



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Sistema de evaluación y control de la renovación de aire para  
prevenir la transmisión del COVID-19 en aulas*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Jesús Ruiz Fontán  
**DIRECTORES:** Arturo González Gil  
Norberto Fernández García  
**CURSO ACADÉMICO:** 2020-2021

**Universida<sub>de</sub>Vigo**





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*Sistema de evaluación y control de la renovación de aire para  
prevenir la transmisión del COVID-19 en aulas*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

Estudios recientes indican que el virus SARS-CoV-2 podría propagarse a través de aerosoles. En espacios cerrados ocupados durante cierto tiempo por varias personas, la renovación del aire pasa a ser un aspecto clave pues, en caso de no producirse, se aumentaría la probabilidad de contagio.

Teniendo esto en cuenta, y con la intención de prevenir contagios, en el presente TFG se ha desarrollado un sistema de evaluación y control de la renovación del aire. Dicho sistema, implementado empleando tecnología del “Internet de las Cosas”, consta de dos funcionalidades bien diferenciadas. Por un lado, la herramienta analiza la renovación de aire en un espacio interior, a partir de la recopilación de datos de un sensor de la calidad del aire. El sistema presta especial atención al CO<sub>2</sub> ya que su concentración se puede relacionar con la renovación del aire. Por otro lado, la herramienta tiene cierta capacidad de actuación, a través de un ventilador y un purificador de aire. Este sistema funciona automáticamente cuando la concentración del CO<sub>2</sub> supera cierto umbral, calculado tomando como base referencias del estado del arte y datos del aula.

El sistema se ha instalado en un aula de la ENM, lo que ha permitido analizar la evolución de la calidad del aire.

## **PALABRAS CLAVE**

COVID-19, Aerosoles, CO<sub>2</sub>, Sensor de calidad del aire, Renovación del aire



# AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a varias personas el apoyo recibido durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, en primer lugar, a mis tutores Arturo y Norberto por toda la motivación, la asistencia profesional y sobre todo por guiarme a lo largo de este proyecto.

Por supuesto, dar las gracias a mis padres, Javier y María por estar ahí siempre, apoyarme en las malas y en las buenas, y confiar en mí. De la misma manera, a mis hermanos por ser como son y no faltarme nunca, Javier, Elisa y Borjita.

Y, por último, y no menos importante, mis compañeros de la promoción 421-151, por el apoyo en el día a día, los momentos compartidos y la gran amistad que hemos forjado.





## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	6
1.1 Introducción .....	6
1.2 Justificación .....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.4 Metodología .....	8
2 Estado del arte .....	11
2.1 La Calidad del Aire Interior .....	11
2.1.1 Factores que afectan a la calidad del aire interior.....	11
2.1.2 Métodos de control del aire interior.....	11
2.1.3 Los principales contaminantes del aire interior .....	12
2.1.4 Síndrome de Edificio Enfermo (SEE) .....	13
2.1.5 Normativa en vigor relativa a la calidad del aire interior .....	13
2.2 Transmisión del Virus SARS-CoV-2.....	15
2.2.1 Renovación del aire y evitar el contagio del COVID-19.....	17
2.3 Equipamiento para el estudio y control de la calidad del aire.....	20
2.3.1 Sensores de la calidad del aire .....	20
2.3.2 Purificadores de aire .....	21
2.3.3 Sistemas de ventilación mecánica .....	23
2.4 Internet of Things ( <i>IoT</i> ).....	24
2.4.1 Raspberry Pi versión 3B y LED RGB .....	25
2.4.2 Lenguaje de Programación Python.....	27
2.5 Estudios similares en la actualidad .....	28
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Elección del aula y características .....	31
3.2 Evaluación de la renovación del aire y cálculo de valores umbrales para el CO <sub>2</sub> .....	34
3.3 Desarrollo del sistema de evaluación y control de la renovación del aire .....	40
4 Resultados .....	45
4.1 Ocupación del aula.....	45
4.2 Análisis de la concentración de CO <sub>2</sub> .....	46
4.2.1 Comparación de los datos de CO <sub>2</sub> con los valores umbrales según el RITE.....	49

4.3 Comparación de otros parámetros con los valores umbrales establecidos .....	51
4.3.1 Estudio de la temperatura y la humedad relativa.....	51
4.3.1 Estudio de los compuestos orgánicos volátiles (VOC).....	52
4.3.2 Estudio del radón .....	53
5 Conclusiones y líneas futuras .....	56
5.1 Conclusiones .....	56
5.2 Líneas futuras .....	57
6 Bibliografía.....	59
Anexo I: Código implementado para el sistema desarrollado.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Vías de transmisión del SARS-CoV-2 [10].....	15
Figura 2-2 Expansión de los aerosoles en el tiempo [9].....	16
Figura 2-3 Portador del virus y la cantidad de personal contagiado sin medidas [9].....	16
Figura 2-4 Uso de mascarillas para disminuir contagios [9].....	17
Figura 2-5 Ventilación y reducción de tiempo minimiza los contagios [9] .....	17
Figura 2-6 Reducción de la emisión del SARS-CoV-2 y su exposición [23] .....	18
Figura 2-7 Renovación del aire [25].....	18
Figura 2-8 Ventilación natural [26].....	19
Figura 2-9 Ventilación cruzada natural [26] .....	19
Figura 2-10 Airthings Wave Plus .....	20
Figura 2-11 Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H con filtro HEPA .....	22
Figura 2-12 Filtros del Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H [33] .....	23
Figura 2-13 Ventilación con impulsión [35] .....	24
Figura 2-14 Extractor tubular MU TU 6 [35].....	24
Figura 2-15 Concepto de IoT .....	25
Figura 2-16 Raspberry Pi 3B.....	26
Figura 2-17 Colores de un LED RGB [42]. .....	27
Figura 3-1 Aula escogida en el Patio de Aulas de la ENM .....	31
Figura 3-2 Distribución en planta del aula 10 .....	32
Figura 3-3 Largo del aula .....	32
Figura 3-4 Ancho y altura del aula .....	33
Figura 3-5 Telémetro Bosch GLM 100 C profesional .....	33
Figura 3-6 Valores del metabolismo equivalente [50] .....	35
Figura 3-7 Generación de CO <sub>2</sub> a partir del met y edad [50].....	36
Figura 3-8 Ventilador colocado en frente de la ventana.....	38
Figura 3-9 Medidas correctoras para renovar el aire.....	39
Figura 3-10 Instrucciones a partir del código de colores .....	40
Figura 3-11 Enchufe inteligente TP-Links HS 100 encendido y conectado .....	41
Figura 3-12 Conexión con el enchufe inteligente a partir del comando “kasa” .....	42
Figura 3-13 Sistema en funcionamiento con el LED de color azul.....	43
Figura 4-1 Distribución del personal en la clase .....	46
Figura 4-2 Concentración del CO <sub>2</sub> desde el 22 de febrero al 9 de marzo.....	47
Figura 4-3 Concentración del CO <sub>2</sub> del 22 al 27 de febrero .....	48
Figura 4-4 Concentración del CO <sub>2</sub> el día 25 de febrero .....	49

Figura 4-5 Histograma de la concentración del CO <sub>2</sub> .....	50
Figura 4-6 Humedad relativa y temperatura en el aula del 22 de febrero al 9 de marzo .....	51
Figura 4-7 Humedad relativa y temperatura en Lourizán .....	52
Figura 4-8 Valor VOC del 22 de febrero al 9 de marzo .....	53
Figura 4-9 Concentración del radón del 22 de febrero al 9 de marzo .....	54

## Índice de Tablas

Tabla 2-1 Principales contaminantes del aire [11] .....	12
Tabla 2-2 Características principales Airthings Wave Plus [29] .....	21
Tabla 2-3 Características del Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H .....	22
Tabla 2-4 Características Raspberry Pi [41].....	26
Tabla 2-5 Python características [44]. .....	28
Tabla 3-1 Características del telémetro Bosch GLM 100 C profesional [47] .....	34
Tabla 3-2 Métodos para medir la tasa de ventilación del aire. ....	34
Tabla 3-3 Características principales del enchufe inteligente TP-Links HS 100 [56] .....	41
Tabla 4-1 Concentración de CO <sub>2</sub> en los locales. IT 1.1.4.2.2 [22].....	50

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El concepto de calidad del aire se puede comprender a partir de la siguiente definición:

*“La calidad de Ambiente Interior es el conjunto de condiciones ambientales de los espacios interiores, adecuadas al usuario y la actividad, definidas por los niveles de contaminación química, microbiológica y por los valores de los factores físicos.” [1].*

Los principales factores ambientales que afectan a este concepto, la calidad del ambiente interior, son: [2].

- El ambiente térmico
- La calidad del aire interior
- El ruido y las vibraciones ambientales
- La iluminación

Es muy determinante para este trabajo de fin de grado, la calidad del aire interior:

*“La calidad del aire interior en un edificio depende de una serie de variables, como la calidad del aire del exterior, el diseño del sistema de ventilación y acondicionamiento del aire, las condiciones en que opera y se mantiene este sistema, la división en compartimentos del edificio y las fuentes interiores de contaminantes y su magnitud. En general, puede afirmarse que los defectos más frecuentes son consecuencia de una ventilación inadecuada, de la contaminación generada en el interior y de la procedente del exterior.” [3].*

La Calidad del Aire siempre ha supuesto un problema, pero no se aplicaron medidas correctoras hasta que se estudió con detalle y se supo cómo afrontar, se reconoce como un factor medioambiental importante desde la revolución de la higiene, alrededor de 1850 [4].

La calidad del aire en compartimentos u otros espacios cerrados, se puede ver afectada por la falta de renovación del aire y los posibles contaminantes que puedan encontrarse, además nos encontramos más del 90% del tiempo expuestos a aire interior, ya sea en casa o en el trabajo [4].

Además, la EPA (*Environmental Protection Agency*) aproxima que el 72% de la exposición a químicos en humanos ocurre en interiores. Por consiguiente, se dará gran importancia a la ventilación y otros sistemas de climatización en este estudio [4].

De hecho, la mala calidad del aire puede llegar a ser causa de muerte, según la OMS mueren cerca de 7 millones de personas al año en todo el mundo por inhalación de aire contaminado (este dato

involucra la contaminación de aire interior y exterior). Pero hoy por hoy, se ha disparado su importancia con el nuevo virus SARS-CoV-2 [5].

Este virus surgido en Wuhan en diciembre del 2019 es muy infeccioso y se ha propagado por todo el mundo en cuestión de meses, estimándose a día de hoy unos 115 millones de casos [6]. Esta enfermedad fue considerada como una pandemia por la OMS el 11 de marzo de 2020. Y afecta gravemente a las personas de mayor edad o personas que padecen previamente algunas enfermedades. Este virus se propaga a gran velocidad a partir de aerosoles en espacios interiores [7].

Los aerosoles son partículas diminutas de tamaño inferior a 100 micras que se emiten al respirar, hablar, toser y cantar. Estas se quedan flotando en el aire por un periodo de tiempo variable, que depende de diferentes factores, pero que puede llegar a 3 horas [8].

A día de hoy, se sabe que este virus aumenta su ritmo de propagación en espacios cerrados, por ejemplo, reuniones, clases, conciertos u otros. Este es un problema que hay que estudiar y solventar, ya que por esta razón y su facilidad de propagación se han colapsado muchos hospitales y mucha gente no ha podido ser atendida. Esto ha desencadenado una etapa complicada para el mundo entero, donde mucha gente ha sufrido pérdidas cercanas, un simple virus ha traído tiempos de incertidumbre y preocupación global [9].

Para mejorar la calidad del aire se pueden usar diversos aparatos, la función de estos es renovar el aire para que las partículas nocivas y el SARS-CoV-2 no nos afecten. Algunos ejemplos son la ventilación natural, los monitores de la calidad del aire, los purificadores de aire portátil con filtros, los aparatos de ventilación y otros [8].

Por otro lado, reseñar que, aunque en este ámbito las tecnologías están muy avanzadas, el problema global es que la gente no está concienciada de la realidad del problema ni de la existencia de estas soluciones. En primer lugar, la sociedad no sabe lo perjudicial que puede ser el aire interior si es de mala calidad y además no saben cómo controlarla o, si fuese necesario, mejorarla [10].

Por otra parte, dentro del desconocimiento general también podemos citar las vías de propagación del COVID-19, en donde la más determinante es a través de los aerosoles. Para reducir esta vía de contagio es muy importante renovar el aire de un sitio cerrado, sea ventilando con aire exterior, o en su defecto, utilizando filtros de alta eficiencia [10].

## 1.2 Justificación

Según estudios recientes [10] una de las vías contagiosas dominantes del SARS-CoV-2 es a partir de los aerosoles en espacios interiores, por eso es crítico el estudio de la calidad del aire interior y el uso de un equipamiento de monitorización y control para mejorarla; así conseguiríamos no propagar el virus o al menos disminuir al máximo la posibilidad de expansión.

La Escuela Naval Militar para minimizar la probabilidad de contagios del COVID-19 en las aulas, ha establecido unas pautas a seguir; en primer lugar, se ha reducido el personal por clase para poder aumentar la distancia de seguridad entre los alumnos; además es obligatoria la ventilación del aula, manteniendo tanto la puerta como las ventanas abiertas el mayor periodo de tiempo posible; limpiar con gel hidroalcohólico las mesas y por último resulta indispensable el uso de la mascarilla.

Cabe destacar que algunas aulas no permiten una ventilación adecuada, ya que tienen las ventanas bloqueadas o no tienen las suficientes, para ventilarlas adecuadamente, además la distribución en planta no siempre es la mejor.

Aparte de la ineficiencia de la ventilación del aire interior, el mantener las ventanas abiertas en invierno impacta en la temperatura y en la humedad relativa, por lo que las condiciones de confort no serían las requeridas y no se cumpliría el objetivo de una buena calidad del aire y unas condiciones ambientales favorables.

Por estas razones, proponemos un sistema de medición y control de la renovación del aire de las aulas de la ENM, ya que no cuenta con ninguno, para revisar y mejorar las condiciones.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de un sistema de evaluación y control de la renovación del aire para uso en las aulas de la ENM basado en la medición de la concentración de CO<sub>2</sub>. Para lograr este objetivo es necesario alcanzar otros objetivos secundarios, de gran importancia, que son los siguientes:

- Estudio de los fundamentos de la calidad del aire interior y todos sus factores condicionantes, además de los mecanismos de medición y control de este concepto.
- Investigación de las vías de transmisión del COVID-19 y los dispositivos que previenen la transmisión del virus, en particular los relacionados con la renovación del aire.
- Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de calidad del aire que nos permita medir diferentes parámetros, destacando por su importancia el CO<sub>2</sub>. El sistema estará basado en el Internet de las Cosas y un sensor comercial de la calidad del aire el cual solo refleja los datos del momento.
- Implementar un sistema de actuación para minimizar el riesgo de contagio del virus SARS-CoV-2 en aulas, mejorando la renovación del aire con el apoyo del IoT y un enchufe inteligente, para activar medidas correctivas.
- Evaluar la renovación del aire en un aula de la ENM, de manera indirecta mediante el nivel de CO<sub>2</sub> a partir de las herramientas elaboradas.
- Reflejar y evaluar los demás parámetros de la calidad del aire obtenidos con nuestro sistema.

### 1.4 Metodología

Para llevar a cabo los objetivos de este TFG en primer lugar se ha realizado un estudio de la bibliografía del trabajo, comprendiendo los principales temas del estudio, entre estos la calidad del aire interior y las vías de transmisión del COVID-19 además de todos los factores que puedan afectar a estos tópicos. Toda la información que conforma la base conceptual de este proyecto se verá reflejada en el capítulo 2 el Estado del arte.

A continuación, desarrollamos la herramienta para acceder a los datos del monitor de la calidad del aire, conectándolo a un ordenador de placa única (*SBC, Single Board Computer*) Raspberry Pi a través de Bluetooth, esta permite la lectura de los datos y su evaluación, y así valorar la situación y tomar las decisiones que se precisen. Al mismo tiempo seleccionamos un aula dentro de la ENM, en la cual trabajaremos y mediremos los diferentes parámetros de la calidad del aire. El estudio del aula y la herramienta implementada se muestran en el capítulo 3 el Desarrollo del TFG.

Para la consideración de los valores obtenidos establecemos unos valores umbrales de CO<sub>2</sub>, ya que lo relacionamos con la limpieza del aire y al mismo tiempo del virus SARS-CoV-2. Para establecer estos valores nos basamos en dos guías de reconocido valor con fundamento científico e internacional, concretando, las guías de CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*) y de la Universidad de Harvard, este apartado se describirá también en el capítulo 3, el Desarrollo del TFG.

Por otra parte en el Desarrollo del TFG, describimos los detalles de la herramienta de control, la cual busca mejorar la renovación del aire. En primer lugar, muestra la condición dada en el momento a partir de un LED RGB conectado a la Raspberry Pi que a partir de un código de colores mostrará el nivel del CO<sub>2</sub>. Y, por consiguiente, se llevarán a cabo acciones correctivas en las situaciones que sean requeridas,



empezando por ventilación natural y si es necesario se recurre a ventilación mecánica y filtración, en el código de colores establecemos unas instrucciones con el modo de actuación para cada situación.

En el capítulo de Resultados realizaremos un análisis del funcionamiento de las herramientas y los datos obtenidos, nos apoyaremos en Excel para representarlos gráficamente y poder estudiarlos con una visión más detallada.

cerraremos el trabajo con nuestras deducciones e ideas obtenidas tras obtener los resultados del trabajo, además de proponer mejoras para llevar a cabo en un futuro.

El último capítulo estará reservado para referenciar las fuentes utilizadas en el proceso de este estudio, la Bibliografía.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 La Calidad del Aire Interior

La mejora de la calidad de vida es uno de los retos que buscamos los seres humanos. El aire es esencial para que exista la vida, principalmente para que los organismos vivos puedan respirar. Las mejoras ambientales son clave para reducir los efectos denigrantes en la salud humana, entre estas cabe destacar la calidad del aire, ya que estamos expuestos a él en todo momento [10].

#### 2.1.1 Factores que afectan a la calidad del aire interior

Las deficiencias más frecuentes en la calidad del aire se deben a los siguientes factores: [11].

- Una ventilación inadecuada: Generalmente es debida a:
  - Insuficiente aire fresco, debido a una elevada recirculación del aire.
  - Una mala distribución de los sistemas de ventilación
  - Una incorrecta filtración del aire debido a un deficiente mantenimiento.
  - Temperatura del aire y humedad relativa extremas.
- La contaminación interior: Originaria del personal, del trabajo, productos químicos inadecuados y gases de combustión.
- La contaminación exterior: Entrada en el edificio de humos de los medios de transporte, gases de calderas y aire contaminado previamente expulsado al exterior que vuelve a entrar a través de los aires acondicionados.
- La contaminación biológica: Es aquella que se produce por los diferentes microorganismos, y que en determinados casos puede causar una situación sanitaria complicada.
- La contaminación debida a materiales empleados en la construcción: La utilización de materiales inadecuados debido a sus características contaminantes, así como materiales con defectos técnicos.

#### 2.1.2 Métodos de control del aire interior

Para que la calidad del aire en un espacio cerrado sea óptima se debe someter a unos tratamientos, estos lograrán mejorarla en gran medida, aun así puede llegar a valores nocivos, entonces se recurriría a la Renovación del aire.

Estos procesos se basan en los métodos tradicionales de la higiene industrial: [11].

- Eliminar la fuente o sustituirla: Si se puede identificar el foco contaminante, se elimina. Si esto no fuese posible se procurará sustituir por otro con menor potencial contaminante. Es decir, no utilizar materiales que puedan liberar contaminación y si no es posible que contaminen lo menos posible.
- Mitigar la acción de la fuente: Disminuir la contaminación de algunos materiales a través de barreras, como pinturas.
- Diluir el aire interior con un aire menos contaminado: Disminuir la concentración de los contaminantes presentes mediante su dilución en un volumen de aire considerablemente mayor es un método habitual.
- Eliminar los contaminantes presentes en el aire: Diferentes métodos para eliminar o minimizar la concentración, entre estos, neutralización o filtración.
- Comprobar la eficacia de la ventilación: Se deben realizar pruebas de seguimiento de la ventilación en diferentes puntos para asegurar el correcto funcionamiento.
- Controlar las diferencias de presión: Son la causa de los movimientos de aire de una zona a otra, así transportando los contaminantes. Se deben tomar medidas para equilibrar las presiones en distintos puntos del edificio. Hay que tener en cuenta, que en algunos casos se disponen de zonas a diferente presión para controlar los contaminantes.

### 2.1.3 Los principales contaminantes del aire interior

Muchas personas pasan la mayor proporción de sus vidas en espacios interiores, las fuentes de contaminación internas representan la mayor parte de la exposición personal a ciertas sustancias. En la Tabla 2-1 se muestran los diferentes tipos de materiales y elementos contaminantes [12].

Productos de combustión	Varios	Materiales construcción	Productos de consumo
NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	Fibra de vidrio	Pinturas
NO	Pb	Asbestos	Barnices
CO <sub>2</sub>	Fe	Compuestos orgánicos	Plásticos
CO	Mn		Colas y cementos
SO <sub>2</sub>	Complejos AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fibras textiles
Humo de tabaco	Radón		Pesticidas
Orgánicos			Disolventes

**Tabla 2-1 Principales contaminantes del aire [11]**

A continuación, se definen los contaminantes más frecuentes y los que mediremos en el desarrollo de este TFG [12]:

- El humo del tabaco: Puede empeorar los problemas respiratorios, irritar los ojos, causar dolores de cabeza y tos. Es un fuerte potenciador del efecto cancerígeno, en particular del cáncer de pulmón.

- Bacterias, hongos y mohos: Crecen en el interior cuando la humedad es elevada, pueden causar dificultades respiratorias y asma, alergias y afectar al sistema inmunológico.
- Compuestos orgánicos volátiles: Presentes en muchos productos del hogar como maderas aglomeradas, pinturas, aislantes, adhesivos, etc. Son desde irritantes a cancerígenos, dañando ciertos órganos.
- El radón: Es un gas radiactivo que emana de subsuelos graníticos y puede acumularse en los edificios, aumentando el riesgo de cáncer de pulmón de sus ocupantes.
- Contaminantes atmosféricos del exterior: Se pueden hallar en el interior, según la ubicación del espacio cerrado, por ejemplo, si está cerca de zonas industriales o zonas de gran densidad de tráfico. Entre estos encontramos partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno, ozono y óxidos de azufre.
- El dióxido de carbono: Es un gas no tóxico que es producido por la exhalación humana. Cuando en un espacio interior sobrepasa ciertos límites es conveniente ventilar ya que la concentración de oxígeno es baja y provoca asfixia.
- El amianto o asbesto: Material usado para la construcción, debido al deterioro de edificios pasa al ambiente y puede ser inhalado. Su inhalación puede llegar a provocar cáncer de pulmón.

Todos estos factores afectan a los edificios y a sus condiciones para vivir, si no se logran solucionar, el edificio puede llegar a ser denominado edificio enfermo.

#### *2.1.4 Síndrome de Edificio Enfermo (SEE)*

*“Se conoce como síndrome del edificio enfermo a un conjunto de sintomatologías y enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en los espacios cerrados, pero que también se puede ver agravado por las condiciones de estrés propias del trabajo, el uso de materiales sintéticos o la electricidad estática. Curiosamente, con frecuencia es uno de los efectos de los llamados edificios inteligentes o muy tecnificados.”*, Laura Mundemurra Benedetti [13].

La OMS señala algunas características iniciales que suelen derivar en el SEE, estas son [12]:

- Ventilación mecánica generalmente común a todo el edificio situada en lugares inadecuados.
- Un edificio con una construcción de mala calidad.
- Recubrimiento con material textil.
- Edificios herméticos.
- Ahorro energético y ambiente térmico homogéneo que penalicen en exceso la posible ventilación.

En conclusión, un edificio con un mal diseño, incluyendo ventilación y climatización por un lado y por otro la construcción y sus materiales, provocará de forma probable que el edificio sufra el síndrome.

Según el tiempo que se encuentre afectado el edificio se reconocen dos tipos:

- Edificios temporalmente enfermos: Nuevos o de reciente remodelación con síntomas, pero tras 6 meses aproximadamente estos desaparecen.
- Edificios permanentemente enfermos: Persisten durante años enfermos, por muchas soluciones que se impongan, los síntomas persisten.

#### *2.1.5 Normativa en vigor relativa a la calidad del aire interior*

En España no existe una legislación concreta sobre el tema. Sin embargo, muchas normas se refieren a la calidad del aire interior. Seguidamente se presentará la normativa vigente a nivel nacional e internacional con respecto a la calidad del aire interior [11].

**Ley 34/2007** Esta ley actualiza la base legal para los desarrollos relacionados con la evaluación y la gestión de la calidad del aire en España, y tiene como fin último el de alcanzar unos niveles óptimos de calidad del aire para evitar, prevenir o reducir riesgos o efectos negativos sobre la salud humana, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza [14].

**Real Decreto 102/2011** Se aprueba con la finalidad de evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza [14].

**Directiva 1008/50/CE** Introduce regulaciones para nuevos contaminantes, como las partículas de tamaño inferior a 2,5 µm, así como nuevos requisitos en cuanto a la evaluación y los objetivos de calidad del aire, teniendo en cuenta las normas, directrices y los programas correspondientes a la Organización Mundial de la Salud [15].

**Directiva 2015/1480/CE** Establece las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente [15].

**Decisión 2011/850/UE** Relativa al intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad del aire ambiente a la Comisión europea, establece que los Estados miembros facilitarán la información sobre el sistema de evaluación que debe aplicarse en el año civil siguiente respecto a cada contaminante en zonas y aglomeraciones [15].

**UNE 171330-2** Define la Calidad Ambiental en Interiores como las condiciones ambientales de los espacios interiores, adecuadas al usuario y la actividad, definidas por los niveles de contaminación química, microbiológica y por los valores de los factores físicos. Se excluye del campo de aplicación de esta definición a los recintos destinados a uso industrial y/o agrícola [16].

La revisión de calidad la realiza un técnico superior en calidad de ambientes interiores. Si está conforme con las normas la AENOR ofrece un certificado. Esta es la norma más importante con respecto al trabajo ya que controla las concentraciones del CO<sub>2</sub> y de las partículas en suspensión [16].

**UNE-EN 13779:2008** Uso de ventilación en edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos.

Esta norma se aplica a edificios no residenciales, pero con ocupación humana, como oficinas, clases, hospitales, etc.

Además esta norma contiene en sus anexos finales las directrices a seguir para la selección de filtros y los diferentes tipos que hay [17].

**UNE 171210:2008** Aplicar buenas prácticas de desinfección, desinsectación y desratización [18].

**UNE 171212** Calidad de aire interior: buenas prácticas en las operaciones de limpieza. Debe obtener buenos resultados ya sea desde el punto de vista de la eliminación de la suciedad, como del resultado final de la superficie tratada y su contaminación medioambiental [19].

**UNE 100012** Higienización de sistemas de climatización, tiene como objeto la valoración de sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire para que los propietarios dispongan de una guía completa de actuación [20].

**CERTIFICADO FEDECAI COVID-SAFE** Certificado que refleja que se han tomado todas las medidas técnicas recomendadas por la mayoría de las entidades del sector a la hora de ayudar a minimizar las infecciones [21].

**Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)**, en particular la **IT 1.1.4.2** Exigencia de calidad del aire interior [22].

## 2.2 Transmisión del Virus SARS-CoV-2

Información basada en un informe científico sobre las posibles vías de transmisión SARS-CoV-2, apoyado en el último informe de la OMS y destinado a mejorar las precauciones para prevenir la infección. Este documento reconoce las siguientes vías como posibles [10]:

- Gotículas o gotas de Flugge de gran tamaño: Se emiten al hablar, cantar, toser, estornudar y respirar, y a menos de 1 metro pueden impactar contra el rostro facial y contagiar.
- Aerosoles: Son partículas más pequeñas que se emiten conjuntamente con las gotículas y permanecen en suspensión en el aire debido a su diminuto tamaño. Contagian por inhalación en diferentes partes del sistema respiratorio. Facilitan una rápida propagación del virus ya que se transmite por cercanía o compartiendo aire en espacios cerrados. La OMS indica la necesidad de ventilar de forma adecuada para evitar esta vía. Comparadas con las gotículas son muy pequeñas, como podemos ver en la Figura 2-1 donde las gotículas son azules y los aerosoles de mayor tamaño son verdes.
- Contacto directo: Contacto físico con una persona infectada, este se produce habitualmente a través de las manos.
- Contacto indirecto o fómite: A través de un objeto que ha sido tocado por una persona infectada, y que posteriormente toca otra persona. Se considera una vía de propagación minoritaria, ya que no es tan simple la transmisión a través de objetos. Además, un estudio de Reino Unido, comparando personas que se lavaban las manos con gran frecuencia con otras que no, encontró una reducción de la transmisión del 16%.

Las siguientes vías de transmisión son poco significativas, pero hay que considerarlas, porque toda precaución es necesaria:

- Heces y orina: Se han detectado trazas del ARN del SARS-CoV-2 en heces y orina de algunos infectados.
- Sangre: La transmisión sanguínea es incierta ya que no se han reportado casos, pero se ha detectado ARN del virus.
- De madre a hijo: No hay evidencia de transmisión, pero se han encontrado fragmentos de ARN en muestras de leche materna de madres infectadas. De todas formas, la OMS recomienda que continúen amamantando ya que los beneficios que transmite a través de nutrientes y anticuerpos son muy superiores a los riesgos.
- De animales a personas: Está demostrado que los seres humanos pueden contagiar el virus a otros mamíferos, incluidos perros, gatos y animales de granja. Pero no está clara la eficacia y frecuencia de estas transmisiones y si los mamíferos son un riesgo importante para los humanos.

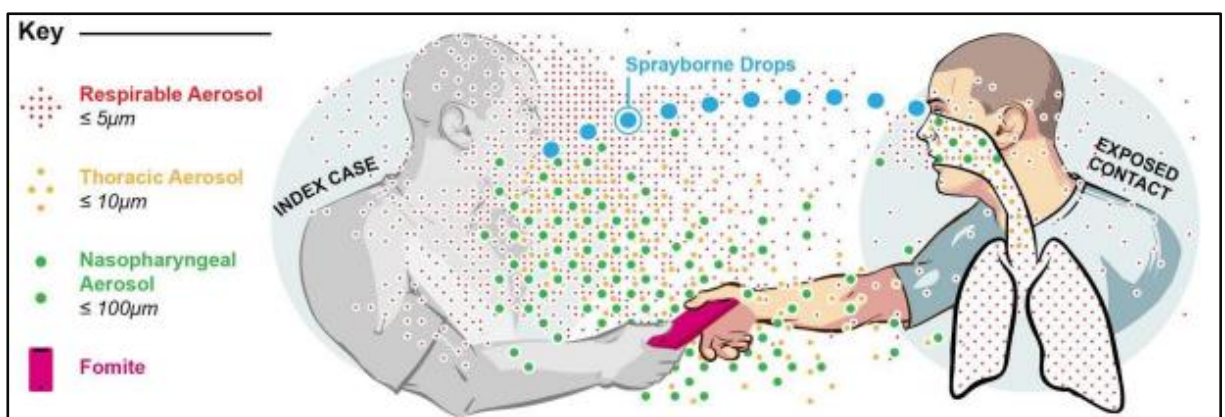


Figura 2-1 Vías de transmisión del SARS-CoV-2 [10]

En la Figura 2-2 los puntos naranjas representan los aerosoles, como podemos observar gritando y cantando se emiten aproximadamente cincuenta veces más aerosoles que en silencio.

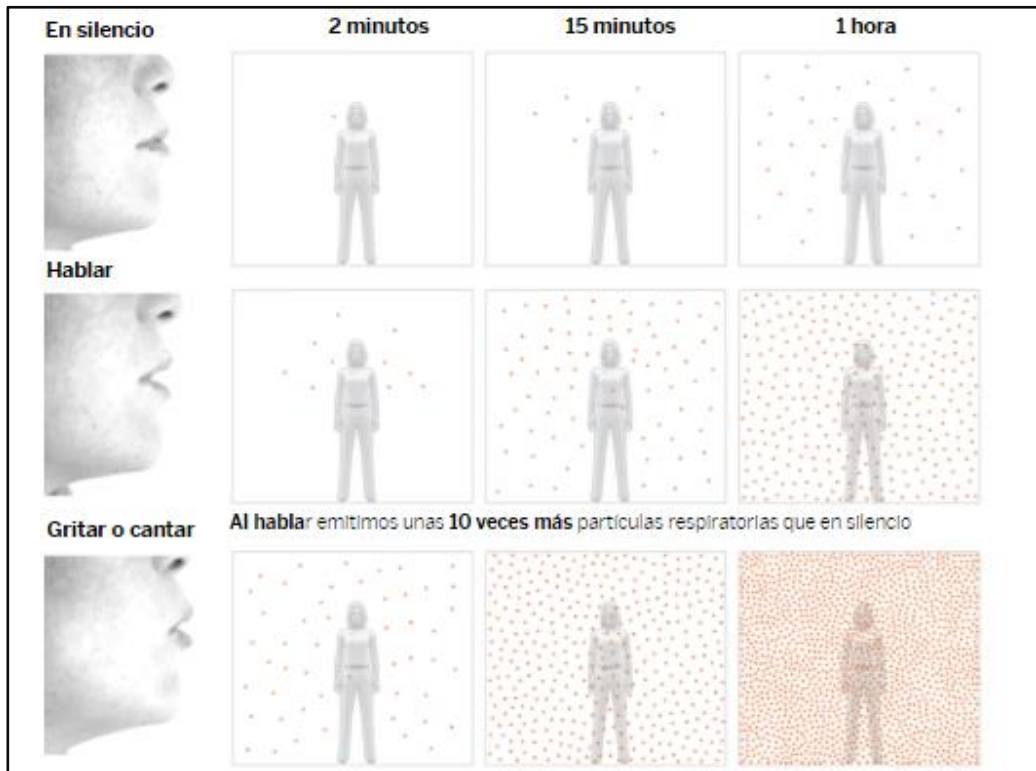


Figura 2-2 Expansión de los aerosoles en el tiempo [9]

A continuación, se mostrará la propagación por aerosoles, al tomar medidas y al no, a partir de imágenes. Si no se toma ningún tipo de medida protectora podemos observar en la Figura 2-3 que el virus se propaga con gran celeridad y contagia a casi el total del aforo.

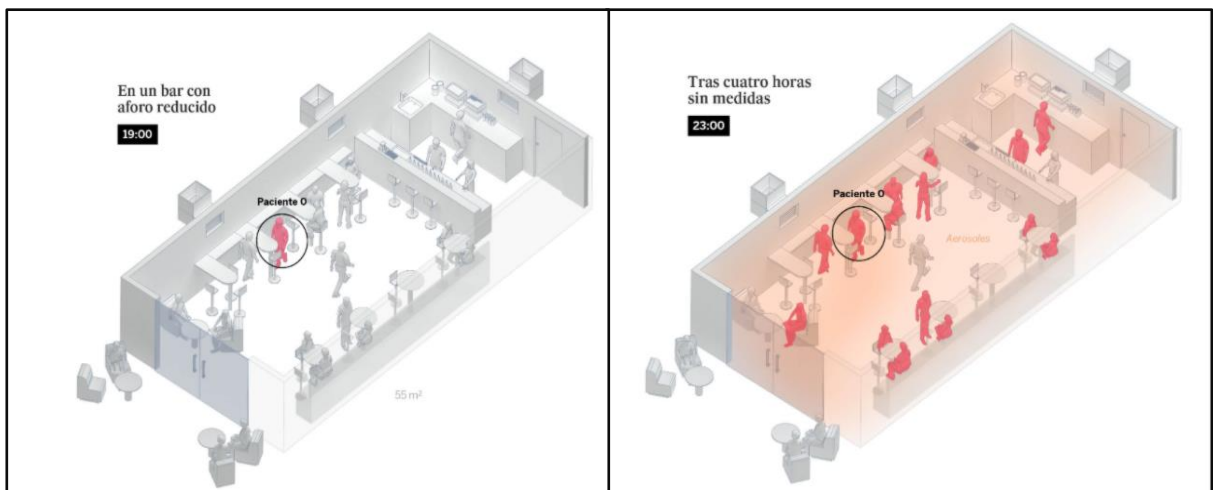


Figura 2-3 Portador del virus y la cantidad de personal contagiado sin medidas [9]

Por otra parte, si se usan las medidas de precaución iniciales contra el contagio, que son el uso de la mascarilla FFP2 y la distancia de seguridad entre los diferentes grupos de personas, el número de contagios cae de 13 a 9 como podemos ver en la Figura 2-4, lo cual no es muy efectivo, aunque mejora un poco la situación. Por esta razón, es muy importante aplicar las medidas más modernas y así procurar que el virus no se propague a través de los aerosoles.



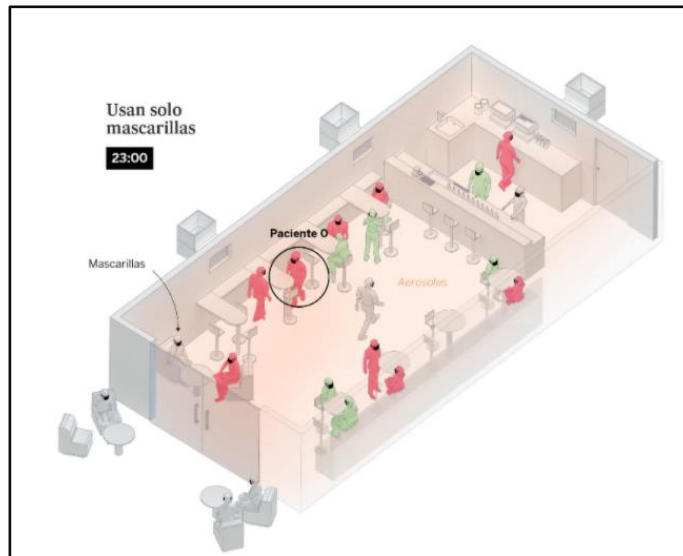


Figura 2-4 Uso de mascarillas para disminuir contagios [9]

Por último, destacar las medidas actuales contra los contagios, y su alta efectividad. Como podemos observar en la Figura 2-5 solo hay un nuevo contagio gracias a las nuevas precauciones, estas son la reducción del tiempo y la más importante la renovación del aire, en este caso, ventilación.



Figura 2-5 Ventilación y reducción de tiempo minimiza los contagios [9]

El objetivo principal es conseguir el resultado de la Figura 2-5, y así asegurar que no se produzcan contagios en la ENM, ya que un brote descontrolado puede desencadenar en desastre al ser una academia militar con actividades conjuntas y donde destaca el compañerismo.

Para este fin, el objetivo es conseguir una ventilación adecuada, la cual comprobaremos a partir del nivel de CO<sub>2</sub>, que vamos a medir y monitorizar a lo largo del tiempo, y tomando medidas correctivas cuando el nivel de CO<sub>2</sub> supere valores umbral recomendados como encender un purificador o ventilador.

### 2.2.1 Renovación del aire y evitar el contagio del COVID-19

La disminución del riesgo de contagio se consigue de dos formas, reduciendo la emisión de partículas y la exposición a las mismas, en la Figura 2-6 podemos observar como minimizar estos dos factores y reducir la probabilidad de riesgo [23].



Figura 2-6 Reducción de la emisión del SARS-CoV-2 y su exposición [23]

Las condiciones ambientales de las aulas se pueden mejorar de diferentes formas, normalmente siguen un orden al haber soluciones preferibles y más saludables [24].

El siguiente diagrama de bloques, Figura 2-7 representa las diferentes soluciones a seguir ordenadamente para conseguir renovar el aire interior, se explicarán con más detalle acto seguido.

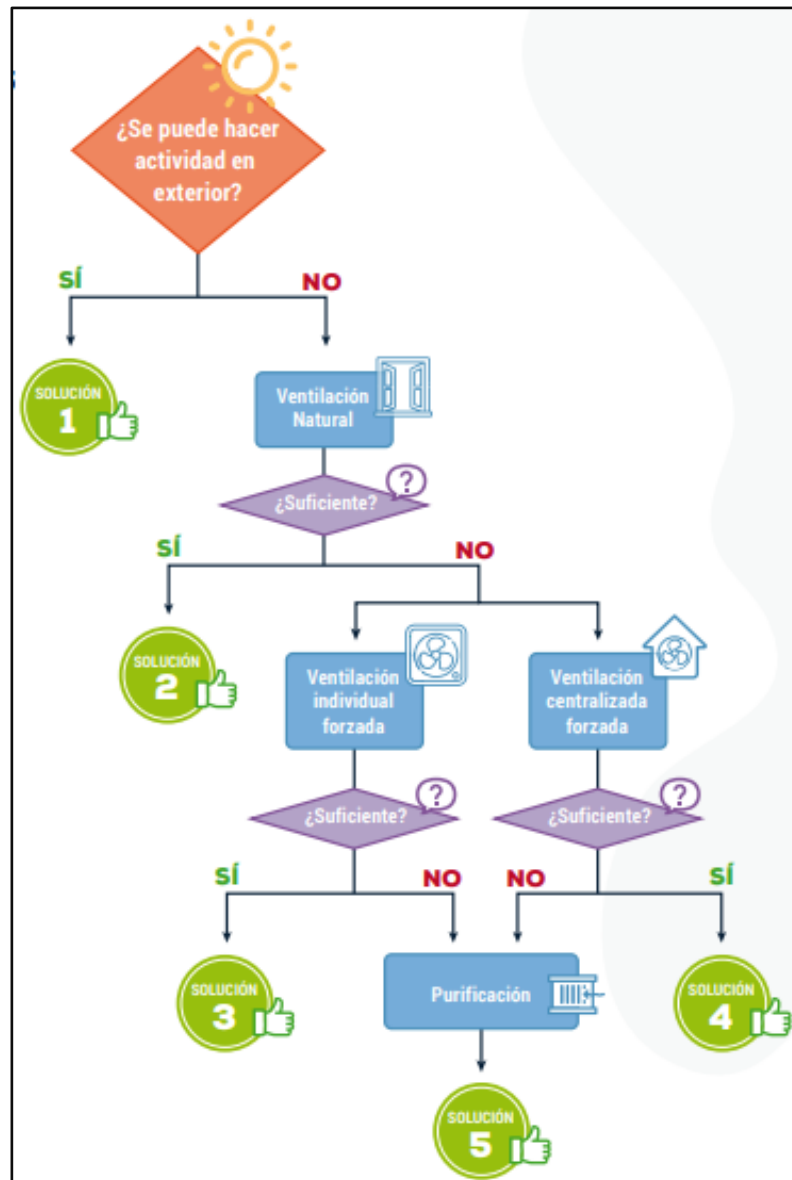


Figura 2-7 Renovación del aire [25]

Para mejorar la calidad del aire en un aula y evitar la propagación del virus SARS-CoV-2, lo primero de todo será probar la ventilación natural, hay diferentes tipos y según la distribución en planta unas son más efectivas que otras, además la eficacia depende de la velocidad del viento, el ángulo en el que golpea y el tamaño de la ventana, entre las principales destacamos [26]:

- Ventilación natural: Abrir las ventanas y puertas para que el aire corra. Una sola abertura tendrá solo 12-23% de la velocidad del viento y con dos aberturas en paredes adyacentes puede mejorar hasta el 51% como podemos observar en la Figura 2-8.

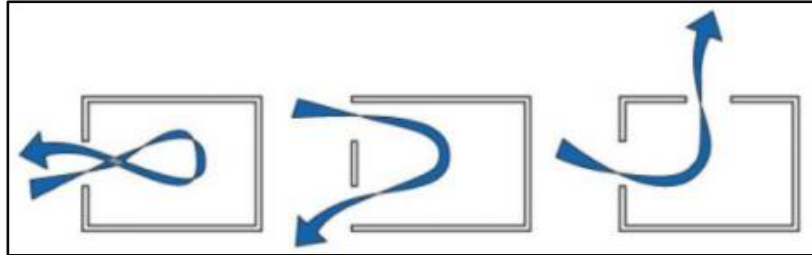


Figura 2-8 Ventilación natural [26]

- Ventilación cruzada natural: Esta ventilación suele ser muy eficaz, es cuando la puerta está situada en lado opuesto de la ventana como podemos ver en la Figura 2-9 y permite el flujo de un gran volumen de aire, su uso es indicado en climas cálidos ya que atraviesa toda el aula y reduce constantemente la temperatura además de renovar el aire. Esta distribución puede tener hasta un 65% de eficacia.

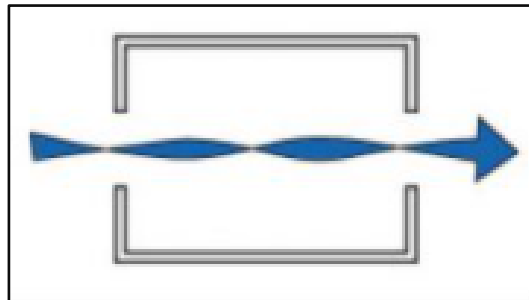


Figura 2-9 Ventilación cruzada natural [26]

- Ventilación natural inducida: Aprovecha el aire caliente que tiende a subir por su densidad. Esta ventilación se consigue mediante aberturas cerca del suelo para que empuje el aire caliente hacia arriba. En el techo se colocan salidas de aire para así renovar el aire, esta opción es muy útil en estancias grandes y con gran altura, también recomendado para climas calurosos.
- Efecto chimenea: Se establece mediante una cubierta ventilada la cual se posiciona frente la pared principal, al igual que en la ventilación natural inducida se colocan entradas de aire en la zona baja de la fachada y salidas en la zona superior. En invierno calienta de manera importante las estancias y en verano refrigera.
- Sistemas de enfriamiento evaporativo: Es utilizado solamente en edificios grandes y con un diseño arquitectónico complejo y es recomendado para climas secos Se utilizan grandes espacios de agua cerca de corrientes de aire, frente a edificios con aberturas, y así el aire que entra adquiere antes un porcentaje de humedad que garantiza una sensación de frescura.

Si la ventilación natural no fuese una opción o no aportase lo suficiente, entonces acudimos a la ventilación individual forzada que consiste en renovar el aire interior a partir de aire exterior utilizando instrumentación. Se puede lograr introduciendo aire exterior (impulsión) o expulsando aire del aula (extracción) [23].

Por otra parte, también es eficaz la ventilación forzada centralizada. En esta se debe aumentar la tasa de aire exterior y disminuir el aire recirculado. Los filtros usados para el aire recirculado deben ser eficientes y revisados de forma frecuente [23].

Por último, si no se consiguiese una calidad de aire óptima, o la ventilación produce un disconfort térmico muy importante, se recurre a la purificación del aire, que consiste en eliminar partículas susceptibles de portar contaminantes o el SARS-CoV-2 a partir de filtros [25].

También son muy importantes dos factores meteorológicos que hay que tener en cuenta para minimizar la propagación según estudios de la OMS: estos dos son la temperatura y la humedad relativa del ambiente [27]. Así, se recomienda:

- Estabilizar la temperatura ambiente entre los valores de 23-25°C preferiblemente, pero siempre mantenerla por encima de los 21°C.
- Mantener una humedad entre el 30-70% aunque la OMS recomienda superar el 40% de humedad relativa.

Por último, nombrar un factor muy importante que es la presión relativa. Dependiendo de si es positiva, negativa o neutra se propagará más o menos. Por ejemplo, en los hospitales es muy importante que los cuartos de aislamiento tengan presión negativa, para aislar a los pacientes que padezcan el virus con certeza, así cuando este se conecta al exterior por una puerta u otro orificio, el aire no sale y no contagia más zonas. Una de las causas por las que se saturaron los hospitales en la primera ola fue la incapacidad de aislar a los pacientes, y gran parte del personal sanitario fue contagiado [28].

## 2.3 Equipamiento para el estudio y control de la calidad del aire

El estudio a realizar requiere un material tecnológico muy moderno y poco común en la vida cotidiana, por ello vamos a proceder a dar una breve explicación y algunos ejemplos de estos aparatos para poder comprender mejor el funcionamiento y los objetivos.

### 2.3.1 Sensores de la calidad del aire

Las tecnologías más importantes para este trabajo son el sensor de calidad del aire que nos proporcionará una valiosa información sobre las características del aire en cualquier momento específico, a partir de unos sensores proporcionará datos de diferentes elementos o factores atmosféricos.

El sensor de calidad del aire que usaremos es el Airthings Wave Plus, Figura 2-10, este es el primer monitor CAI (*Calidad Aire Interior*) inteligente que funciona con baterías. Este dispositivo necesita aproximadamente una semana para adaptarse a un nuevo entorno y que sus datos sean fiables, y se conecta con otros dispositivos a través de Bluetooth [29].



Figura 2-10 Airthings Wave Plus

Su funcionamiento depende de 6 sensores que le permiten controlar los valores de contaminantes como el CO<sub>2</sub>, el radón y el VOC. Por otra parte, analiza elementos del clima como la temperatura, la presión y la humedad relativa. Este sensor muestra los datos de un momento dado, pero no lleva un registro con los datos almacenados al que acceder para apoyar el estudio [29].

Indicadores visuales	Rojo, amarillo y verde
Entorno operativo	De 4° C a 40° C
Peso	219 g
Dimensiones	12 cm de diámetro × 3,6 cm de altura
Alimentación	Dos baterías AA
Conectividad	Bluetooth y Smart link

**Tabla 2-2 Características principales Airthings Wave Plus [29]**

Con respecto a monitores de calidad de aire, nombraremos otros dos con muy buenas apreciaciones, en primer lugar, el Awair Element, capaz de rastrear cinco componentes diferentes de la calidad del aire, entre ellos CO<sub>2</sub>, COV, material particulado, temperatura y humedad. Una característica bastante ventajosa es que muestra la calidad del aire en un valor del 0 al 100 donde comprende todas las variables. No muestra el nivel de radón y debe colocarse cerca de una toma de aire acondicionado [30].

Otro ejemplo es uHoo, este monitor muestra hasta nueve mediciones diferentes, destacar el NO<sub>2</sub>, el ozono y el polvo, ya que no los contiene el monitor que hemos escogido, pero estas constantes no son necesarias para nuestro propósito y este adquiere un precio más elevado [30].

También existen sensores de la calidad del aire como el HOBO MX1102, que directamente ya guarda el registro de los parámetros, aunque solo mide el CO<sub>2</sub>, la temperatura y la humedad relativa, es una gran ventaja, pero por esto el precio dobla el de nuestro monitor de la calidad del aire [31].

### 2.3.2 Purificadores de aire

El purificador de aire portátil, es la tecnología que va a permitir mejorar la renovación del aire si fuese necesario y procurar disminuir la probabilidad de contagio del COVID-19. Su funcionamiento se basa en un ventilador que succiona aire de una estancia determinada y lo hace pasar a través de filtros de alta eficiencia, en donde quedan atrapadas las impurezas y contaminantes ambientales.

Uno de los objetivos de este trabajo es que se encienda el purificador de aire portátil con filtro HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) en automático cuando se sobrepasen unos valores establecidos, es decir, si el nivel del CO<sub>2</sub> sobrepasa el valor umbral, se activa el purificador.

Emplearemos un purificador de aire portátil con filtro HEPA denominado Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier, se puede visualizar en la Figura 2-11, es una herramienta muy eficaz contra alérgenos y bacterias. Además, devuelve un aire más limpio y en algunos casos con menos olores debido a que atrapan a las partículas responsables de estos. Tiene un modo de funcionamiento automático en el que se adecua su capacidad de filtrado al nivel de contaminación existente en un espacio y tiempo determinado y otro manual, con tres velocidades de filtrado [32].



**Figura 2-11 Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H con filtro HEPA**

El parámetro CADR (*Clean Air Delivery Rate*) indica el caudal del aire que trata el purificador por cada hora, es decir, la cantidad de aire limpio que el filtro entrega a la hora. En este tiempo este purificador es capaz de procesar 380 m<sup>3</sup> de aire en su velocidad de trabajo máximo. [32] Las demás características serán reseñadas en la Tabla 2-3.

Pantalla OLED	Táctil y circular con diámetro de 52 mm
Superficie estancia	Máximo 45 m <sup>2</sup>
Nivel máximo de ruido	64dB
Vida útil del filtro	De 6 a 12 meses
Dimensiones	240 × 240 × 520 mm
Peso	4.8 kg

**Tabla 2-3 Características del Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H**

El filtro que figura en este purificador es cilíndrico de 360° y está constituido por tres capas de diferentes materiales, por consiguiente, cada capa tiene la responsabilidad de atrapar partículas de un rango de tamaños distintos.

La capa externa tiene forma de rejilla y se encarga de retener las partículas o elementos de mayor tamaño como pelos, polvo o fibras de papel. La capa del medio es un filtro HEPA que se responsabiliza de capturar hasta el 99,97% de las partículas que tienen un tamaño entre 0,3 y 0,1 micras. Esta capa es capaz de retener gran parte de las partículas portadoras del virus, es decir, los aerosoles, ya que el diámetro de estos se mueve entre 0,5 y 0,02 micras. La capa más interna es un filtro de carbón activo el cual absorbe los compuestos orgánicos volátiles que son los responsables del mal olor y de otras sustancias nocivas [32].

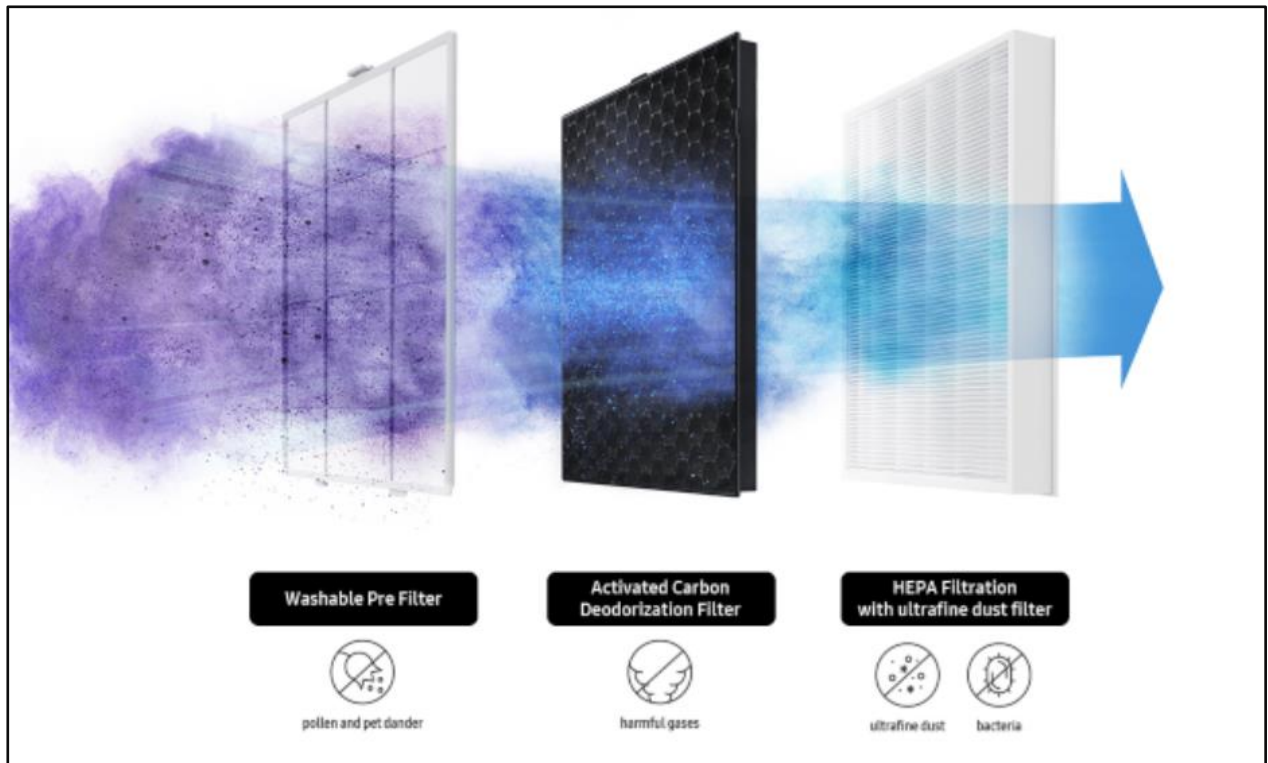


Figura 2-12 Filtros del Xiaomi AC-M6-SC Air Purifier 3H [33]

Los resultados de concentración de partículas se pueden ver mediante la aplicación móvil del fabricante o directamente a partir de la pantalla OLED que contiene el mismo purificador. Si el nivel de partículas es aceptable, el anillo que la rodea será verde, si es medio será naranja y si fuese malo el anillo sería de color rojo [32].

Además, destacar otros purificadores de aire competentes hoy por hoy, primeramente, se hablará del QUARED purificador de aire portátil con filtro HEPA, no es tan eficiente como el purificador que hemos escogido, como curiosidad puede integrar aceites aromáticos para perfumar a la par que purifica el aula [34].

Para finalizar, nombrar el purificador de aire portátil con filtro HEPA H13 de grado médico, con características muy similares al equipo escogido para el trabajo aunque solo es eficiente para habitaciones pequeñas de hasta 15 metros cuadrados [34].

### 2.3.3 Sistemas de ventilación mecánica

Cuando no hay suficiente ventilación natural se recurre a la ventilación mecánica, podemos dividirla en dos tipos con extracción o con impulsión [35].

En primer lugar, la ventilación con impulsión que se caracteriza por inyectar aire del exterior en el recinto. Estos aparatos son muy efectivos, un ejemplo es el Coolbreeze, tiene diferentes versiones para los diferentes escenarios, el modelo Coolbreeze 500D es el más potente que renueva hasta 41000 m<sup>3</sup>/h, muy útil para naves industriales [35].



**Figura 2-13 Ventilación con impulsión [35]**

Por otro lado, se encuentra la ventilación con expulsión es el sistema más utilizado ya que tiene la ventaja de controlar la descarga, esta puede ser individual o centralizada. Un ejemplo de la individual es el extractor tubular serie MU TU 6, como se muestra en la Figura 2-14 se caracteriza por ser para un espacio doméstico como puede ser una habitación o un aula, es muy silencioso y su caudal es de 320 m<sup>3</sup>/h [35].



**Figura 2-14 Extractor tubular MU TU 6 [35]**

Por último, nombrar un extractor de tejado de la serie MUTE que pertenece a la ventilación centralizada, es decir engloba todo el edificio. Dependiendo del modelo renovará una mayor o menor cantidad del aire, varía entre los 1000 y los 35000 m<sup>3</sup>/h [35].

## **2.4 Internet of Things (IoT)**

Internet of Things, en español el Internet de las Cosas, es la conexión a Internet de los sensores y dispositivos que poseen algunos objetos cotidianos, a través de redes fijas e inalámbricas. Ya que Internet está presente en todo lugar y en todo momento permite la evolución masiva de esta tecnología. Asimismo, el IoT permite que todo objeto pueda ser una fuente de datos, esta innovación está cambiando la forma de hacer negocios y el día a día de un sinnúmero de personas [36].



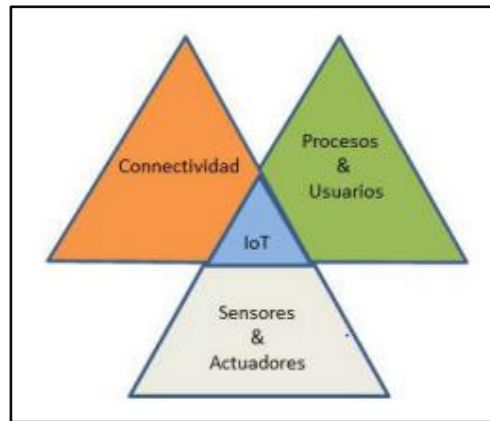


Figura 2-15 Concepto de IoT

El Internet de las Cosas no es una idea nueva. Fue concebida a principios de los noventa por Mark Weiser, lo denominó “Computación ubicua”, aunque el nombre de Internet of Things se originó en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) a finales de los noventa. Pero la idea se ha llevado a cabo de forma física mayoritariamente en el siglo veintiuno, gracias a la veloz evolución de las tecnologías [36].

Este fenómeno ha salido a flote debido a tres fenómenos que han permitido el desarrollo y avance en este ámbito, el primer suceso es la miniaturización de los elementos de los ordenadores ya que permite que cualquier cosa se pueda conectar. En segundo lugar, el perfeccionamiento de los servicios de telefonía móvil. Y, por último, la cantidad masiva de nuevas aplicaciones que permiten el uso de la información obtenida por el IoT [36].

*“La ciudad del futuro será una ciudad «inteligente», en la que los teléfonos móviles abren puertas y los sensores detectan fugas de agua”* [36]. Los teléfonos móviles cada vez son más capaces y realizan más funciones en nuestro día a día, de ahí viene su nombre en inglés “Smartphones” que significa teléfonos inteligentes. *«Nuestros móviles y cámaras se están convirtiendo en los ojos y oídos de las aplicaciones; sensores de movimiento y ubicación nos dicen dónde estamos, lo que estamos viendo y la velocidad a la que nos movemos. Los datos se están recopilando y se está actuando en tiempo real en base a ellos. La escala de participación se ha incrementado en órdenes de magnitud»* [37].

El Internet de las Cosas llegará a ser la estructura más compleja que se haya implantado por los humanos. En un futuro no muy lejano es probable que todo se mida a partir de la red y con los datos se controlará todos los aspectos del mundo que hemos construido. Por otro lado, esta innovación tiene carácter político y va a afectar a la vida humana en gran medida, con repercusiones sociales, económicas y sobre la privacidad. Por ende, es importante que sea construida de manera inclusiva, debido a que, de otra forma, el temor podría superar a los beneficios [36].

En este proyecto trabajaremos el Internet de las Cosas con Python y RPi, una gran ventaja es tener un sistema operativo como Linux que puede interactuar con infinidad de aplicaciones externas, además la capacidad de WiFi y Bluetooth, y los cuarenta pines de entrada y salida de propósito general (GPIO) de la RPi facilitan la conexión con los distintos sensores [38].

En conclusión, el Internet de las Cosas se exhibe como una de las primordiales tendencias del siglo XXI, pero se tienen que superar los diferentes desafíos para que se consiga su uso generalizado. El más crucial consiste en distribuir la conexión a internet en todas partes ya que hay zonas que carecen de esta [36].

#### 2.4.1 Raspberry Pi versión 3B y LED RGB

La Raspberry Pi es una placa que sustenta varios componentes imprescindibles de un ordenador, y la utilizaremos para almacenar información y tratarla a partir de programas informáticos. Se puede describir como un ordenador del tamaño de un carnet de conducir muy capaz, que puede realizar muchas

de las funciones de un ordenador normal. Es muy funcional y por su tamaño puede ser útil para muchas finalidades [39].

En este ordenador incorporamos un sistema operativo a partir de una tarjeta micro SD y lo instalamos, después de este paso, tiene muchas capacidades y funciones, nosotros la emplearemos para controlar componentes electrónicos. Las características del hardware de la RPi empleada en este trabajo (una RPi 3B) se pueden ver en la Tabla 2-4, mientras que una fotografía de la placa se muestra en la Figura 2-16 [40].

Memoria RAM	1GB
Velocidad	1.2 GHz 64bit CPU
Peso	70 g
Conexión	Bluetooth 4.1 ( <i>BLE</i> )
Admite diferentes distribuciones	ARM, GNU/Linux y Windows 10
Pin GPIO	40
Red	Wireless LAN
Capacidad IoT	Si

**Tabla 2-4 Características Raspberry Pi [41]**



**Figura 2-16 Raspberry Pi 3B**

Este microprocesador tiene una gran cantidad de conectores para vincular diferentes dispositivos de hardware, entre estos destacamos [40]:

- Cuatro conectores de USB, para cualquier dispositivo, ratón, teclado, disco duro, etc.
- Un conector de Ethernet, para conectar a Internet, aunque puede conectarse por WiFi.
- Un conector HDMI, para conectar un monitor.
- Un conector micro USB, es la fuente de alimentación, nuestro cargador debe ser de 5V y 2,5A.
- Un conector Jack, para el audio.
- Un conector micro SD, donde se implanta una tarjeta el sistema operativo.
- Dos conectores para cámaras.

A partir de todos estos componentes podemos conseguir la misma función que un ordenador normal, aunque tendrá menos capacidades en algunos aspectos, como memoria RAM, disco duro, tarjeta gráfica, etc. Destacar un modo de funcionamiento del Raspberry Pi es el Headless mode, el cual opera sin monitor, teclado o ratón, es decir, por sí solo [40].

En la Raspberry Pi conectaremos un LED RGB, que significa Light Emitting Diode Red Green Blue. Este LED combina estos tres colores y así genera más de 16 millones de tonos de luz. Mezclando estos colores se pueden conseguir los colores mostrados en la Figura 2-17 con diferentes tonos [42].

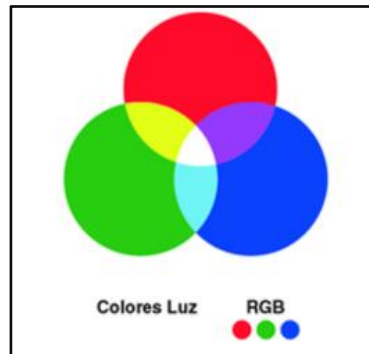


Figura 2-17 Colores de un LED RGB [42].

La intensidad de cada una de las componentes de RGB va de 0 a 255, y así se ajustan las tonalidades, mezclándolos por parejas se consiguen diferentes colores y según la intensidad se obtendrán diferentes tonos; la mezcla de los tres colores a su máxima intensidad devuelve el color blanco, sin embargo, los tres colores con intensidad 0 muestran el color negro por ausencia de color [42].

El LED RGB tiene cuatro terminales, uno para cada señal RGB y otro que representa GND (*ground*), estas patas las conectaremos a la Raspberry Pi en los pines GPIO para obtener los diferentes colores requeridos en nuestro código de colores [42].

#### 2.4.2 Lenguaje de Programación Python

Para entrelazar nuestros dispositivos, estudiar y analizar los datos registrados, vamos a recurrir al Internet de las Cosas, para llevar esto a cabo utilizaremos el lenguaje de programación Python, además del material previamente detallado.

Python fue creado a principios de los 90, inicialmente fue desarrollado como un hobby por Guido Van Rossum, un ingeniero holandés que trabajaba en el Centro de Investigación de Ciencias de la Computación Holandés en Ámsterdam, y el nombre del lenguaje se debe al apellido del grupo cómico Monty Python ya que Guido era un gran aficionado [43].

Python es un lenguaje de programación muy presente actualmente en aplicaciones y sistemas operativos. Es multiplataforma y destaca por la limpieza de su código. La principal causa de su éxito es que cuenta con una licencia de código abierto por lo que se puede utilizar en cualquier escenario y campo. A cuenta de esto, es uno de los lenguajes de iniciación de muchos programadores siendo el lenguaje predeterminado en muchos centros docentes [43].

Grandes empresas incluso del ámbito del Big Data se apoyan en este lenguaje debido a su capacidad de automatizar procesos y ejecutar tareas tanto en entorno cliente como servidor. Por otro lado, al ser multiplataforma es de gran utilidad para trabajar con grandes volúmenes de datos, ya que favorece a su extracción y procesamiento [43].

Las principales características de Python son: que es sencillo y legible, que sigue unas reglas del estilo que hacen que su aprendizaje sea rápido, y es un lenguaje muy práctico que permite ahorrar tiempo y espacio, en pocas líneas se pueden desarrollar algoritmos complejos [43].

Este lenguaje es muy útil para muchas circunstancias, pero también tiene sus defectos y no es apto para algunas tareas, en la Tabla 2-5 se muestran sus ventajas y desventajas [43].

Ventajas	Desventajas
Fácil de aprender y usar	Baja velocidad
Bibliotecas enormes	Consumo de memoria
Fuente abierta	Poco útil en móviles
Lenguaje interpretado	Baja velocidad
Portable	Errores durante el tiempo de ejecución
Fácil de aprender y usar	

Tabla 2-5 Python características [44].

## 2.5 Estudios similares en la actualidad

El COVID-19 ha tenido un impacto mundial y han surgido estudios y ensayos de todo tipo para aumentar los conocimientos con respecto al virus, y saber todos los factores que le afectan y que pueden tener alguna relación con el virus, ya sea con su propagación, su tratamiento, sus síntomas o cualquier otra peculiaridad. El estudio realizado en este proyecto tiene como objetivo evitar su propagación, y con respecto a este tema se han llevado a cabo varios experimentos, como por ejemplo el que se describe a continuación [45].

Se trata de un “experimento de medición de CO<sub>2</sub> de un instituto de Benalmádena para prevenir el COVID-19 en clase”, en el que se investigó la concentración de aerosoles en el aula y, por consiguiente, la importancia de una buena ventilación para la neutralización de los aerosoles.

Un profesor del instituto Poetas Andaluces consciente de la realidad y su preocupación sobre la pandemia del COVID-19 analizó con un medidor de CO<sub>2</sub> las diferencias que generan las ventanas, ya estén abiertas o entreabiertas o cerradas. El profesor citó a la hora de realizar el experimento que no había problema al ser una época calurosa, pero que el problema llegaría cuando fuese invierno.

Los resultados fueron deprimentes, el 85% del tiempo los valores del CO<sub>2</sub> estuvieron por encima de los valores recomendados. El profesor insistió “*si no hay una buena ventilación que elimine el CO<sub>2</sub> tampoco va a eliminar los aerosoles. Ese es el problema*”, afirmaba el profesor Javier Pérez Soriano [45], que es químico e imparte la asignatura de Tecnología, además de ser el responsable de las medidas contra el virus SARS-CoV-2 en dicho instituto.

El profesor destaca que, como el virus se contagia por aerosoles, si todos llevásemos la mascarilla bien colocada y estuviese homologada no debería haber problema, ya que estas partículas se quedarían retenidas, pero el profesor asegura que no todo el mundo la lleva en estas condiciones ya sea por uso mayor del límite de horas, que carezcan de filtro o que no estén higienizadas, y por esto es tan importante la ventilación.

Comparó sus resultados con dos recursos documentales diferentes, uno el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios que recomienda no sobrepasar los 900 ppm de CO<sub>2</sub> y por otra parte la Escuela de Salud Pública de Harvard, en la que nos hemos apoyado también en este trabajo del mismo modo, que advierte de no superar las 700 ppm de CO<sub>2</sub>.

Su ensayo comenzó con las ventanas abiertas y no se superaron los 900 ppm por lo que se mantuvieron correctamente dentro de los límites, lo siguiente fue probar con las ventanas cerradas, la media fue de 1200 ppm, aunque se alcanzó un máximo de 1500 ppm, lo cual sobrepasa con creces los

valores permitidos. Las recomendaciones de sanidad eran efectivas, pero no lo suficiente, entre clase y clase ventilar 5 minutos bajaba a 900 ppm y si se ventilaba durante 10 minutos llegaba a las 600 ppm, pero a lo largo de la clase, alrededor de 20 minutos, esos valores volvían a exceder los valores umbrales.

Por último, probó con las ventanas a medio abrir, es decir unos cuatro dedos, esto mantenía de manera constante el CO<sub>2</sub> en 1100 ppm, que no es un valor óptimo.

Lo ideal sería abrir las ventanas 5 minutos cada 20 minutos, desde el punto de vista académico, pero resultaría poco eficiente ya que se pararía la clase demasiado tiempo.

El profesor Pérez recomienda la utilización de medidores de CO<sub>2</sub> para el control del COVID-19, con un precio que ronda los 30 euros, también recomienda que en lugares con condiciones adversas se combine la ventilación con filtros HEPA.

Otra investigación [46] similar publicada en el periódico El Confidencial, cuyo nombre define la práctica llevada a cabo, “48 horas con un medidor de CO<sub>2</sub>”. Esta busca identificar puntos calientes donde se producen supercontagios, y realizan pruebas en distintos lugares habituales para ver cuales no son recomendados o se deben tener más precauciones.

También se demuestra que en interiores es mucho más probable contagiar el virus, ya que el aire se concentra mucho más, en el exterior aproxima las 400 ppm, en espacios interiores es muy complicado obtener valores tan bajos ni con medidas correctivas, “Si en una habitación hay 800 partes por millón esto quiere decir que el 1% del aire que respiramos lo estamos respirando por segunda vez”.

La primera prueba de esta investigación fue en un apartamento, y el CO<sub>2</sub> subió de 623 a 1682 ppm en cuestión de 15 minutos, sin ventilación y la calefacción encendida. En este punto se recurre a ventilación cruzada y al cabo de una hora baja a 585 ppm de nuevo. Muchos brotes se producen en casas a partir de comidas familiares u otros eventos.

En un coche el CO<sub>2</sub> también se acumula, en este estudio en 10 minutos aumentó de 867 a 1103 ppm con solo dos personas por llevar las ventanillas cerradas. Si se ventila desciende de manera brusca, es un entorno muy sensible, al igual que los ascensores.

En la universidad se obtuvieron unos datos mucho menos alarmantes debido a la ventilación, el control de aforo y la separación de asientos, con veinte personas en el aula se mantuvo el nivel de CO<sub>2</sub> por debajo de 500 ppm.

Los metros y autobuses son zonas que transmiten mucho miedo, pero no son los más peligrosos, las medidas tomadas oscilaron entre 500 y 850 ppm, sí que pueden resultar valores mayores si no se respetan las medidas de aforo y si es un transporte público viejo que no contiene sistemas de ventilación.

Además, citar dos casos que pueden tener impresiones no esperadas, en los centros comerciales la concentración de CO<sub>2</sub> suele mantenerse por debajo de 600 ppm debido a ser espacios tan amplios y tener sistemas de ventilación. En el caso opuesto, un hospital produce gran cantidad de contagios, un estudio de Reino Unido asocia los hospitales a un porcentaje del total de contagios de entre un 6% y un 15%, se debe a las pocas ventanas que se encuentran en los hospitales y las largas esperas de los pacientes.

Por último, enfocan este análisis a las diferencias entre espacios ventilados y no ventilados y entre espacios interiores y exteriores, a día de hoy se aconseja ir bien abrigado a los espacios cerrados ya sea en la oficina, en las universidades u en otros entornos, y si es posible mantener la ropa de abrigo y abrir las ventanas para ventilar de manera adecuada.

Cabe destacar que para llevar a cabo estos dos estudios se requiere estar pendiente de los datos que revela el sensor cada determinado tiempo, en nuestro proyecto estos datos se almacenaran en un archivo gracias a la herramienta desarrollada que se mostrará en el capítulo de Desarrollo del TFG principal ventaja es que es un sistema automático y que almacena gran cantidad de datos ofreciendo además la posibilidad de trabajar con ellos.



### 3 DESARROLLO DEL TFG

En este apartado se va a reflejar de lo general a lo particular el desarrollo del TFG que se ha seguido a lo largo del periodo de trabajo, en primer lugar, se mostrará el procedimiento seguido para obtener los resultados y a continuación los equipos y aplicaciones elegidas para su realización.

#### 3.1 Elección del aula y características

En primer lugar, elegimos el aula en la que se trabajará, ya que dependiendo de dónde realicemos el estudio podemos obtener resultados muy diferentes siendo la capacidad de ventilación el factor más determinante. Escogemos una con poca capacidad de ventilación, por lo que el aire se retendrá por un largo periodo de tiempo. Además, es un aula designada a la 2ª Brigada, la cual tiene mayor número de clases en el día a día, con lo que se obtendrán más medidas estando presente el alumnado, obteniendo así un estudio más fiable.

El aula escogida se encuentra en el patio de aulas de la Escuela Naval Militar, es la número 10 como se muestra en la Figura 3-1, y tiene una planta rectangular. Esta aula además tiene una capacidad de ventilación muy limitada. como se puede observar en la Figura 3-2, las ventanas y puertas están en paredes adyacentes.

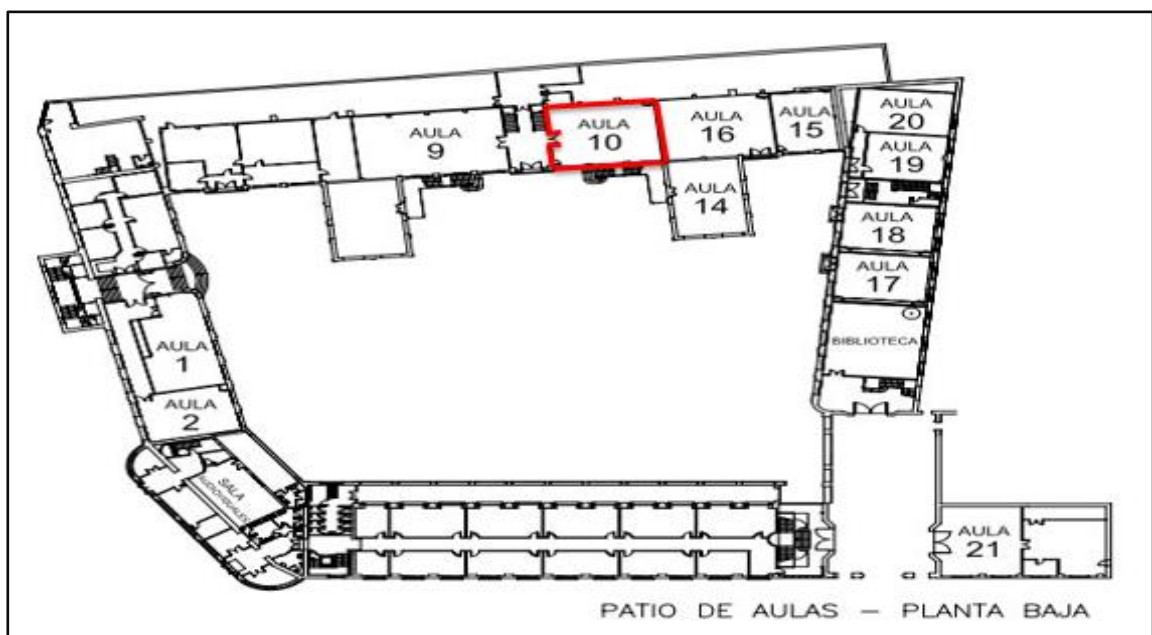
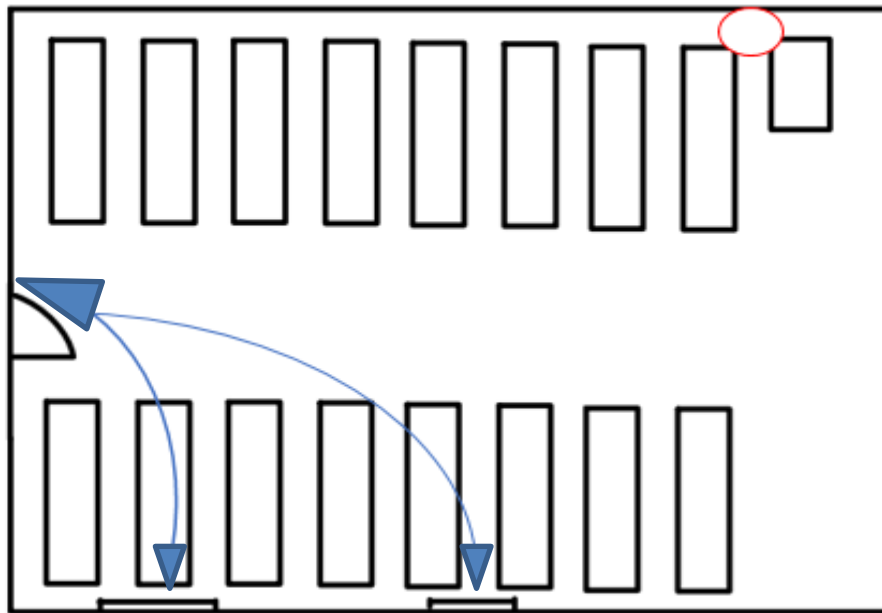


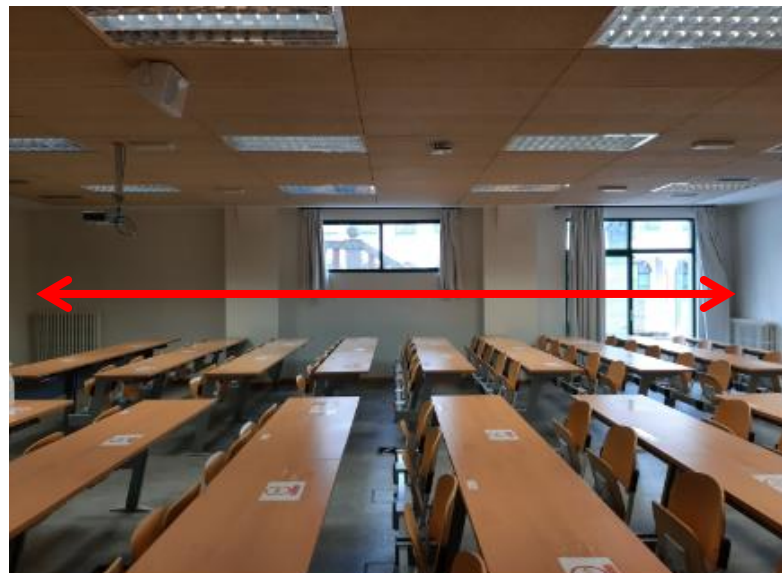
Figura 3-1 Aula escogida en el Patio de Aulas de la ENM

La distribución en planta de la clase es la que se muestra en la Figura 3-2, la cual muestra cómo será el flujo de aire a partir de la ventilación natural, a partir de las líneas azules, se puede comprobar que es muy pobre debido a que solo ocupa un cuarto de la clase. Por otra parte, también se puede observar dónde estará colocado el monitor de la calidad del aire, que es en la esquina opuesta, el círculo rojo.



**Figura 3-2 Distribución en planta del aula 10**

En la Figura 3-3 podemos observar el largo de la clase en la que se va a realizar el estudio que son 11.25 metros, y se contemplan las dos únicas ventanas, una más pequeña con unas dimensiones de  $0.8 \times 1$  metros y una de mayor tamaño con una superficie de  $1 \times 1.5$  metros.



**Figura 3-3 Largo del aula**

A continuación, en la Figura 3-4 se enseña el ancho y la altura del aula que son 9 y 2.8 metros respectivamente, además se puede observar la puerta, que se encuentra en la pared contigua a las ventanas, y que tiene unas dimensiones de  $1.6 \times 2.4$  metros.



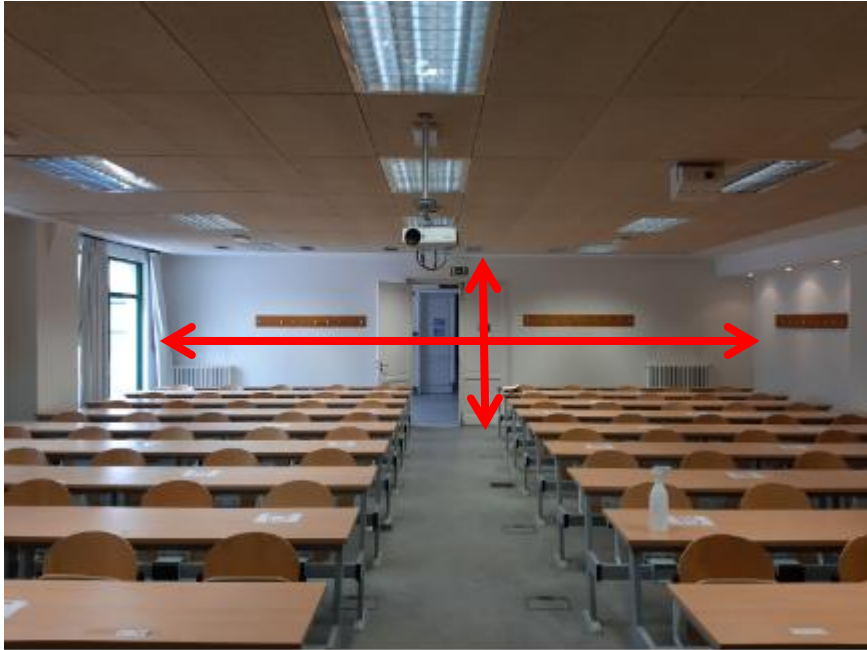


Figura 3-4 Ancho y altura del aula

Las dimensiones del aula las cuales han sido obtenidas mediante un telémetro, que será detallado a continuación, son: 2.8 metros de altura, 9 metros de ancho y 11.25 metros de largo, obteniendo así un volumen total de 284m<sup>3</sup>.

Por último, nombrar el sistema de medida utilizado para dimensionar los lugares de trabajo, tanto el aula 10 como el estudio donde realizamos los primeros ensayos, este será el telémetro Bosch GLM 100 C profesional, Figura 3-5, que ofrece una medición laser muy efectiva con muy poco error, y que nos permitirá conseguir resultados mucho más precisos que con una cinta métrica [47].



Figura 3-5 Telémetro Bosch GLM 100 C profesional

Gran precisión	$\pm 1.5 \text{ mm}$
Alcance	De 0.05 a 100 metros
Pantalla	Giratoria y con iluminación

Conexión	Bluetooth y micro USB
Memoria	50 valores de medición
Sensor de inclinación	360°
Temporizador	9 segundos, mediciones más precisas
Temperatura operativa	De -10° C a 50° C
Clase de láser	2
Batería	De litio con 3.7 V
Tiempo de carga	3 horas

**Tabla 3-1 Características del telémetro Bosch GLM 100 C profesional [47]**

### 3.2 Evaluación de la renovación del aire y cálculo de valores umbrales para el CO<sub>2</sub>

Este procedimiento parte de la base de las recomendaciones elaboradas por el Colegio público de la salud de la Universidad de Harvard [48] y de la guía de ventilación del CSIC [25].

Para conocer el riesgo de contagio se procede a medir la concentración de CO<sub>2</sub> en un espacio cerrado ya que sirve como referencia para saber si la renovación del aire está siendo adecuada y así estimar la cantidad de aerosoles. En general, se considera que una ventilación correcta nos ofrece un valor menor a 800 ppm (*partes por millón*) constantemente. Por esta razón, es conveniente medir de forma habitual las concentraciones de CO<sub>2</sub> [49].

El siguiente paso es estimar la tasa de ventilación de aire exterior, para realizar esa tarea la universidad de Harvard ofrece cuatro métodos diferentes, se selecciona el método según la situación y el tipo de ventilación, como podemos observar en la Tabla 3-2.

	Situación del aula	Tipo de sistema de ventilación	Materiales necesarios
<b>Opción A</b>	Ocupada o desocupada	Unidad individual	Balómetro
<b>Opción B</b>	Ocupada o desocupada	Centralizado	Balómetro Medidor
<b>Opción C</b>	Desocupada	Cualquiera	CO <sub>2</sub> y hielo seco
<b>Opción D</b>	Ocupada	Cualquiera	Medidor CO <sub>2</sub>

**Tabla 3-2 Métodos para medir la tasa de ventilación del aire.**

Para la ejecución de nuestro estudio emplearemos la opción D, ya que el aula se encuentra ocupada y disponemos de un medidor de CO<sub>2</sub>.

El primer paso será colocar el monitor de la calidad del aire en el interior del aula para medir la cantidad de CO<sub>2</sub> que se encuentra en el interior y así ser capaces de estimar la ventilación de aire exterior. El monitor a utilizar es el Airthings Wave Plus, que además de la concentración de CO<sub>2</sub> nos proporcionará otra información útil para estimar la calidad del aire como temperatura y humedad del aire, concentración de compuestos orgánicos volátiles y concentración de radón. Este aparato estará colocado en una estantería pegado a la pared opuesta a las ventanas, ya que la ventilación del aire es

peor por la falta de ventilación y se pretende que la calidad sea buena en cualquier punto de la clase, se muestra en la Figura 3-2.

Para medir la concentración del CO<sub>2</sub> hay que seguir una serie de pasos, los cuales se presentan numerados por orden:

- Calibrar el sensor de CO<sub>2</sub> según las instrucciones del monitor de la calidad del aire utilizado.
- Configurar las medidas cada cinco minutos, ya que el sensor tarda unos minutos en actualizar nuevos datos y así obtenemos muchos datos para un estudio más completo.
- Tomar muestras de la concentración de CO<sub>2</sub> en el exterior antes y después de proceder a estudiar el aula, ya que se necesitará para estimar la concentración en estado estable. Para este dato hemos hallado la concentración el valor de forma reiterada, colocando el sensor de CO<sub>2</sub> en el exterior, y hemos utilizado la media de dichos valores, en nuestro caso hemos obtenido 460 ppm de CO<sub>2</sub>.
- Estimar la tasa de generación de CO<sub>2</sub>, la cual depende de diferentes parámetros y se puede calcular a partir de dos tablas que se mostrarán a continuación.

En primer lugar, se expondrá una tabla con los diferentes valores de las diferentes actividades físicas, en esta se presentan diferentes situaciones en las que se consume energía, se miden en M (*met*) que significa “*Metabolismo equivalente*”, es la unidad de medida del calor producido por el organismo de un individuo en reposo. A partir de la Figura 3-6 estimamos los valores del MET para los alumnos presentes y para el docente que imparta la clase.

Activity	M (met)	Range
Calisthenics—light effort	2.8	
Calisthenics—moderate effort	3.8	
Calisthenics—vigorous effort	8.0	
Child care		2.0 to 3.0
Cleaning, sweeping—moderate effort	3.8	
Custodial work—light	2.3	
Dancing—aerobic, general	7.3	
Dancing—general	7.8	
Health club exercise classes—general	5.0	
Kitchen activity—moderate effort	3.3	
Lying or sitting quietly		1.0 to 1.3
Sitting reading, writing, typing	1.3	
Sitting at sporting event as spectator	1.5	
Sitting tasks, light effort (e.g., office work)	1.5	
Sitting quietly in religious service	1.3	
Sleeping	0.95	
Standing quietly	1.3	
Standing tasks, light effort (e.g., store clerk, filing)	3.0	
Walking, less than 2 mph, level surface, very slow	2.0	
Walking, 2.8 mph to 3.2 mph, level surface, moderate pace	3.5	

**Figura 3-6 Valores del metabolismo equivalente [50]**

El siguiente paso será entrar en la Figura 3-7 a partir del M (*met*) previamente hallado y la edad o el peso del personal, para hallar el total de CO<sub>2</sub> generado.

**TABLE 4** CO<sub>2</sub> generation rates at 273 K and 101 kPa for ranges of ages and level of physical activity (based on mean body mass in each age group)

Age (y)	Mean body mass (kg)	BMR (MJ/day)	CO <sub>2</sub> generation rate (L/s)						
			Level of physical activity (met)						
			1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0
<b>Males</b>									
<1	8.0	1.86	0.0009	0.0011	0.0013	0.0014	0.0018	0.0027	0.0036
1 to <3	12.8	3.05	0.0015	0.0018	0.0021	0.0024	0.0030	0.0044	0.0059
3 to <6	18.8	3.90	0.0019	0.0023	0.0026	0.0030	0.0038	0.0057	0.0075
6 to <11	31.9	5.14	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040	0.0050	0.0075	0.0100
11 to <16	57.6	7.02	0.0034	0.0041	0.0048	0.0054	0.0068	0.0102	0.0136
16 to <21	77.3	7.77	0.0037	0.0045	0.0053	0.0060	0.0075	0.0113	0.0150
21 to <30	84.9	8.24	0.0039	0.0048	0.0056	0.0064	0.0080	0.0120	0.0160
30 to <40	87.0	7.83	0.0037	0.0046	0.0053	0.0061	0.0076	0.0114	0.0152
40 to <50	90.5	8.00	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0155
50 to <60	89.5	7.95	0.0038	0.0046	0.0054	0.0062	0.0077	0.0116	0.0154
60 to <70	89.5	6.84	0.0033	0.0040	0.0046	0.0053	0.0066	0.0099	0.0133
70 to <80	83.9	6.57	0.0031	0.0038	0.0045	0.0051	0.0064	0.0095	0.0127
≥80	76.1	6.19	0.0030	0.0036	0.0042	0.0048	0.0060	0.0090	0.0120

Figura 3-7 Generación de CO<sub>2</sub> a partir del met y edad [50]

Calculamos el valor para los alumnos, usando un  $M(met)$  de 1,3 y lo introducimos en la tabla obteniendo un valor de 0.005, con respecto al profesor usamos un  $M(met)$  de 1.6 y obtenemos un valor de 0.0061.

En este proyecto contamos con 20 alumnos que acuden al aula a diario y un profesor alterno, por lo que el total de litros de CO<sub>2</sub> generados por minuto será:

$$C_{CO_2} = (20 \times 0.005) + (1 \times 0.0061) = 0.1061\text{ lps} = 6.366\text{ lpm}$$

- Estimar el flujo de aire exterior deseado a lo largo de una hora a partir de la siguiente fórmula [25]:

$$\text{Flujo aire exterior} = \frac{V \times ACH}{t}$$

Donde  $V$  es el volumen del aula,  $ACH$  (*Air Changes per Hour*) las renovaciones por hora y  $t$  el tiempo que será 60 minutos.

Para este análisis se pueden establecer distintos valores recomendados para una buena renovación del aire, estos están establecidos en las guías usadas.

En primer lugar, la recomendación estándar para aulas es llegar a 5 ACH, pero se ajusta a clases de 100 metros cuadrados y 25 estudiantes, lo cual no se adapta a las circunstancias de nuestro estudio.

En segundo lugar, se puede calcular considerando como objetivo el doble de ventilación generalmente recomendado, es decir 14 lps. Con este dato hallamos las renovaciones de aire por hora ( $N^{\circ}$  renovaciones) que se requieren [25].

$$N^{\circ}_{renovaciones} = \frac{14\text{ lps} \times (20 + 1)\text{ personas} \times 3600\text{ s} \times 0.001\text{ m}^3/\text{litro}}{284\text{ m}^3} = 3.7\text{ ACH}$$

Este valor sería suficiente para tener una buena calidad del aire en términos de limpieza, y a continuación hallaremos el flujo de aire exterior que corresponde a este nivel de ventilación [25]:

$$\text{Flujo aire exterior} = \frac{284m^3 \times 3.7ACH \times 1000}{60min} = 17640 m^3/min$$

Al escoger el filtro hemos tenido en cuenta dos factores muy importantes, en primer lugar, las dimensiones del aula, y el CADR (*Clean Air Delivery Rate*) del purificador, estos definen una fórmula que se deberá seguir para conseguir una adecuada renovación del aire [51].

Ya que el valor del CADR entre el volumen del aula de trabajo resulta ser las renovaciones de aire por hora del recinto, es decir los ACH que logra el purificador de aire.

Lo habitual es establecer el ACH que se quiere alcanzar y a partir de ese valor y el volumen del compartimento se obtiene el CADR requerido, y a partir de ese valor se elige el purificador.

Por último, como sabemos que el filtro tiene un CADR de  $380 m^3$ , podemos hallar el ACH:

$$N^{\circ}_{renovaciones} = \frac{380}{284} = 1.3 ACH \text{ purificación}$$

Por lo que las renovaciones de aire requeridas a partir de la ventilación, serán menores a la hora de lograr una renovación del aire favorable:

$$ACH \text{ total} = ACH \text{ ventilación} + ACH \text{ purificación}$$

Dado que hemos calculado previamente el ACH total (3.7) de esta fórmula despejamos el ACH ventilación y se obtiene un valor de 2.4 ACH a partir de la ventilación ya sea natural o mecánica.

En este caso el flujo de aire exterior valdrá:

$$\text{Flujo aire exterior} = \frac{284m^3 \times 2.4ACH \times 1000}{60min} = 11307m^3/min$$

- Tras haber realizado los pasos previos, utilizamos la siguiente fórmula para hallar el número de partes por millón de CO<sub>2</sub> en estado estable [25]:

$$C_{steady - state} = \frac{C_{CO_2} + \text{Flujo aire exterior} \times C_{CO_2-ext} \times 1 \times 10^{-6}}{C_{CO_2-ext} \times 1 \times 10^{-6}}$$

A partir de la fórmula hallamos el resultado, ya conociendo todos los valores de los diferentes parámetros, que son:

- Concentración de CO<sub>2</sub> (C<sub>co2</sub>) = 6.366 litros por minuto
- Flujo aire exterior para 3.7 ACH = 17640 litros por minuto
- Flujo aire exterior para 2.4 ACH = 11307 litros por minuto
- Concentración de CO<sub>2</sub> exterior (C<sub>CO2-ext</sub>) = 460 partes por millón

El valor calculado para 3.7 ACH, que comprendería una buena calidad del aire suponiendo que cada persona expulsa 14 lps, acepta un máximo de 821 ppm de CO<sub>2</sub> en el aula. Si se sobrepasa este valor se procederá a emplear las medidas correctivas como es el purificador de aire portátil o un ventilador colocado cerca de una ventana para favorecer la renovación de aire.

Por último, con el filtro activado, es decir para 2.4 ACH ventilación se podrá alcanzar hasta 1023 ppm de CO<sub>2</sub> y seguir en buenas condiciones, en este caso el purificador mejora la

calidad del aire, pero no reduce el CO<sub>2</sub> por esta razón, aunque este parámetro sea elevado las condiciones son óptimas.

Debido a las constantes variaciones de las concentraciones a lo largo del tiempo. Es asumible una desviación del 20% antes de tomar medidas radicales, donde el CO<sub>2</sub> equivaldría a 1228 ppm, en este caso sí que sería necesario reaccionar, una recomendación es desalojar el aula durante 5 minutos con los equipos de ventilación y filtrado activos.

Tras finalizar, se compararán los resultados obtenidos a partir del sensor colocado en el aula y los que hemos hallado a partir de las guías. Si no se consigue una renovación del aire adecuada se puede complementar con diferentes estrategias para limpiar el aire. Algunos ejemplos serán: incrementar el aire exterior, usar filtros MERV13 (*Minimum Efficiency Reporting Value 13*) o usar purificadores de aire portátiles con filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Arresting*).

En este trabajo recurriremos a un filtro y un ventilador, estos eliminarán las partículas que poseen el virus SARS-Cov-2 o cualquier otra sustancia dañina, cabe destacar que el filtro no disminuirá el CO<sub>2</sub>, por lo que no se podrá comprobar su efectividad. Pero expertos han demostrado a partir de experimentos con filtros HEPA, que atrapan las partículas que propagan el COVID-19 [52].

El purificador de aire con filtro HEPA lo colocaremos donde hay una mala ventilación natural para que renueve el aire en esa zona. Sin embargo, el ventilador lo colocaremos en la ventana de mayores dimensiones, con el flujo hacia el exterior, y así favorece a la extracción del aire interior, es el uso de ventilación mecánica para favorecer la ventilación natural, este método se recomienda en la guía CSIC [25].



**Figura 3-8 Ventilador colocado en frente de la ventana**

En el aula recurriremos a un ventilador y un purificador como medidas correctoras, estas medidas se encenderán cuando el CO<sub>2</sub> sea mayor de 821 ppm, es decir, cuando no se consigan 3.7 ACH, así la renovación del aire incrementará y se intentarán recuperar unas condiciones adecuadas.

En el aula en el que se ha trabajado y se han obtenido los datos, se distribuyeron el ventilador y el purificador como se puede ver en la Figura 3-9.

El cilindro azul es el ventilador que absorbe aire de mala calidad y lo expulsa hacia la ventana dando paso a aire limpio al interior del aula y por otro lado en la esquina inferior derecha colocamos el purificador de aire, el cilindro gris, que absorbe aire por sus laterales en 360° y lo expulsa en dirección hacia arriba tras atravesar el filtro, es decir renovado.

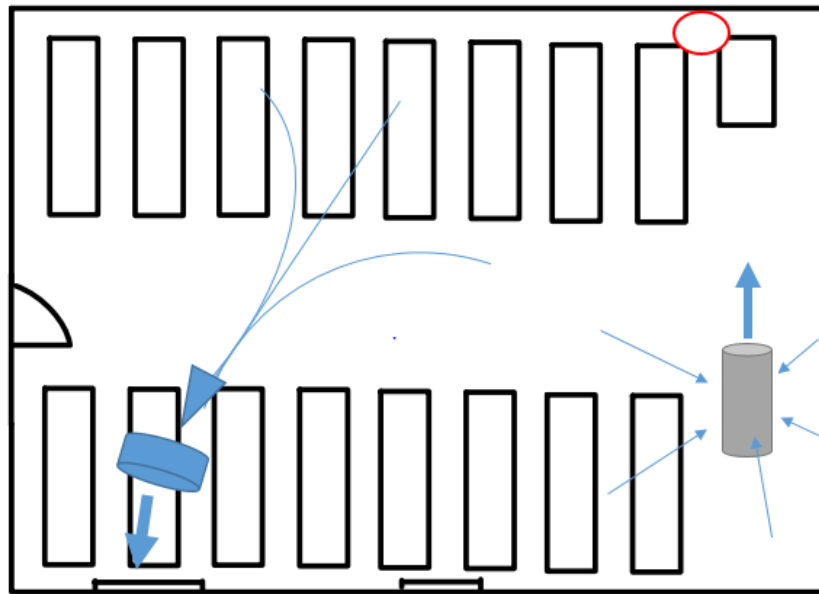


Figura 3-9 Medidas correctoras para renovar el aire

Para el seguimiento y control de la renovación de aire en el aula, se utilizará un código de colores a partir de un LED RGB. Para conocer la situación momentánea habrá que mirar el LED instalado en la Raspberry Pi, dependiendo del color se tendrá una situación u otra y en algunos casos habrá que actuar para corregirla.

Con una renovación de aire adecuada el  $\text{CO}_2$  permanecerá por debajo de 656 ppm y el LED se encontrará de color azul, no hará falta ninguna medida, este valor se encuentra en un 20% por debajo del límite entre una buena y una mala renovación del aire.

En el último 20% de los valores adecuados, comprendidos entre 656 y 821 ppm de  $\text{CO}_2$ , el LED se hallará de color verde, en esta situación el  $\text{CO}_2$  es posible que tienda a ascender por lo que se recomienda revisar la ventilación natural, y asegurar la apertura de todas las vías de ventilación natural.

Si el  $\text{CO}_2$  sobrepasa las 821 ppm, la restauración del aire no estará siendo suficiente por lo que el LED cambia a color amarillo y automáticamente se enciende el enchufe inteligente donde estará enchufado el ventilador apuntando a la ventana para renovar el aire de una forma más rápida, y además se encenderá el purificador de la calidad del aire con filtro HEPA de forma manual, en el aula habrá unas instrucciones con lo que supone cada color para llevar a cabo las recomendaciones, como se muestra en la Figura 3-10.

El funcionamiento del filtro no disminuirá el valor del  $\text{CO}_2$ , pero supondrá 1.3 ACH por lo que el nivel del  $\text{CO}_2$  podrá elevarse hasta un valor mayor sin suponer una mayor probabilidad de contagio del virus SARS-Cov-2, este valor aumenta de 821 a 1023 ppm como hallamos previamente.

Las condiciones del aula no serán recomendables si se sobrepasa las 1023 ppm de  $\text{CO}_2$ , pero las fuentes utilizadas permiten un 20% de margen antes de recurrir a medidas más estrictas, por lo que se encenderá la luz morada del LED, y habrá que tener precaución y prestar atención a las condiciones de entonces.

Por último, si el aula alcanza el valor de 1228 ppm de  $\text{CO}_2$  el LED mostrará el color rojo, para advertir que las condiciones son malas y que se recomienda salir de la estancia, un parón de cinco minutos con la ventilación natural, el ventilador y el filtro mejora significativamente las condiciones.



Figura 3-10 Instrucciones a partir del código de colores

### 3.3 Desarrollo del sistema de evaluación y control de la renovación del aire

Para el desarrollo de este trabajo ha sido fundamental la implementación de un sistema para comunicar los dispositivos electrónicos, haciendo uso del Internet de las Cosas como hemos visto previamente, a partir de esta función somos capaces de llevar a cabo varios de nuestros objetivos.

El objetivo del trabajo es realizarlo a través de la Raspberry Pi 3B, y a partir del lenguaje de programación Python, a través de esta plataforma se ha implementado el código para la función requerida, que es la captura y visualización de datos a través del LED, que permite el acceso y el análisis de estos, además, para una visión más profunda y clara, se han realizado tablas y gráficos usando Excel.

Por otro lado, nos hemos apoyado en los valores umbrales hallados en la Evaluación de la renovación del aire y cálculo de valores umbrales para el CO<sub>2</sub>, los cuales no se deben sobrepasar. Y hemos establecido que, si se exceden esos valores, el enchufe inteligente se enciende automáticamente y así activamos el ventilador, en la ventana para mejorar la situación, además el LED se cambia de color para tomar otras medidas.

Antes de nada, se requiere poner en funcionamiento la Raspberry Pi. El primer paso es instalar el sistema operativo a partir de una tarjeta micro SD, para este paso se necesitará un programa como puede ser Balena Etcher para instalar el Sistema operativo en la micro SD a través de un ordenador. Hay varios, pero escogeremos Raspbian ya que es bastante adecuado para esta placa base, instalaremos una versión con interfaz gráfica para poder trabajar de forma sencilla.

A continuación, conectamos todos los demás elementos para su funcionamiento, como el ratón, el teclado, el puerto HDMI con un monitor para su visualización y el cable Ethernet, aunque se puede conectar vía WiFi si se prefiere.

Por último, se enchufa la fuente de alimentación conectando el micro USB para encender el sistema. Al encenderlo por primera vez se llevará cabo una configuración para empezar a funcionar. Esta versión de Raspbian tiene algunos programas ya instalados, entre ellos podemos encontrar Python que será el lenguaje de programación que se usará para enlazar con los diferentes dispositivos y los sensores.

Para implementar estos códigos nos apoyaremos en unas librerías. Para el enlace con el enchufe inteligente utilizaremos [53], por otro lado, para conectar y obtener la información del monitor de la calidad del aire usaremos [54], a partir de estas realizaremos nuestro código para crear el sistema final



que involucre todas las aplicaciones. Y por último para integrar el LED RGB al sistema utilizaremos las siguientes especificaciones indicadas [55].

En primer lugar, el enchufe se conecta a través de una red WiFi, desde el teléfono se podía encender y apagar como función principal, además se podía programar con diferentes horarios para diferentes posibles tareas, como por ejemplo encender la luz de casa cuando no hay nadie para que no parezca vacía.

El enchufe inteligente que usaremos será el TP-Link HS 100, especializada en productos de domótica, es decir para automatizar la vivienda, este posee diferentes opciones de funcionamiento, estas son acceso remoto, programación, modo ausente, tiempo de uso y temporizador [56]. Al enlazar el dispositivo con un dispositivo móvil se pueden realizar estas funciones desde cualquier punto del mundo donde haya acceso a Internet.

Protocolo	(WiFi) IEEE 802.11 b/g/n
Temperatura ambiente	Entre 0° C y 40° C
Peso	131.8 g
Voltaje de entrada/salida	100-240 V
Dimensiones	100,3× 66,3× 77 mm

**Tabla 3-3 Características principales del enchufe inteligente TP-Links HS 100 [56]**



**Figura 3-11 Enchufe inteligente TP-Links HS 100 encendido y conectado**

Para implementar el programa de Python para la conexión con el enchufe HS100 se usa la versión Python 3, en un primer lugar hay que descargar una librería llamada “pyhs100” y a continuación obtener la IP del dispositivo electrónico, esta se obtiene al realizar una conexión WiFi con el dispositivo y usando el comando “kasa” desde el terminal de la Raspberry Pi como se muestra en la Figura 3-12. Hay que tener en cuenta que dependiendo de la WiFi y el dispositivo utilizado para el enlace a través del IoT, la IP cambiará.

```

C:\Users\jesus>kasa
No host name given, trying discovery..
Discovering devices on 255.255.255.255 for 3 seconds
== pyhs100 - HS100(EU) ==
Host: 192.168.137.177
Device state: ON

== Generic information ==
Time:      2021-02-15 22:19:07
Hardware:  4.0
Software:  1.1.5 Build 200828 Rel.081157
MAC (rssi): D8:47:32:A3:E9:0A (-45)
Location:  {'latitude': 423956, 'longitude': -87094}

== Device specific information ==
LED state: True
On since: 2021-02-15 20:58:09.560416

```

**Figura 3-12 Conexión con el enchufe inteligente a partir del comando “kasa”**

A partir de este punto se puede trabajar con el aparato a través del lenguaje de programación y la librería nombrada previamente, desde la cual programaremos que se encienda y se apague el enchufe en ciertas situaciones siguiendo las instrucciones del código de colores, especificado en la Figura 3-10. El enchufe activará el ventilador.

Para controlar el enchufe, implementaremos dos funciones diferentes, una para encenderlo y otra para apagarlo, y llamaremos estas funciones desde el código principal cuando se requieran.

Tras finalizar el código del enchufe y comprobar que funciona, comenzamos con la conexión del sensor Airthings Wave Plus, este aparato requiere Python 2.7 para su funcionamiento, esta versión también viene incorporada en la Raspberry Pi. Lo primero es descargar la librería con la que trabajaremos, que es “bluepy”, que permite el uso de Bluetooth desde Python. Esta será la vía de conexión con el monitor de la calidad del aire.

Para utilizar el código se nos requerirá información de nuestro sensor, en particular el número de serie. Al ver que funciona, modificamos el código para que los datos de los diferentes parámetros nos los devuelva separados por comas e incluyendo el sello temporal de cada medida.

Estos cambios los generamos para poder almacenar los datos de manera ordenada, a continuación, creamos un fichero.log.csv, donde depositaremos las medidas que tome el sistema. La extensión “log” utilizada para una grabación secuencial en un archivo o base de datos, y la extensión “csv” que significa valores separados por comas, traducido del inglés, este nos permitirá trabajar con los diferentes parámetros por columnas, además se podrán leer y analizar los datos usando Excel.

Además, a su vez uniremos el código de los diferentes dispositivos a utilizar en el sistema. Al modificarlo agregaremos el código del enchufe inteligente para que se encienda o se apague. También añadiremos el código para que funcione el LED RGB, que crearemos a partir de la librería citada previamente y el código de colores, habrá que conocer los códigos de todos los colores y los pines GPIO que corresponden a las cuatro patillas de la RPi en las que se enchufa el LED.

Nos apoyaremos de los comandos “if”, “elif” y “else”, y comparando los datos del sensor con los umbrales se ordenarán distintas condiciones, siguiendo el código de colores.

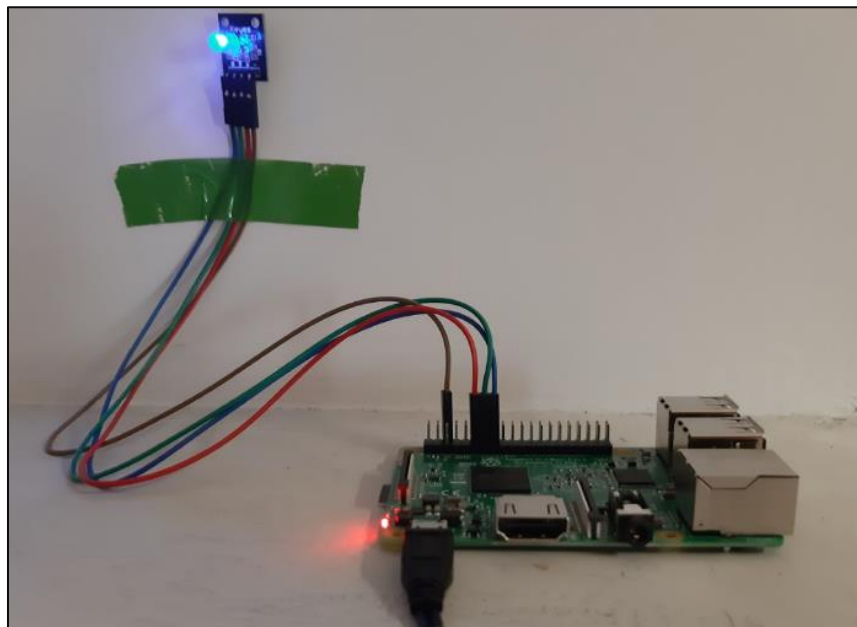
Una vez escrito todo el código conjunto, utilizaremos el comando “crontab” de Linux para implementar esta función de forma periódica, su funcionamiento es programar la ejecución de otros comandos, en otras palabras, automatizar tareas.

Ejecutamos el comando “crontab –e” y a continuación, ejecutamos el código con esta instrucción:

```
* /5 * * * * sudo Python /home/pi/AirthingsWave_pyhs100.Py 2930039770 >> /home/pi/airthings.log.csv
```

En los asteriscos se concreta cada cuanto tiempo se ejecuta la tarea periódica que en este caso es cada cinco minutos, y a continuación ejecutamos el script añadiendo su ruta y el resultado del código lo enviamos al fichero, con su ruta especificada. El parámetro 2930039770 es el número de serie del sensor.

Una vez la herramienta está preparada para operar, la trasladamos al aula que escogimos para la toma de datos y la instalamos, colocando todo como en la Figura 3-9, la Raspberry Pi la colocaremos al lado del sensor de la calidad del aire, ya que el enlace Bluetooth tiene un alcance limitado y podría haber interferencias o fallos.



**Figura 3-13 Sistema en funcionamiento con el LED de color azul**

El sistema implantado estará durante casi 3 semanas funcionando en el aula, tomando datos y tomando precauciones necesarias a partir del código de colores. En el aula se encontrará el personal los días de entre semana de 0800 hasta las 1800 aproximadamente, faltando algunas horas, ya que en horario de estudio o clases prácticas no se presenta el alumnado.

Los alumnos del aula seguirán las indicaciones de las instrucciones de la Figura 3-10 para mantener el aula en buenas condiciones, y seguirán además los protocolos de la ENM, por lo que la concentración no debería llegar a límites perjudiciales. El estudio de los datos se presentará en los Resultados.



## 4 RESULTADOS

En este TFG hemos desarrollado un sistema de evaluación y control de la renovación del aire, el funcionamiento de este ha sido exitoso. La intención era que registrase los datos entregados por el sensor, añadiendo un el sello temporal para poder trabajar con ellos y se ha conseguido, más adelante se mostrarán gráficos con estos valores y se evaluarán, tanto el CO<sub>2</sub> como de los demás parámetros.

Por otro lado, se pretendía que al incrementarse la concentración del CO<sub>2</sub> se controlase la situación. A partir del código de colores y el LED RGB, que, cambiaría de color al sobrepasar determinados valores de CO<sub>2</sub>, se ha llevado a cabo la comprobación en el aula, aumentando el dióxido de carbono, y al mismo tiempo se demostró que el enchufe inteligente se encendía y activaba el ventilador.

Para llevar a cabo esta tarea, hemos recurrido al uso de las instrucciones del código de colores, Figura 3-10, para que el personal presente en el aula sea capaz de utilizar esta herramienta. Con el sistema instalado y funcionando el personal no ha tenido problemas con su manejo, y la renovación de la calidad del aire ha sido adecuada en todo momento. Se podrá observar en los gráficos a continuación.

### 4.1 Ocupación del aula

Durante las clases en el aula se encuentran 20 alumnos y un profesor, y las medidas se comenzaron el 22 de febrero por la mañana, desde entonces se han tomado todas las medidas posibles cada cinco minutos.

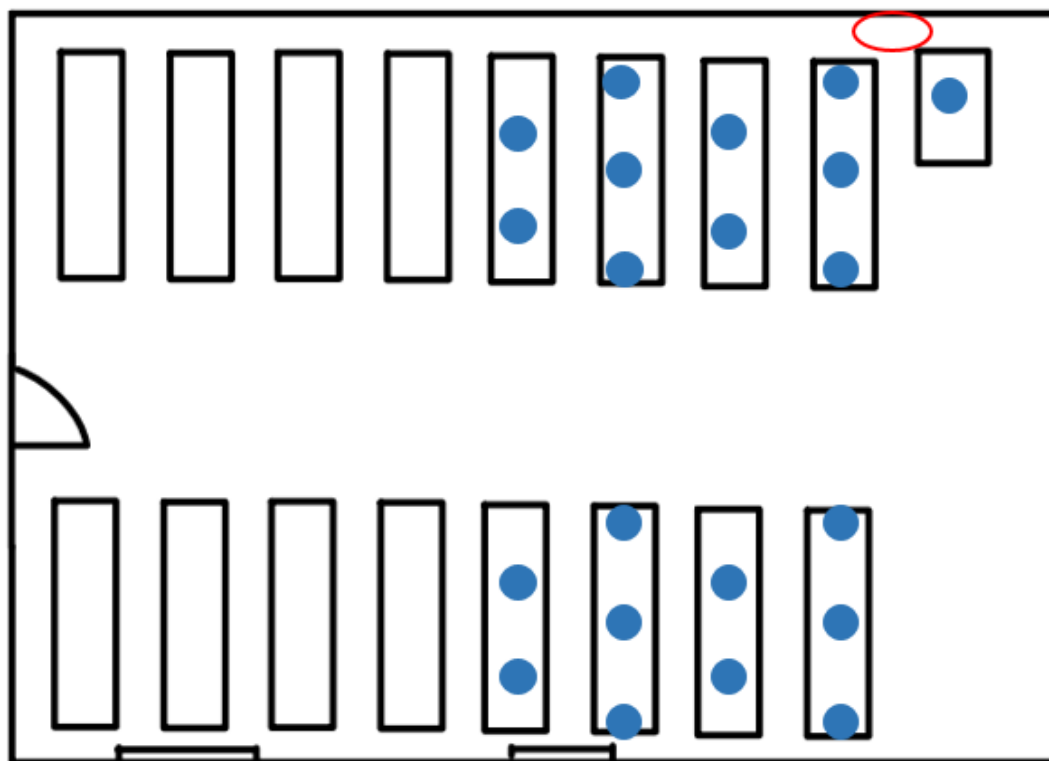
La primera semana, del día 22 al 26, el personal estuvo presente en la clase según su horario asignado, con posibles clases de 08:15 hasta 13:55, y el personal se encontró distribuido respetando la distancia de seguridad, dejando un espacio libre entre estudiantes como se muestra en la Figura 4-1. Cabe reseñar que solo son 20 alumnos, medida de seguridad tomada por la ENM para minimizar los contagios.

Es importante reseñar que los dos primeros días de medición de datos no estuvo instalado el sistema de control de la renovación del aire, tan solo se implantó el sistema de evaluación, es decir se recopilaban los datos de los parámetros del sensor, pero no se activó cuando la calidad del aire no era adecuada.

En las gráficas se podrá comprobar como el CO<sub>2</sub> se incrementa cuando el personal está presente, por eso es tan importante conocer los periodos de tiempo con el aula llena, para entender el estudio.

También es importante puntualizar que entre clase y clase hay 5 minutos de descanso, donde los niveles de CO<sub>2</sub> disminuyen.

El personal se representa en la Figura 4-1 por círculos de color azul y el sensor de la calidad del aire se señalará con un círculo hueco de color rojo.



**Figura 4-1 Distribución del personal en la clase**

Después de esta semana, habrá 9 días seguidos, del 27 de febrero al 7 de marzo, sin personal presente debido al fin de semana y a la semana de I+A de la ENM, es decir la semana de Instrucción y Adiestramiento donde los alumnos se centran en actividades militares y dejan de lado las clases. Por lo que el aula 10 estará desocupada, este periodo de tiempo se podrá determinar sin dificultad en las gráficas ya que habrá un cambio significativo en las variaciones de la concentración del CO<sub>2</sub>. Estos datos no serán de gran ayuda para el proyecto, debido a que no habrá posibilidad de contagio de COVID-19.

Por último, se medirá dos días más, el 8 y el 9 de marzo, al retomar las clases los alumnos, para obtener el máximo número de datos posibles y hacer así el estudio más fiable, se volverá a notar el cambio al mirar los gráficos debido al aumento del CO<sub>2</sub> que se puede apreciar.

## 4.2 Análisis de la concentración de CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> es el parámetro más importante que nos devuelve el sensor, fijándonos en el objetivo de este TFG, ya que una elevada concentración de este elemento significa que el aire no se está renovando eficazmente, lo cual conlleva que el virus SARS-CoV-2 se acumule en el aula a partir de aerosoles, lo que aumentaría la probabilidad de contagio.

Para comenzar, se va a mostrar un gráfico, la Figura 4-2, con todos los datos tomados por nuestro sistema, en este se podrá distinguir claramente la etapa en la que no se presenta el personal, debido a que el CO<sub>2</sub> se mantiene constante y aproximado al nivel de CO<sub>2</sub> exterior, que como ya mencionamos con anterioridad era 460 ppm. Con el personal asistente en el aula se presentarán diferentes situaciones. Se puede observar una excepción en el periodo de I+A, el día 4 de marzo, donde el CO<sub>2</sub> sube, fue debido a una presentación del Simulador Táctico que tomó lugar en el aula 10.

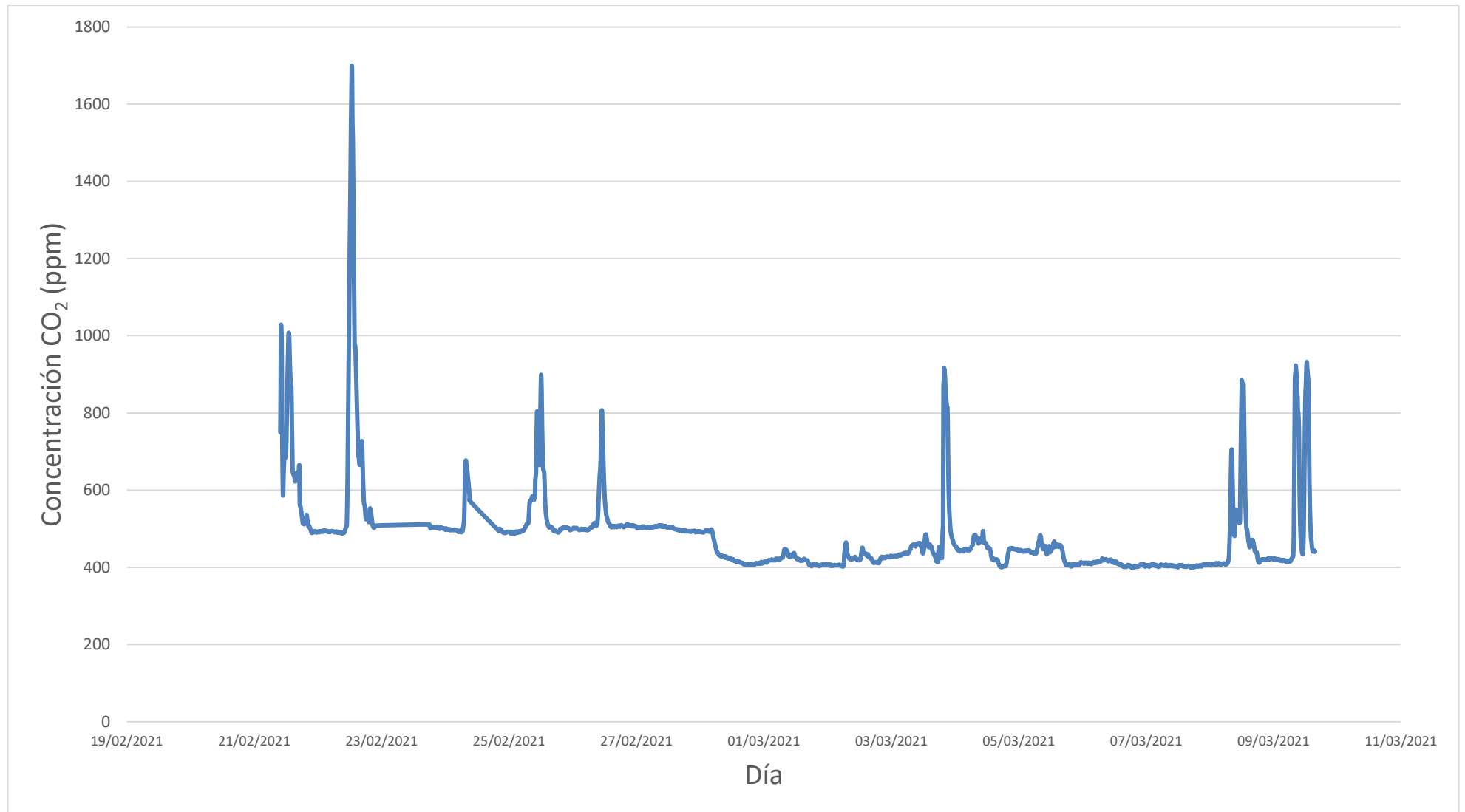
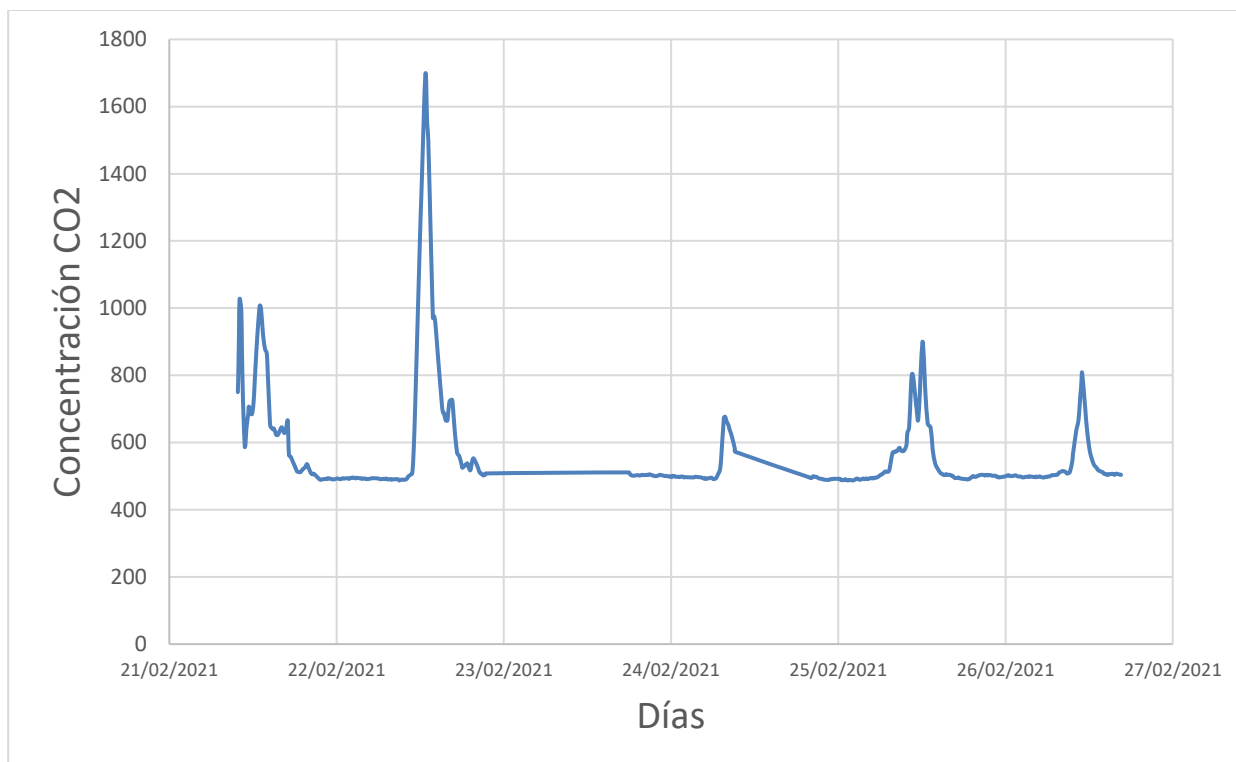


Figura 4-2 Concentración del CO<sub>2</sub> desde el 22 de febrero al 9 de marzo

En la Figura 4-3, se pueden observar los datos obtenidos durante los 5 primeros días, empezando en la mañana del lunes y acabando en la tarde del viernes. Se diferencian los momentos de ocupación del aula por los picos de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4-3 Concentración del CO<sub>2</sub> del 22 al 27 de febrero**

En el gráfico podemos observar la concentración del CO<sub>2</sub> en el eje vertical, y el día que se toman los datos en el eje horizontal.

Si nos fijamos en los datos del primer día, los valores del CO<sub>2</sub> sobrepasaron las 1000 ppm ya que no se había instalado el sistema de control, también se puede observar que llega a la cumbre y desciende hasta las 600 ppm, debido a que el aula se desalojó durante dos horas al no haber clase. Y a continuación volvió a ascender hasta las 1000 ppm.

Con estos datos, deducimos que la ventilación no fue adecuada, por dos posibles causas, en primer lugar, el aula expulsa menos flujo de aire del que necesita o, por otro lado, las ventanas o la puerta no estaban abiertas de forma correcta.

Apoyándonos en el segundo día, donde el valor de CO<sub>2</sub> es el peor que se ha alcanzado, siendo 1696 ppm, en este caso la ventilación sí que debió ser nula y se mantuvo por un periodo de tiempo mayor. Estos casos son los que buscamos evitar con la elaboración de este TFG, ya que es probable que se contagie el virus si hay algún caso, teniendo en cuenta de que las mascarillas no siempre están al 100% de su efectividad ya sea por colocación o por uso excesivo.

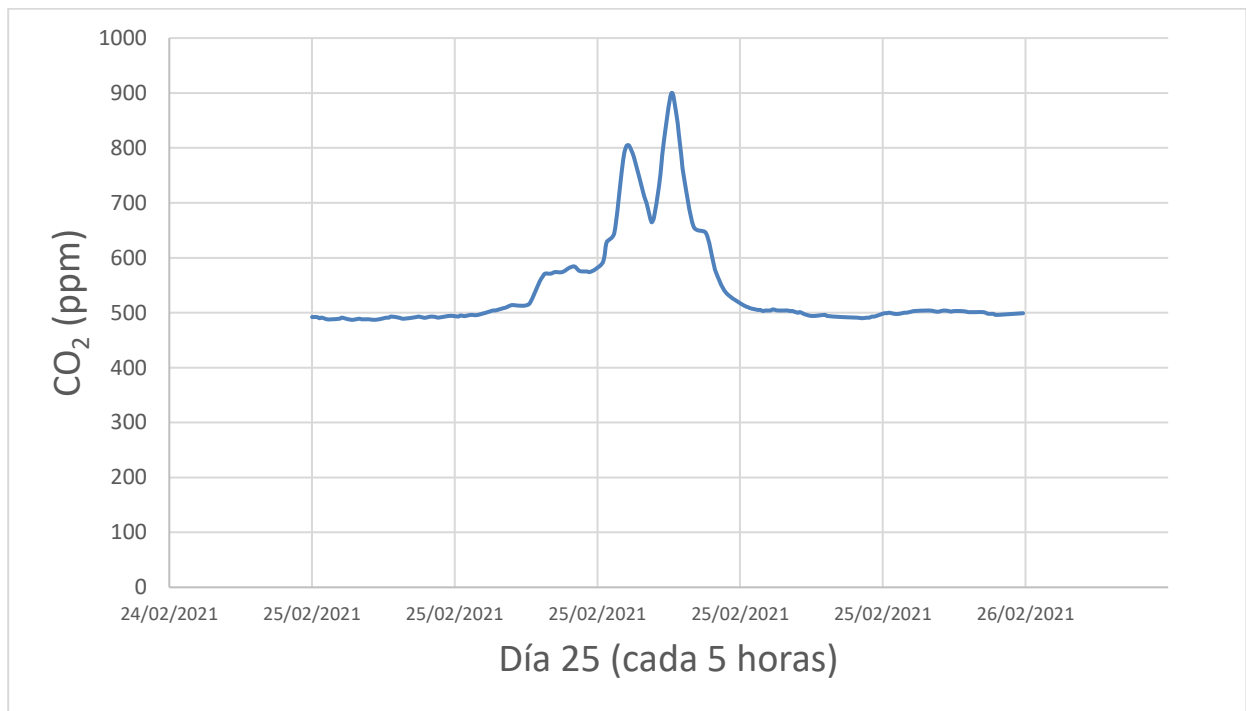
Para este caso, que es el más crítico, hemos calculado la velocidad de subida de la concentración, los valores suben de 584 ppm a 1696 ppm en 110 minutos, es decir se incrementa a 606ppm/h hasta que llega a su valor máximo, que sería el final de la clase, probablemente hubiese subido aún más en un intervalo de tiempo mayor. Este valor disminuye ligeramente más lento, bajó de 1696 a 701 en 145 minutos por lo que su velocidad de bajada fue de 411ppm/h.

A continuación, observaremos los resultados obtenidos tras la instalación del sistema de control, durante el miércoles, el jueves y el viernes. El valor más alto fue el jueves llegando a 899 ppm y ya comenzó a bajar, cabe destacar que cuando la concentración alcanza los 821 ppm se activa el LED de color amarillo, que enciende el ventilador automáticamente, para expulsar el aire con mayor velocidad,



lo que significa un mayor caudal expulsado dado que  $Q = V \times S$ , sabiendo que  $Q$  es caudal,  $V$  es velocidad y  $S$  es superficie.

Seguidamente, la Figura 4-4 muestra la evolución del CO<sub>2</sub> a lo largo de un día.



**Figura 4-4 Concentración del CO<sub>2</sub> el día 25 de febrero**

Se puede ver en el gráfico la evolución del CO<sub>2</sub> en un día, es decir a las 00:00 comienza con la misma concentración que en el exterior, y 8 horas más tarde, que empieza el horario lectivo se puede percibir que este valor comienza a incrementarse moderadamente por la exhalación humana, pero sin sobrepasar los límites establecidos ya que su umbral es 804 ppm. En un momento dado de la mañana los alumnos desalojan el aula, entonces el CO<sub>2</sub> baja hasta 665 ppm, hasta que los alumnos vuelven al aula, lo cual supone un incremento del CO<sub>2</sub> hasta 899 ppm. Después de esta hora el aula se queda vacía el resto del día por lo que el nivel del CO<sub>2</sub> regresa al valor inicial, en este caso aproximadamente 500 ppm.

Además, se encendió el filtro que mejora la calidad, aunque no se pueda comprobar con el material utilizado en este TFG, por lo cual se puede asumir que la calidad del aire se encontraba en condiciones adecuadas y la renovación del aire fue exitosa.

Los otros dos días con el sistema de control los valores fueron menores, obteniendo como valores umbrales 673 ppm y 790 ppm, por lo que se mantuvieron por debajo del tope, ya que al superar el valor 656 ppm el sistema nos advierte de que comprobemos la ventilación natural y que nos aseguremos de que esta todo abierto.

A lo largo de esta semana se puede observar que el CO<sub>2</sub> aumenta en el horario de clase y tras finalizar este desciende hasta un valor próximo al del CO<sub>2</sub> en el exterior, el cual se mantiene constante hasta el día siguiente, aproximadamente de 15:00 de la tarde hasta las 08:10 del día siguiente que comienza a incrementarse con la primera clase.

#### 4.2.1 Comparación de los datos de CO<sub>2</sub> con los valores umbrales según el RITE

Los valores umbrales establecidos para el CO<sub>2</sub> son los especificados por el RITE en concreto la Instrucción Técnica, **IT 1.1.4.2.2** “Categorías de calidad del aire interior del uso de los edificios”. A

continuación, las diferentes condiciones para los diversos valores de CO<sub>2</sub> concentrados en un espacio cerrado, se pueden observar en la Tabla 4-1, estos los tendremos en cuenta a lo largo del trabajo [22].

Categoría	Ppm	Calidad
IDA 1	350	Óptima
IDA 2	500	Buena
IDA 3	800	Media
IDA 4	1200	Baja

Tabla 4-1 Concentración de CO<sub>2</sub> en los locales. IT 1.1.4.2.2 [22]

Cabe destacar que para el CO<sub>2</sub> en nuestro estudio hemos concretado otros valores umbrales, ya que son para prevenir el contagio del COVID-19 a partir de los aerosoles, que es el principal objetivo, por consiguiente, los valores obtenidos no son los recomendados para nuestra salud ya que son superiores en general.

En el siguiente histograma, Figura 4-5, podemos observar todos los valores de CO<sub>2</sub> que se han tomado a lo largo de estos 16 días de campaña de medidas. Los hemos separado en 3 tipos diferentes según las condiciones que presentan.

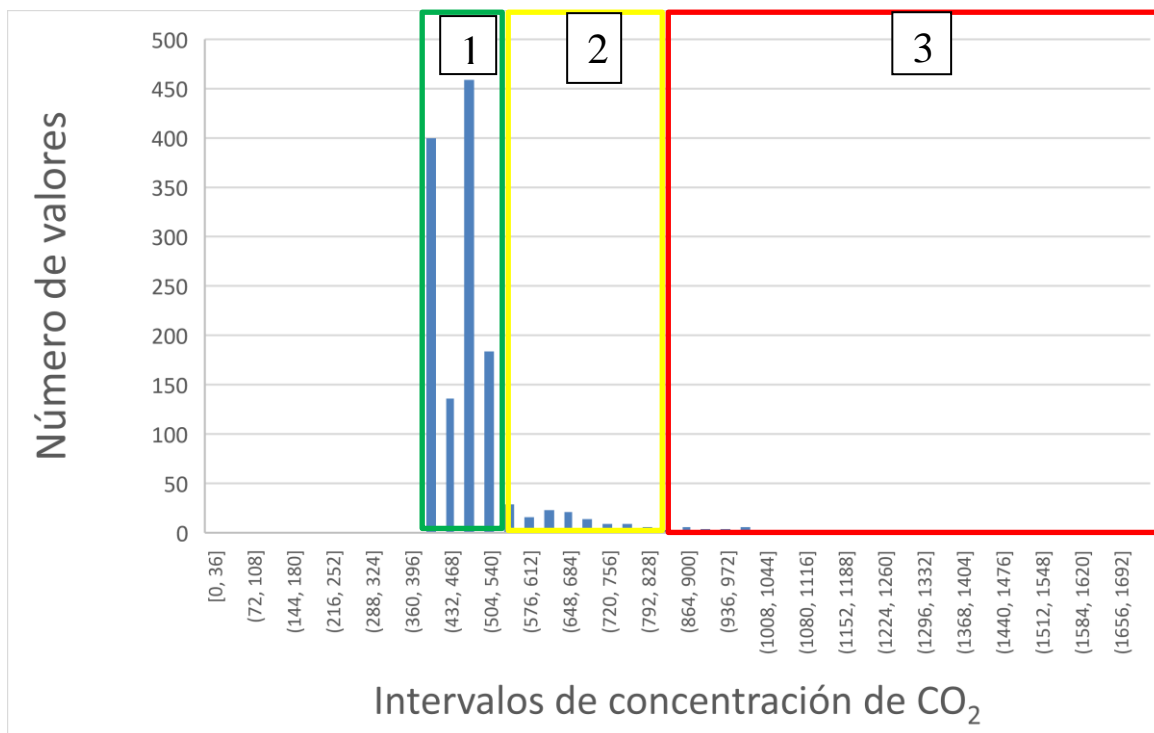


Figura 4-5 Histograma de la concentración del CO<sub>2</sub>

Como se puede comprobar, la mayor parte de los valores se concentra en los 3 primeros intervalos de valores, es decir el tipo 1, los cuales son bastante bajos, se encuentran entre las condiciones óptimas y buenas según la Tabla 4-1, pero todos estos valores se miden mayormente cuando el alumnado no está presente. Estas condiciones empeoran durante las clases es decir la calidad de aire se ve deteriorada por la presencia humana, y esto es lo que buscamos, mejorar con el sistema de control de la renovación del aire.

Entre los valores inadecuados, podemos destacar dos zonas, primeramente, los valores del tipo 2 que se delimitan entre 500 y 1000 ppm aproximadamente, los cuales son pocos, pero significativas ya que se pueden considerar de calidad media e incluso mala, y se deben tomar en cuenta y tomar medidas

para minimizar al máximo. Por último, el tipo 3, que sobrepasa los límites por bastante, alcanzando las 1700 ppm, lo cual habría que suprimir ya que significa una baja calidad y además se propagaría el virus SARS-CoV-2.

### 4.3 Comparación de otros parámetros con los valores umbrales establecidos

A continuación, realizaremos un estudio de los datos obtenidos a partir del sistema implantado en el Desarrollo del sistema de evaluación y control de la renovación del aire, plasmaremos los datos a partir de gráficos, comentaremos los resultados y los compararemos con los datos umbrales que hemos establecido provienen de fuentes oficiales y fiables [57].

#### 4.3.1 Estudio de la temperatura y la humedad relativa

Con respecto al RITE, la temperatura se debe mantener entre 21°C y 26°C con una humedad relativa que figure entre el 30 y el 70% [58].

En la Figura 4-6, se pueden observar los datos obtenidos a lo largo de las mediciones tomadas, la línea de color azul representa la humedad relativa y la línea roja la temperatura.

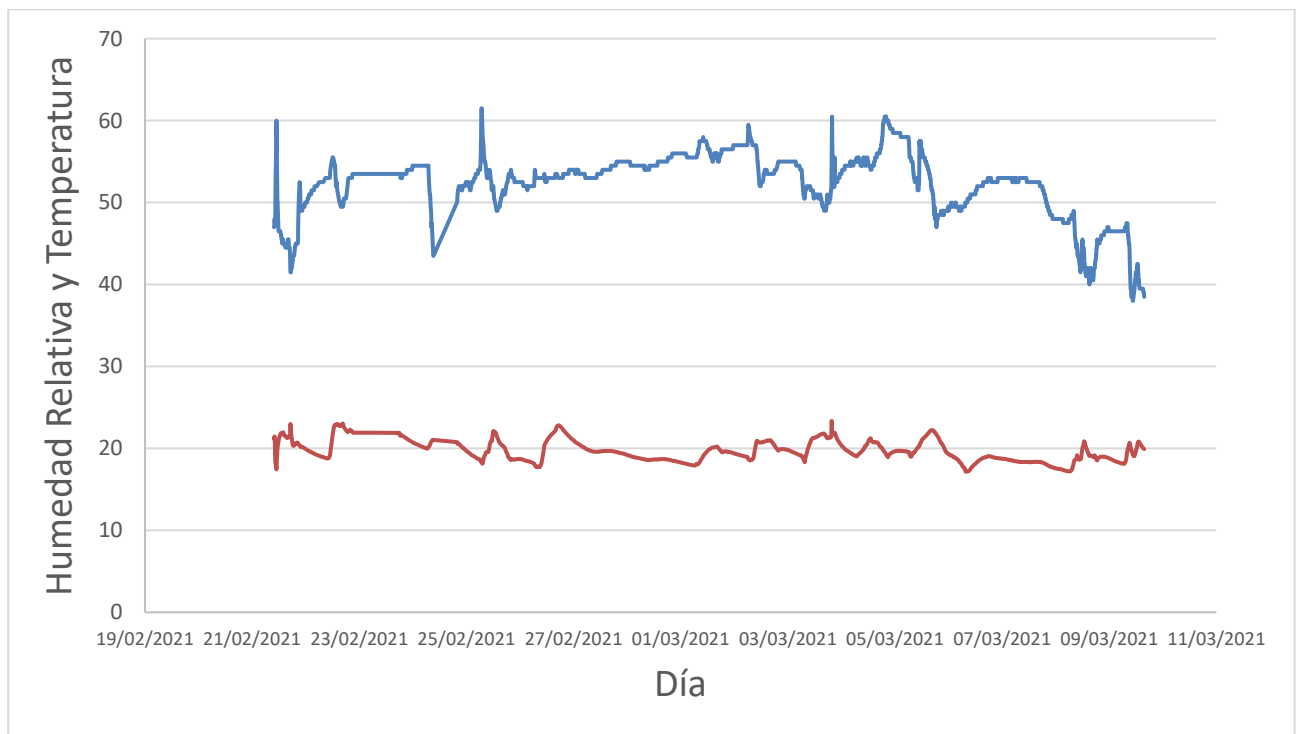


Figura 4-6 Humedad relativa y temperatura en el aula del 22 de febrero al 9 de marzo

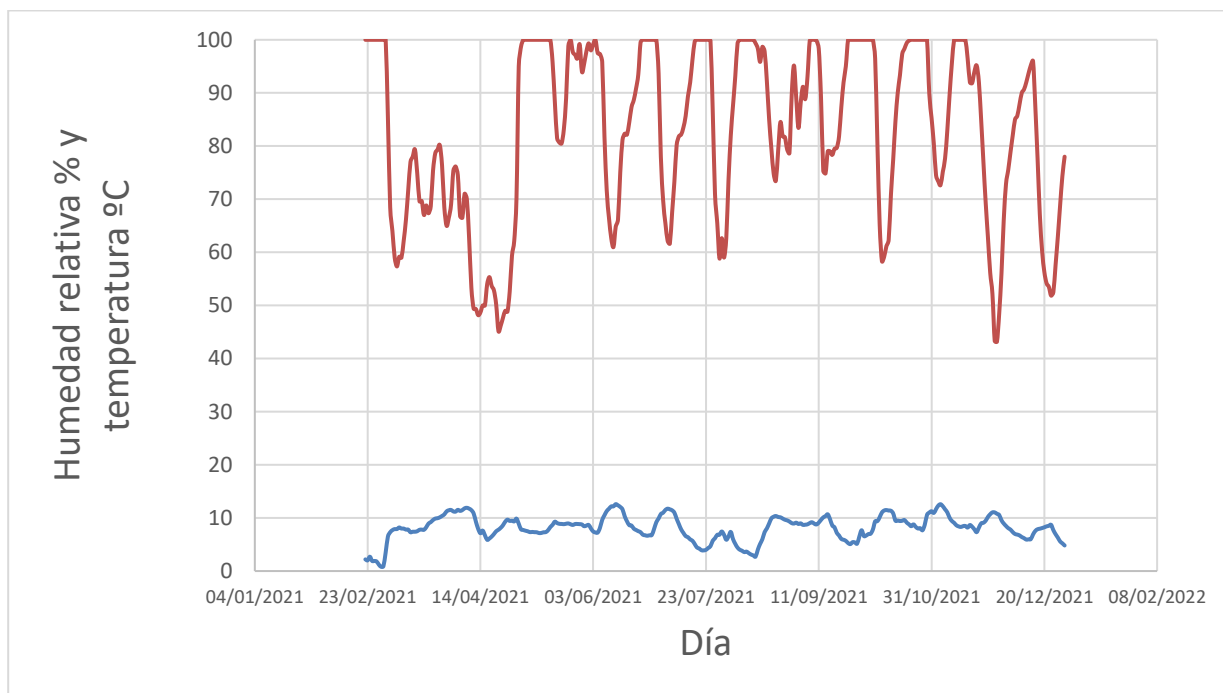
Como se puede percibir, la humedad se mantiene entre el 40% y el 60% en todo momento, por lo cual se encuentra dentro de los requisitos, y no hará falta controlarla de manera estricta. Esto se debe a que se está ventilando casi todo el día. Como podemos comprobar en la Figura 4-7, las condiciones son mucho mejores que en la estación meteorológica más cercana, ya que gran parte del tiempo se supera el 70% de Humedad Relativa, debido a la lluvia.

Si el parámetro de la humedad relativa estuviese fuera de los límites establecidos por las fuentes oficiales, se podría recurrir a un deshumidificador para eliminar el H<sub>2</sub>O del aire, si el caso fuese el opuesto, es decir muy seco con menos del 40% de humedad, se podría utilizar un humidificador.

En cambio, la temperatura no es la deseable, ya que gran parte del tiempo la temperatura se encuentra por debajo de los 21°C, llegando hasta los 17,45°C, esto se debe al hecho de ventilar el aula la mayor parte del tiempo. Aunque si la comparamos con la temperatura del exterior, se nota una gran mejoría debido a la calefacción y a las paredes, que funcionan como aislante térmico en gran medida.

Se ventila con la intención de minimizar la posibilidad de transmitir el virus, pero esta acción puede suponer un deterioro del confort ambiental, sobre todo en épocas invernales.

En la Figura 4-7 se pueden comprobar las condiciones en la estación de Lourizán, donde la máxima temperatura es de 13°C, es decir mucho más bajas. Las condiciones mejoran significativamente, pero no llegan a estar entre los límites establecidos, para considerarse una óptima condición térmica.



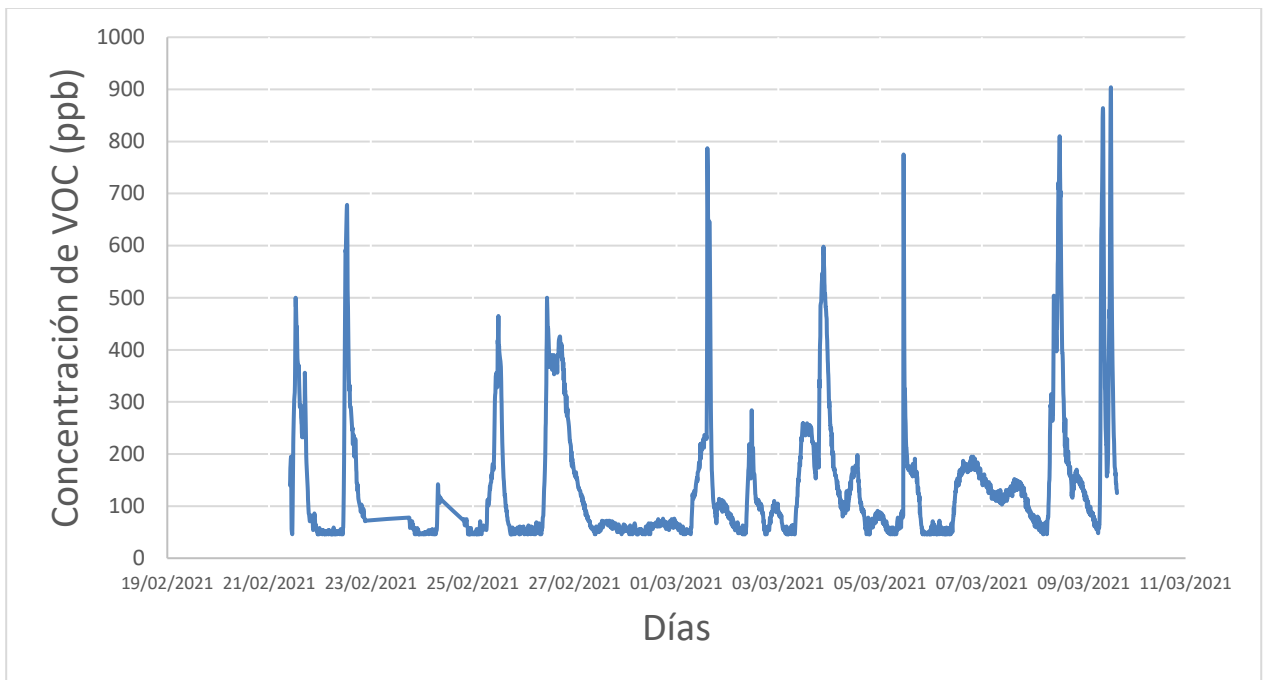
**Figura 4-7 Humedad relativa y temperatura en Lourizán**

Por lo tanto, se debería considerar aumentar la potencia de la calefacción o instalar un sistema de ventilación o filtración más potente, para no tener que abrir las ventanas y empeorar las condiciones térmicas del aula.

#### *4.3.1 Estudio de los compuestos orgánicos volátiles (VOC)*

Los compuestos orgánicos volátiles no tienen un sistema de medición estandarizado, ya que hay muchos tipos diferentes de partículas que lo componen, para un análisis preciso es necesario detectar los distintos compuestos y sus concentraciones. Según el International Well Building Institute se recomienda menos de 500  $\mu\text{m}/\text{m}^3$  [59]. Por otro lado, el sensor Airthings considera buena calidad por debajo de 250 ppb y hasta 2000 ppb se puede considerar calidad media, utilizaremos este valor ya que el sensor nos devuelve este parámetro en esta unidad [60].

Los compuestos orgánicos volátiles están concentrados gran parte del tiempo por debajo de 100 ppb lo que significa que está dentro de los valores aceptables, como se puede observar en la Figura 4-8.



**Figura 4-8 Valor VOC del 22 de febrero al 9 de marzo**

Por otra parte, el nivel sube puntualmente hasta 600-900 ppb lo cual supone una calidad media, y requieren cierta preocupación. Estos valores se deben a diferentes razones, entre ellos a la pintura, que según las condiciones meteorológicas se pronuncian más o menos, y otro factor muy característico son los materiales de limpieza, que utilizan los alumnos al terminar las clases para limpiar las mesas y así prevenir la transmisión del COVID-19.

#### 4.3.2 Estudio del radón

Por último, nombrar el radón que está regulado por la normativa de la Unión Europea, la Directiva EURATOM 59/13, la cual establece un máximo de promedio anual de 300 Bq/m<sup>3</sup> [61]. La concentración de este gas se debe a los materiales graníticos del edificio, o los subsuelos.

En la Figura 4-9 se pueden observar las condiciones que ha presentado este elemento a lo largo de todo el estudio, se puede observar que el valor del radón comenzó aproximadamente en 0 Bq/m<sup>3</sup> pero con una tendencia ascendente, el valor se estabilizó alrededor de los 100 Bq/m<sup>3</sup>, esto se debe a que el sensor requiere aproximadamente una semana para calibrarse.

El radón en el aula llega como máximo a 100 Bq/m<sup>3</sup>, siendo menor que el valor umbral, por lo cual este elemento no es preocupante. Estos valores son tan bajos debido a la ventilación continua en la clase.

Este elemento depende mayoritariamente del aula donde se tomen los datos, en esta aula la calidad es muy buena, pero se podría dar el caso que en otras aulas este valor subiese considerablemente.

Se usan los datos del radón “Long Term” ya que es más eficaz en largos periodos de tiempo, y este sistema se ha implantado con la intención de utilizarlo continuamente. El radón “Short Term” es para tiempo más reducidos, es decir, de 2 a 7 días.

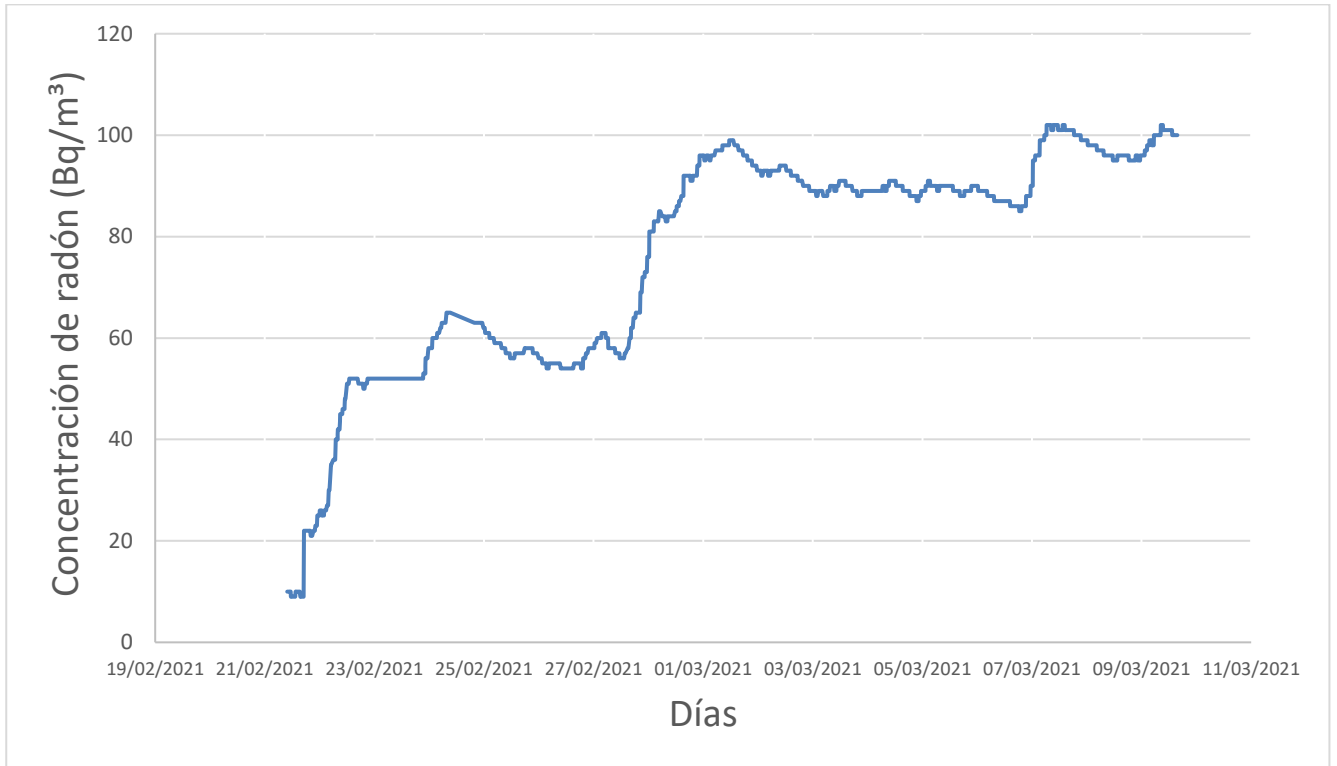


Figura 4-9 Concentración del radón del 22 de febrero al 9 de marzo



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

En una actualidad marcada por el virus SARS-CoV-2, se busca detener la propagación de dicho virus. Por eso resulta de interés, la implementación de este sistema de evaluación y control de la renovación del aire. Este se ha podido utilizar un par de semanas y se ha podido comprobar su utilidad. Durante la realización de este trabajo, uno se concienza sobre la importancia que tiene la calidad del aire interior, y no solo la peligrosidad del COVID-19.

Tras la realización de este TFG, con la investigación que ha requerido, los datos tomados, y las medidas implantadas se concluye:

- La importancia de una buena renovación del aire, debido a la cantidad de contaminantes que se acumulan en los espacios interiores y sus efectos sobre los humanos. Y se hace necesario un reglamento oficial sobre la calidad del aire interior ya que algunos aspectos pueden generar dudas.
- Que se deben seguir las normas contra la transmisión del virus SARS-CoV-2 rigurosamente, ya que existe una diferencia descomunal, empezando desde llevar la mascarilla bien colocada hasta que se encuentre en buen estado. Aunque no existe riesgo nulo.
- La necesidad del Internet de las Cosas, y su utilidad tan expandida en el mundo. Además de familiarizarnos con el concepto se ha dado uso a la tecnología con resultados fructíferos.
- La utilidad del CO<sub>2</sub> para el estudio de la renovación del aire en un espacio cerrado, además de otros métodos que no se han realizado pero se propondrán en las Líneas futuras.
- Gracias a la recopilación de datos se ha podido realizar un estudio detenido sobre los distintos parámetros del aire que hemos estudiado. Además, el uso de gráficos genera una interpretación mucho más clara y rápida.
- La utilidad de la comparación entre los datos obtenidos, a partir de nuestro sistema desarrollado, y los valores umbrales establecidos por las distintas normativas, para poder conocer las condiciones establecidas y poder tomar las medidas más oportunas.

Por último, es importante resaltar que se han llevado a cabo los apartados indicados en los Objetivos, recalando el desarrollo de la herramienta y la evaluación de la renovación del aire. Durante el desarrollo de este TFG, se pudieron conocer las deficiencias del aula en el que trabajamos y también se puede ver mejoría a partir del sistema de actuación. Aunque todavía quedan aspectos que retocar, que se comentarán en las Líneas futuras.



## 5.2 Líneas futuras

Después de la realización de este trabajo se proponen una serie de posibles objetivos futuros, debido a ideas y problemas que se han ido encontrando a la vez que se desarrollaba. Estas se exponen a continuación:

- Implantación de más elementos en el sistema, como conectar el filtro u otros aparatos que también mejoren la calidad del aire y no solo la renovación del aire, como podría ser un deshumidificador. Y conseguir que el sistema sea totalmente automático, que no requiera de personal para funcionar.
- También se podrían enviar los datos a aplicaciones web de código abierto, que permiten la visualización de los datos, a partir de gráficas que se crean automáticamente con los datos que se va registrando, como por ejemplo Grafana.
- Utilizar otro método para determinar la ventilación del aula, como puede ser hallar la tasa de la renovación del aire, a partir de un sensor de CO<sub>2</sub> y hielo seco, para este caso se necesita que el aula está desocupada.
- Estudiar las condiciones del aire en más aulas para compararlas y analizarlas, y así poder mejorar el sistema para que su uso sea general, es decir, que se pueda utilizar en cantidad de compartimentos diferentes, tras proporcionar sus parámetros característicos tal como su volumen
- Hacer una investigación sobre la posibilidad de implantar el sistema de evaluación y control en los buques de la Armada Española.

Este sistema puede tener gran variedad de complementos debido a que abarca un tema muy amplio, el proyecto se apoya en muchas bases para su estudio.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laura Ruiz Ruiz, María Peñahora García Sanz., «[www.insst.es](http://www.insst.es),» [En línea]. Available: <https://www.insst.es/documents/94886/509319/CalidadambinteriorDTECAI.pdf/6f7cfa1c-215d-4f56-9e39-2869a23d8892>. [Último acceso: 28 02 2021].
- [2] (INSHT), Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/CAI+en+oficinas.pdf/cf678a1a-ac21-40a7-9c31-a22efe5428d3>. [Último acceso: 28 02 2021].
- [3] Solá, Xavier Guardino, «[www.insst.es](http://www.insst.es),» [En línea]. Available: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+44.+Calidad+del+aire+interior>. [Último acceso: 28 02 2021].
- [4] Sundell, J., «[pubmed.ncbi.nlm.nih.gov](http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov),» Biblioteca Nacional de Medicina, [En línea]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15330772/>. [Último acceso: 20 01 2021].
- [5] LA VANGUARDIA, «[www.lavanguardia.com](http://www.lavanguardia.com),» 26 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.lavanguardia.com/vida/20191126/471881709587/la-contaminacion-causa-10000-muertes-ano-espana-y-7-millones-en-el-mundo.html#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20causa%2010.000%20muertes%20a%C3%B1o%20Espa%C3%B1a%20y%207%20millones%20en%20el%20mundo,>. [Último acceso: 15 01 2021].
- [6] «Statista,» 28 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1104227/numero-acumulado-de-casos-de-coronavirus-covid-19-en-el-mundo-enero-marzo/>. [Último acceso: 2021 02 2021].
- [7] Organización Panamericana de la Salud, «[www.paho.org](http://www.paho.org),» 11 Marzo 2020. [En línea]. Available: La OMS caracteriza a COVID-19 como una pandemia - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud ([paho.org](http://paho.org)). [Último acceso: 16 01 2021].
- [8] Juan Antonio Ortega García, Ferrán Campillo López, «Asociación Española de Pediatra,» 23 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.aeped.es/sites/default/files/covid19flotaenel aire212.pdf>. [Último acceso: 19 01 2021].
- [9] EL PAÍS, «[elpais.com](http://elpais.com),» 24 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://elpais.com/ciencia/2020-10-24/un-salon-un-bar-y-una-clase-asi-contagia-el-coronavirus-en-el-aire.html>. [Último acceso: 15 01 2021].

- [10] Antonio Alcamí, Margarita del Val , Miguel Hernán, Pello Latassa, José Luis Jiménez, Xavier Querol, Ana Robustillo, Gloria Sánchez, Alfonso Valencia, «[www.ciencia.gob.es](http://www.ciencia.gob.es),» 29 Octubre 2020. [En línea]. Available: [https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Prensa/FICHEROS/Informe\\_Aerosoles\\_COVID\\_MCienciaInnov.pdf](https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Prensa/FICHEROS/Informe_Aerosoles_COVID_MCienciaInnov.pdf). [Último acceso: 16 01 2021].
- [11] M<sup>a</sup> José Berenguer Subils, M<sup>a</sup> Carmen Martí Solé, «[www.insst.es](http://www.insst.es),» 1990. [En línea]. Available: [https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp\\_243.pdf/9f6cbba4-ac26-4d0b-aae7-068ca6e66914](https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_243.pdf/9f6cbba4-ac26-4d0b-aae7-068ca6e66914). [Último acceso: 22 01 2021].
- [12] OBSERVATORIOS SALUD Y MEDIO AMBIENTE, «[higieneambiental.com](http://higieneambiental.com),» 2015. [En línea]. Available: <https://higieneambiental.com/sites/default/files/images/pdf/hogares-saludables-edificios-sostenibles.pdf>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [13] Ecologistas en acción, «[www.ecologistasenaccion.org](http://www.ecologistasenaccion.org),» 01 Marzo 2008. [En línea]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/17875/el-sindrome-del-edificio-enfermo/#:~:text=Se%20conoce%20como%20s%C3%ADndrome%20del,materiales%20sint%C3%A9ticos%20o%20la%20electricidad>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [14] Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/normativa-espanola.aspx>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [15] Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/normativa-europea.aspx>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [16] Actualia, «[www.calidaddelaireinterior.es](http://www.calidaddelaireinterior.es),» [En línea]. Available: <http://www.calidaddelaireinterior.es/normativa-rite/normativa-rite-une-171330/>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [17] S&P, «[www.solerpalau.com](http://www.solerpalau.com),» 29 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/une-13779-ventilacion/>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [18] Norma española, «[www.hibelia.com](http://www.hibelia.com),» Julio 2008. [En línea]. Available: [https://www.hibelia.com/sites/default/files/UNE\\_171210.pdf](https://www.hibelia.com/sites/default/files/UNE_171210.pdf). [Último acceso: 18 01 2021].
- [19] Higiene ambiental, «[higieneambiental.com](http://higieneambiental.com),» 29 Septiembre 2008. [En línea]. Available: <https://higieneambiental.com/calidad-de-aire-interior/une-171212-de-calidad-de-aire-interior-buenas-practicas-en-las-operaciones->. [Último acceso: 18 01 2021].
- [20] Higiene ambiental, «[higieneambiental.com](http://higieneambiental.com),» 15 Marzo 2006. [En línea]. Available: <https://higieneambiental.com/calidad-de-aire-interior/norma-une-100012-de-higienizacion-de-sistemas-de-climatizacion>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [21] [www.fedecai.org](http://www.fedecai.org), «[www.fedecai.org](http://www.fedecai.org),» Mayo 2020. [En línea]. Available: <http://www.fedecai.org/wp-content/uploads/2020/11/FEDECAI-COVID-SAFE.pdf>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [22] DELSAN, [En línea]. Available: <https://delsaningenieros.com/informacion-tecnica/documentacion-tecnica/exigencia-de-calidad-del-aire-interior/>. [Último acceso: 18 01 2021].
- [23] Ministerio de ciencia e innovación, «[www.ciencia.gob.es](http://www.ciencia.gob.es),» [En línea]. Available: [https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia\\_para\\_reducir\\_riesgo\\_de\\_contagio.pdf](https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia_para_reducir_riesgo_de_contagio.pdf). [Último acceso: 22 01 2021].

- [24] Siber, [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/ventilacion-natural/>. [Último acceso: 27 01 2021].
- [25] María Cruz Minguillón, Xavier Querol, José Manuel Felisi y Tomás Garrido, «CSIC,» 06 Noviembre 2020. [En línea]. Available: [https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia\\_para\\_ventilacion\\_en\\_aulas\\_csic.pdf](https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia_para_ventilacion_en_aulas_csic.pdf). [Último acceso: 17 01 2021].
- [26] Efficient Windows, [En línea]. Available: <https://www.efficientwindows.org/design-ventilation/>. [Último acceso: 27 01 2021].
- [27] Departamento de Salud Ambiental, «Madrid salud,» Departamento de Salud Ambiental Subdirección General de Salud Pública, 08 10 2020. [En línea]. Available: [https://madridsalud.es/wp-content/uploads/2020/11/InfSAM33-2020Ventilacion\\_interio\\_como\\_medida\\_preventivaCOVID19.pdf](https://madridsalud.es/wp-content/uploads/2020/11/InfSAM33-2020Ventilacion_interio_como_medida_preventivaCOVID19.pdf). [Último acceso: 26 01 2021].
- [28] Ehsan S. Mousavi , Krystal J. Godri Pollitt, Jodi Sherman, Richard A. Martinello , «Performance analysis of portable HEPA filters and temporary plastic anterooms on the spread of surrogate coronavirus,» *ELSEVIER*, p. 10, 2020.
- [29] AIRTHINGS, «www.airthings.com,» [En línea]. Available: <https://www.airthings.com/es/wave-plus>. [Último acceso: 17 01 2021].
- [30] Domotrica, 27 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://domotrica.es/los-7-mejores-monitores-y-sensores-inteligentes-de-calidad-del-aire-para-su-hogar/>. [Último acceso: 29 01 2021].
- [31] «ONSET,» [En línea]. Available: <https://www.onsetcomp.com/co2>. [Último acceso: 22 02 2021].
- [32] Juan Carlos, López, «Xataka,» 17 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/analisis/xiaomi-mi-air-purifier-3h-analisis-caracteristicas-precio-especificaciones>. [Último acceso: 17 01 2021].
- [33] ¿Qué es un filtro HEPA y por qué es importante?, «Samsung,» 14 08 2020. [En línea]. Available: <https://news.samsung.com/co/que-es-un-filtro-hepa-y-por-que-es-importante>.
- [34] Econimía digital, 25 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.economiadigital.es/consumo/los-4-purificadores-de-aire-mas-vendidos-en-tiempos-de-coronavirus.html>. [Último acceso: 29 01 2021].
- [35] María Cruz Minguillón, Xavier Querol, José Manuel Felisi y Tomás Garrido, «CSIC,» Octubre 2020. [En línea]. Available: [https://www.csic.es/sites/default/files/anexos\\_guia\\_para\\_ventilacion\\_en\\_aulas\\_csic-mesura\\_.pdf](https://www.csic.es/sites/default/files/anexos_guia_para_ventilacion_en_aulas_csic-mesura_.pdf). [Último acceso: 01 02 2021].
- [36] Fundación de la Innovación Bankinter, «Accenture,» 2011. [En línea]. Available: [http://boletines.prisadigital.com/El\\_internet\\_de\\_las\\_cosas.pdf](http://boletines.prisadigital.com/El_internet_de_las_cosas.pdf). [Último acceso: 21 02 2021].
- [37] Tim O'Reilly, John battelle, Web Squared: Web 2.0 Five Years On, Web<sup>2</sup>, 2009.
- [38] T Bem, «Aprende con Pytjon y Raspberry Pi,» 27 09 2019. [En línea]. Available: <https://teslabem.com/blog/libro-aprende-iot-con-python-y-raspberry-pi/>. [Último acceso: 21 02 2021].
- [39] ABC, «¿Qué es Raspberry PI y para qué sirve?,» 21 Julio 2013. [En línea]. Available: <https://www.abc.es/tecnologia/informatica-hardware/20130716/abci-raspberry-como-201307151936.html>. [Último acceso: 30 01 2021].

- [40] Fazt, «Raspberry Pi, Curso para principiantes,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ra6kNSIB1uA&t=3866s>. [Último acceso: 30 01 2021].
- [41] RaspberryPi, «Raspberry Pi model 3B,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Último acceso: 2021 02 25].
- [42] Zaragoza, Manuel, «Educar para el cambio,» [En línea]. Available: <https://educarparaelcambio.com/arduino/reto-10-led-rgb-jugando-con-los-colores-primarios-de-la-luz/>. [Último acceso: 25 02 2021].
- [43] Robledano, Ángel, «openwebinars.net,» 23 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://openwebinars.net/blog/que-es-python/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [44] Todoequipo, «Ventajas y desventajas de Python,» 09 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://todoequipo.com/ventajas-y-desventajas-de-python/>. [Último acceso: 24 01 2021].
- [45] Zamora, Susana, «El experimento de medición de CO2 de un instituto de Benalmádena para prevenir el Covid-19 en clase,» SUR, 21 10 2020. [En línea]. Available: <https://www.diariosur.es/costadelsol/experimento-co2-coronavirus-instituto-benalmadena20201021125626-nt-20201021130135-nt.html>. [Último acceso: 21 02 2021].
- [46] Villareal, Antonio, «El Confidencial,» [En línea]. Available: [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2020-11-18/covid-19-medidor-co2-48-horas\\_2836300/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2020-11-18/covid-19-medidor-co2-48-horas_2836300/). [Último acceso: 22 02 2021].
- [47] BOSCH, [En línea]. Available: <https://www.bosch-professional.com/static/specials/glm100c/ar/es/glm-100-c-professional.html>. [Último acceso: 01 03 2021].
- [48] Joseph Allen, Jack Spengler, Emily Jones, Jose Cedeno-Laurent, «schools.forhealth.org,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/08/Harvard-Healthy-Buildings-program-How-to-assess-classroom-ventilation-08-28-2020.pdf>. [Último acceso: 16 01 2021].
- [49] Aniés, Javier, «www.asepeyo.es,» ASEPEYO, [En línea]. Available: <https://www.asepeyo.es/blog/seguridad-laboral/aerosoles-contagio-covid-19/>. [Último acceso: 17 01 2021].
- [50] A. Persily, L. de Jonge, «Carbon dioxide generation rates for building occupants,» *Indoor Air*, vol. 27, 2017.
- [51] «purificarmiaire.com,» [En línea]. Available: <https://purificarmiaire.com/purificadores-de-aire/que-significan-los-valores-cadr-y-ach/>. [Último acceso: 17 02 2021].
- [52] Green Protection, «www.greenprotection.es,» [En línea]. Available: <https://www.greenprotection.es/filtros-hepa-coronavirus/>. [Último acceso: 22 02 2021].
- [53] Gadget Reactor pyHS100, «GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/GadgetReactor/pyHS100>. [Último acceso: 27 01 2021].
- [54] Airthings Waveplus Reader, «GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/Airthings/waveplus-reader>. [Último acceso: 27 01 2021].
- [55] «ATAREAO,» 3 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.atareao.es/raspberry/raspberry-pi-y-un-led-rgb/>. [Último acceso: 03 03 2021].

- [56] Tp-link, [En línea]. Available: <https://www.tp-link.com/es/home-networking/smart-plug/hs100/#specifications>. [Último acceso: 17 01 2021].
- [57] IDAE, Noviembre 2007. [En línea]. Available: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Comentarios\\_RITE\\_GT7\\_07\\_2200d691.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Comentarios_RITE_GT7_07_2200d691.pdf). [Último acceso: 23 Febrero 2021].
- [58] BOE, 11 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2009/12/11/pdfs/BOE-A-2009-19915.pdf>. [Último acceso: 23 02 2021].
- [59] S&P, «Monitorizar la calidad del aire interior: ¿por qué es importante?,» 26 10 2020. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/monitorizar-calidad-aire-interior/>. [Último acceso: 04 03 2021].
- [60] Airthings, «What is VOC?,» [En línea]. Available: <https://www.airthings.com/es/what-is-voc>. [Último acceso: 04 03 2021].
- [61] Sarachu, Elena, «Radón en edificios normativa y soluciones,» 20 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://e-eficiencia.com/radon-en-edificios-normativa-y-soluciones/>. [Último acceso: 23 02 2021].

## ANEXO I: CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA EL SISTEMA DESARROLLADO

A continuación, se presenta el código de Python utilizado para ejecutar la herramienta implantada por este Trabajo de Fin de Grado.

```

from bluepy.btle import UUID, Peripheral, Scanner, DefaultDelegate

import sys
import time
import struct
import backports
import tableprint
import subprocess
import RPi.GPIO as GPIO

# =====
# Script guards for correct usage
# =====
COLORS = [0xFF0000, 0x00FF00, 0x0000FF, 0x00FFFF, 0xFF00FF, 0xFFFF00, 0FFFFFFF, 0xB695C0]
if len(sys.argv) != 2:
    print "ERROR: Input argument SN."
    print "USAGE: read_waveplus.py SN"
    print "    where SN is the 10-
digit serial number found under the magnetic backplate of your Wave Plus."
    sys.exit(1)

if sys.argv[1].isdigit() is not True or len(sys.argv[1]) != 10:
    print "ERROR: Invalid SN format."
    print "USAGE: read_waveplus.py SN SAMPLE-PERIOD [pipe > yourfile.txt]"
    print "    where SN is the 10-
digit serial number found under the magnetic backplate of your Wave Plus."
    print "    where SAMPLE-
PERIOD is the time in seconds between reading the current values."
    print "    where [pipe > yourfile.txt] is optional and specifies that you want to
pipe your results to yourfile.txt."
    sys.exit(1)

    Mode = 'terminal' # (default) print to terminal

SerialNumber = int(sys.argv[1])

# Check: https://www.atarea.es/raspberry/raspberry-pi-y-un-led-rgb/
pins = {'Red': 22, 'Green': 17, 'Blue': 27}

# =====
# Utility functions for WavePlus class
# =====

```



```

def parseSerialNumber(ManuDataHexStr):
    if (ManuDataHexStr == None or ManuDataHexStr == "None"):
        SN = "Unknown"
    else:
        ManuData = bytearray.fromhex(ManuDataHexStr)

        if (((ManuData[1] << 8) | ManuData[0]) == 0x0334):
            SN = ManuData[2]
            SN |= (ManuData[3] << 8)
            SN |= (ManuData[4] << 16)
            SN |= (ManuData[5] << 24)
        else:
            SN = "Unknown"
    return SN

# =====
# Class WavePlus
# =====
class WavePlus():

    def __init__(self, SerialNumber):
        self.periph = None
        self.curr_val_char = None
        self.MacAddr = None
        self.SN = SerialNumber
        self.uuid = UUID("b42e2a68-ade7-11e4-89d3-123b93f75cba")

    def connect(self):
        # Auto-discover device on first connection
        if (self.MacAddr is None):
            scanner = Scanner().withDelegate(DefaultDelegate())
            searchCount = 0
            while self.MacAddr is None and searchCount < 50:
                devices = scanner.scan(0.1) # 0.1 seconds scan period
                searchCount += 1
                for dev in devices:
                    ManuData = dev.getValueText(255)
                    SN = parseSerialNumber(ManuData)
                    if (SN == self.SN):
                        self.MacAddr = dev.addr # exits the while loop on next conditional check
                        break # exit for loop

            if (self.MacAddr is None):
                print "ERROR: Could not find device."
                print "GUIDE: (1) Please verify the serial number."
                print "      (2) Ensure that the device is advertising."
                print "      (3) Retry connection."
                sys.exit(1)

```

```

# Connect to device
if (self.periph is None):
    self.periph = Peripheral(self.MacAddr)
if (self.curr_val_char is None):
    self.curr_val_char = self.periph.getCharacteristics(uuid=self.uuid)[0]

def read(self):
    if (self.curr_val_char is None):
        print "ERROR: Devices are not connected."
        sys.exit(1)
    rawdata = self.curr_val_char.read()
    rawdata = struct.unpack('<BBBBHHHHHHH', rawdata)
    sensors = Sensors()
    sensors.set(rawdata)
    return sensors

def disconnect(self):
    if self.periph is not None:
        self.periph.disconnect()
        self.periph = None
        self.curr_val_char = None

# =====
# Class Sensor and sensor definitions
# =====
NUMBER_OF_SENSORS          = 7
SENSOR_IDX_HUMIDITY        = 0
SENSOR_IDX_RADON_SHORT_TERM_AVG = 1
SENSOR_IDX_RADON_LONG_TERM_AVG = 2
SENSOR_IDX_TEMPERATURE     = 3
SENSOR_IDX_REL_ATM_PRESSURE = 4
SENSOR_IDX_CO2_LVL         = 5
SENSOR_IDX_VOC_LVL         = 6

class Sensors():
    def __init__(self):
        self.sensor_version = None
        self.sensor_data    = [None]*NUMBER_OF_SENSORS
        self.sensor_units   = ["ms", "%rH", "Bq/m3", "Bq/m3", "degC", "hPa", "ppm", "ppb"]

    def set(self, rawData):
        self.sensor_version = rawData[0]
        if (self.sensor_version == 1):
            self.sensor_data[SENSOR_IDX_HUMIDITY]          = rawData[1]/2.0
            self.sensor_data[SENSOR_IDX_RADON_SHORT_TERM_AVG] = self.conv2radon(rawData[4])
            self.sensor_data[SENSOR_IDX_RADON_LONG_TERM_AVG] = self.conv2radon(rawData[5])
            self.sensor_data[SENSOR_IDX_TEMPERATURE]       = rawData[6]/100.0

```

```
self.sensor_data[SENSOR_IDX_REL_ATM_PRESSURE] = rawData[7]/50.0
self.sensor_data[SENSOR_IDX_CO2_LVL] = rawData[8]*1.0
self.sensor_data[SENSOR_IDX_VOC_LVL] = rawData[9]*1.0
else:
    print "ERROR: Unknown sensor version.\n"
    print "GUIDE: Contact Airthings for support.\n"
    sys.exit(1)

def conv2radon(self, radon_raw):
    radon = "N/A" # Either invalid measurement, or not available
    if 0 <= radon_raw <= 16383:
        radon = radon_raw
    return radon

def getValue(self, sensor_index):
    return self.sensor_data[sensor_index]

def getUnit(self, sensor_index):
    return self.sensor_units[sensor_index]

def mapea(x, in_min, in_max, out_min, out_max):
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min

def set_color(color):
    # calcula el valor para cada canal R, G, B
    R_val = (color & 0xFF0000) >> 16
    G_val = (color & 0x00FF00) >> 8
    B_val = (color & 0x0000FF) >> 0

    # Convierte el color de 0~255 a 0 o 1 (entero)
    R_val = int(mapea(R_val, 0, 255, 0, 1))
    G_val = int(mapea(G_val, 0, 255, 0, 1))
    B_val = int(mapea(B_val, 0, 255, 0, 1))

    # asigna a cada pin el valor calculado
    GPIO.output(pins['Red'], R_val)
    GPIO.output(pins['Green'], G_val)
    GPIO.output(pins['Blue'], B_val)

try:
    #---- Initialize ----#
    waveplus = WavePlus(SerialNumber)

    # Initialize output pins for RGB
    GPIO.setwarnings(False)
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    for i in pins:
        # Config pin as output
        GPIO.setup(pins[i], GPIO.OUT, initial=GPIO.LOW)
```

```

waveplus.connect()

# read values
sensors = waveplus.read()

timestamp = str(int(time.time() * 1000))
humidity = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_HUMIDITY))
radon_st_avg = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_RADON_SHORT_TERM_AVG))
radon_lt_avg = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_RADON_LONG_TERM_AVG))
temperature = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_TEMPERATURE))
pressure = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_REL_ATM_PRESSURE))
CO2_lvl = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL))
VOC_lvl = str(sensors.getValue(SENSOR_IDX_VOC_LVL))

# Print data
data = [timestamp, humidity, radon_st_avg, radon_lt_avg, temperature, pressure, CO2_lvl, VOC_lvl]
print ",".join(data)

if (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) > 821):
    subprocess.call(["python3", "/home/pi/Enciende_Enchufe.py"])
if (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) < 771):
    subprocess.call(["python3", "/home/pi/Apaga_Enchufe.py"])

if (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) <= 656):
    set_color(0x0000FF)
elif (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) > 656 and sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) <= 821):
    set_color(0x00FF00)
elif sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) > 821 and (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) <= 1023):
    set_color(0xFFFF00)
elif sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) > 1023 and (sensors.getValue(SENSOR_IDX_CO2_LVL) <= 1228):
    set_color(0xFF00FF)
else:
    set_color(0xFF0000)

waveplus.disconnect()

except:
    print("ERROR: ", sys.exc_info()[0])
finally:
    waveplus.disconnect()

```