aislamiento/rotura-de-puente-termico>.

- [26] PATTEX, «Sellar ventanas: información básica,» [En línea]. Available: <https://www.pattex.es/pagina-de-inicio/ideas/bricolaje-repara-muebles-y-objetos-pattex/como-sellar-ventanas-tu-puedes-aprenderlo.html>.
- [27] Ventanasinfo, «Burletes para ventanas correderas,» [En línea]. Available: <https://ventanasinfo.com/burletes-para-ventanas-correderas/>.
- [28] Macoglass, «Mallas y plásticos,» [En línea]. Available: <https://www.mallasyplasticos.com/plastico-invernadero/plastico-invernadero-g-800-3-anos-al-corte.html>. [Último acceso: febrero 2022].
- [29] Researchgate, «Scan and paint: theory and practice of a sound field visualization method,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/256116455_Scan_and_Paint_Theory_and_Practice_of_a_Sound_Field_Visualization_Method. [Último acceso: 30 enero 2022].
- [30] D. F. Comesaña, «Scan-based sound visualisation methods using sound pressure and particle velocity,» University of Southampton, 2014.
- [31] P. S. CALORYFRIO, «Estanqueidad de los edificios: que es, evaluación, riesgos y soluciones,» [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/aislamiento-y-humedad/estanqueidad-edificios-que-es-evaluacion-riesgos-soluciones.html>. [Último acceso: 06 febrero 2022].
- [32] APEIA, «Análisis de pérdidas energéticas por infiltraciones de aire,» [En línea]. [Último acceso: 05 febrero 2022].
- [33] P. serrano, «La importancia de los test de Blower Door al hablar de eficiencia energética y aislamiento,» [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/ahorro-energia/aislamiento-termico/importancia-test-blower-door-al-hablar-eficiencia-aislamiento.html>. [Último acceso: 2022].
- [34] Normalización española, «UNE-EN 13829:2002,» [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/N0026148>. [Último acceso: 2022].
- [35] arcgis, «Mapa del potencial de Radón de España,» [En línea]. Available: <https://www.arcgis.com/apps/SimpleViewer/index.html?appid=a3a435cfb6114e21ad03a5ac2961d8a8>. [Último acceso: 2022].
- [36] Uropean Union, «Clean Aviation,» [En línea]. Available: <https://www.clean-aviation.eu/>. [Último acceso: marzo 2022].
- [37] <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>. [En línea]. Available: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>.

