



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Automatización del sistema de ventilación de la planta baja del
CUDENM como medida de mitigación del gas radón*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Llaca González

DIRECTORES: Ana Ogando Martínez
Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Automatización del sistema de ventilación de la planta baja del
CUDENM como medida de mitigación del gas radón*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo desarrolla una solución basada en la ventilación para la mitigación del gas radón en el CUD-ENM, mediante la automatización del sistema existente. Para ello, se ha diseñado e implementado un dispositivo electromecánico no invasivo capaz de actuar sobre el regulador de ventilación, junto con una aplicación de supervisión y control que permite monitorizar el sistema y enviar consignas en tiempo real. El sistema integra sensores de radón y ventilación, un microcontrolador ESP32 y comunicación mediante MQTT, todo ello gestionado desde Node-RED. Esto permite adaptar el caudal de ventilación a las condiciones reales del ambiente, superando las limitaciones del control manual previo.

La validación experimental ha permitido comprobar el correcto funcionamiento del conjunto, verificando la correspondencia entre la consigna enviada desde la aplicación y la posición real del regulador, así como la estabilidad del sistema. Como resultado, se ha demostrado la viabilidad de automatizar la ventilación como medida de mitigación del radón, mediante un sistema funcional, escalable y fácilmente integrable, que constituye una base sólida para futuras mejoras.

PALABRAS CLAVE

Radón, Ventilación, Eficiencia energética, Automatización, Monitorización

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores, Ana Ogando y Arturo González, por el apoyo y la orientación durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. Sus indicaciones han sido clave para poder enfocar correctamente el trabajo y sacar adelante cada una de las fases del proyecto.

Asimismo, quiero agradecer al profesorado del Centro Universitario de la Defensa, ya que a lo largo de estos años me han proporcionado la formación necesaria para afrontar este trabajo con una base sólida, tanto a nivel técnico como personal.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mi familia por el apoyo constante durante toda esta etapa. Han sido un pilar fundamental en los momentos más exigentes y siempre han estado ahí, ayudándome a seguir adelante y a no bajar el ritmo.

Por último, agradecer a mis compañeros por todos los momentos compartidos durante estos años en la Escuela Naval Militar. Tanto en el día a día como en los momentos más complicados, han formado parte importante de este camino.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 El gas radón y su impacto en la calidad del aire interior	7
1.2 Motivación del presente trabajo	8
1.3 Objetivos del trabajo	9
2 Estado del arte	10
2.1 Calidad del aire interior y eficiencia energética.....	10
2.1.1 Definición y parámetros característicos de la calidad del aire interior.....	11
2.2 El radón en edificios, marco normativo y técnicas de mitigación	12
2.2.1 Presencia del radón en edificios	12
2.2.2 Mecanismos de entrada y factores condicionantes	12
2.2.3 Marco normativo europeo y nacional	14
2.2.4 Técnicas de mitigación del radón en edificios.....	15
2.3 Ventilación en edificios y marco normativos	20
2.3.1 Ventilación como técnica de control del radón	20
2.3.2 Normativa y caudales de ventilación en edificios	21
2.3.3 Sistemas y tipos de ventilación.....	22
2.3.4 Implementación de sistemas de ventilación en edificios	23
2.3.5 Limitaciones de los sistemas de ventilación existentes	24
3 Sistema Actual de Monitorización y Control del Radón en el CUD-ENM	25
3.1 Sistema de monitorización del Radón.....	25
3.2 Sistema de ventilación y monitorización de caudales.....	28
3.3 Sistema de ventilación existente	31
3.3.1 Descripción general	31
3.3.2 Componentes del sistema	31
3.3.3 Sistema de distribución de aire en los recintos	32
3.3.4 Sistema de extracción de aire	33
3.3.5 Sistema de regulación manual del caudal	34
4 Proceso de diseño, construcción y validación del dispositivo.....	36
4.1 Mejora del sistema de monitorización de la ventilación.....	36
4.1.1 Calibración y verificación de las sondas de velocidad de aire	39

4.1.2 Instalación de las sondas de medición	43
4.2 Automatización de la regulación del caudal	45
4.2.1 Requisitos del sistema.....	45
4.2.2 Prototipos	45
4.2.3 Diseño y componentes hardware del sistema de automatización	46
4.2.4 Diseño software	54
4.3 Implementación del sistema en Node-RED	60
4.3.1 Integración del sistema de control	61
4.3.2 Validación Experimental del Sistema.....	66
5 Conclusiones y líneas futuras	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Líneas Futuras	69
6 Bibliografía.....	70
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	73
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	74
Anexo III: Código Empleado	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Representación de la entrada de radón en edificios [2].....	7
Figura 1-2 Peso del radón en el cáncer de pulmón en España frente al resto de causas y factores [6]. ...	8
Figura 2-1 Principales mecanismos de entrada del radón desde el subsuelo al interior de los edificios [7].	13
Figura 2-2 Vías de entrada del radón en edificios y medidas de limitación mediante barreras y sellado de la envolvente [20]......	16
Figura 2-3 Sistema de despresurización del terreno mediante extracción activa de radón bajo la solera [21]......	17
Figura 2-4 Reducción de la concentración de radón mediante ventilación y renovación de aire interior [23].	18
Figura 2-5 Esquema comparativo de los sistemas de ventilación: (a) simple flujo, (b) doble flujo y (c) sistema híbrido [28].	23
Figura 3-1 Esquema general de las comunicaciones de la herramienta de monitorización de radón [29].	25
Figura 3-2 Sensor RadonEye RD200 [29].	26
Figura 3-3 Raspberry Pi 3 Modelo B [29].	26
Figura 3-4 Flujo actual de Node-RED que refleja cada despacho	27
Figura 3-5 Gráfico representativo del radón en los distintos despachos.....	28
Figura 3-6 Sistema de la sonda actual.....	29
Figura 3-7 Sonda IVL-20	29
Figura 3-8 Unidad de Tratamiento del Aire FMA/HP 036, instalada en el CUD [10]......	31
Figura 3-9 Esquema del sistema de conducción de aire desde la UTA a los despachos en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010 [10].	32
Figura 3-10 Conducto de entrada de aire al falso techo [10].	32
Figura 3-11 Fancoil FCX42P del despacho 114 [10].	33
Figura 3-12 Ventilador helicocentrífugo TD-350/125 SILENT [10].	33
Figura 3-13 Controlador del régimen de velocidad de la UTA.	34
Figura 4-1 Esquema del sistema de la sonda.	36
Figura 4-2 L7805CV [38].	37
Figura 4-3 Sistema de la segunda sonda.	38
Figura 4-4 Flujo de Node-RED que establece las gráficas de las sondas.	38
Figura 4-5 Gráficos de los datos en Grafana.....	39
Figura 4-6 Medición con anemómetro de referencia.	40
Figura 4-7 Medición con sonda 1.	41
Figura 4-8 Medición con sonda 2.	42

Figura 4-9 Gráficos comparativo de datos de S1, S2, y el anemómetro: (a) velocidad y (b) temperatura.	43
Figura 4-10 Planos del sistema de monitorización de ventilación con las ubicaciones de los principales componentes.....	44
Figura 4-11 Instalación de la sonda 2 en el pasillo de la plana baja del CUD.....	44
Figura 4-12 Prototipos iniciales.	46
Figura 4-13 Motor paso a paso NEMA 17 [40].	47
Figura 4-14 Driver de control A4988 con vista de sus pines [41].	47
Figura 4-15 Sensor de posición AS5600 con sus pines y el imán.	48
Figura 4-16 ESP 32 tipo WROOM-32D.....	49
Figura 4-17 Esquema de la integración del sensor AS5600 en el motor.	49
Figura 4-18 Engranajes del sistema motor/regulador.	50
Figura 4-19 Pieza de acople del motor a la puerta.	51
Figura 4-20 Esquema de movimiento del motor del dispositivo final.....	52
Figura 4-21 Driver A4988 ubicado en la placa.....	52
Figura 4-22 Esquema de conexiones del sistema con el AS5600.....	53
Figura 4-23 Sistema final en la placa.....	53
Figura 4-24 Mecanismo en su totalidad incorporado en el regulador.....	54
Figura 4-25 Esquema de control del motor.....	55
Figura 4-26 Funcionamiento general.	56
Figura 4-27 Parámetros de calibración del sistema y correspondencia entre sensor y mecanismo.....	57
Figura 4-28 Bloque de código correspondiente a la lectura y procesamiento de la posición mediante el sensor AS5600.	58
Figura 4-29 Bloque de código correspondiente a la lógica de control y accionamiento del motor paso a paso.	59
Figura 4-30 Bloque de código correspondiente a la comunicación WiFi y MQTT.	60
Figura 4-31 Esquema de control automático del sistema.	61
Figura 4-32 Flujo de datos implementación en Node-RED.....	62
Figura 4-33 Flujo del control manual.	62
Figura 4-34 Visual del control manual en la <i>dashboard</i>	63
Figura 4-35 Flujo del control automático.	63
Figura 4-36 Programación de la función 5.....	64
Figura 4-37 Visual del cambio de modo y de la posición del regulador en porcentaje.	64
Figura 4-38 Gráfica de la concentración de radón con respecto al tiempo.....	65
Figura 4-39 Gráfica de la velocidad del aire con respecto al tiempo de ambas sondas (azul S1 y roja S2).	65
Figura 4-40 Gráfica de las posiciones del regulador con respecto al tiempo durante algunas de las pruebas realizadas.....	65

Figura 4-41 Vista general de la <i>dashboard</i>	66
Figura 4-42 Activación de modo manual.....	66
Figura 4-43 Mensajes recibidos en Node-RED.	66
Figura 4-44 Posición real del regulador.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Marco normativo europeo y nacional en relación con el gas radón.....	15
Tabla 2-2 Clasificación de las principales técnicas de mitigación del radón en función de su principio de actuación y características.	18
Tabla 2-3 Caudales de ventilación según distintas normativas.	22
Tabla 4-1 Características de Sonda IVL-20 [35].....	37
Tabla 4-2 Tabla de componentes del sistema.....	37
Tabla 4-3 Tabla de datos de la con el anemómetro de referencia con intervalo de 30 segundos.....	40
Tabla 4-4 Tabla de datos de la Sonda 1 con intervalo de 30 segundos.	41
Tabla 4-5 Tabla de datos de la Sonda 2 con intervalo de 30 segundos.	42
Tabla 4-6 Parámetros para la construcción de engranajes.	50

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 El gas radón y su impacto en la calidad del aire interior

El gas radón es un gas radiactivo de origen natural que se genera a partir de la desintegración del uranio presente en el suelo, las rocas y determinados materiales geológicos. Forma parte de la cadena de desintegración del uranio-238 y, debido a su naturaleza gaseosa, puede desplazarse fácilmente a través del terreno y liberarse a la atmósfera [1].

Se trata de un gas incoloro, inodoro e insípido, lo que dificulta su detección sin el uso de equipos de medición específicos. Esta característica lo convierte en un contaminante especialmente peligroso en espacios interiores, ya que puede acumularse sin que los ocupantes sean conscientes de su presencia [2].

El radón penetra en los edificios principalmente desde el subsuelo, aprovechando discontinuidades en la envolvente como grietas en soleras, juntas de construcción, pasos de instalaciones, fisuras en muros o zonas de contacto directo con el terreno, como se muestra en Figura 1-1. La diferencia de presión entre el interior del edificio y el terreno favorece este flujo de entrada, especialmente en plantas bajas o sótanos. Una vez en el interior, su concentración depende en gran medida de las condiciones de ventilación, pudiendo alcanzar niveles elevados en espacios con renovación de aire insuficiente [3].

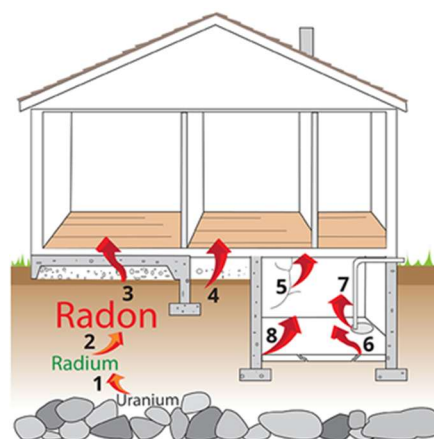


Figura 1-1 Representación de la entrada de radón en edificios [2].

Desde el punto de vista sanitario, la exposición prolongada a concentraciones elevadas de radón supone un riesgo significativo para la salud. Durante su desintegración, el radón genera productos sólidos radiactivos que pueden adherirse a partículas en suspensión y ser inhalados, depositándose en el tejido pulmonar. Esta exposición está directamente relacionada con el desarrollo de cáncer de pulmón, siendo el radón reconocido como la segunda causa de esta enfermedad después del consumo de tabaco [4], que

como se muestra en Figura 1-2, aunque el tabaco continúa siendo el principal factor de riesgo del cáncer de pulmón, el radón residencial constituye la segunda causa en importancia. En España, la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón se ha estimado en torno al 3,8%, lo que pone de manifiesto su relevancia como problema de salud pública [5].

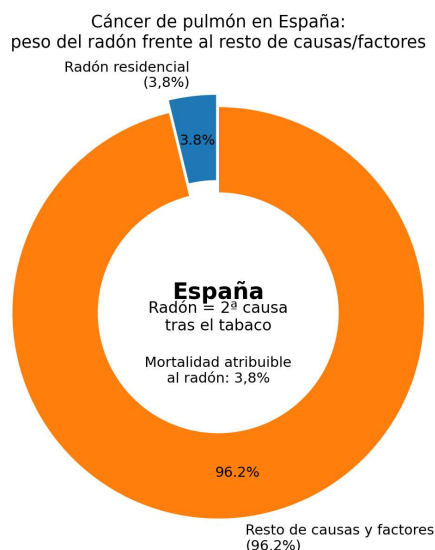


Figura 1-2 Peso del radón en el cáncer de pulmón en España frente al resto de causas y factores [6].

Debido a su impacto en la salud, el radón ha sido clasificado como carcinógeno por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que recomienda establecer medidas de control en los edificios con el fin de limitar su concentración en el aire interior.

En este contexto, el estudio y control del radón adquieren una especial relevancia dentro del ámbito de la calidad del aire interior, especialmente en edificios de uso docente o administrativo, donde los ocupantes permanecen durante largos periodos de tiempo. La ventilación se presenta como uno de los mecanismos más eficaces para la reducción de su concentración especialmente en edificios ya construidos [7], lo que pone de manifiesto la importancia de disponer de sistemas de ventilación adecuados y correctamente gestionados.

1.2 Motivación del presente trabajo

El presente trabajo se desarrolla en el edificio del Centro Universitario de la Defensa (CUD), ubicado en la Escuela Naval Militar de Marín, en la provincia de Pontevedra (Galicia). Esta región se caracteriza por presentar una elevada concentración de radón debido a sus condiciones geológicas, asociadas principalmente a la presencia de suelos graníticos, conocidos por su mayor contenido en uranio [8].

Como consecuencia, los edificios situados en esta zona presentan un mayor riesgo de acumulación de radón en su interior, especialmente en aquellos espacios en contacto directo con el terreno o con ventilación limitada. Este contexto convierte al control del radón en un aspecto especialmente relevante dentro de la gestión de la calidad del aire interior en este tipo de instalaciones.

El edificio objeto de estudio corresponde a un uso docente y administrativo, en el que se desarrollan actividades académicas y de gestión, implicando la permanencia prolongada de los usuarios en su interior. Esta circunstancia incrementa la importancia de garantizar unas condiciones adecuadas de calidad del aire, minimizando la exposición a contaminantes como el radón ya que se ha detectado niveles altos en ausencia de ventilación [9].

Desde el punto de vista de las instalaciones, el edificio dispone de un sistema de climatización y ventilación centralizado, basado en una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) que introduce aire exterior en los distintos recintos a través de una red de conductos. La distribución del aire se realiza

mediante elementos terminales, complementados por unidades tipo *fancoil* que permiten el acondicionamiento térmico local. No obstante, a pesar de la existencia de este sistema, la regulación del caudal de ventilación en los distintos despachos se realiza de forma manual, mediante dispositivos de ajuste instalados en los conductos. Esta configuración implica que el sistema no se adapta de forma automática a las condiciones reales del ambiente interior ni a la presencia de contaminantes.

La ventilación no está vinculada a la concentración de radón, lo que puede dar lugar a situaciones en las que el caudal de aire no sea suficiente para garantizar una adecuada dilución del gas, o bien a un funcionamiento ineficiente desde el punto de vista energético. Por tanto, el contexto del edificio analizado, caracterizado por su ubicación en una zona con elevada presencia de radón y por la existencia de un sistema de ventilación con control manual, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar soluciones automatizadas que permitan mejorar la gestión de la ventilación en función de las condiciones reales del recinto.

1.3 Objetivos del trabajo

El objetivo principal del trabajo es el diseño e implementación de un sistema automatizado de control que permita regular el caudal de aire impulsado por el sistema de ventilación en función de las condiciones ambientales, en particular de la concentración de radón, garantizando el cumplimiento de los niveles de seguridad establecidos y optimizando el consumo energético.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Integrar una nueva sonda de medida de la velocidad del aire en el sistema de monitorización existente, con el fin de caracterizar la ventilación del recinto.
- Diseñar e instalar un actuador electromecánico capaz de regular de forma remota el sistema de impulsión de aire sin modificar la instalación original y sin perder la capacidad de control manual.
- Definir las bases de un algoritmo de control que permita ajustar el caudal de ventilación en función de la concentración de radón medida en el interior de los recintos.
- Implementar el sistema de control mediante un microcontrolador, permitiendo la ejecución automática de las consignas de funcionamiento.
- Integrar el sistema dentro de una plataforma de supervisión basada en Node-RED, posibilitando la monitorización y el control remoto.

El trabajo persigue mejorar la eficacia del sistema de ventilación como medida de mitigación del radón, ofreciendo la posibilidad de adaptar su funcionamiento a las condiciones reales del entorno y contribuyendo, de este modo, a garantizar la calidad del aire interior en el edificio y maximizar la eficiencia energética.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Calidad del aire interior y eficiencia energética

La calidad del aire interior (CAI) constituye uno de los factores fundamentales en la habitabilidad y funcionalidad de los edificios, especialmente en aquellos de uso docente, administrativo o residencial, donde los ocupantes permanecen durante periodos prolongados de tiempo. La CAI se define como el conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas del aire en el interior de un espacio que influyen en la salud, el confort y el rendimiento de sus ocupantes [10].

En el aire interior pueden encontrarse diversos tipos de contaminantes, tanto de origen externo como interno. Entre los más habituales se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), asociado a la ocupación de los espacios; los compuestos orgánicos volátiles (COV), procedentes de materiales de construcción y mobiliario; las partículas en suspensión; y gases de origen natural como el radón. La acumulación de estos contaminantes en el interior de los recintos puede dar lugar a efectos adversos sobre la salud, desde molestias leves hasta patologías de mayor gravedad en exposiciones prolongadas.

En estas condiciones, la ventilación se configura como el principal mecanismo para garantizar una adecuada calidad del aire interior, ya que permite la renovación del aire contaminado mediante la introducción de aire exterior. El caudal de ventilación necesario depende de múltiples factores, como la ocupación, el uso del edificio, la emisión de contaminantes o las condiciones ambientales del entorno.

Paralelamente, en las últimas décadas se ha producido una creciente preocupación por la eficiencia energética en el sector de la edificación, impulsada tanto por criterios económicos como por la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado al consumo energético. Como consecuencia, los edificios modernos se diseñan con envolventes cada vez más estancas, reduciendo al mínimo las infiltraciones de aire no controladas [11].

Este aumento de la estanqueidad permite mejorar el comportamiento energético del edificio, ya que limita las pérdidas térmicas asociadas a la renovación de aire no deseada. Sin embargo, esta misma característica puede dar lugar a una disminución significativa de la ventilación natural, favoreciendo la acumulación de contaminantes en el interior de los recintos si no se dispone de sistemas de ventilación adecuados.

De este modo, se establece una relación directa entre la calidad del aire interior y la eficiencia energética del edificio. Mientras que una mayor ventilación contribuye a mejorar la CAI mediante la dilución de contaminantes, también implica un incremento del consumo energético, al ser necesario acondicionar térmicamente el aire exterior introducido en el sistema. Por el contrario, la reducción de la ventilación favorece la eficiencia energética, pero puede comprometer la salubridad del ambiente interior.

Este conflicto se acentúa en el caso de contaminantes de origen natural como el gas radón, cuya entrada en los edificios se produce desde el subsuelo y cuya concentración depende en gran medida de las condiciones de ventilación. En edificios situados en zonas con elevada presencia de radón, una ventilación insuficiente puede dar lugar a acumulaciones significativas de este gas, incrementando el riesgo para la salud de los ocupantes.

En este escenario, la ventilación no debe considerarse únicamente como un sistema de acondicionamiento, sino como un elemento clave en la gestión de la calidad del aire interior. Sin embargo, la eficacia de la ventilación no depende únicamente de su existencia, sino de su correcta regulación. Sistemas de ventilación con caudal fijo o control manual pueden resultar insuficientes para adaptarse a las variaciones reales de las condiciones del recinto, dando lugar tanto a situaciones de ventilación insuficiente como a un consumo energético innecesario.

Por ello, en los sistemas actuales de edificación se tiende hacia soluciones de ventilación controlada, en las que el caudal de aire se ajusta en función de parámetros medidos en tiempo real, como la concentración de contaminantes o la ocupación del espacio. Este enfoque permite optimizar el funcionamiento del sistema, garantizando simultáneamente la calidad del aire interior y la eficiencia energética.

Por todo ello, la ventilación se configura como el elemento de equilibrio entre la salubridad del ambiente interior y el consumo energético del edificio, siendo su control y gestión aspectos clave en el diseño de sistemas avanzados de climatización y calidad del aire.

2.1.1 Definición y parámetros característicos de la calidad del aire interior

La calidad del aire interior (CAI) se define como el conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas del aire en el interior de un recinto que determinan su idoneidad para la salud, el confort y el bienestar de los ocupantes. A diferencia de otros parámetros ambientales, la CAI no puede evaluarse únicamente mediante la percepción sensorial, sino que requiere la medición de variables específicas que permitan caracterizar el estado del aire de forma objetiva. La evaluación de la CAI se basa en el análisis de una serie de parámetros característicos, que pueden agruparse en tres grandes categorías: parámetros físicos, parámetros químicos y parámetros biológicos.

Desde un punto de vista físico, destacan variables como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire. Estos parámetros influyen directamente en la sensación térmica y en el confort de los ocupantes, pero también condicionan el comportamiento de los contaminantes en el aire interior. En particular, la velocidad del aire está directamente relacionada con la ventilación del recinto, ya que determina el caudal de aire renovado y, por tanto, la capacidad del sistema para diluir contaminantes [10], [11].

En cuanto a los parámetros químicos, estos constituyen uno de los aspectos más relevantes en la evaluación de la CAI. Entre ellos, el dióxido de carbono (CO_2) se utiliza habitualmente como indicador del nivel de ventilación, ya que su concentración aumenta con la ocupación del espacio y la falta de renovación de aire. Asimismo, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y las partículas en suspensión pueden proceder de materiales, equipos o actividades humanas, afectando a la calidad del aire y a la salud de los ocupantes.

Dentro de este grupo, el gas radón adquiere una especial relevancia en determinadas zonas geográficas. A diferencia de otros contaminantes, el radón no está asociado a la actividad humana, sino que proviene del subsuelo, pudiendo acumularse en el interior de los edificios en función de las condiciones de ventilación. Su carácter radiactivo y su impacto en la salud lo convierten en uno de los parámetros críticos en la evaluación de la CAI.

Por último, los parámetros biológicos incluyen la presencia de microorganismos como bacterias, virus o mohos, cuya proliferación está fuertemente condicionada por factores como la humedad y la

ventilación. Aunque su análisis requiere técnicas específicas, su presencia puede tener un impacto significativo en la salud de los ocupantes.

Además de estos parámetros, la calidad del aire interior puede evaluarse mediante indicadores globales relacionados con la ventilación, como la tasa de renovación de aire o el caudal de ventilación por ocupante. Estos indicadores permiten relacionar directamente las condiciones del aire interior con el funcionamiento del sistema de ventilación.

En conjunto, la caracterización de la CAI requiere el análisis combinado de múltiples variables, siendo la ventilación el elemento que conecta la mayoría de estos parámetros. Por ello, el control del caudal de aire se presenta como una herramienta fundamental para la gestión de la calidad del aire interior, permitiendo actuar directamente sobre la concentración de contaminantes presentes en el recinto.

2.2 El radón en edificios, marco normativo y técnicas de mitigación

2.2.1 Presencia del radón en edificios

Aunque el radón ya se ha introducido previamente como contaminante de relevancia para la calidad del aire interior, resulta necesario analizar específicamente su comportamiento en el contexto de los edificios, ya que es en este entorno donde adquiere mayor importancia desde el punto de vista de la exposición humana.

El radón es un gas de origen natural que se genera en el terreno y que puede desplazarse a través del subsuelo hasta alcanzar la superficie. Su entrada en los edificios se produce principalmente desde el terreno, aprovechando discontinuidades constructivas como grietas en la solera, juntas de ejecución, pasos de instalaciones, fisuras en cerramientos, encuentros entre elementos constructivos o zonas en contacto directo con el terreno. En este sentido, la envolvente del edificio actúa no solo como barrera frente al exterior, sino también como posible vía de penetración del gas cuando no presenta un comportamiento suficientemente estanco.

La acumulación del radón en el interior depende de varios factores. En primer lugar, influye el potencial de exhalación del terreno sobre el que se sitúa el edificio, determinado por las características geológicas de la zona. En segundo lugar, es especialmente importante la geometría y configuración del edificio, siendo más vulnerables los espacios situados en plantas bajas, semisótanos o sótanos, es decir, aquellos que mantienen un contacto más directo con el terreno. A ello se suma la influencia de la ventilación, que condiciona la capacidad de dilución y evacuación del gas una vez ha penetrado en el interior.

Por tanto, la concentración de radón en un edificio no depende únicamente de la presencia del gas en el subsuelo, sino también del comportamiento del propio edificio frente a su entrada y de la capacidad del sistema de ventilación para renovar el aire interior. Esta idea es especialmente relevante en edificios existentes, donde la configuración constructiva y las instalaciones no siempre han sido concebidas para hacer frente a este problema.

2.2.2 Mecanismos de entrada y factores condicionantes

La presencia de radón en el interior de los edificios está directamente relacionada con los mecanismos de entrada del gas desde el subsuelo y con una serie de factores que condicionan su acumulación en los espacios interiores. La comprensión de estos procesos resulta fundamental para evaluar el riesgo y definir estrategias eficaces de mitigación. El radón se genera en el terreno como resultado de la desintegración radiactiva del uranio presente en el suelo y las rocas. Debido a su naturaleza gaseosa, puede desplazarse a través de los poros del terreno y alcanzar la superficie, penetrando en los edificios a través de distintas vías. Las principales rutas de entrada del radón en los edificios son:

- **Grietas en soleras y muros en contacto con el terreno**, que actúan como puntos de infiltración directa del gas.
- **Juntas constructivas**, especialmente en la unión entre elementos estructurales, donde pueden existir discontinuidades.
- **Pasos de instalaciones**, como conducciones de agua, electricidad o saneamiento, que atraviesan la envolvente del edificio.
- **Porosidad de los materiales**, en aquellos casos en los que los elementos constructivos presentan una permeabilidad significativa.

El movimiento del radón desde el terreno hacia el interior del edificio se ve favorecido por diferencias de presión. En particular, el interior del edificio suele presentar una presión ligeramente inferior a la del subsuelo, lo que genera un efecto de succión conocido como “efecto chimenea” o “*stack effect*”, facilitando la entrada del gas, una representación gráfica de ello en Figura 2-1.

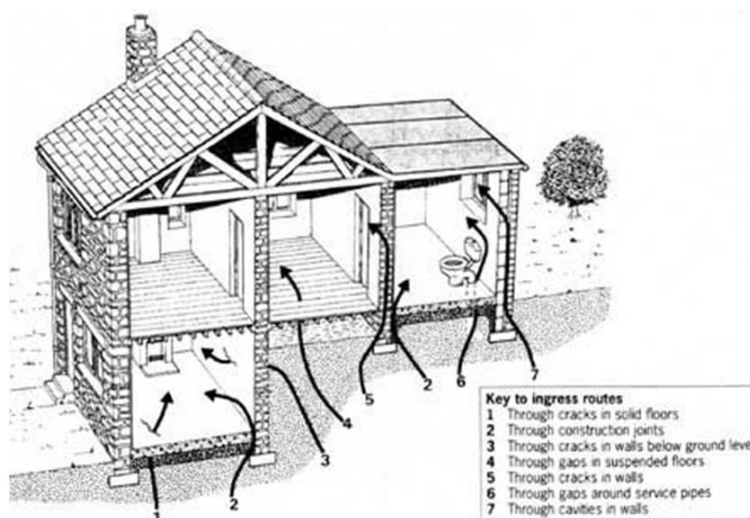


Figura 2-1 Principales mecanismos de entrada del radón desde el subsuelo al interior de los edificios [7].

Una vez que el radón ha penetrado en el interior del edificio, su concentración depende de múltiples factores que determinan su acumulación o dispersión. Entre los factores más relevantes destacan:

- **Condiciones geológicas del terreno**: la concentración de radón depende del contenido de uranio en el suelo, siendo especialmente elevada en zonas graníticas, como ocurre en amplias áreas de Galicia.
- **Grado de contacto con el terreno**: los espacios situados en plantas bajas o sótanos presentan un mayor riesgo de acumulación debido a su proximidad a la fuente de emisión.
- **Estanqueidad del edificio**: edificios con alta estanqueidad pueden limitar la ventilación natural, favoreciendo la acumulación del gas en el interior.
- **Condiciones de ventilación**: la renovación de aire es el principal mecanismo de reducción de la concentración de radón. Una ventilación insuficiente permite su acumulación, mientras que una ventilación adecuada favorece su dilución.
- **Condiciones ambientales**: factores como la temperatura, la presión atmosférica o el viento pueden influir en el movimiento del radón desde el terreno hacia el interior del edificio.

De todos estos factores, la ventilación constituye el elemento más determinante desde el punto de vista operativo, ya que es el único parámetro que puede ser controlado directamente mediante sistemas de climatización.

El análisis de los mecanismos de entrada y de los factores condicionantes pone de manifiesto que la concentración de radón en un edificio no depende de un único parámetro, sino de la interacción de múltiples variables.

En edificios existentes, donde la modificación de las condiciones constructivas resulta limitada, la ventilación se configura como el principal mecanismo de control disponible. Sin embargo, la variabilidad de los factores que influyen en la concentración de radón implica que una ventilación fija o no adaptativa puede no ser suficiente para garantizar niveles adecuados en todas las situaciones.

Por tanto, la gestión del radón requiere no solo la implementación de sistemas de ventilación, sino su control en función de las condiciones reales del entorno, lo que introduce la necesidad de soluciones capaces de adaptar dinámicamente el caudal de aire.

2.2.3 Marco normativo europeo y nacional

La creciente evidencia científica sobre los efectos del radón en la salud ha motivado el desarrollo de un marco normativo específico a nivel internacional, europeo y nacional, orientado a limitar la exposición de la población a este gas en espacios interiores.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece recomendaciones para la concentración de radón en el aire interior, proponiendo un valor de referencia de 100 Bq/m^3 , y en caso de no ser viable su cumplimiento, un límite máximo de 300 Bq/m^3 . Estas recomendaciones han servido de base para el desarrollo de la normativa europea y nacional.

En el ámbito europeo, la Directiva 2013/59/EURATOM [12] establece los requisitos básicos de protección frente a las radiaciones ionizantes, incluyendo disposiciones específicas relativas al radón. Esta directiva obliga a los Estados miembros a establecer niveles de referencia nacionales para la concentración de radón en viviendas y lugares de trabajo, así como a desarrollar planes de acción frente al radón.

En España, esta directiva ha sido transpuesta mediante el Real Decreto 1029/2022, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes [13]. Este documento establece un nivel de referencia de 300 Bq/m^3 como valor máximo de concentración media anual de radón en espacios interiores, tanto en viviendas como en lugares de trabajo.

En el ámbito de la edificación, el Código Técnico de la Edificación (CTE) incorpora el Documento Básico HS6 “Protección frente al radón”, que establece las exigencias aplicables a edificios de nueva construcción [14]. Este documento clasifica el territorio en diferentes zonas en función del potencial de radón del terreno y define soluciones constructivas específicas, como la instalación de barreras de protección o sistemas de despresurización del terreno, destinadas a limitar la entrada del gas al interior del edificio.

Sin embargo, el CTE se aplica fundamentalmente a edificios de nueva construcción o a intervenciones de cierta entidad, por lo que su alcance en edificios existentes es limitado. En estos casos, la problemática del radón debe abordarse mediante medidas correctoras que no siempre están reguladas de forma tan estricta como en el diseño de nuevos edificios [7].

En el caso de edificios existentes, la aplicación de la normativa se complementa con guías técnicas elaboradas por distintas administraciones. En Galicia, la Xunta de Galicia ha desarrollado documentación específica sobre el radón, incluyendo mapas de potencial de exposición y recomendaciones para su medición y mitigación [15]. Estas guías destacan la importancia de la ventilación como una de las principales estrategias de reducción de la concentración de radón en espacios interiores.

De forma similar, el Ministerio de Sanidad ha publicado estrategias y recomendaciones orientadas a la gestión del radón en viviendas y edificios públicos, promoviendo la medición sistemática del gas y la adopción de medidas correctoras en caso de superarse los niveles de referencia [16].

Por otro lado, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) establece las condiciones de ventilación necesarias para garantizar la calidad del aire interior, definiendo caudales mínimos en función del uso del edificio y clasificando la calidad del aire en diferentes categorías (IDA). Aunque este reglamento no está específicamente orientado al control del radón, sí proporciona el marco de referencia para el diseño de sistemas de ventilación capaces de diluir contaminantes en el aire interior [17].

En conjunto, como se muestra en la Tabla 2-1, el marco normativo actual establece claramente la necesidad de controlar la concentración de radón en edificios, diferenciando entre medidas preventivas en nuevas construcciones y medidas correctoras en edificios existentes. En este último caso, la ventilación se presenta como una herramienta fundamental, cuya eficacia depende en gran medida de su correcta gestión y control.

Ámbito	Normativa / Referencia	Contenido principal	Valor / Exigencia
Internacional	OMS (Organización Mundial de la Salud)	Recomendaciones sobre concentración de radón en aire interior	100 Bq/m ³ (recomendado) 300 Bq/m ³ (máximo)
Europeo	Directiva 2013/59/EURATOM	Protección frente a radiaciones ionizantes y obligación de establecer niveles de referencia	Nivel de referencia nacional obligatorio
Nacional	Real Decreto 1029/2022	Transposición de la Directiva EURATOM en España	300 Bq/m ³ (media anual en interiores)
Edificación (España)	CTE DB HS6	Protección frente al radón en edificios de nueva construcción	Medidas constructivas según zona (barreras, despresurización)
Instalaciones	RITE	Condiciones de ventilación y calidad del aire interior (IDA)	Caudales mínimos según uso del edificio
Regional	Xunta de Galicia	Guías de medición y mitigación del radón	Recomendaciones técnicas (énfasis en ventilación)
Nacional (guías)	Ministerio de Sanidad	Estrategias de control y reducción de exposición al radón	Medición + actuación correctora

Tabla 2-1 Marco normativo europeo y nacional en relación con el gas radón.

2.2.4 Técnicas de mitigación del radón en edificios

Las técnicas de mitigación del radón en edificios tienen como objetivo reducir la concentración de este gas en el aire interior hasta niveles aceptables desde el punto de vista sanitario. Estas técnicas pueden clasificarse en función de su principio de actuación en dos grandes grupos: aquellas orientadas a limitar

la entrada del radón desde el subsuelo y aquellas destinadas a reducir su concentración una vez que ha penetrado en el interior del edificio [18].

Medidas orientadas a limitar la entrada del radón

Este tipo de soluciones se basa en actuar sobre la envolvente del edificio en contacto con el terreno, reduciendo o eliminando las vías de entrada del gas. Entre las principales técnicas se encuentran:

- **Barreras impermeables al radón**, consistentes en láminas o membranas colocadas en la base del edificio, diseñadas para impedir el paso del gas desde el subsuelo.
- **Sellado de grietas y fisuras**, mediante la aplicación de materiales específicos en juntas de construcción, pasos de instalaciones o discontinuidades estructurales.
- **Mejora de la estanqueidad de la envolvente**, reduciendo la permeabilidad de los elementos constructivos en contacto con el terreno.

Estas soluciones resultan especialmente eficaces en edificios de nueva construcción, donde pueden integrarse desde la fase de diseño [19]. Sin embargo, en edificios existentes su aplicación puede ser limitada o requerir intervenciones constructivas complejas. La Figura 2-2 muestra de forma esquemática las principales vías de entrada del radón en los edificios, así como las soluciones constructivas orientadas a limitar su penetración desde el subsuelo.

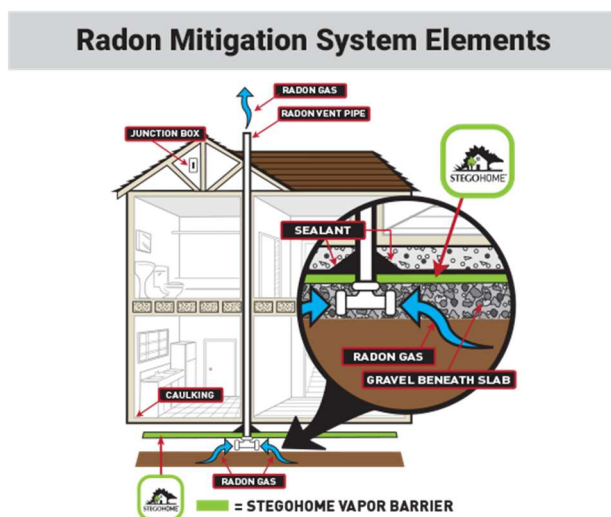


Figura 2-2 Vías de entrada del radón en edificios y medidas de limitación mediante barreras y sellado de la envolvente [20].

Medidas basadas en la despresurización del terreno

Otra estrategia ampliamente utilizada consiste en actuar sobre el terreno bajo el edificio mediante sistemas de despresurización, cuyo objetivo es evitar que el radón penetre en el interior.

- **Despresurización activa del subsuelo**, mediante la instalación de sistemas de extracción que generan una depresión bajo la solera, captando el gas antes de que entre en el edificio.
- **Cámaras ventiladas o espacios intermedios**, que permiten evacuar el radón antes de su entrada en los espacios habitables.

Estas técnicas presentan una elevada eficacia en la reducción de la concentración de radón, pero su implementación puede ser compleja en edificios ya construidos, especialmente si no se dispone de acceso al subsuelo o si la estructura no permite la instalación de estos sistemas, todo ello aparece reflejado en la Figura 2-3 [21].

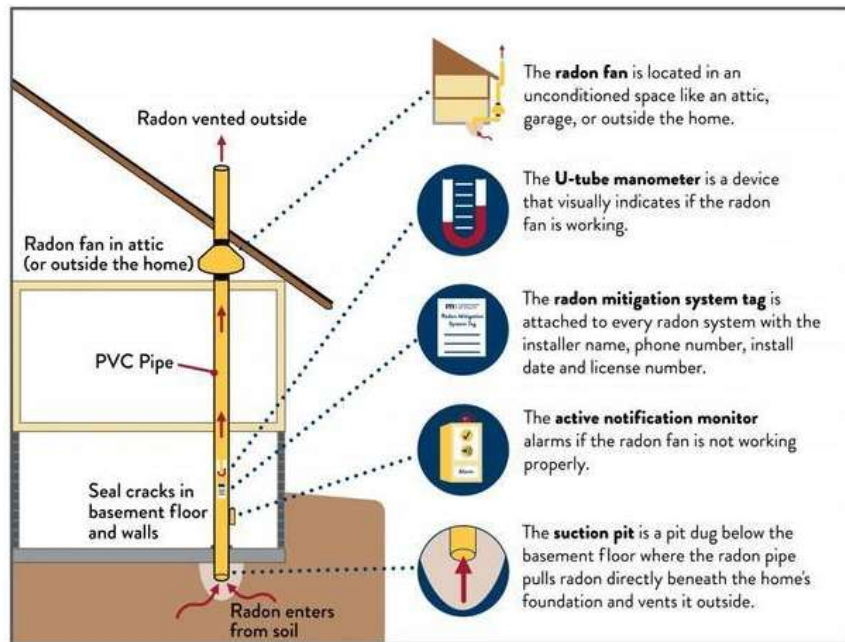


Figura 2-3 Sistema de despresurización del terreno mediante extracción activa de radón bajo la solera [21].

Medidas basadas en la ventilación

Las técnicas de ventilación tienen como objetivo reducir la concentración de radón mediante la dilución del aire interior, introduciendo aire exterior con menor concentración del gas [18].

- **Ventilación natural**, basada en la apertura de ventanas o en la existencia de infiltraciones no controladas. Aunque puede ser efectiva de forma puntual, su funcionamiento es altamente variable y dependiente de las condiciones ambientales.
- **Ventilación mecánica**, que permite controlar el caudal de aire introducido en el edificio, garantizando una renovación continua del aire interior [22].
- **Sistemas híbridos**, que combinan ventilación natural y mecánica en función de las condiciones del entorno.

Entre estas opciones, la ventilación mecánica destaca como una de las soluciones más viables y aplicables en edificios existentes, ya que permite actuar directamente sobre la concentración de radón sin necesidad de realizar modificaciones estructurales significativas.

No obstante, la eficacia de la ventilación depende en gran medida del caudal de aire suministrado y de su correcta distribución en el interior del recinto, esto se ve en un esquema en la Figura 2-4. Un caudal insuficiente puede no ser capaz de reducir la concentración del gas, mientras que un caudal excesivo puede derivar en un incremento innecesario del consumo energético.

La imagen ilustra el principio de funcionamiento de la ventilación como técnica de mitigación del radón, basada en la dilución del gas mediante la introducción de aire exterior y la evacuación del aire interior contaminado.

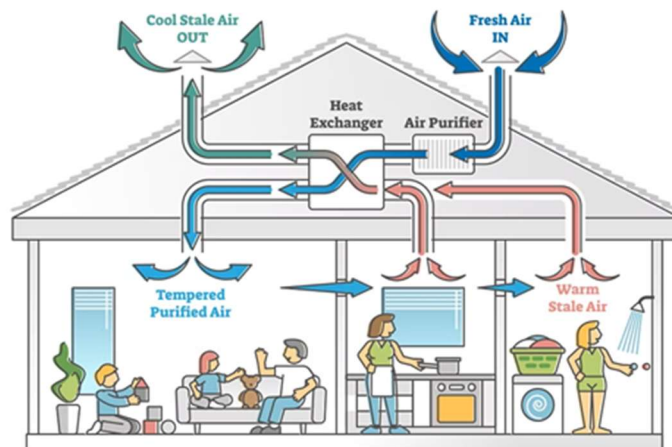


Figura 2-4 Reducción de la concentración de radón mediante ventilación y renovación de aire interior [23].

En la Tabla 2-2 se puede apreciar un resumen de los tipos de técnicas junto a la aplicación, ventajas y limitaciones, explicando así mismo el principio de funcionamiento de cada una de las técnicas.

Tipo de técnica	Técnica	Principio de funcionamiento	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
Limitación de entrada	Barreras frente al radón	Impiden el paso del gas desde el terreno	Edificios nuevos	Alta eficacia preventiva	Difícil aplicación en existentes
Limitación de entrada	Sellado de grietas y juntas	Reduce las vías de entrada del gas	Existentes	Bajo coste, fácil implementación	Eficacia limitada
Despresurización	Despresurización del subsuelo	Extrae el radón antes de su entrada	Nuevos / existentes	Muy eficaz	Requiere instalación y consumo
Dilución	Ventilación natural	Renovación de aire por medios pasivos	Existentes	Bajo coste	No controlable
Dilución	Ventilación mecánica	Introducción controlada de aire exterior	Nuevos / existentes	Control del caudal	Consumo energético

Tabla 2-2 Clasificación de las principales técnicas de mitigación del radón en función de su principio de actuación y características.

Limitaciones de las técnicas de mitigación en edificios existentes

En edificios existentes, la aplicación de técnicas de mitigación del radón está limitada por las características constructivas y la dificultad de realizar intervenciones integrales [18]. En particular, soluciones como la modificación de la envolvente o la despresurización del subsuelo pueden resultar complejas o económicamente inviables, restringiendo su uso en muchos casos reales [21].

Por ello, la ventilación se convierte en la principal alternativa, aunque los sistemas existentes suelen operar con control fijo o manual, lo que reduce su eficacia. En este contexto, la mejora no pasa solo por aumentar el caudal, sino por optimizar su control en función de la concentración de radón, garantizando eficacia y eficiencia energética.

2.2.5 El radón en edificios existentes y estrategias de actuación

La gestión del radón en edificios existentes presenta una problemática específica, derivada principalmente de la ausencia de medidas preventivas en su diseño original. A diferencia de los edificios de nueva construcción, en los que es posible incorporar soluciones constructivas desde la fase de proyecto, en edificios ya ejecutados la intervención debe realizarse sobre sistemas existentes, lo que limita las opciones disponibles y condiciona la eficacia de las medidas adoptadas.

En este ámbito, la concentración de radón en edificios existentes depende de múltiples factores, entre los que destacan las características geológicas del terreno, el grado de contacto del edificio con el subsuelo, la estanqueidad de la envolvente y, especialmente, las condiciones de ventilación del recinto [24]. En zonas con elevada presencia de radón, como es el caso de Galicia, estos factores adquieren una mayor relevancia, incrementando la probabilidad de que se alcancen niveles significativos en el interior de los edificios.

Diversos estudios y guías técnicas elaboradas por administraciones públicas han puesto de manifiesto que, en edificios existentes, la ventilación constituye una de las medidas más viables para la reducción de la concentración de radón. Entre estas medidas, la mejora de la ventilación aparece como una solución efectiva, siempre que se garantice un caudal suficiente de aire exterior.

No obstante, la aplicación de la ventilación como técnica de mitigación presenta una serie de limitaciones en edificios existentes. En muchos casos, los sistemas de ventilación disponibles no han sido diseñados específicamente para el control del radón, sino para garantizar condiciones generales de confort o calidad del aire. Como consecuencia, estos sistemas suelen operar con configuraciones de caudal fijo o con regulación manual, sin adaptarse a las condiciones reales del recinto.

Esta falta de adaptación implica que la ventilación puede resultar insuficiente en momentos en los que la concentración de radón es elevada, o excesiva en situaciones en las que no es necesaria, lo que además conlleva un incremento innecesario del consumo energético. De este modo, la eficacia de la ventilación como medida de mitigación queda condicionada no solo por su existencia, sino por su correcta gestión.

En este sentido, las guías técnicas actuales coinciden en señalar la importancia de avanzar hacia sistemas de ventilación más eficientes y adaptativos, capaces de responder a las condiciones reales del ambiente interior. Este enfoque permite mejorar la eficacia de la ventilación en la reducción del radón, al tiempo que optimiza el consumo energético asociado al sistema.

Por tanto, en edificios existentes, la problemática del radón no puede abordarse únicamente mediante el incremento del caudal de ventilación, sino que requiere una gestión adecuada del mismo, basada en la monitorización de las condiciones del recinto y en la capacidad de adaptación del sistema. Esta necesidad de control constituye uno de los principales retos en la mitigación del radón y representa el punto de partida para el desarrollo de soluciones basadas en sistemas automatizados.

La implementación de estrategias de mitigación del radón en edificios no solo debe evaluarse desde el punto de vista de su eficacia en la reducción de la concentración del gas, sino también considerando su impacto ambiental y energético. En este sentido, las distintas técnicas presentan comportamientos diferenciados en términos de consumo energético, emisiones asociadas y sostenibilidad. Las soluciones basadas en la modificación de la envolvente, como las barreras frente al radón o el sellado de grietas, presentan un impacto energético reducido una vez instaladas, ya que no requieren consumo adicional durante su funcionamiento. Sin embargo, su aplicación en edificios existentes puede implicar intervenciones constructivas complejas.

Por otro lado, los sistemas de despresurización del terreno, especialmente aquellos de tipo activo, requieren el uso continuo de equipos mecánicos, lo que conlleva un consumo energético adicional y, en consecuencia, un incremento de la huella energética del edificio.

En el caso de la ventilación, su impacto ambiental está directamente relacionado con el caudal de aire introducido y con la necesidad de acondicionamiento térmico del aire exterior. Un aumento del caudal de ventilación implica un mayor consumo energético, especialmente en sistemas de climatización, lo que puede reducir la eficiencia global del edificio.

Por este motivo, la evaluación de las estrategias de mitigación debe considerar un equilibrio entre la reducción de la concentración de radón y el consumo energético asociado [25]. En este contexto, las soluciones basadas en la ventilación resultan especialmente interesantes cuando se combinan con sistemas de control capaces de adaptar el caudal de aire a las condiciones reales del recinto.

De este modo, es posible minimizar el consumo energético sin comprometer la calidad del aire interior, lo que pone de manifiesto la importancia de integrar criterios de eficiencia energética en el diseño de sistemas de mitigación del radón.

2.3 Ventilación en edificios y marco normativos

2.3.1 Ventilación como técnica de control del radón

La ventilación constituye uno de los mecanismos más eficaces para la reducción de la concentración de radón en el interior de los edificios, especialmente en aquellos casos en los que no es posible intervenir sobre las condiciones constructivas de la envolvente. Su principio de funcionamiento se basa en la dilución del gas mediante la introducción de aire exterior con menor concentración de radón y la evacuación del aire interior contaminado.

Diversas guías técnicas y organismos especializados coinciden en señalar la ventilación como una de las principales estrategias de mitigación del radón en edificios existentes [7], [18], [21]. En particular, documentos elaborados por administraciones públicas y organismos de referencia destacan que el incremento de la tasa de renovación de aire permite reducir significativamente la concentración de radón en espacios interiores, especialmente en aquellos en contacto directo con el terreno.

Desde un punto de vista físico, la eficacia de la ventilación puede analizarse mediante la relación entre el caudal de aire introducido en el recinto y su volumen. Este parámetro, conocido como tasa de renovación de aire o *air changes per hour* (ACH), permite cuantificar la capacidad del sistema de ventilación para diluir contaminantes. Un aumento del caudal de ventilación implica, en general, una reducción de la concentración de radón, al favorecer su evacuación y evitar su acumulación.

No obstante, la ventilación presenta una serie de limitaciones que condicionan su eficacia como técnica de mitigación. En primer lugar, su capacidad de reducción depende directamente del caudal de aire suministrado, lo que implica que, en situaciones de alta concentración de radón, pueden ser necesarios caudales elevados para alcanzar niveles adecuados. En segundo lugar, la ventilación no elimina la fuente del problema, sino que actúa sobre sus efectos, lo que implica que su funcionamiento debe mantenerse de forma continua para garantizar su eficacia.

Asimismo, la aplicación de la ventilación conlleva implicaciones desde el punto de vista energético. El aumento del caudal de aire exterior implica la necesidad de acondicionar térmicamente dicho aire, lo que puede suponer un incremento significativo del consumo energético del sistema de climatización. Este aspecto resulta especialmente relevante en edificios con sistemas de ventilación mecánica, donde el caudal de aire puede ser elevado.

En este contexto, la ventilación no debe entenderse únicamente como un mecanismo de renovación de aire, sino como una variable de control que debe gestionarse de forma adecuada. Sistemas de ventilación con caudal fijo o con regulación manual pueden no ser capaces de adaptarse a las variaciones en la concentración de radón, dando lugar a situaciones de ventilación insuficiente o, por el contrario, a un consumo energético innecesario.

Por tanto, la eficacia de la ventilación como técnica de control del radón no depende únicamente de su existencia, sino de su capacidad de adaptación a las condiciones reales del recinto. Este enfoque pone

de manifiesto la necesidad de sistemas de ventilación controlados, capaces de ajustar dinámicamente el caudal de aire en función de parámetros como la concentración de radón, permitiendo alcanzar un equilibrio entre calidad del aire interior y eficiencia energética.

2.3.2 Normativa y caudales de ventilación en edificios

La ventilación en edificios está regulada mediante un conjunto de normativas que establecen los requisitos mínimos necesarios para garantizar una adecuada calidad del aire interior. En el contexto español, las principales referencias normativas en este ámbito son el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [22] y el Código Técnico de la Edificación (CTE) [26], en particular su Documento Básico HS3 “Calidad del aire interior” [14].

El RITE establece las condiciones de las instalaciones de ventilación con el objetivo de garantizar el bienestar térmico y la calidad del aire interior, introduciendo las categorías IDA (de IDA 1 a IDA 4) y los caudales mínimos de ventilación en función del uso del edificio. En entornos docentes o administrativos, es habitual trabajar con categorías intermedias como IDA 2, que requieren asegurar una ventilación suficiente mediante valores de caudal por persona o superficie.

Por su parte, el CTE HS3 [14] define los requisitos de ventilación en edificios, estableciendo los caudales mínimos de aire exterior necesarios y diferenciando entre sistemas naturales y mecánicos. Ambas normativas coinciden en la necesidad de garantizar una ventilación mínima para diluir los contaminantes del aire interior.

No obstante, estos valores se establecen como condiciones de diseño bajo escenarios estándar, sin contemplar la adaptación dinámica del caudal en función de contaminantes específicos como el radón. Por ello, aunque el cumplimiento normativo mejora la calidad del aire, no asegura el control efectivo de este gas, cuya concentración depende de condiciones variables. En consecuencia, resulta necesario complementar los requisitos normativos con sistemas de control capaces de ajustar la ventilación a las condiciones reales del recinto.

Los caudales de ventilación constituyen uno de los parámetros fundamentales en el diseño y evaluación de los sistemas de ventilación, ya que determinan la capacidad del sistema para renovar el aire interior y diluir los contaminantes presentes en el ambiente. Las distintas normativas establecen valores mínimos de caudal de ventilación en función del uso del edificio, la ocupación y el nivel de calidad del aire requerido. Estos valores suelen expresarse en unidades de volumen de aire por unidad de tiempo y por ocupante ($\text{l/s} \cdot \text{persona}$) o por superficie ($\text{l/s} \cdot \text{m}^2$).

En el ámbito español, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) define los caudales mínimos de ventilación en función de las categorías de calidad del aire interior (IDA). Por ejemplo, para espacios de uso docente o administrativo, asociados habitualmente a la categoría IDA 2, se establecen caudales del orden de 12,5 l/s por persona, lo que garantiza una renovación suficiente del aire en condiciones estándar de ocupación.

Por su parte, el Código Técnico de la Edificación (CTE), a través del Documento Básico HS3, establece caudales mínimos de ventilación principalmente en el ámbito residencial, definidos en función de los distintos espacios de la vivienda. Aunque su enfoque es diferente al del RITE, ambos coinciden en la necesidad de asegurar una ventilación continua que permita mantener la calidad del aire interior.

A nivel internacional, organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras guías técnicas proporcionan recomendaciones generales orientadas a garantizar una adecuada calidad del aire, aunque sin definir en todos los casos valores específicos de caudal, centrándose más en la concentración de contaminantes.

A continuación, se presenta una comparación de los caudales de ventilación establecidos por distintas referencias normativas, reflejado en la Tabla 2-3:

Normativa / Referencia	Tipo de edificio	Caudal de ventilación
RITE (IDA 2)	Oficinas / aulas	~12,5 l/s·persona
RITE (IDA 1)	Alta calidad (hospitales, etc.)	~20 l/s·persona
CTE HS3	Viviendas	Variable según estancia
OMS / recomendaciones	General	Enfoque basado en concentración

Tabla 2-3 Caudales de ventilación según distintas normativas.

Estos valores representan condiciones de diseño orientadas a garantizar una calidad del aire aceptable en condiciones estándar. Sin embargo, en la práctica, la concentración de contaminantes puede variar en función de múltiples factores, como la ocupación, las condiciones ambientales o la presencia de fuentes específicas como el gas radón.

En este sentido, el uso de caudales fijos de ventilación puede resultar insuficiente para responder a situaciones dinámicas, en las que la demanda real de ventilación varía con el tiempo. En particular, en el caso del radón, cuya concentración depende de factores externos al propio uso del edificio, la aplicación de caudales constantes no garantiza el mantenimiento de niveles adecuados en todo momento.

Por tanto, aunque los caudales establecidos por la normativa constituyen una base adecuada para el diseño de sistemas de ventilación, su aplicación debe complementarse con estrategias de control que permitan adaptar la ventilación a las condiciones reales del entorno.

2.3.3 Sistemas y tipos de ventilación

Los sistemas de ventilación en edificios pueden clasificarse en función del modo en que se produce la renovación del aire y del grado de control sobre el caudal de ventilación. Esta clasificación permite identificar las distintas soluciones existentes y analizar su idoneidad en relación con la calidad del aire interior y el control de contaminantes como el radón.

Ventilación natural

La ventilación natural se basa en la renovación del aire mediante la apertura de ventanas, infiltraciones a través de la envolvente o el efecto combinado del viento y las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior [27]. Este tipo de ventilación no requiere sistemas mecánicos y presenta un consumo energético prácticamente nulo.

Sin embargo, su principal limitación radica en la falta de control sobre el caudal de aire, que depende de condiciones externas variables como la climatología o el comportamiento de los usuarios. Como consecuencia, la ventilación natural no garantiza una renovación de aire constante ni adecuada, lo que limita su eficacia como método de control del radón en entornos donde se requiere un comportamiento predecible.

Ventilación mecánica

La ventilación mecánica utiliza sistemas impulsados por ventiladores para introducir aire exterior y evacuar el aire interior, permitiendo un mayor control sobre el caudal de ventilación. Este tipo de sistemas es el más utilizado en edificios modernos, especialmente en aquellos con alta estanqueidad. Dentro de la ventilación mecánica, se pueden distinguir diferentes configuraciones:

- Sistemas de simple flujo

En los sistemas de simple flujo, el aire es introducido o extraído de forma mecánica, pero no ambos simultáneamente mediante un sistema equilibrado. En el caso de sistemas de impulsión, el aire exterior es introducido en el edificio, generando una sobrepresión que favorece la salida del aire interior. Por el

contrario, en sistemas de extracción, se evacúa el aire interior, generando una depresión que induce la entrada de aire exterior a través de aberturas o infiltraciones.

Estos sistemas presentan una implementación sencilla, pero su control sobre la distribución del aire puede ser limitado, lo que afecta a la eficacia de la ventilación en determinados espacios.

- Sistemas de doble flujo

Los sistemas de doble flujo combinan la impulsión y la extracción de aire de forma controlada, permitiendo una ventilación equilibrada del edificio. En estos sistemas, el aire exterior es introducido y el aire interior es evacuado de manera simultánea, lo que permite controlar tanto el caudal como la distribución del aire.

Además, estos sistemas pueden incorporar recuperadores de calor, que permiten reducir el impacto energético de la ventilación al transferir energía entre el aire extraído y el aire introducido. Este tipo de ventilación ofrece un mayor grado de control y eficiencia, siendo especialmente adecuado en edificios donde se requiere un alto nivel de calidad del aire interior.

- Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos combinan la ventilación natural y mecánica, activando los sistemas mecánicos únicamente cuando las condiciones naturales no son suficientes para garantizar una ventilación adecuada. Este enfoque permite optimizar el consumo energético, aprovechando las condiciones ambientales favorables, esto se puede ver reflejado en la Figura 2-5.

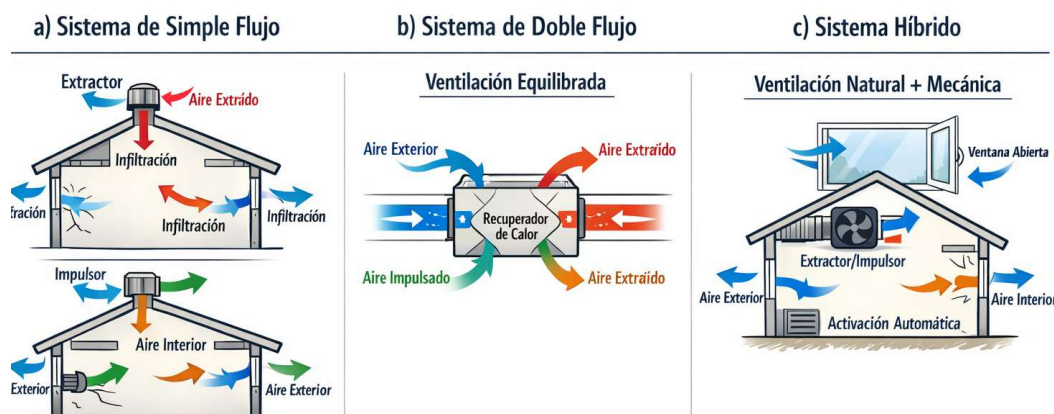


Figura 2-5 Esquema comparativo de los sistemas de ventilación: (a) simple flujo, (b) doble flujo y (c) sistema híbrido [28].

2.3.4 Implementación de sistemas de ventilación en edificios

En la práctica, los sistemas de ventilación en edificios de uso docente y administrativo se implementan mediante soluciones centralizadas que permiten gestionar de forma conjunta la renovación y el acondicionamiento del aire.

Uno de los elementos principales de estos sistemas es la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA), encargada de captar aire exterior, filtrarlo y acondicionarlo térmicamente antes de su distribución al interior del edificio. La UTA constituye el núcleo del sistema de ventilación, ya que permite controlar tanto el caudal como las condiciones del aire impulsado.

El aire tratado es distribuido a los distintos recintos mediante una red de conductos, que permite transportar el flujo de aire desde la UTA hasta los espacios ocupados. En los puntos terminales, el aire se introduce en los recintos a través de rejillas o difusores de impulsión, diseñados para favorecer una adecuada distribución del aire en el interior.

De forma complementaria, muchos sistemas incorporan unidades terminales tipo fancoil, cuya función principal es el acondicionamiento térmico del aire mediante la recirculación del aire interior. Aunque estos equipos no introducen aire exterior, contribuyen a la mezcla del aire en el recinto, influyendo en la distribución de los contaminantes.

En algunos casos, el sistema se completa con conductos de extracción mecánica, que permiten evacuar el aire interior hacia el exterior, estableciendo un flujo de ventilación a través del edificio.

Este tipo de configuración, basada en la impulsión de aire desde una unidad central y su distribución mediante conductos, es ampliamente utilizada en edificios existentes, ya que permite garantizar la renovación del aire interior de forma controlada.

No obstante, el funcionamiento de estos sistemas suele basarse en configuraciones de caudal predefinidas, sin incorporar mecanismos avanzados de adaptación a las condiciones reales del recinto.

2.3.5 Limitaciones de los sistemas de ventilación existentes

La eficacia de los sistemas de ventilación en el control del radón depende principalmente de su capacidad para garantizar un caudal adecuado y una correcta distribución del aire. Aunque la ventilación mecánica permite un mayor control, en muchos edificios estos sistemas operan con caudales fijos o regulación manual, lo que limita su adaptación a las condiciones reales del entorno. Por ello, el factor clave no es únicamente el tipo de sistema, sino su capacidad de regulación, lo que pone de manifiesto la necesidad de sistemas de control que permitan ajustar dinámicamente la ventilación.

En la práctica, muchos sistemas de ventilación están diseñados para condiciones estándar de uso y no se adaptan a variaciones en la ocupación, el ambiente o la concentración de contaminantes. En el caso del radón, esta limitación resulta especialmente relevante, ya que un caudal constante puede ser insuficiente en situaciones de alta concentración o excesivo en condiciones normales, generando un consumo energético innecesario.

Además, la falta de integración con sistemas de monitorización impide ajustar el funcionamiento de la ventilación en función de las condiciones reales del aire interior, dando lugar a una gestión poco eficiente.

En consecuencia, la principal limitación de los sistemas actuales no reside en su capacidad de renovación de aire, sino en la ausencia de control. Esto pone de manifiesto la necesidad de soluciones que integren monitorización y regulación automática, permitiendo adaptar el caudal de ventilación en función de variables como la concentración de radón.

3 SISTEMA ACTUAL DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DEL RADÓN EN EL CUD-ENM

3.1 Sistema de monitorización del Radón

La caracterización del comportamiento del gas radón en la planta baja del edificio se fundamenta en la implementación de un sistema de monitorización continua, diseñado para registrar la evolución temporal de la concentración de este contaminante bajo condiciones reales de funcionamiento del sistema de ventilación. El esquema general del sistema se encuentra reflejado en Figura 3-1 y se explica en apartados siguientes.

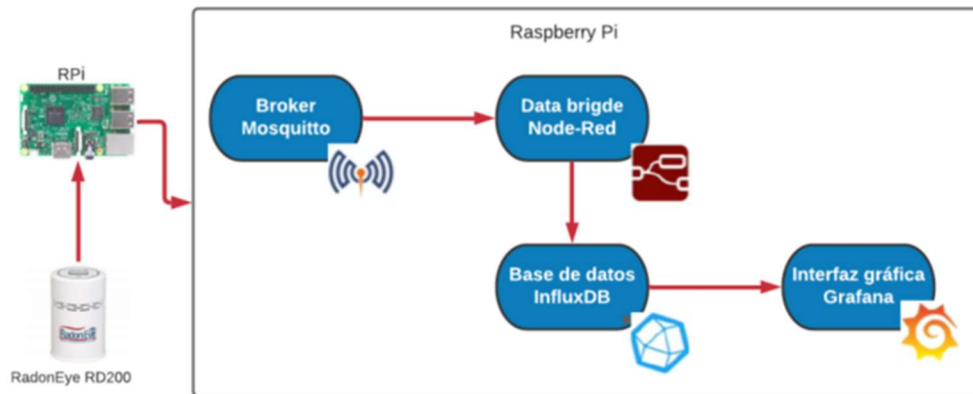


Figura 3-1 Esquema general de las comunicaciones de la herramienta de monitorización de radón [29].

La medición de la concentración de radón se realiza mediante sensores electrónicos activos tipo RadonEye RD200 [30], como aparece en la Figura 3-2, estos dispositivos específicamente diseñados para la detección en tiempo real de este gas en espacios interiores. Estos sensores proporcionan valores instantáneos de concentración expresados en Bq/m³, permitiendo capturar la naturaleza dinámica y fluctuante del radón, especialmente en entornos cerrados donde su acumulación depende de múltiples factores como la ventilación, la presión diferencial o la interacción con el terreno [29].



Figura 3-2 Sensor RadonEye RD200 [29].

La ubicación de los sensores en el interior de los despachos de la planta baja (a una altura aproximada de entre 80-100 cm) se ha seleccionado con el objetivo de representar condiciones reales de exposición. En este sentido, se ha considerado la influencia de la estratificación del radón, fenómeno por el cual las concentraciones tienden a ser superiores en zonas próximas al suelo debido a su origen en el subsuelo y a su transporte por difusión y convección. Este aspecto resulta especialmente relevante en la interpretación de los datos obtenidos.

Desde el punto de vista de la adquisición de datos, los valores registrados por el sensor son transmitidos a dos unidades de procesamiento basadas en Raspberry Pi [31], que actúan como nodo central del sistema de monitorización. La comunicación entre el sensor y las Raspberry Pi (Figura 3-3) se realiza mediante conexión Bluetooth, lo que permite una integración inalámbrica y flexible dentro del entorno de medida.

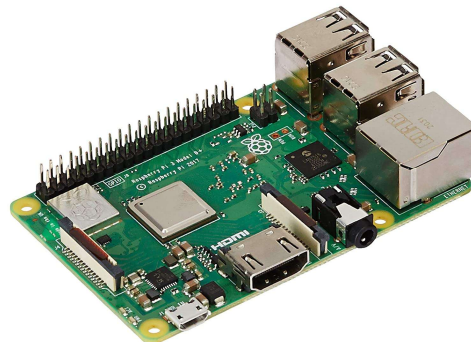


Figura 3-3 Raspberry Pi 3 Modelo B [29].

En la Raspberry Pi se ejecutan scripts específicos encargados de la lectura periódica de los datos, estableciendo una frecuencia de muestreo adecuada para capturar la variabilidad temporal del radón. Este muestreo continuo permite generar series temporales de alta resolución, fundamentales para el análisis posterior.

Una vez adquiridos, los datos son transmitidos mediante el protocolo de comunicación MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), ampliamente utilizado en arquitecturas IoT por su eficiencia y bajo consumo de recursos. En este esquema, la Raspberry Pi actúa como publicador, enviando los datos a un “*topic*” específico dentro de un *broker* MQTT, desde donde pueden ser consumidos por otros elementos del sistema [29].

La gestión de estos flujos de información se realiza mediante la herramienta Node-RED [32], que permite estructurar el sistema de comunicaciones mediante nodos interconectados. A través de esta plataforma, los datos recibidos son procesados y redirigidos hacia su almacenamiento en una base de datos.

Para el almacenamiento de la información se emplea InfluxDB [33], una base de datos orientada a series temporales, especialmente adecuada para el tratamiento de variables ambientales que evolucionan en el tiempo. Este sistema permite registrar de forma continua la concentración de radón, generando históricos que facilitan el análisis de tendencias y la comparación entre diferentes condiciones de operación.

Finalmente, la visualización de los datos se realiza mediante la herramienta Grafana [34], que permite la creación de paneles de control dinámicos en los que se representa gráficamente la evolución de la concentración de radón. Estas representaciones constituyen una herramienta fundamental para la interpretación de resultados, ya que permiten identificar de forma inmediata patrones de comportamiento, episodios de acumulación y la respuesta del sistema de ventilación ante distintas condiciones [29].

De este modo, el sistema implementado configura una arquitectura completa de monitorización, que abarca desde la medición hasta la visualización de los datos, proporcionando una base sólida para el análisis del comportamiento del radón en el edificio.

El núcleo del sistema de monitorización lo constituye una plataforma centralizada basada en la herramienta Node-RED, que actúa como elemento integrador de todos los datos procedentes de los distintos despachos del edificio. Node-RED es un entorno de programación visual orientado a aplicaciones de tipo IoT, que permite gestionar flujos de información mediante la interconexión de nodos funcionales. En el contexto del sistema analizado, esta herramienta se utiliza para recibir, organizar y redirigir los datos procedentes de los sensores distribuidos en los diferentes espacios.

Cada despacho del edificio dispone de un sensor que registra variables como la concentración de radón o parámetros asociados a la ventilación. Estos datos son enviados a través de la red mediante protocolos de comunicación como MQTT, siendo posteriormente capturados por Node-RED mediante nodos de entrada específicos [29].

Una vez recibida la información, Node-RED permite estructurar los flujos de datos de forma organizada, como se muestra en Figura 3-4, diferenciando los distintos despachos mediante *topics* o identificadores específicos. Esto facilita el tratamiento individualizado de cada espacio, así como la posibilidad de realizar análisis comparativos entre diferentes recintos del edificio.

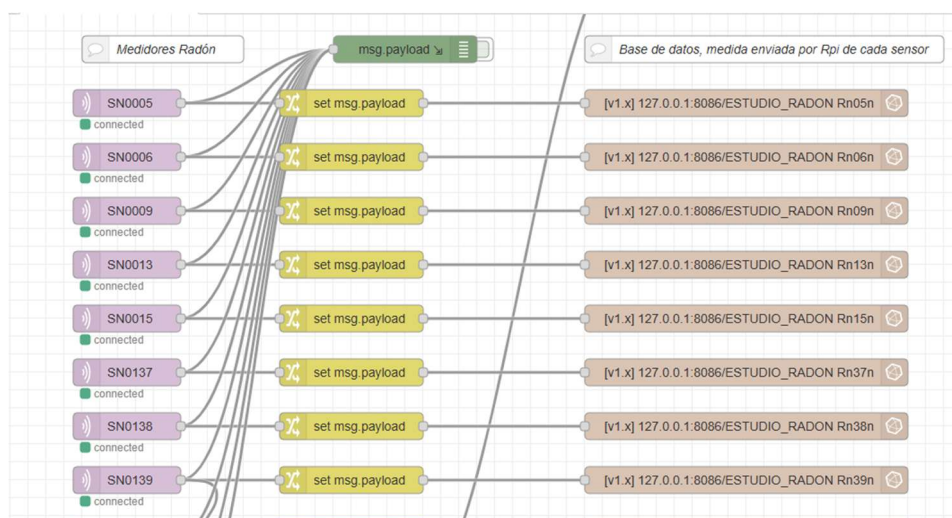


Figura 3-4 Flujo actual de Node-RED que refleja cada despacho

Además, esta plataforma permite implementar funciones de procesamiento y control básico de los datos, tales como filtrado, transformación o redirección hacia otros sistemas de almacenamiento y visualización.

En el sistema desarrollado, Node-RED actúa como elemento intermedio entre la adquisición de datos y su visualización final, enviando la información a una base de datos de series temporales (InfluxDB), desde donde es posteriormente representada mediante la herramienta Grafana, como se muestra en la Figura 3-5, en la que se aprecia la evolución de la concentración del radón en los despachos de la planta baja.

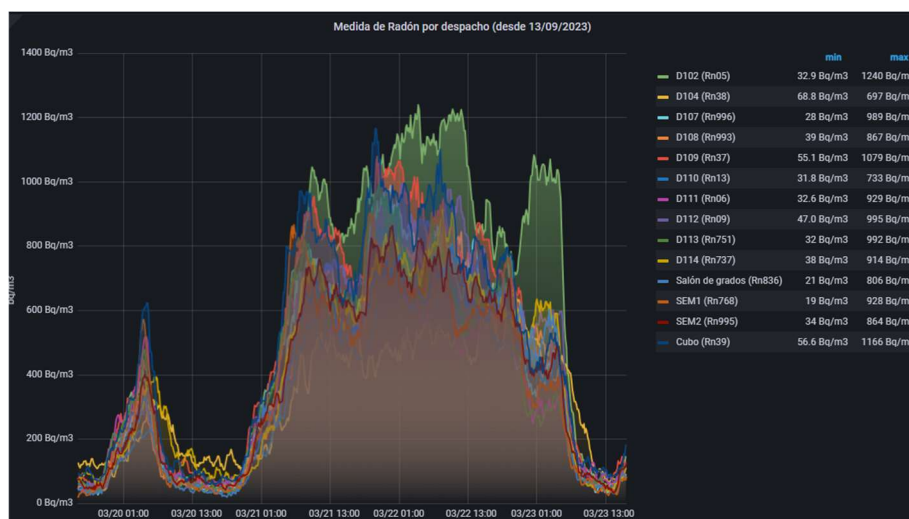


Figura 3-5 Gráfico representativo del radón en los distintos despachos.

Aunque la visualización final de los datos se realiza a través de plataformas como Grafana, Node-RED constituye el punto central donde se integran todos los despachos del edificio, permitiendo gestionar de forma unificada la información procedente de los distintos sensores.

Esta arquitectura centralizada resulta fundamental para el análisis global del sistema, ya que permite disponer de una visión conjunta del comportamiento del radón en todo el edificio, facilitando la identificación de patrones espaciales y temporales, así como la evaluación de la eficacia del sistema de ventilación en los diferentes recintos.

3.2 Sistema de ventilación y monitorización de caudales

La ventilación constituye el principal mecanismo de control de contaminantes el edificio del CUD-ENM, ya que permite la renovación del aire y la dilución de gases como el radón, este mecanismo se ve reflejado en la Figura 3-6. Por este motivo, resulta imprescindible cuantificar de forma objetiva el aporte de aire exterior al recinto para poder establecer relaciones entre las condiciones de ventilación y la concentración de radón.

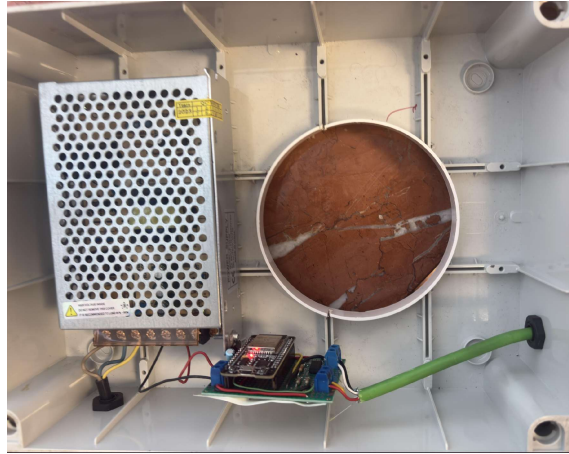


Figura 3-6 Sistema de la sonda actual.

Para ello, se emplea una sonda de velocidad de aire modelo IVL-20 [35] (Figura 3-7), diseñada para medir la velocidad del flujo de aire en conductos de ventilación o en puntos de impulsión. Esta magnitud, expresada en m/s, permite caracterizar el comportamiento del flujo de aire introducido en el recinto, siendo un parámetro directamente relacionado con el caudal de ventilación.



Figura 3-7 Sonda IVL-20.

Desde un punto de vista físico, el caudal volumétrico de aire introducido en el sistema puede estimarse a partir de la velocidad medida mediante la siguiente expresión:

$$Q = v \cdot A$$

donde:

- Q es el caudal volumétrico (m^3/s) [36]
- v es la velocidad del aire (m/s),
- A es la sección del conducto (m^2)

Esta relación permite transformar una magnitud fácilmente medible, como es la velocidad del aire, en un parámetro de gran relevancia en ingeniería de ventilación, como es el caudal de aire. A su vez, el

caudal puede relacionarse con indicadores fundamentales como las renovaciones de aire por hora (ACH) [37], que describen la capacidad del sistema para renovar el volumen de aire del recinto.

En el contexto del estudio del radón, este parámetro adquiere una especial importancia, ya que la ventilación actúa como mecanismo de dilución. El incremento del caudal de aire exterior favorece la reducción de la concentración de radón mediante dos efectos principales:

- Dilución directa del contaminante, al introducir aire con menor concentración.
- Modificación de las condiciones de presión y flujo, lo que puede afectar a la entrada de radón desde el subsuelo.

No obstante, la relación entre ventilación y concentración de radón no siempre es lineal, ya que depende de múltiples factores como la tasa de emisión del gas, la estanqueidad del edificio o la distribución del flujo de aire en el interior del recinto. De este modo, ambas magnitudes son almacenadas en la base de datos y representadas conjuntamente en los paneles de visualización desarrollados en Grafana. Esta representación simultánea permite analizar la evolución temporal de ambas variables y estudiar su comportamiento correlacionado. A través de este enfoque, es posible identificar patrones característicos, tales como:

- Descensos en la concentración de radón asociados a incrementos en la velocidad del aire o en el caudal de ventilación.
- Episodios de acumulación de radón en condiciones de baja ventilación o reducción del caudal de aire.
- Respuestas transitorias del sistema ante cambios en las condiciones de funcionamiento de la ventilación.

Este tipo de análisis permite pasar de una evaluación meramente descriptiva, basada únicamente en la observación de valores de concentración, a un análisis de carácter explicativo, en el que se identifican las relaciones causa-efecto entre la ventilación y la calidad del aire interior.

En consecuencia, la incorporación de la medición de la velocidad del aire no solo complementa la información disponible, sino que resulta esencial para comprender el comportamiento del radón y evaluar la eficacia del sistema de ventilación existente, constituyendo además una base fundamental para el desarrollo de estrategias de control automático en fases posteriores del trabajo.

No obstante, es importante destacar que la capacidad de análisis de la ventilación en el sistema actual presenta una limitación significativa. En la instalación estudiada, la medición de la velocidad del aire se realiza en un único punto del sistema, situado en el inicio de la red de conductos. Esta configuración impide conocer con precisión cómo se distribuye el caudal de aire entre los distintos recintos del edificio.

Como consecuencia, aunque se dispone de una estimación del caudal total impulsado por el sistema, no es posible determinar de forma exacta qué fracción de dicho caudal llega a cada despacho, ni evaluar posibles desequilibrios en la distribución del aire. Asimismo, tampoco se puede cuantificar el caudal efectivo que realmente participa en la renovación del aire interior de cada recinto, existiendo incertidumbre sobre posibles pérdidas, derivaciones o excesos de ventilación en determinadas zonas.

Esta limitación condiciona el análisis del comportamiento del radón, ya que dificulta establecer una relación precisa entre la ventilación real de cada espacio y la concentración medida del gas. Por tanto, se pone de manifiesto la necesidad de sistemas de control y regulación más localizados, capaces de actuar directamente sobre cada punto de impulsión y adaptar el caudal de forma específica en función de las condiciones del recinto.

3.3 Sistema de ventilación existente

3.3.1 Descripción general

El edificio objeto de estudio dispone de un sistema de ventilación mecánica centralizada, cuya función principal es garantizar la renovación del aire interior y mantener condiciones adecuadas de calidad ambiental en los distintos recintos [10].

El sistema se basa en una estrategia de ventilación por impulsión, en la que el aire exterior es tratado previamente en una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) y posteriormente distribuido a través de una red de conductos hacia los diferentes despachos y aulas del edificio. Este aire constituye el principal mecanismo de renovación del ambiente interior, permitiendo la dilución de contaminantes como el dióxido de carbono o el gas radón. A diferencia de otros sistemas más avanzados, la instalación analizada presenta una configuración de simple flujo, en la que únicamente se introduce aire exterior sin disponer de un sistema de retorno integrado dentro de la propia UTA. Como consecuencia, la evacuación del aire interior no se realiza de forma equilibrada a través de la misma unidad, sino mediante mecanismos independientes o, en algunos casos, por infiltraciones y exfiltraciones no controladas [10].

Desde el punto de vista del control, el sistema presenta un funcionamiento esencialmente estático, con escasa capacidad de adaptación a las condiciones reales del recinto. El caudal de aire impulsado no se regula en función de variables ambientales, sino que se mantiene en valores preestablecidos, lo que limita la eficiencia del sistema tanto desde el punto de vista energético como desde la calidad del aire interior.

3.3.2 Componentes del sistema

Unidad de Tratamiento de Aire (UTA)

La Unidad de Tratamiento de Aire del edificio, mostrada en la Figura 3-8, constituye el elemento central del sistema de ventilación, siendo la encargada de captar, tratar e impulsar el aire exterior hacia el interior del edificio.



Figura 3-8 Unidad de Tratamiento del Aire FMA/HP 036, instalada en el CUD [10].

El funcionamiento de la UTA [22] se basa en una serie de etapas sucesivas que permiten acondicionar el aire antes de su distribución:

- Captación de aire exterior, que constituye el aporte principal de ventilación del edificio.
- Filtrado del aire, eliminando partículas en suspensión y mejorando la calidad del aire introducido.
- Acondicionamiento térmico, mediante baterías de calefacción o refrigeración, que permiten adaptar la temperatura del aire a las condiciones de confort requeridas.
- Impulsión del aire, realizada mediante ventiladores que generan el caudal necesario para su distribución a través de la red de conductos.

- El aire tratado en la UTA es el encargado de renovar el aire interior de los recintos, siendo por tanto un elemento clave en el control de la calidad del aire.

Red de conductos de impulsión

La distribución del aire tratado se realiza mediante una red de conductos que conecta la UTA con los distintos espacios del edificio, reflejados en la Figura 3-9. Estos conductos discurren principalmente por el espacio situado sobre los falsos techos, permitiendo una distribución oculta y eficiente del aire. En el caso del edificio analizado, los conductos están fabricados en panel rígido de lana de vidrio con revestimiento de aluminio, material que proporciona buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico.

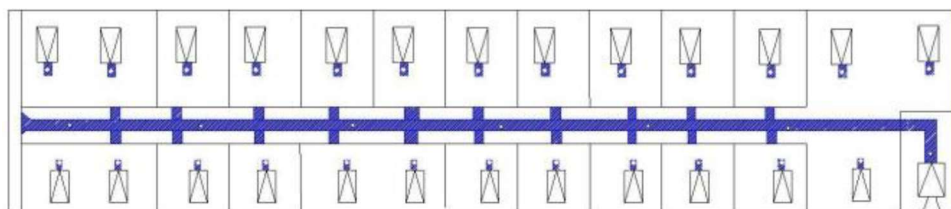


Figura 3-9 Esquema del sistema de conducción de aire desde la UTA a los despachos en la planta baja del CUD – Proyecto de reforma del edificio en 2010 [10].

La función principal de esta red es transportar el aire tratado desde la UTA hasta los puntos de impulsión, garantizando una distribución uniforme del caudal en los diferentes recintos. No obstante, debido a la configuración del sistema, pueden existir diferencias en la cantidad de aire que recibe cada espacio, lo que introduce cierta heterogeneidad en la ventilación [10].

3.3.3 Sistema de distribución de aire en los recintos

El aire impulsado a través de la red de conductos es introducido en los recintos mediante elementos terminales, como rejillas o difusores, habitualmente situados en el falso techo en espacios ocupados. Sin embargo, en zonas de circulación como los pasillos, la impulsión puede realizarse directamente desde los propios conductos, sin necesidad de elementos terminales integrados en el falso techo.

Estos dispositivos permiten la entrada del aire tratado en el espacio como se ve Figura 3-10, favoreciendo su adecuada distribución y mezcla con el aire interior. La correcta disposición de los puntos de impulsión resulta fundamental para garantizar una ventilación eficaz y evitar la aparición de zonas de estancamiento.



Figura 3-10 Conducto de entrada de aire al falso techo [10].

De forma complementaria, los recintos disponen de unidades terminales tipo *fancoil*, encargadas de regular las condiciones térmicas del aire interior. Estos equipos funcionan mediante la recirculación del aire del propio recinto, haciéndolo pasar a través de un intercambiador de calor conectado al sistema central de climatización.

Además, en la instalación analizada, los *fancoils* [22] (Figura 3-11) incorporan una aportación de aire procedente del falso techo, que actúa como *plenum* de aire impulsado desde el sistema de ventilación. De este modo, el equipo no solo recircula el aire interior, sino que también capta una fracción de aire fresco previamente tratado, impulsándolo posteriormente al despacho. Esta configuración permite combinar la climatización del aire recirculado con la renovación parcial del aire interior, favoreciendo tanto el control térmico como la mejora de la calidad del aire. No obstante, la eficacia de este proceso depende de la proporción de aire exterior introducido y de su adecuada distribución en el recinto.



Figura 3-11 Fancoil FCX42P del despacho 114 [10].

Aunque los *fancoils* no aportan aire exterior, su funcionamiento induce movimiento de aire en el interior del espacio, lo que contribuye a la mezcla del aire impulsado y mejora la homogeneidad de las condiciones ambientales. Sin embargo, esta recirculación no implica una renovación efectiva del aire, por lo que la calidad del ambiente interior depende fundamentalmente del aire aportado por la UTA.

3.3.4 Sistema de extracción de aire

En la instalación analizada, el sistema de extracción de aire no se encuentra centralizado ni distribuido de forma homogénea en todos los recintos del edificio. En la mayoría de los espacios, la evacuación del aire se produce de forma pasiva a través de infiltraciones y exfiltraciones no controladas, principalmente mediante huecos en la envolvente interior, como puertas y ventanas, lo que implica una renovación de aire poco predecible y dependiente de las condiciones del entorno. Adicionalmente, se dispone de un sistema de extracción (Figura 3-12) localizado instalado en el despacho 114.



Figura 3-12 Ventilador helicocentrífugo TD-350/125 SILENT [10].

Este sistema está constituido por un ventilador helicocentrífugo en línea, cuya función es extraer el aire interior del recinto y expulsarlo al exterior a través de un conducto flexible conectado a una salida en fachada o ventana. Este tipo de dispositivos genera una depresión en el interior del espacio,

favoreciendo la evacuación del aire y promoviendo la entrada de aire nuevo desde otros puntos del sistema.

Según se describe en el trabajo de referencia [10], este sistema presenta un caudal máximo del orden de 360 m³/h y está diseñado para operar con bajos niveles de ruido, lo que lo hace adecuado para su uso en entornos docentes.

La presencia de este sistema de extracción introduce una variación significativa en el comportamiento de la ventilación del despacho en el que está instalado, ya que modifica el equilibrio entre el aire impulsado y el aire evacuado. Como consecuencia, se generan condiciones de flujo diferentes respecto al resto de recintos, lo que puede influir directamente en la distribución y concentración de contaminantes como el radón.

No obstante, al tratarse de un sistema localizado y no integrado dentro de una estrategia global de ventilación, su efecto se limita al recinto en el que se encuentra instalado, sin permitir un control coordinado del conjunto del edificio [10].

3.3.5 Sistema de regulación manual del caudal

El sistema dispone de un único dispositivo de regulación manual del caudal de aire impulsado (Figura 3-13), ubicado en una sala independiente y asociado a la red de conductos de ventilación. Este elemento permite modificar la sección de paso del aire, actuando directamente sobre el caudal suministrado por la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA). De este modo, la regulación no se realiza a nivel individual en cada despacho, sino de forma global sobre el caudal impulsado al conjunto del sistema, lo que limita la capacidad de ajuste específico en cada recinto [10].



Figura 3-13 Controlador del régimen de velocidad de la UTA.

El funcionamiento de este sistema se basa en la variación de la apertura del dispositivo, lo que produce una mayor o menor resistencia al paso del aire. De este modo, es posible ajustar el caudal de ventilación en función de las necesidades del usuario o de las condiciones del recinto.

El sistema de ventilación presenta una limitación fundamental, ya que la regulación del caudal se realiza de forma manual y no está integrada con los sistemas de monitorización. Como consecuencia, el ajuste depende de la intervención del usuario, introduciendo variabilidad en el funcionamiento y dificultando la adaptación a las condiciones reales del recinto.

Aunque el sistema de monitorización proporciona información en tiempo real sobre la concentración de radón y la calidad del aire, no existe un mecanismo que permita ajustar automáticamente la ventilación en función de estos parámetros. Esto puede dar lugar tanto a situaciones de ventilación insuficiente, con aumento de contaminantes, como a una ventilación excesiva, con el consiguiente incremento del consumo energético.

En este contexto, se identifica la necesidad de integrar la monitorización ambiental con el control del caudal de ventilación, permitiendo su regulación automática en función de variables como la

concentración de radón. En respuesta a esta problemática, el presente trabajo plantea el desarrollo de un sistema de automatización capaz de actuar sobre el dispositivo de regulación existente, transformando un control manual en un sistema basado en datos.

4 PROCESO DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL DISPOSITIVO

4.1 Mejora del sistema de monitorización de la ventilación

En una primera fase del estudio, la caracterización de la ventilación se realizaba mediante una única sonda de velocidad de aire situada en el inicio de la red de conductos, lo que permitía estimar el caudal total impulsado por el sistema. Sin embargo, esta configuración presentaba una limitación importante, ya que no permitía conocer la distribución del caudal en los distintos recintos.

Con el objetivo de mejorar la capacidad de análisis del sistema, se ha incorporado una segunda sonda de velocidad de aire en el tramo final del conducto correspondiente al despacho objeto de estudio con las mismas características que la anterior, reflejadas en la Tabla 4-1. Para ello, se ha replicado el sistema de medida existente, manteniendo la misma configuración hardware y lógica de adquisición de datos, lo que garantiza la coherencia y comparabilidad entre ambas mediciones, como se puede apreciar en el esquema de la Figura 4-1.

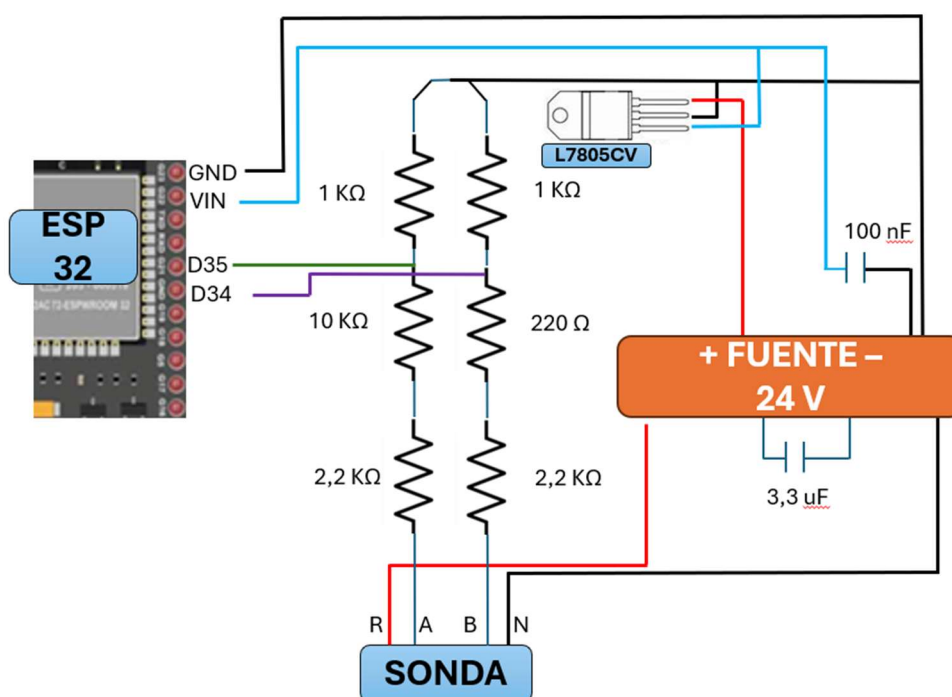


Figura 4-1 Esquema del sistema de la sonda.

Parámetro	Valor aproximado
Rango de medida	0 – 10 m/s
Precisión	$\pm (0.1 \text{ m/s} + 5\%)$
Tipo de sensor	Anemómetro térmico
Tiempo de respuesta	< 1 s
Salida	Señal analógica
Aplicación	Conductos de ventilación

Tabla 4-1 Características de Sonda IVL-20 [35].

Para la implementación del sistema de monitorización de la ventilación, ha sido necesario definir tanto los elementos hardware que componen el sistema como su disposición física dentro de la instalación. En la Tabla 4-2 se recogen los principales componentes utilizados, junto con sus características más relevantes, mientras que en las Figura 4-1 y Figura 4-3 se muestra la configuración física del sistema y la ubicación de los distintos elementos en el entorno de medida. Esta representación conjunta permite comprender de forma global el funcionamiento del sistema, así como la relación entre los dispositivos de adquisición de datos y su integración en la red de ventilación.

Componentes	Descripción
ESP32	Microcontrolador que procesa datos y permite control y comunicación (WiFi/Bluetooth).
Sonda IVL-20	Mide la velocidad del aire en conductos de ventilación.
Resistencias	2,2 k Ω , 10 k Ω , 220 Ω y 1 k Ω , en cargadas de limitar y controlar la corriente eléctrica en el circuito.
Fuente 24V	Se encarga de alimentar tanto la ESP como el resto del circuito.
L7805CV (Figura 4-2)	Regula la tensión a 5 V estables desde una entrada mayor.
Condensadores	3.3 uF y 100 nF, encargados de filtrar el ruido y estabilizar la tensión

Tabla 4-2 Tabla de componentes del sistema.

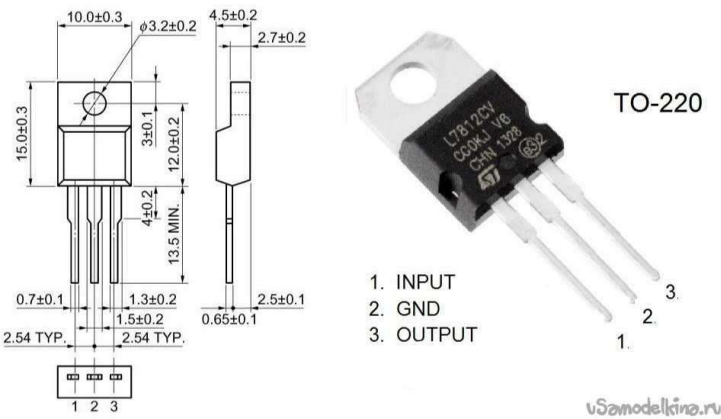


Figura 4-2 L7805CV [38].

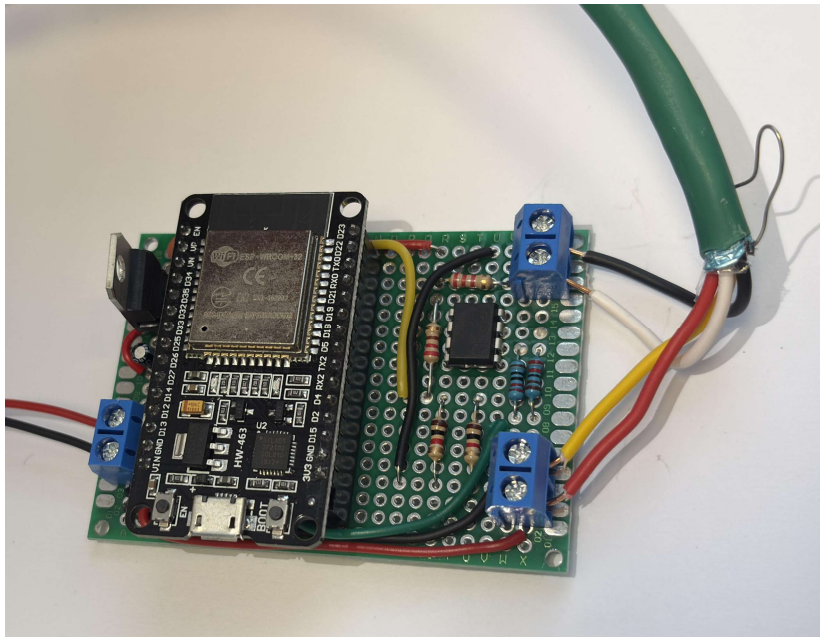


Figura 4-3 Sistema de la segunda sonda.

La nueva sonda se ha integrado en la arquitectura existente replicando el flujo de adquisición de datos previamente desarrollado. El microcontrolador ESP32 se encarga de la lectura de la señal de la sonda y del envío de los datos mediante protocolo MQTT. Estos datos son procesados en la plataforma Node-RED, donde se integran dentro del flujo ya existente (Figura 4-4), replicando la lógica de tratamiento aplicada a la primera sonda. Posteriormente, la información es almacenada y visualizada en Grafana, permitiendo el análisis conjunto de ambas mediciones en tiempo real.

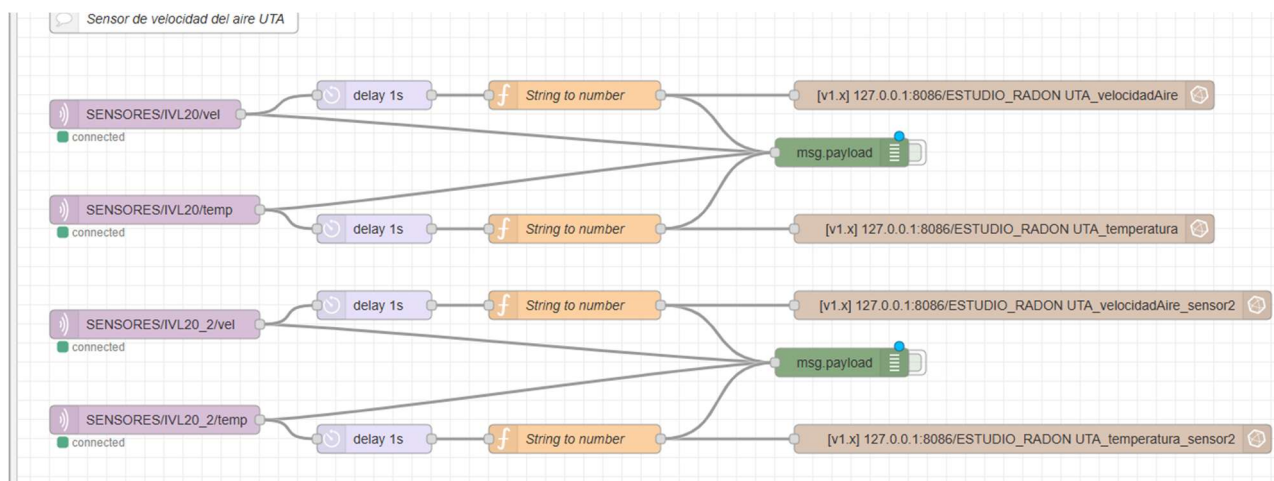


Figura 4-4 Flujo de Node-RED que establece las gráficas de las sondas.

Esta ampliación del sistema de monitorización permite disponer de una visión más completa del comportamiento de la ventilación, facilitando la evaluación de la distribución del caudal y su relación con las condiciones ambientales del recinto, añadiendo también el dato de la temperatura como se muestra en las gráficas de la Figura 4-5.



Figura 4-5 Gráficos de los datos en Grafana.

De este modo, el sistema permite disponer tanto de una medida global del caudal impulsado como de una medida local del flujo de aire que llega efectivamente al recinto, facilitando el análisis de pérdidas, distribución y comportamiento del sistema de ventilación.

Gracias a la instalación de esta segunda sonda, es posible comparar el caudal medido en el inicio del sistema con el caudal que alcanza el punto final, lo que permite evaluar la distribución del aire en la red de conductos. De este modo, se puede estimar qué fracción del aire impulsado se dirige al despacho analizado y qué parte del caudal se distribuye hacia otros recintos o se pierde a lo largo del sistema.

Esta mejora en la instrumentación permite reducir la incertidumbre existente en el análisis de la ventilación, proporcionando una visión más precisa del comportamiento real del sistema. Además, posibilita establecer una relación más directa entre la ventilación efectiva del despacho y la concentración de radón medida en el mismo.

En consecuencia, la incorporación de esta segunda sonda no solo mejora la calidad de los datos obtenidos, sino que constituye un elemento clave para el desarrollo del sistema de control, ya que permite ajustar la ventilación de forma más precisa en función de las condiciones reales del recinto.

4.1.1 Calibración y verificación de las sondas de velocidad de aire

Previo a la instalación definitiva de la nueva sonda de medición, se llevó a cabo un proceso de calibración comparativa con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento y garantizar la coherencia de las medidas respecto a la sonda previamente disponible.

Para ello, se seleccionó como entorno de ensayo el despacho 114 del edificio del CUD, concretamente la conducción de aire asociada al sistema de extracción. Este punto resulta especialmente adecuado, ya que permite trabajar con un flujo de aire controlado y representativo de las condiciones reales de operación del sistema de ventilación.

El procedimiento experimental consistió en generar un flujo de aire mediante el extractor, empleando aire procedente del exterior, y estableciendo dos condiciones de funcionamiento diferenciadas mediante la regulación de la velocidad del extractor. De este modo, se obtuvieron dos regímenes de flujo distintos (Régimen 1 y Régimen 2), que representa diferentes velocidades en el

sistema) que permiten evaluar el comportamiento de las sondas en diferentes condiciones operativas. En cada uno de los regímenes de funcionamiento se siguió la siguiente secuencia de medida:

1. Medición de referencia: Se empleó un anemómetro de referencia como se muestra en la Figura 4-6 (empleando el modelo es el 405i [39]), para determinar la velocidad del aire y la temperatura del flujo en la sección de la tubería. Estos valores se consideraron como referencia para la comparación posterior y se pueden apreciar en la Tabla 4-3.



Figura 4-6 Medición con anemómetro de referencia.

Número de prueba	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Régimen del aire
1	3,22	23,6	Régimen 1
2	3,26	23,6	Régimen 1
3	3,23	23,6	Régimen 1
4	3,21	23,6	Régimen 1
5	3,26	23,6	Régimen 1
6	3,2	23,6	Régimen 2
7	3,19	23,6	Régimen 2
8	3,3	23,6	Régimen 2
9	3,22	23,6	Régimen 2
10	3,17	23,7	Régimen 2

Tabla 4-3 Tabla de datos de la con el anemómetro de referencia con intervalo de 30 segundos.

2. Medición con la sonda existente (Sonda 1): Se colocó la sonda previamente disponible en el mismo punto de medida como se muestra en la Figura 4-7, asegurando condiciones geométricas equivalentes (posición, orientación y profundidad de inserción), y se registraron los valores de velocidad y temperatura reflejadas en la Tabla 4-4.



Figura 4-7 Medición con sonda 1.

Número de prueba	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Régimen del aire
1	3,15	22,83	Régimen 1
2	3,06	22,99	Régimen 1
3	3,19	23,02	Régimen 1
4	3,21	23,15	Régimen 1
5	3,15	23,5	Régimen 1
6	2,31	23,39	Régimen 2
7	2,18	23,33	Régimen 2
8	2,24	23,39	Régimen 2
9	2,18	23,32	Régimen 2
10	2,22	23,23	Régimen 2

Tabla 4-4 Tabla de datos de la Sonda 1 con intervalo de 30 segundos.

- Medición con la nueva sonda (Sonda 2): Se repitió el procedimiento con la nueva sonda mostrado en la Figura 4-8, manteniendo las mismas condiciones de medida para garantizar la comparabilidad de los resultados mostrados en la Tabla 4-5.



Figura 4-8 Medición con sonda 2.

Número de prueba	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Régimen del aire
1	3,34	23,35	Régimen 1
2	3,34	23,06	Régimen 1
3	3,16	22,84	Régimen 1
4	3,30	22,47	Régimen 1
5	3,37	23,56	Régimen 1
6	2,33	23,06	Régimen 2
7	2,34	23,8	Régimen 2
8	2,41	23,84	Régimen 2
9	2,31	23,84	Régimen 2
10	2,35	23,38	Régimen 2

Tabla 4-5 Tabla de datos de la Sonda 2 con intervalo de 30 segundos.

Los datos obtenidos en ambos regímenes de flujo (Figura 4-9) mostraron una elevada concordancia entre los valores registrados por el anemómetro de referencia y los medidos por ambas sondas. Las diferencias observadas se situaron dentro de un margen de error despreciable, atribuible a tolerancias instrumentales y pequeñas variaciones locales del flujo.

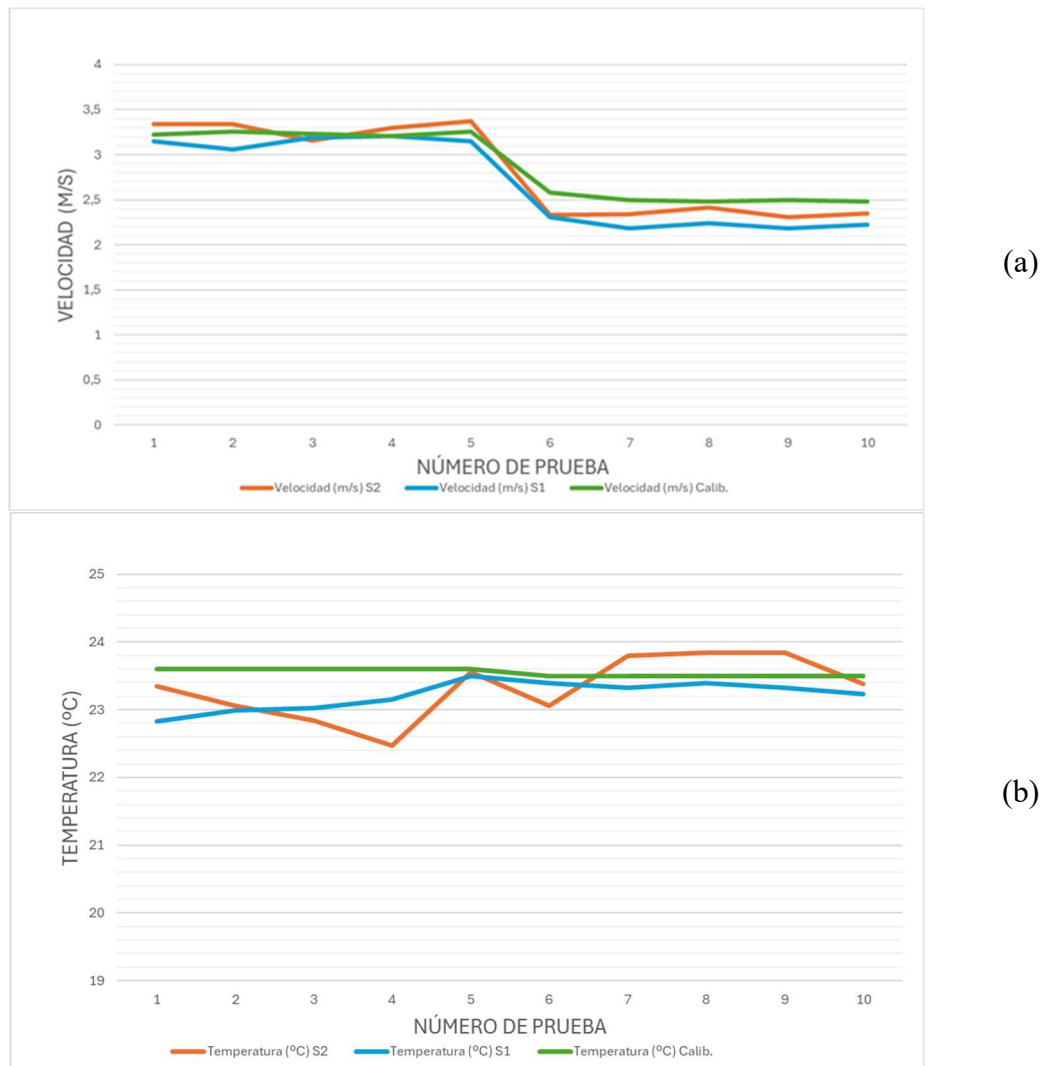


Figura 4-9 Gráficos comparativo de datos de S1, S2, y el anemómetro: (a) velocidad y (b) temperatura.

Este resultado permite validar que ambas sondas presentan un comportamiento adecuado y consistente, siendo aptas para su uso en la caracterización experimental del sistema de ventilación. Asimismo, la similitud entre ambas mediciones garantiza la continuidad de los datos en futuras campañas experimentales, evitando desviaciones sistemáticas entre sensores.

4.1.2 Instalación de las sondas de medición

Una vez verificado el correcto funcionamiento de ambas sondas mediante el proceso de calibración previa, se procedió a su instalación definitiva dentro del sistema de ventilación del edificio, con el objetivo de obtener mediciones representativas en distintos puntos de la red de distribución de aire.

La estrategia de instalación se basó en la necesidad de analizar el comportamiento del flujo de aire a lo largo del sistema, permitiendo comparar condiciones de entrada y salida dentro del conducto.

Sonda 1 (referencia): Se calibraron en el despacho 114 en el sistema de extracción [10], e instaló en la Sala de Grados (su ubicación anterior). Esta ubicación corresponde a una zona próxima a la impulsión del sistema, donde el flujo de aire presenta mayor uniformidad y estabilidad, sirviendo como referencia para el resto de las medidas, esta posición se puede ver reflejada en los planos de la

Sonda 2 (nueva instalación): Se instaló en el extremo final del pasillo, directamente en el conducto de ventilación, tal y como se muestra en la Figura 4-10. Esta ubicación permite evaluar el comportamiento del flujo tras recorrer la red de distribución, siendo especialmente relevante para analizar pérdidas de carga, variaciones de velocidad y posibles efectos de disipación del flujo.



Figura 4-10 Planos del sistema de monitorización de ventilación con las ubicaciones de los principales componentes.

Montaje físico

La instalación de la sonda 2 (Figura 4-11) se realizó mediante fijación directa al conducto, asegurando una correcta orientación del sensor respecto al flujo de aire. Para garantizar la estabilidad mecánica del conjunto, se empleó un sistema de sujeción mediante soporte rígido y fijación adicional con cuerda, evitando vibraciones o desplazamientos que pudiesen afectar a la calidad de la medida.



Figura 4-11 Instalación de la sonda 2 en el pasillo de la plana baja del CUD.

Asimismo, se tuvo en cuenta que la sonda quedase posicionada en una zona representativa del flujo, evitando proximidad a paredes o elementos perturbadores que pudiesen alterar el perfil de velocidades (zonas de capa límite o turbulencias locales).

En cuanto a alimentación y control, la sonda instalada en el extremo del conducto se conectó a la red eléctrica mediante un dispositivo inteligente tipo Tapo, que permite el control remoto de encendido y apagado. Permitiendo gestionar el funcionamiento de la sonda sin necesidad de acceso físico al punto

de instalación y reduciendo el consumo energético al poder activar la medición únicamente en los periodos de ensayo.

4.2 Automatización de la regulación del caudal

Como se expresó anteriormente, el objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un sistema capaz de automatizar la regulación del caudal de ventilación en los despachos del edificio, permitiendo adaptar dicho caudal en función de las condiciones ambientales, particularmente de la concentración de radón.

Para ello, se plantea el diseño e implementación de un dispositivo que actúe sobre el sistema de regulación existente, transformando un mecanismo manual en un sistema automatizado integrado con la monitorización del entorno.

El proceso de desarrollo del dispositivo se ha estructurado en distintas fases, que comprenden desde el análisis del sistema existente hasta la implementación física y validación del prototipo.

4.2.1 Requisitos del sistema

Como se ha descrito previamente, el sistema de ventilación dispone de un mecanismo de regulación del caudal basado en la modificación manual de la sección de paso del aire. Desde el punto de vista del diseño, este elemento presenta una ventaja relevante: puede ser accionado externamente, lo que permite su automatización sin necesidad de intervenir sobre la instalación original.

No obstante, el sistema presenta ciertas limitaciones desde el punto de vista mecánico, como la ausencia de control preciso de la posición y la necesidad de aplicar un par suficiente para su accionamiento, aspectos que han sido considerados en el diseño del dispositivo desarrollado.

A partir de este análisis, se han definido los requisitos funcionales del sistema de automatización. En primer lugar, el dispositivo debe ser capaz de actuar sobre el mecanismo de regulación de forma automática en función de los datos proporcionados por el sistema de monitorización, permitiendo el ajuste dinámico del caudal. Asimismo, el sistema debe admitir el control remoto mediante la recepción de consignas desde plataformas externas, como el entorno basado en Node-RED, facilitando su operación sin intervención física directa. Por último, se ha considerado la necesidad de mantener la operatividad manual del sistema, garantizando que el usuario pueda actuar directamente sobre el regulador en caso necesario.

Estos requisitos constituyen la base del diseño del dispositivo, condicionando tanto la selección de los componentes como la arquitectura del sistema de control.

4.2.2 Prototipos

Una vez definida la problemática y establecidos los objetivos del sistema, se procede al desarrollo del concepto del dispositivo de automatización, así como a la evaluación de las distintas alternativas de diseño que permiten su implementación sobre el sistema de regulación existente.

En esta fase inicial, se plantean diferentes configuraciones mecánicas orientadas a transmitir movimiento desde un actuador hasta el elemento de regulación del caudal, teniendo en cuenta las limitaciones físicas del entorno, la accesibilidad del dispositivo y la necesidad de compatibilidad con el sistema original. Las primeras aproximaciones de diseño se recogen de forma esquemática en la Figura 4-12, donde se representan las distintas ideas conceptuales consideradas.

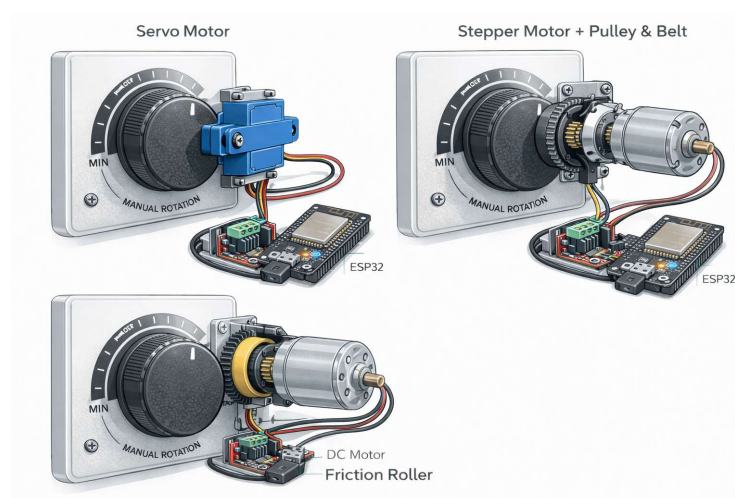


Figura 4-12 Prototipos iniciales.

Tras el análisis de las distintas alternativas de diseño, se han descartado aquellas soluciones que implicaban una modificación permanente o invasiva del sistema de regulación existente, con el objetivo de preservar la integridad mecánica del elemento original y garantizar la reversibilidad de la intervención. Este criterio resulta especialmente relevante, ya que permite retirar el dispositivo sin provocar daños en la instalación, manteniendo el sistema en su estado inicial.

Desde el punto de vista del diseño mecánico, esta restricción condiciona significativamente la solución adoptada, ya que impide el uso de configuraciones basadas en fijaciones rígidas permanentes, mecanizados directos sobre la pieza original o sustitución de componentes del sistema de ventilación. En su lugar, se priorizan soluciones acopladas, modulares y fácilmente desmontables.

En este contexto, se evalúan distintas alternativas de transmisión de movimiento, entre las que destacan:

- Accionamiento directo sobre el eje del regulador, mediante acoplamiento rígido entre el motor y el regulador de caudal.
- Sistemas de transmisión indirecta, como engranajes o correas, que permiten desacoplar la posición del motor respecto al elemento de regulación.
- Sistemas de presión o fricción, en los que el movimiento se transmite por contacto sin necesidad de fijación permanente.

4.2.3 Diseño y componentes hardware del sistema de automatización

El diseño hardware del sistema desarrollado se fundamenta en la integración de un conjunto de dispositivos electrónicos y electromecánicos cuyo objetivo es automatizar el control de la apertura del sistema de ventilación existente en el edificio. La solución propuesta permite actuar sobre el elemento de regulación del caudal de aire, incorporando control automático, remoto y manual, en función de las condiciones ambientales y de las necesidades del usuario.

El sistema está compuesto por un motor paso a paso tipo NEMA 17, un *driver* de control A4988, un sensor de posición magnético AS5600 y una unidad de control basada en ESP32. La interacción entre estos elementos permite implementar un sistema de control preciso, repetible y adaptable a distintas condiciones de operación.

Desde un punto de vista funcional, la idea principal del sistema consiste en transformar un elemento de regulación manual en un sistema automatizado capaz de modificar la ventilación en función de variables como la concentración de radón o instrucciones externas, manteniendo en todo momento la posibilidad de operación manual.

Motor paso a paso NEMA 17

El actuador principal del sistema es un motor paso a paso tipo NEMA 17 (Figura 4-13), ampliamente utilizado en aplicaciones de control de movimiento por su elevada precisión y capacidad de posicionamiento angular.



Figura 4-13 Motor paso a paso NEMA 17 [40].

Este tipo de motor permite dividir una vuelta completa en un número elevado de pasos discretos (típicamente 200 pasos por revolución, equivalentes a $1,8^\circ$ por paso), lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones donde se requiere un control fino de la posición, como es el caso del ajuste de la apertura del sistema de ventilación.

La elección de un motor paso a paso frente a otras soluciones, como motores de corriente continua, se justifica por su capacidad de control sin necesidad de sistemas de realimentación complejos, así como por su facilidad de integración con sistemas de control digital.

Driver de control A4988

El control del motor paso a paso se realiza mediante un *driver* A4988 (Figura 4-14), encargado de gestionar la alimentación y la secuencia de excitación de las bobinas del motor. Este dispositivo permite controlar el motor mediante señales digitales simples (STEP y DIR), facilitando su integración con microcontroladores. Además, el A4988 soporta modos de *microstepping*, lo que permite aumentar la resolución del movimiento y mejorar la suavidad del giro, reduciendo vibraciones y mejorando la precisión del sistema. El uso de este *driver* resulta fundamental para garantizar un funcionamiento estable del motor, así como para proteger tanto el motor como la electrónica de control frente a sobre corrientes.



Figura 4-14 Driver de control A4988 con vista de sus pines [41].

Sensor de posición AS5600

Para garantizar el conocimiento preciso de la posición del sistema, se incorpora un sensor magnético AS5600 (Figura 4-15), capaz de medir el ángulo de rotación de un eje mediante la detección del campo magnético generado por un imán acoplado al mismo. Este sensor proporciona una medición absoluta del ángulo (0° – 360°), lo que permite conocer en todo momento la posición real del sistema de ventilación, independientemente de pérdidas de pasos o reinicios del sistema. La incorporación de este sensor introduce un sistema de realimentación (*feedback*), mejorando la fiabilidad del sistema frente a soluciones de control en lazo abierto. Esto resulta especialmente relevante en aplicaciones donde la posición final debe ser conocida con precisión, como en el ajuste del caudal de ventilación.

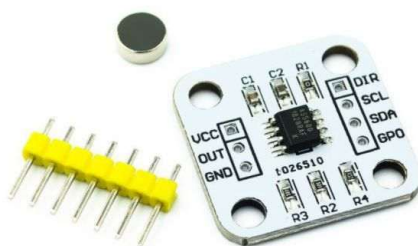


Figura 4-15 Sensor de posición AS5600 con sus pines y el imán.

Unidad de control: ESP32

El núcleo del sistema de control está constituido por un microcontrolador ESP32, que actúa como elemento central de procesamiento, comunicación y coordinación de todos los subsistemas que componen el dispositivo.

Desde el punto de vista funcional, el ESP32 se encarga de integrar las señales procedentes de los distintos elementos del sistema, procesarlas y generar las acciones de control necesarias para el posicionamiento del mecanismo de regulación. En particular, este dispositivo desempeña las siguientes funciones:

- Generación de señales de control para el *driver* del motor paso a paso, mediante la emisión de señales digitales de tipo *step* y *direction*, que determinan tanto el número de pasos como el sentido de giro del actuador.
- Adquisición de la posición angular, a partir de los datos proporcionados por el sensor magnético AS5600, permitiendo conocer en todo momento la posición real del sistema.
- Procesamiento de consignas externas, recibidas desde plataformas de monitorización y control, como Node-RED, a través de protocolos de comunicación inalámbrica.
- Ejecución del algoritmo de control, encargado de transformar las consignas de entrada (por ejemplo, asociadas a niveles de radón o configuraciones manuales) en órdenes de movimiento para el motor.

Desde un punto de vista arquitectónico, el ESP32 actúa como el elemento encargado de cerrar el bucle de control del sistema, al combinar la información de entrada (consigna) con la realimentación de posición proporcionada por el sensor, permitiendo así un control preciso y repetible del sistema de regulación.

La elección de este microcontrolador se fundamenta en varios factores clave. Por un lado, dispone de una capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar tareas de control en tiempo real. Por otro

lado, integra de forma nativa conectividad WiFi y Bluetooth, lo que facilita su integración dentro de arquitecturas IoT sin necesidad de hardware adicional. Además, su bajo coste y amplia disponibilidad lo convierten en una solución adecuada para el desarrollo de sistemas distribuidos y escalables.

En conjunto, el ESP32 (Figura 4-16) no solo actúa como controlador del sistema electromecánico, sino también como interfaz entre el sistema físico de ventilación y las plataformas digitales de monitorización, constituyendo un elemento clave en la implementación de estrategias de control inteligente.

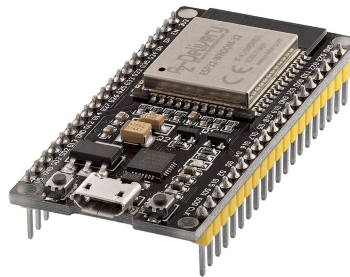


Figura 4-16 ESP 32 tipo WROOM-32D.

La combinación de los elementos descritos da lugar a un sistema de control electromecánico capaz de ajustar de forma precisa la apertura del sistema de ventilación. El funcionamiento general se basa en la recepción de una señal de consigna (automática o manual), que es procesada por el ESP32. A partir de esta, se genera una secuencia de control para el motor paso a paso, mientras que el sensor AS5600 permite verificar la posición alcanzada, cerrando el bucle de control.

De este modo, se consigue un sistema que no solo automatiza la regulación de la ventilación, sino que también permite mejorar el análisis del comportamiento del sistema, al disponer de información precisa sobre la posición y su relación con variables como la concentración de radón.

Adicionalmente, el sistema incorpora los elementos mecánicos de transmisión previamente descritos, basados en un conjunto de engranajes diseñado específicamente para esta aplicación. En particular, se dispone de un engranaje solidario al eje del motor y otro engranaje adaptado al elemento de regulación existente, cuya geometría ha sido diseñada para acoplarse correctamente con el mando original sin necesidad de modificarlo. Esta configuración permite transmitir el movimiento de forma directa y precisa, garantizando la compatibilidad con el sistema manual.

El conjunto incluye una pieza estructural de soporte encargada de fijar el motor a la puerta o superficie donde se ubica el sistema de regulación. Esta pieza no solo asegura la correcta posición y estabilidad del motor, sino que además ha sido diseñada para integrar el sensor de posición AS5600 en la parte posterior del eje del motor, como se muestra en la Figura 4-17.

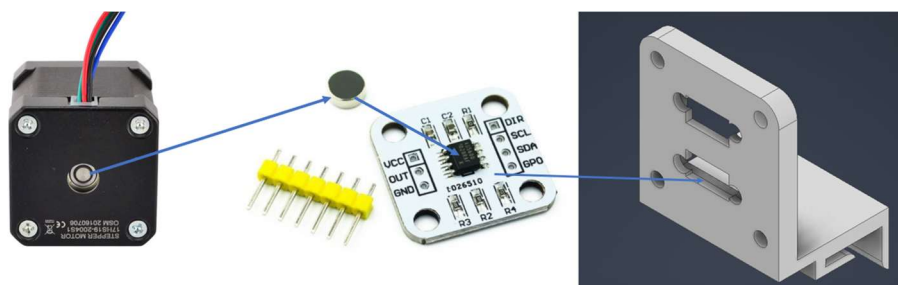


Figura 4-17 Esquema de la integración del sensor AS5600 en el motor.

En este sentido, el diseño permite ubicar el imán asociado al sensor para realizar la medición de la posición desde la parte trasera del motor, sin interferir con el sistema de transmisión mecánica. Esta solución facilita la integración del sistema de medida dentro del conjunto, permitiendo obtener una lectura directa y continua de la posición del eje mientras se mantiene la compacidad y funcionalidad del dispositivo.

Continuando con el diseño, se ha optado por una solución basada en un sistema de transmisión mediante engranajes con relación 1:1, con las medidas que aparecen en la Figura 4-18 y en la Tabla 4-6. Esta configuración permite transmitir el movimiento del motor al mecanismo de regulación sin alterar su comportamiento original, asegurando que el desplazamiento angular aplicado por el actuador se corresponda directamente con el movimiento del elemento de control de caudal.

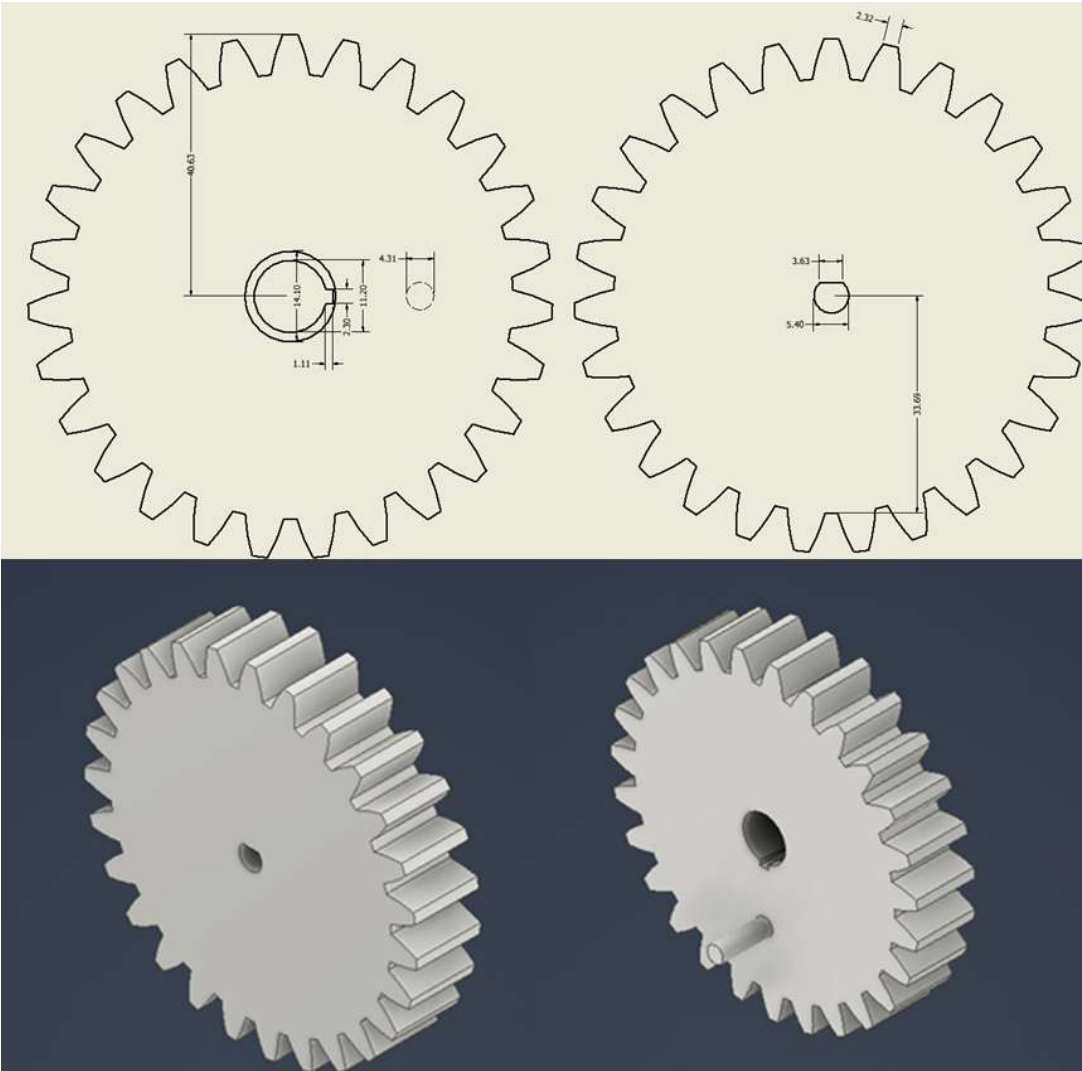


Figura 4-18 Engranajes del sistema motor/regulador.

Parámetro	Valor numérico
Coef. del engranaje	1,000
Módulo	2,750 mm
Ángulo de presion	20,00°
Distancia al centro	75 mm
Número de dientes	27
Anchura de cara	15,2 mm

Tabla 4-6 Parámetros para la construcción de engranajes.

El sistema se diseña de manera que uno de los engranajes se acople al eje del motor paso a paso, mientras que el segundo engranaje se integra con el elemento de regulación manual existente. De este modo, se consigue una transmisión directa del movimiento, manteniendo la precisión y permitiendo, además, la coexistencia con el accionamiento manual.

Adicionalmente, la ubicación del motor ha sido definida con el objetivo de minimizar interferencias con el uso habitual del sistema. En concreto, el motor se sitúa en la parte superior de la puerta o cerramiento donde se encuentra el regulador, de manera que su funcionamiento no se vea afectado por la apertura o cierre de este, empleándose un modelo hecho a medida que solape con la anchura de la puerta (En la Figura 4-19 se ve las proporciones principales de este soporte). Esta disposición garantiza tanto la estabilidad del conjunto como la protección del sistema frente a posibles perturbaciones mecánicas derivadas del uso cotidiano.

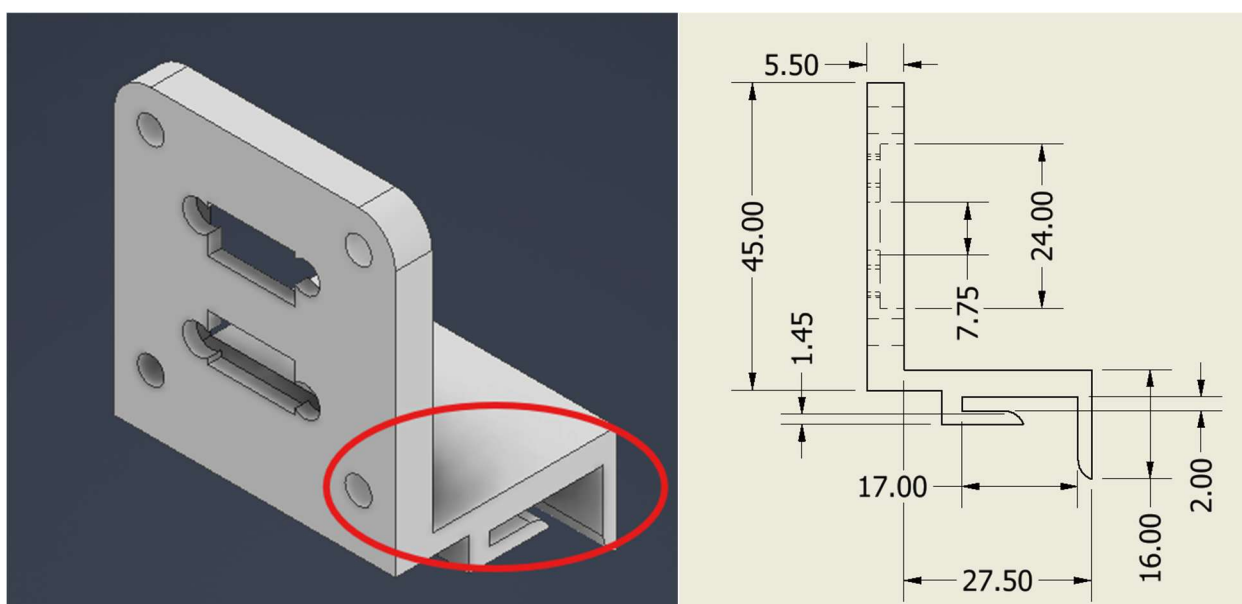


Figura 4-19 Pieza de acople del motor a la puerta.

Se puede concluir que este conjunto de elementos permitirá automatizar el sistema de forma no invasiva, asegurando la compatibilidad con el sistema existente, la reversibilidad de la instalación y un correcto funcionamiento tanto en modo automático como manual.

Integración del sistema

El sistema desarrollado consiste en un dispositivo electromecánico diseñado para actuar sobre el mecanismo de regulación del caudal de ventilación, permitiendo automatizar su funcionamiento sin modificar el sistema original, como bien se ha explicado en apartados anteriores. Desde un punto de vista global, el dispositivo integra en un único conjunto los elementos mecánicos, electrónicos y de control necesarios para transformar una consigna de funcionamiento en un posicionamiento preciso del sistema de regulación. Todos estos componentes han sido explicados con anterioridad, y se ven reflejados tanto sus posiciones como sus conexiones en el esquema representado en la Figura 4-20.

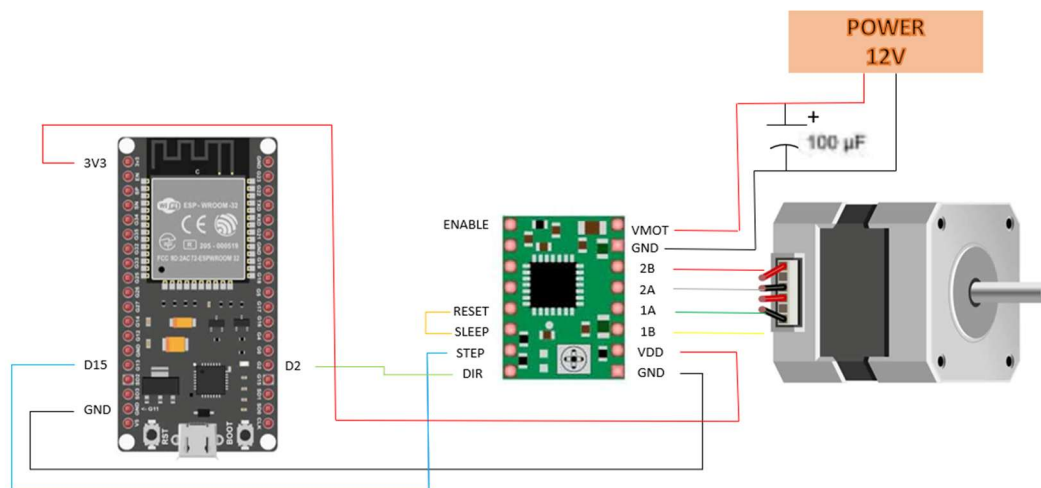


Figura 4-20 Esquema de movimiento del motor del dispositivo final.

El núcleo del sistema está formado por un motor paso a paso, encargado de generar el movimiento, controlado mediante un *driver* A4988 reflejado en la Figura 4-11 y gobernado por un microcontrolador ESP32 programado en entorno Arduino. Este conjunto permite ejecutar de forma precisa los movimientos necesarios para ajustar la posición del mecanismo en función de las consignas recibidas.

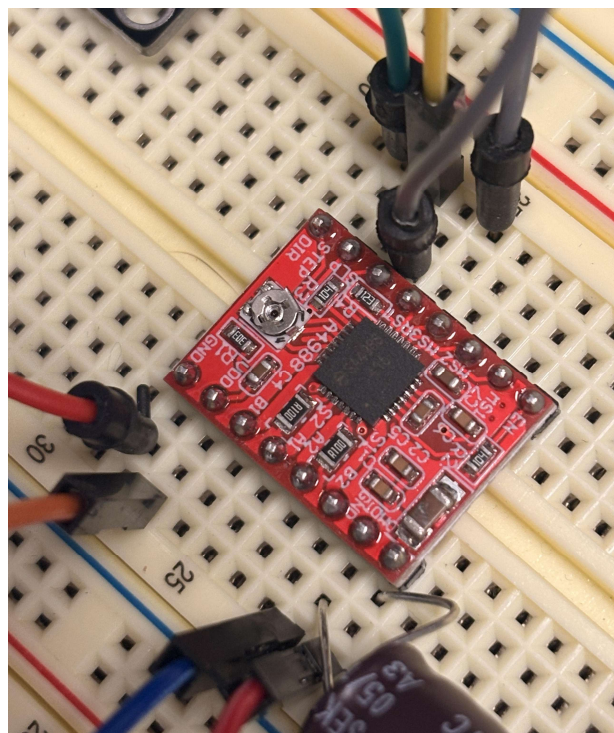


Figura 4-21 Driver A4988 ubicado en la placa.

La transmisión del movimiento se realiza mediante un sistema de engranajes diseñado específicamente para esta aplicación. Este sistema permite acoplar el eje del motor con el elemento de regulación existente, garantizando una transmisión directa del movimiento sin necesidad de modificar la instalación original. De este modo, se mantiene la integridad del sistema y se asegura la reversibilidad del dispositivo.

El conjunto mecánico se completa con una pieza estructural de soporte, encargada de fijar el motor al entorno físico del sistema de ventilación. Esta pieza ha sido diseñada para asegurar la correcta

alineación del motor con el mecanismo de regulación, así como para proporcionar estabilidad al conjunto durante su funcionamiento.

Continuando con los componentes, el dispositivo incorpora un sensor de posición magnético AS5600, integrado en el propio sistema de accionamiento y sus conexiones se ven reflejadas en la Figura 4-22. Este sensor permite medir la posición angular del mecanismo en tiempo real, proporcionando una señal de realimentación que mejora la precisión del control.

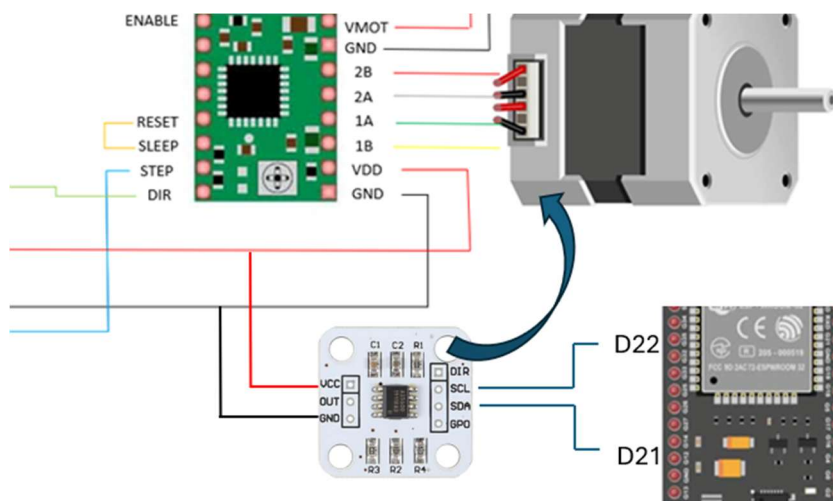


Figura 4-22 Esquema de conexiones del sistema con el AS5600.

El dispositivo desarrollado permite actuar de forma directa sobre el sistema de regulación de la ventilación, combinando capacidad de accionamiento, medición de posición y control electrónico dentro de una única arquitectura compacta. Como se muestra anteriormente (Figura 4-21), el sistema se planteó en una *proto-board*, pero una vez realizado las pruebas necesarias se estableció en una placa, como se muestra en la Figura 4-23Figura 4-24 con las mismas conexiones como se explica en apartados anteriores. El sistema finalmente se sitúa en el regulador, dejando el sistema en su conjunto en un recipiente para conservar su integridad, y quedando el motor junto a las piezas correspondientes en sus respectivas ubicaciones (Figura 4-24).

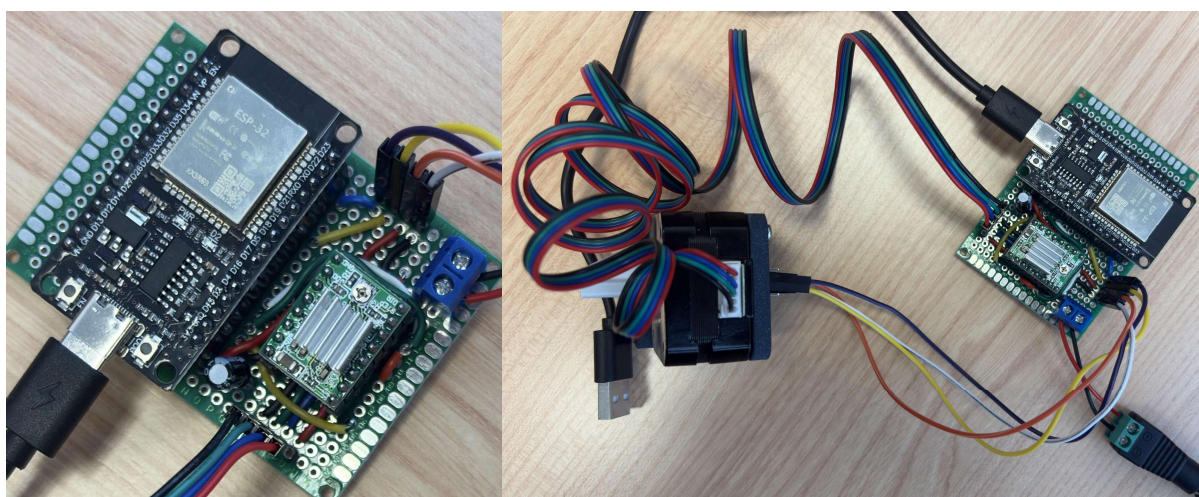


Figura 4-23 Sistema final en la placa.



Figura 4-24 Mecanismo en su totalidad incorporado en el regulador.

4.2.4 Diseño software

El diseño software del sistema se ha desarrollado con el objetivo de integrar la información procedente del sistema de monitorización con el control físico del dispositivo de regulación de la ventilación. Para ello, se ha planteado una arquitectura distribuida basada en dos niveles diferenciados: un nivel de supervisión y toma de decisiones, implementado mediante la plataforma Node-RED, y un nivel de control local, ejecutado en el microcontrolador ESP32. Esta separación permite simplificar el diseño del sistema, facilitando tanto su comprensión como su posible ampliación en futuras implementaciones.

En términos generales, el funcionamiento del sistema consiste en transformar los datos de calidad del aire interior, en particular la concentración de radón, en una consigna de actuación sobre el mecanismo de regulación. Esta consigna puede generarse de forma automática, en función de los valores medidos, o bien de forma manual mediante intervención del usuario.

El sistema de supervisión, basado en Node-RED, se encarga de gestionar los datos procedentes de los sensores, visualizar su evolución y generar las consignas de control en función de las condiciones establecidas. Por su parte, el microcontrolador ESP32 actúa como sistema de ejecución, interpretando dichas consignas y convirtiéndolas en movimiento real del actuador, al tiempo que supervisa la posición alcanzada mediante el sensor de posición.

De este modo, el sistema software permite establecer una conexión directa entre la monitorización del ambiente interior y la actuación sobre el sistema de ventilación, introduciendo una capacidad de control dinámico que no está presente en la instalación original.

En los apartados siguientes se describen de forma general los dos bloques principales que componen el sistema software, reservando el análisis detallado de su implementación para el capítulo de resultados.

4.2.4.1 Programación del ESP32 en entorno Arduino

El control del motor se realiza a través del *driver* A4988, mediante la generación de señales digitales que determinan tanto el sentido de giro como el número de pasos necesarios para alcanzar la posición objetivo. Estas señales son generadas directamente por el ESP32 a partir de la lógica implementada en el código, que calcula el desplazamiento requerido en función de la consigna recibida.

De forma simultánea, el sistema incorpora un sensor de posición magnético AS5600, cuya lectura se realiza mediante comunicación I2C desde el propio microcontrolador. Esta información permite conocer en todo momento la posición angular del sistema y es utilizada como señal de realimentación dentro del algoritmo de control. Gracias a esta integración (Figura 4-25), el sistema se comporta como un sistema de control en lazo cerrado, en el que el programa implementado en el ESP32 compara la posición deseada con la posición real, ajustando el movimiento del motor hasta alcanzar el valor objetivo. Asimismo, el software desarrollado incorpora restricciones asociadas a los límites mecánicos del sistema, evitando movimientos fuera del rango operativo y garantizando la protección del mecanismo. En general, el ESP32, junto con el programa desarrollado en entorno Arduino, constituye el elemento encargado de ejecutar el control físico del sistema, asegurando una respuesta precisa y coherente con las consignas generadas en el nivel de supervisión.

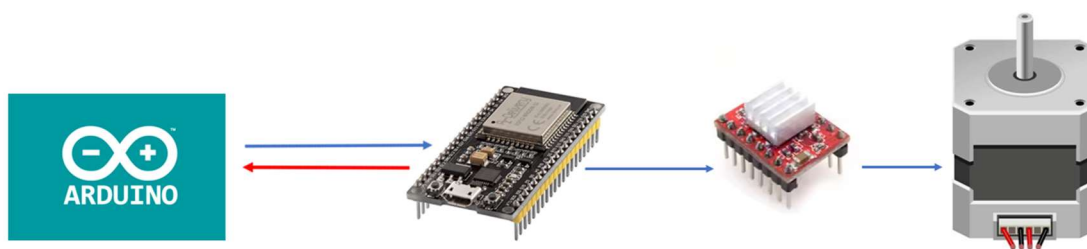


Figura 4-25 Esquema de control del motor.

Con el fin de materializar el funcionamiento del sistema automatizado, se ha desarrollado un programa específico para el microcontrolador ESP32 en entorno Arduino. Este código constituye el núcleo lógico del dispositivo, ya que integra la lectura del sensor de posición, la recepción de consignas externas, la comunicación con el sistema de supervisión y el control del motor paso a paso. El programa ha sido diseñado de forma modular, estructurándose en diferentes bloques funcionales que permiten separar las tareas de inicialización, comunicación, adquisición de datos, control del movimiento y protección del sistema. Esta organización facilita tanto la comprensión del funcionamiento como su mantenimiento y posible ampliación futura.

Dado que el código completo presenta una extensión considerable y un nivel de detalle elevado, se ha incluido íntegramente en el anexo correspondiente. No obstante, en este apartado se describen y analizan sus partes más relevantes, centrándose en aquellos bloques que definen el comportamiento del sistema y su integración con la instalación de ventilación. En términos generales, el código implementado permite:

- Inicializar y configurar el hardware del sistema
- Establecer la comunicación WiFi y MQTT con la plataforma de supervisión
- Leer la posición real del mecanismo mediante el sensor AS5600
- Interpretar las consignas recibidas
- Accionar el motor paso a paso hasta alcanzar la posición objetivo
- Y proteger el sistema frente a movimientos fuera del rango permitido o situaciones de fallo

En los subapartados siguientes se expone el funcionamiento del programa por bloques, analizando de forma progresiva la lógica de control desarrollada.

4.2.4.2 Principales apartados del programa

Funcionamiento general

Una vez inicializado el sistema, el programa ejecutado en el ESP32 sigue una secuencia continua de funcionamiento orientada a recibir consignas, supervisar la posición del mecanismo y actuar sobre el motor cuando resulta necesario.

En primer lugar, el microcontrolador mantiene activas las comunicaciones con la red WiFi y con el sistema MQTT, permitiendo la recepción de nuevas órdenes de posicionamiento procedentes de la plataforma de supervisión. Estas consignas representan la posición objetivo que debe alcanzar el mecanismo de regulación y se muestra en el código de la Figura 4-26.

```

402
403 void loop() {
404     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) connectWiFi();
405     if (!client.connected()) connectMqtt();
406
407     client.loop();
408
409     if (moveRequested) {
410         moveRequested = false;
411
412         bool ok = moveToPosition(targetPosition);
413
414         if (ok) {
415             updatePositionFromSensor();
416             publishPosition();
417         }
418     }
419 }

```

Figura 4-26 Funcionamiento general.

Cuando se recibe una nueva consigna, el programa compara dicho valor con la posición real del sistema, obtenida a través del sensor magnético AS5600. A partir de esta comparación se calcula el error de posición, determinando tanto el sentido de giro como el movimiento necesario del motor paso a paso.

Durante el desplazamiento, el programa verifica de forma continua la evolución de la posición real, de manera que el movimiento no se realiza de forma ciega, sino supervisada. Esto permite detener el motor al alcanzar el objetivo establecido, así como detectar situaciones anómalas, como ausencia de avance o intentos de movimiento fuera del rango permitido.

Una vez completado el movimiento, el sistema actualiza su estado interno y publica la nueva posición, de modo que esta información pueda ser utilizada por la plataforma de supervisión. Este proceso se repite de forma continua mientras el sistema permanece en funcionamiento, permitiendo una operación dinámica y adaptativa.

De este modo, el programa implementa una lógica de control basada en la recepción de consignas, la lectura de posición y la actuación supervisada del motor, constituyendo la base del comportamiento automático del dispositivo.

Calibración y configuración del sistema

Uno de los aspectos más relevantes del código desarrollado es la calibración del sistema, que permite adaptar el funcionamiento del programa a las características reales del mecanismo de regulación. Para ello, se definen los valores extremos del sensor de posición, correspondientes a las posiciones mínima y máxima del sistema. Estos valores, obtenidos experimentalmente, permiten establecer una correspondencia entre la lectura bruta del sensor AS5600 y el rango de funcionamiento del mecanismo. Asimismo, se define el sentido de variación del sensor, indicando si el incremento de la posición se corresponde con un aumento o disminución del valor leído. Este aspecto resulta fundamental debido al carácter circular del sensor, que mide ángulos en un rango de 0 a 360 grados.

Adicionalmente, se establece el rango mecánico útil del sistema, así como el sentido de giro del motor necesario para incrementar la posición. Estos parámetros permiten garantizar que el control del actuador sea coherente con la respuesta física del mecanismo.

Este proceso de calibración permite transformar la lectura del sensor en una variable de control significativa, expresada en porcentaje de apertura, facilitando la implementación de la lógica de control del sistema. En el fragmento (Figura 4-27) se definen los valores de calibración que permiten relacionar la lectura del sensor AS5600 con la posición real del sistema, así como los parámetros que determinan el sentido de funcionamiento del motor.

```

13
14 // =====
15 // CALIBRACION EXACTA
16 // =====
17 // Posicion 0 -> raw 2757
18 // Posicion 100 -> raw 124
19 const uint16_t SENSOR_RAW_POS0 = 183;
20 const uint16_t SENSOR_RAW_POS100 = 1379;
21
22 // IMPORTANTE:
23 // true = de 0 a 100 el RAW avanza en sentido creciente
24 // false = de 0 a 100 el RAW avanza en sentido decreciente
25 const bool SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100 = false;
26
27 // Solo informativo para mostrar "grados mecanicos"
28 const float MECH_MAX_DEG = 200.0f;
29
30 const bool MOTOR_DIR_INCREASES_POS = true;

```

Figura 4-27 Parámetros de calibración del sistema y correspondencia entre sensor y mecanismo.

Lectura de posición mediante el sensor AS5600.

La determinación de la posición real del sistema se realiza mediante un sensor magnético AS5600, cuya lectura se implementa dentro del código como una de las funciones fundamentales del control.

El programa accede al sensor mediante comunicación I2C, solicitando el valor angular bruto almacenado en el registro correspondiente. Este valor, expresado en una escala digital de 12 bits, representa la posición angular detectada por el sensor dentro de un recorrido completo de 360 grados.

A partir de esta lectura bruta, el código realiza una conversión a una variable de posición útil para el sistema de control. Para ello, se utilizan los parámetros de calibración definidos previamente, que permiten establecer la correspondencia entre los valores extremos del sensor y el rango real de funcionamiento del mecanismo.

El algoritmo implementado no solo transforma la lectura a un porcentaje de apertura entre 0 y 100, sino que también calcula el ángulo mecánico equivalente dentro del rango operativo del sistema. De este modo, la señal del sensor deja de ser una magnitud puramente electrónica para convertirse en una variable física interpretable desde el punto de vista funcional. Además, el tratamiento de la lectura tiene en cuenta el carácter circular del AS5600, resolviendo correctamente el sentido de avance del sensor y la posible discontinuidad en el paso por el origen angular. Esto resulta esencial para evitar errores en la interpretación de la posición cuando el recorrido útil del sistema no coincide con una zona lineal simple del sensor. La información obtenida se emplea de forma continua durante el funcionamiento del sistema, permitiendo actualizar la posición real del mecanismo y utilizarla como señal de realimentación dentro del control en lazo cerrado.

En este fragmento (Figura 4-28) se implementa la lectura del valor angular bruto del sensor AS5600 y su conversión a una variable de posición útil para el sistema de control, expresada en porcentaje de apertura y ángulo mecánico.

```

113 // =====
114 // AS5600
115 // =====
116 bool readRawAngle(uint16_t &rawOut) {
117     Wire.beginTransmission(AS5600_ADDR);
118     Wire.write(0x0C); // RAW_ANGLE
119     if (Wire.endTransmission(false) != 0) return false;
120
121     Wire.requestFrom(AS5600_ADDR, (uint8_t)2);
122     unsigned long t0 = millis();
123     while (Wire.available() < 2) {
124         if (millis() - t0 > 50) return false;
125     }
126
127     uint8_t msb = Wire.read();
128     uint8_t lsb = Wire.read();
129     rawOut = (((uint16_t)msb) << 8) | lsb & 0xFFFF;
130     return true;
131 }
132
133 bool readPositionFromSensor(float &posOut, float &mechDegOut, uint16_t &rawOut) {
134     if (!readRawAngle(rawOut)) return false;
135
136     const uint16_t span = getSensorSpanRaw();
137     uint16_t progress = 0;
138
139     if (SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100) {
140         progress = forwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, rawOut);
141     } else {
142         progress = backwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, rawOut);
143     }
144
145     if (progress <= span) {
146         posOut = 100.0f * ((float)progress / (float)span);
147     } else {
148         // saturar al extremo mas cercano
149         uint16_t distToStart = progress - span;
150         uint16_t distToEnd = 0;
151
152         if (SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100) {
153             distToEnd = forwardArcRaw(rawOut, SENSOR_RAW_POS100);
154         } else {
155             distToEnd = backwardArcRaw(rawOut, SENSOR_RAW_POS100);
156         }
157
158         if (distToEnd < distToStart) posOut = 100.0f;
159         else posOut = 0.0f;
160     }
161
162     posOut = clampf(posOut, 0.0f, 100.0f);
163     mechDegOut = posToMechDeg(posOut);
164     return true;
165 }
166
167 bool updatePositionFromSensor() {
168     uint16_t raw;
169     return readPositionFromSensor(currentPosition, currentMechDeg, raw);
170 }
171

```

Figura 4-28 Bloque de código correspondiente a la lectura y procesamiento de la posición mediante el sensor AS5600.

Lógica de control y accionamiento del motor

El bloque de control del motor constituye la parte central del programa, ya que es el encargado de transformar la consigna de posición en un movimiento real del sistema de regulación. El accionamiento se realiza mediante un motor paso a paso gobernado a través del driver A4988, controlado por el microcontrolador mediante señales digitales. Para ello, el código implementa funciones específicas que permiten generar pulsos de avance y definir el sentido de giro del motor en función de la posición objetivo.

La lógica principal de control se desarrolla en la función encargada de mover el sistema hasta una posición determinada. En primer lugar, esta función actualiza la posición real medida por el sensor y calcula el error existente respecto a la consigna deseada. A partir del signo de dicho error se establece el sentido de giro necesario para reducir la diferencia entre ambas posiciones. El movimiento no se realiza de forma continua sin supervisión, sino en bloques de pasos. Tras cada bloque, el sistema vuelve a leer la posición real mediante el sensor AS5600, verificando si el mecanismo está avanzando correctamente hacia la posición objetivo. Este enfoque permite mantener el movimiento bajo control en todo momento, evitando desviaciones acumuladas y mejorando la precisión del sistema.

Cuando el error de posición cae por debajo de una tolerancia predefinida, el programa considera que el objetivo ha sido alcanzado y detiene el motor. De este modo, se evita un accionamiento excesivo y se asegura un posicionamiento suficientemente preciso para la aplicación. Además, durante el proceso de movimiento se incorporan diversas comprobaciones de seguridad. En particular, el código verifica que el sistema no intente sobrepasar los límites mecánicos definidos, que exista progreso real en la lectura del *encoder* y que el número máximo de pasos no exceda un umbral de seguridad. Si alguna de estas condiciones no se cumple, el movimiento se interrumpe para proteger tanto el mecanismo como el actuador.

En este bloque implementa una estrategia de control basada en realimentación, en la que el motor es accionado de forma supervisada hasta alcanzar la posición requerida, garantizando precisión, seguridad y coherencia con el estado real del sistema. En este fragmento (Figura 4-29) se implementa la lógica de movimiento del sistema, incluyendo la generación de pasos, la selección del sentido de giro y la supervisión continua de la posición real durante el accionamiento.

```

172 // MOTOR
173 // =====
174 void stepOnce() {
175     digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
176     delayMicroseconds(STEP_HIGH_US);
177     digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
178     delayMicroseconds(STEP_LOW_US);
179 }
180
181 void setMotorDirection(bool increasePos) {
182     bool level = increasePos ? MOTOR_DIR_INCREASES_POS : !MOTOR_DIR_INCREASES_POS;
183     digitalWrite(DIR_PIN, level ? HIGH : LOW);
184 }
185
186 bool moveToPosition(float targetPos) {
187     targetPos = clampf(targetPos, 0.0f, 100.0f);
188
189     if (!updatePositionFromSensor()) {
190         Serial.println("ERROR: no se puede leer AS5600 al iniciar movimiento");
191         return false;
192     }
193
194     Serial.print("Mover desde ");
195     Serial.print(currentPosition, 2);
196     Serial.print(" % hasta ");
197     Serial.print(targetPos, 2);
198     Serial.println(" %");
199
200     long totalSteps = 0;
201     int noProgressLoops = 0;
202
203     while (totalSteps < MAX_STEPS_PER_MOVE) {
204         if (!updatePositionFromSensor()) {
205             Serial.println("ERROR: fallo leyendo AS5600 durante movimiento");
206             return false;
207         }
208
209         float errorPos = targetPos - currentPosition;
210         float absError = fabs(errorPos);
211
212         if (absError <= TARGET_TOLERANCE_POS) {
213             Serial.println("Objetivo alcanzado");
214             return true;
215         }
216
217         bool increasePos = (errorPos > 0.0f);
218
219         if (!increasePos && currentPosition <= LIMIT_MARGIN_POS) {
220             Serial.println("Limite minimo alcanzado");
221             return true;
222         }
223
224         if (increasePos && currentPosition >= (100.0f - LIMIT_MARGIN_POS)) {
225             Serial.println("Limite maximo alcanzado");
226             return true;
227         }
228
229         setMotorDirection(increasePos);
230
231         float beforeBlockPos = currentPosition;
232
233         for (int i = 0; i < STEPS_PER_BLOCK; i++) {
234             stepOnce();
235             totalSteps++;
236             if (totalSteps >= MAX_STEPS_PER_MOVE) break;
237         }
238
239         if (!updatePositionFromSensor()) {
240             Serial.println("ERROR: fallo leyendo AS5600 tras bloque de pasos");
241             return false;
242         }
243
244         float afterBlockPos = currentPosition;
245         float newErrorPos = targetPos - afterBlockPos;
246         float newAbsError = fabs(newErrorPos);
247
248         Serial.print("pos=");
249         Serial.print(afterBlockPos, 2);
250         Serial.print(" % | mech=");
251         Serial.print(currentMechDeg, 2);
252         Serial.print(" deg | err=");
253         Serial.println(newErrorPos, 2);
254
255         if (newAbsError > absError + 0.8f) {
256             Serial.println("El error empeora; paro para evitar pasarme");
257             return true;
258         }
259
260         if (fabs(afterBlockPos - beforeBlockPos) < MIN_PROGRESS_POS) {
261             noProgressLoops++;
262             if (noProgressLoops >= MAX_NO_PROGRESS_LOOPS) {
263                 Serial.println("Sin progreso en encoder; abortando");
264                 return false;
265             }
266         } else {
267             noProgressLoops = 0;
268         }
269     }
270
271     Serial.println("STOP: maximo de pasos alcanzado");
272     return false;
273 }
274

```

Figura 4-29 Bloque de código correspondiente a la lógica de control y accionamiento del motor paso a paso.

Comunicación con Node-RED mediante WiFi y MQTT

La comunicación entre el dispositivo de control y la plataforma de supervisión se realiza mediante conexión WiFi y el protocolo de mensajería MQTT, lo que permite integrar el sistema dentro de una arquitectura IoT. El microcontrolador ESP32 establece inicialmente la conexión con la red inalámbrica, tras lo cual se conecta a un *broker* MQTT que actúa como intermediario en la transmisión de datos. Esta conexión permite tanto la recepción de consignas de control como el envío de información sobre el estado del sistema. Por un lado, el programa se suscribe a un canal específico en el que recibe las órdenes de posicionamiento generadas desde Node-RED. Estas consignas, expresadas en forma de porcentaje de apertura, son interpretadas por el sistema y almacenadas como posición objetivo.

En cambio, por otro lado, el ESP32 publica de forma periódica la posición actual del mecanismo, permitiendo que la plataforma de supervisión disponga en todo momento de información actualizada sobre el estado del sistema. La recepción de mensajes se gestiona mediante una función de *callback*, que

se ejecuta automáticamente cada vez que se recibe una nueva consigna. Esta función procesa el mensaje recibido, lo convierte a un valor numérico válido y activa la orden de movimiento del sistema.

Este esquema de comunicación permite desacoplar el sistema de supervisión del control físico, facilitando la implementación de distintos modos de funcionamiento, como el control manual remoto o el control automático basado en variables ambientales. La utilización de WiFi y MQTT proporciona una solución eficiente y flexible para la integración del dispositivo dentro del sistema de monitorización, permitiendo el intercambio de información en tiempo real y la implementación de estrategias de control distribuidas. En el código representado en la Figura 4-30 se implementa la conexión del ESP32 con la red WiFi y el *broker* MQTT, así como la recepción de consignas de control y la publicación del estado del sistema.

```

277 // WiFi / MQTT
278 // =====
279 void connectWifi() {
280   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) return;
281
282   Serial.print("Conectando a WiFi: ");
283   Serial.println(WiFi_SSID);
284
285   WiFi.mode(WIFI_STA);
286   WiFi.begin(WiFi_SSID, WiFi_PASS);
287
288   unsigned long t0 = millis();
289   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - t0 < 20000) {
290     delay(500);
291     Serial.print(".");
292   }
293   Serial.println();
294
295   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
296     Serial.print("WiFi OK. IP: ");
297     Serial.println(WiFi.localIP());
298   } else {
299     Serial.println("WiFi KO");
300   }
301 }
302
303 bool connectMqtt() {
304   if (client.connected()) return true;
305
306   Serial.println("Conectando a MQTT...");
307   if (client.connect(MQTT_CLIENT_ID, MQTT_USER, MQTT_PASS)) {
308     Serial.println("MQTT OK");
309     client.subscribe(TOPIC_POS_SET);
310     return true;
311   }
312
313   void publishPosition() {
314     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
315     if (!client.connected() && !connectMqtt()) return;
316
317     if (!updatePositionFromSensor()) {
318       Serial.println("ERROR: no se puede leer posicion para publicar");
319       return;
320     }
321
322     char buf[16];
323     dtostrf(currentPosition, 1, 2, buf);
324     client.publish(TOPIC_POS, buf, true);
325
326     Serial.print("Posicion publicada: ");
327     Serial.println(buf);
328   }
329
330   void mqttCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
331     String topicStr = String(topic);
332     String msg;
333
334     for (unsigned int i = 0; i < length; i++) {
335       msg += (char)payload[i];
336     }
337     msg.trim();
338
339     Serial.print("MQTT recibido [");
340     Serial.print(topicStr);
341     Serial.print("] = ");
342     Serial.println(msg);
343
344     if (topicStr != TOPIC_POS_SET) return;
345
346     targetPosition = clampf(msg.toFloat(), 0.0f, 100.0f);
347   }

```

Figura 4-30 Bloque de código correspondiente a la comunicación WiFi y MQTT.

4.3 Implementación del sistema en Node-RED

La plataforma Node-RED constituye el nivel superior del sistema software, actuando como entorno de supervisión, monitorización y generación de consignas de control. A través de esta herramienta se integran los datos procedentes de los sensores de calidad del aire interior, en particular la concentración de radón, permitiendo su visualización en tiempo real y facilitando el seguimiento del comportamiento del sistema en los distintos recintos. Esta capacidad de monitorización resulta fundamental para comprender la evolución de las condiciones ambientales y para establecer criterios de actuación sobre el sistema de ventilación.

Además de su función de visualización, Node-RED desempeña un papel clave en la lógica de control del sistema, ya que es el encargado de generar las consignas que determinan la posición del mecanismo de regulación. Estas consignas pueden originarse a partir de diferentes modos de funcionamiento, permitiendo dotar al sistema de una elevada flexibilidad operativa.

Por un lado, el sistema permite un control manual, en el que el usuario introduce directamente la consigna de funcionamiento a través de una interfaz externa. Por otro lado, se dispone de un modo de control automático, en el que las consignas se generan en función de los valores de concentración de radón registrados en el recinto.

En este último caso, Node-RED actúa como elemento de decisión, evaluando los niveles de radón y estableciendo el grado de apertura más adecuado del sistema de ventilación. De este modo, el sistema es capaz de incrementar la ventilación en situaciones de alta concentración y reducirla cuando las condiciones son favorables, optimizando tanto la calidad del aire interior como el consumo energético. La comunicación entre Node-RED y el dispositivo de control se realiza mediante protocolos de mensajería, lo que permite el envío de consignas de forma eficiente y en tiempo real. Este enfoque facilita la integración del sistema dentro de arquitecturas IoT y permite su ampliación a múltiples dispositivos distribuidos en el edificio.

Como conclusión, Node-RED no solo actúa como plataforma de monitorización, sino que constituye el elemento encargado de transformar la información ambiental en decisiones de control, estableciendo el vínculo entre el análisis de datos y la actuación sobre el sistema físico.

4.3.1 Integración del sistema de control

La integración del sistema se basa en la comunicación entre Node-RED y el ESP32. Node-RED se encarga de procesar los datos de radón y generar las consignas de control, mientras que el ESP32, programado en entorno Arduino, ejecuta dichas órdenes sobre el sistema electromecánico mediante el código desarrollado.

Una vez recibida la consigna, el programa implementado en el ESP32 calcula el movimiento necesario y controla el motor paso a paso, utilizando el sensor AS5600 para verificar la posición alcanzada y establecer un control en lazo cerrado.

Esta arquitectura, mostrada en el esquema de la Figura 4-31, permite separar la toma de decisiones del control físico, posibilitando diferentes modos de funcionamiento (manual, remoto y automático) y adaptando la ventilación a las condiciones reales del recinto.

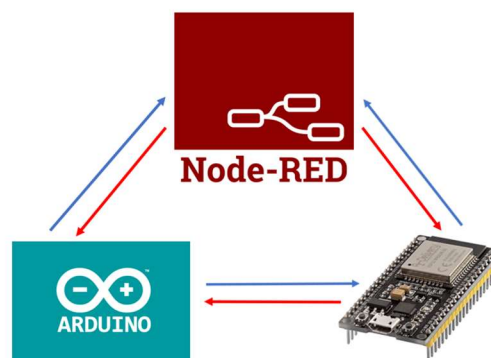


Figura 4-31 Esquema de control automático del sistema.

Ubicándonos en la plataforma, el flujo desarrollado en Node-RED, representado en la Figura 4-32 se encarga de recibir la información de los sensores de radón y de ventilación, procesarla y representar su evolución temporal mediante paneles de visualización. De forma simultánea, permite enviar consignas de control al dispositivo basado en ESP32 mediante comunicación MQTT. Esta integración permite disponer de un sistema completo en el que la monitorización del ambiente interior y el control del sistema de ventilación se encuentran unificados dentro de una misma plataforma.

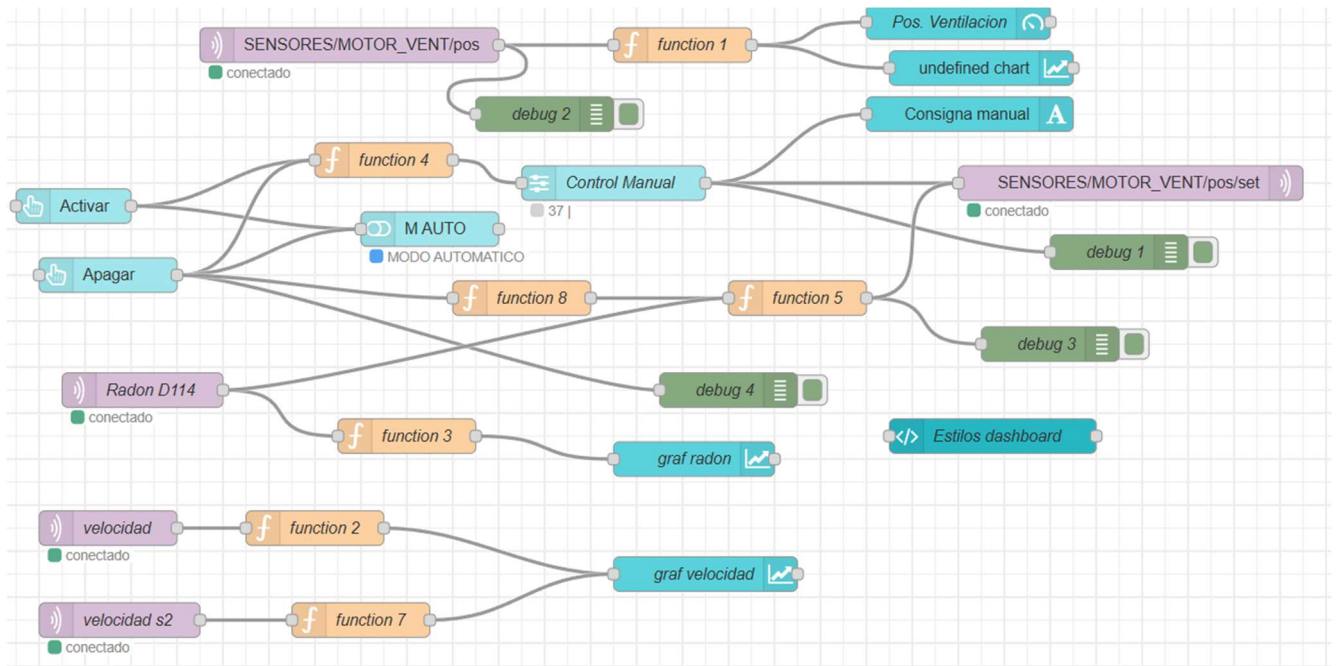


Figura 4-32 Flujo de datos implementación en Node-RED.

En este esquema se representa el flujo de datos desarrollado en Node-RED, donde se integran la recepción de datos de sensores, su visualización y la generación de consignas de control enviadas al dispositivo. El flujo implementado en Node-RED se estructura en distintos bloques funcionales que permiten tanto la monitorización del sistema como su control, diferenciándose principalmente dos modos de operación: control manual y control automático.

Control manual del sistema

El sistema dispone de un modo de operación manual, mostrado en el flujo de la Figura 4-33, que permite al usuario actuar directamente sobre la posición del elemento de control de la ventilación. A través del panel de control desarrollado en el *dashboard* de Node-RED, el usuario puede introducir una consigna en forma de porcentaje, que representa la posición deseada del sistema de apertura mostrado en la Figura 4-34.

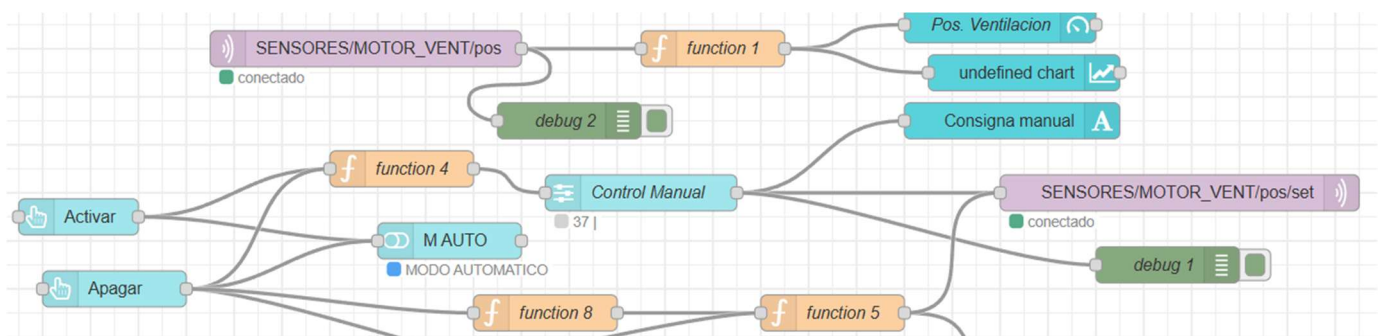


Figura 4-33 Flujo del control manual.



Figura 4-34 Visual del control manual en la *dashboard*.

Esta consigna es enviada mediante protocolo MQTT al dispositivo basado en ESP32, el cual traduce dicho valor en un movimiento del actuador (motor paso a paso), posicionando el sistema en el ángulo correspondiente. De esta forma, el usuario mantiene un control directo sobre el funcionamiento del sistema de ventilación, pudiendo ajustar manualmente el caudal de aire en función de las necesidades. Este modo resulta especialmente útil durante las fases de ensayo y validación experimental, ya que permite forzar condiciones concretas de operación y analizar su impacto sobre las variables medidas.

Control automático del sistema

Además del control manual, el sistema incorpora un modo de funcionamiento automático basado en la monitorización de variables ambientales, principalmente de concentración de radón, reflejado en el flujo de la Figura 4-35.

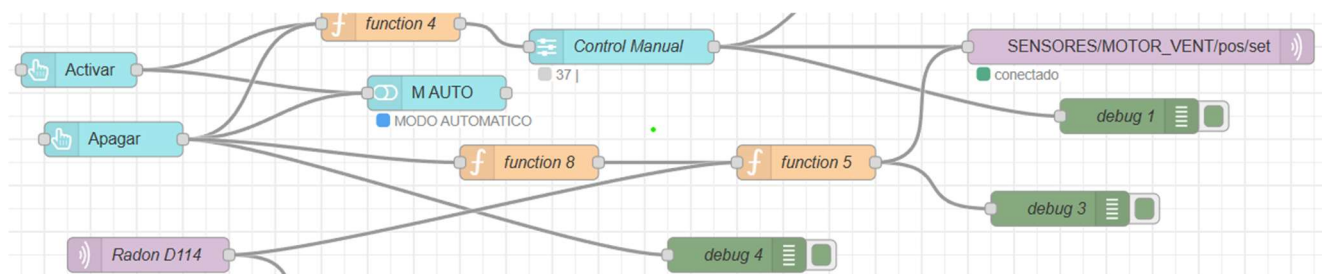


Figura 4-35 Flujo del control automático.

En este modo, Node-RED recibe de forma continua los datos procedentes de los sensores, los procesa y genera consignas de control de manera automática en función de las condiciones detectadas. Esto permite adaptar el comportamiento del sistema de ventilación sin intervención directa del usuario, optimizando su funcionamiento, para ello en la ventana *function 5*, se emplea el código mostrado en la Figura 4-36, pero este código se ha realizado a modo de prueba basándose en otros proyectos [10], [29], pero siendo una configuración puramente experimental.

```

1  let auto = flow.get("auto_mode");
2  let value = Number(msg.payload);
3
4  if (auto === false || auto === "false") {
5    if (value > 300) msg.payload = 95;
6    else if (value > 275) msg.payload = 90;
7    else if (value > 250) msg.payload = 85;
8    else if (value > 225) msg.payload = 80;
9    else if (value > 200) msg.payload = 75;
10   else if (value > 175) msg.payload = 70;
11   else if (value > 150) msg.payload = 65;
12   else if (value > 125) msg.payload = 60;
13   else if (value > 100) msg.payload = 55;
14   else if (value > 75) msg.payload = 50;
15   else if (value > 50) msg.payload = 35;
16   else if (value > 40) msg.payload = 25;
17   else msg.payload = 10;
18   return msg;
19 }
20 return null;

```

Figura 4-36 Programación de la función 5.

Dentro del *dashboard* se muestra en tiempo real la posición del elemento de control, lo que permite conocer en todo momento el estado del sistema y el modo de control en el que se encuentra. Esta información es obtenida a partir de los datos enviados por el *encoder* (AS5600), proporcionando una referencia precisa del ángulo o porcentaje de apertura y además es reflejada en la *dashboard* como se muestra en la Figura 4-37.



Figura 4-37 Visual del cambio de modo y de la posición del regulador en porcentaje.

Visualización de variables del sistema

El entorno de visualización desarrollado en Node-RED permite representar de forma clara y continua la evolución temporal de las principales variables del sistema:

- **Concentración de radón:** Se muestra mediante gráficos temporales que permiten analizar la variación de la concentración en el interior del recinto, facilitando la evaluación del impacto de la ventilación sobre la reducción del gas, y se ve reflejado como en la Figura 4-38.



Figura 4-38 Gráfica de la concentración de radón con respecto al tiempo

- **Velocidad del aire en el conducto:** Se representa igualmente mediante gráficas como se ve en la Figura 4-39, lo que permite observar el comportamiento del flujo de aire en función de las distintas configuraciones del sistema y verificar la respuesta del sistema de ventilación ante diferentes consignas.



Figura 4-39 Gráfica de la velocidad del aire con respecto al tiempo de ambas sondas (azul S1 y roja S2).

- **Régimen de ventilación:** Se representa igualmente mediante gráficas como se ve en la Figura 4-40, lo que permite observar las posiciones del regulador a lo largo del tiempo, estas representaciones gráficas resultan fundamentales para el análisis experimental, ya que permiten correlacionar la posición del sistema de ventilación con la evolución de las variables ambientales.

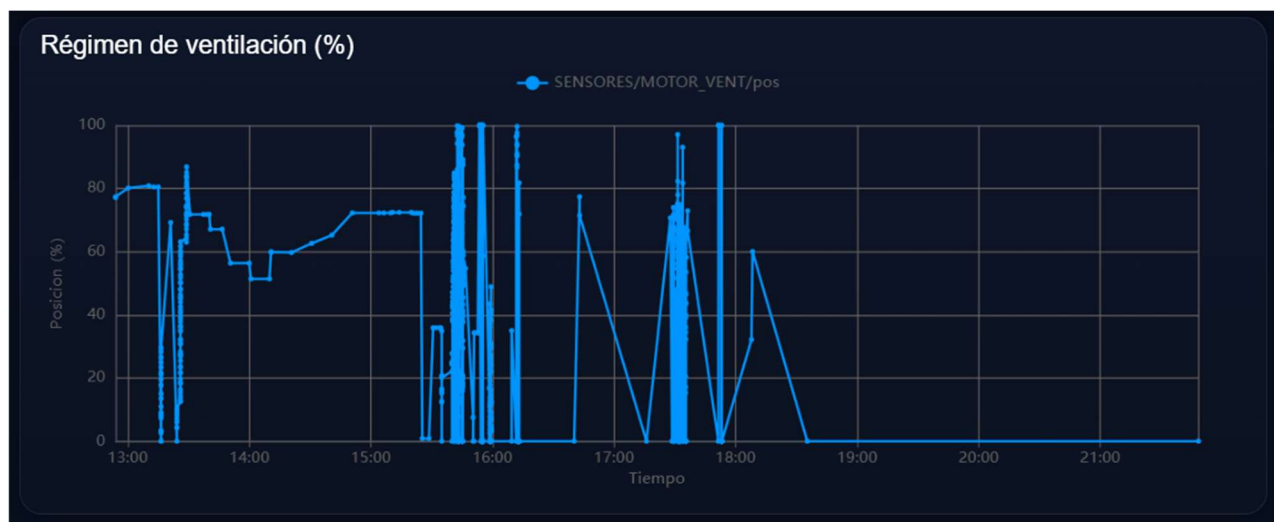


Figura 4-40 Gráfica de las posiciones del regulador con respecto al tiempo durante algunas de las pruebas realizadas.

Cómputo general del sistema

La combinación de control manual, control automático y visualización en tiempo real permite disponer de una herramienta completa de supervisión y control. Node-RED actúa como elemento central del sistema, integrando la adquisición de datos, su procesamiento y la generación de acciones de control. Esta arquitectura facilita tanto la experimentación como la futura implementación de estrategias de control más avanzadas, orientadas a optimizar la calidad del aire interior y minimizar la concentración de radón en el recinto de estudio. Y se puede comprobar el resultado final y global representado en la Figura 4-41.

Figura 4-41 Vista general de la *dashboard*.

4.3.2 Validación Experimental del Sistema

Con el fin de comprobar el comportamiento del sistema desarrollado, se ha llevado a cabo una validación experimental centrada en verificar la coherencia entre la consigna generada en la plataforma de supervisión, su transmisión al sistema embebido y la respuesta real del mecanismo, y así demostrar su cohesión y funcionamiento.

Comprobación del control manual y las comunicaciones

En primer lugar, se activa el modo de control manual desde la interfaz implementada en Node-RED, desde donde se introduce directamente una consigna de movimiento. Como se ve en la Figura 4-42, en la *dashboard* se encuentran dos botones (apagar y activar) y un selector que indica el modo en el que nos encontramos, una vez puesto el control manual movemos la barra de la consigna de apertura para indicar la posición que vamos a poner.

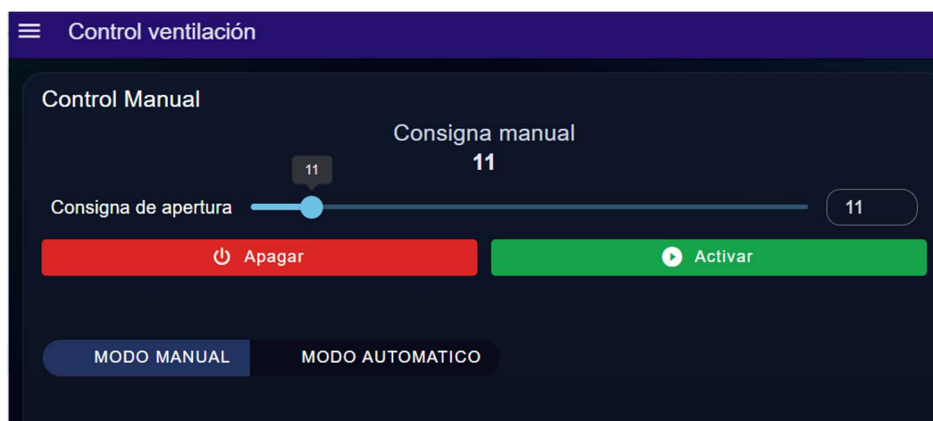


Figura 4-42 Activación de modo manual.

Seguidamente, se analiza el intercambio de información mediante el protocolo MQTT, verificando el mensaje enviado desde la *dashboard* y comparándolo con el recibido por el microcontrolador ESP32, así como con el valor que este devuelve tras su procesamiento. Esta comprobación permite asegurar que la información se transmite correctamente a lo largo de todo el sistema, sin pérdidas ni alteraciones, y que existe correspondencia entre la consigna introducida y la respuesta reportada, en la Figura 4-43 se puede comprobar tanto la orden de la *dashboard* como la respuesta del sensor enviada por la ESP32, que se muestran en la ventana de *depuración* de Node-RED



Figura 4-43 Mensajes recibidos en Node-RED.

De manera visual se puede apreciar que los datos correspondientes al sensor y recibidos en la plataforma se representan en la *dashbord*, coincidiendo con la información obtenida anteriormente (Figura 4-44).



Figura 4-44 Posición real del regulador.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente trabajo ha tenido como objetivo principal el desarrollo de un sistema automatizado capaz de regular el caudal de ventilación en función de las condiciones del aire interior, con especial atención a la concentración de radón en el edificio del CUD-ENM. A lo largo del desarrollo del proyecto se ha abordado de forma completa el proceso de diseño, construcción e implementación del sistema, permitiendo validar su funcionamiento. En este sentido, puede afirmarse que los objetivos planteados inicialmente han sido alcanzados de manera satisfactoria.

En primer lugar, se ha logrado mejorar el sistema de monitorización de la ventilación mediante la integración de una nueva sonda de caudal y temperatura, lo que ha permitido disponer de información más representativa del comportamiento real del flujo de aire en los conductos. También se ha diseñado y construido un dispositivo electromecánico capaz de actuar sobre el sistema de regulación existente sin necesidad de modificar la instalación original. Este aspecto resulta especialmente relevante, ya que garantiza la compatibilidad con el sistema actual y permite una solución reversible y no invasiva.

Por otro lado, se ha implementado un sistema de control basado en un microcontrolador que permite interpretar consignas externas y accionar el mecanismo de regulación de forma precisa, remota y automática. La integración con la plataforma de supervisión ha permitido disponer de un entorno unificado desde el que monitorizar variables y actuar sobre el sistema en tiempo real.

Del mismo modo, se han establecido las bases de un algoritmo de control orientado a la automatización del sistema en función de la concentración de radón. Aunque su desarrollo en este trabajo tiene un carácter inicial, permite demostrar la viabilidad del enfoque planteado. Los resultados obtenidos en la validación experimental muestran que el sistema responde correctamente a las consignas introducidas, mantiene coherencia en la transmisión de la información y permite conocer en todo momento la posición del mecanismo, lo que confirma el correcto funcionamiento del conjunto. No obstante, durante la fase final de ensayos se detectaron fallos progresivos en el sensor de posición, lo que limitó la realización de pruebas adicionales de automatización en condiciones prolongadas, si bien no afecta a la validez del diseño ni a la funcionalidad general del sistema.

El trabajo demuestra que es posible transformar un sistema de ventilación con regulación manual en un sistema controlado y adaptable, mejorando su capacidad para actuar como medida de mitigación del radón y sentando las bases para una gestión más eficiente de la calidad del aire interior y del consumo energético.

5.2 Líneas Futuras

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de trabajo que permitirían ampliar y mejorar el sistema desarrollado. Una de las principales mejoras consiste en la integración completa del sistema dentro de la infraestructura del edificio, incorporando la *dashboard* desarrollada en Node-RED al flujo operativo del CUD. De este modo, el sistema dejaría de funcionar como una herramienta externa para convertirse en parte del sistema de gestión del edificio, facilitando su uso y explotación en condiciones reales.

Sin embargo, el algoritmo de control implementado presenta un carácter experimental y puede ser mejorado significativamente. En este sentido, se plantea como línea futura el desarrollo de estrategias de control más avanzadas, capaces de ajustar el caudal de ventilación de forma más eficiente en función de la evolución temporal de la concentración de radón, evitando respuestas bruscas y optimizando el consumo energético.

Asimismo, sería de interés ampliar el sistema de monitorización, incorporando nuevas variables relacionadas con la calidad del aire interior, como CO₂, temperatura o humedad, lo que permitiría desarrollar estrategias de control más completas y adaptativas.

Otra posible línea de mejora consiste en la implementación de sistemas de control a nivel global del edificio, coordinando la regulación de distintos elementos del sistema de ventilación para optimizar su funcionamiento conjunto.

Finalmente, se plantea la necesidad de realizar campañas de monitorización a largo plazo que permitan evaluar el impacto real del sistema sobre la concentración de radón y el consumo energético, validando su eficacia en condiciones de operación prolongadas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Radón - CSN». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/radon>
- [2] «How Radon Gas Enters Homes», Extension | University of Nevada, Reno. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=2645>
- [3] «BORJA FRUTOS VAZQUEZ», studylib.es. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/1162638/borja-frutos-vazquez>
- [4] «World Health Organization (WHO)». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es>
- [5] «Plan Nacional contra el Radón - Laboratorio de Radón en Galicia - USC». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://radon.gal/es/plan-nacional-contra-el-radon/>
- [6] «Ministerio de Sanidad - Áreas - CANCER DE PULMON - CRIBADO CANCER - OTROS CANCERES EN ESTUDIO». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/areas/promocionPrevencion/cribado/cribadoCancer/otrosCanceresenestudio/cancerPulmon.htm>
- [7] «Guía Rehabilitación frente al radón». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/Guias/GuiaRadon.html>
- [8] «Mapa de radón en España | RADONSPAIN». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.radonspain.com/mapa-radon-espana.htm>
- [9] A. M. Alonso, A. G. Gil, y L. F. Garrido, «Caracterización de los principales focos de inmisión de gas radón en despachos de la planta baja del CUD», <https://calderon.cud.uvigo.es/items/2113af83-d915-497a-8e23-59ad19720f63>
- [10] S. R. Rodríguez, A. G. Gil, y P. F. Oubiña, «Evaluación experimental de un sistema de ventilación mecánica controlada para minimizar la concentración de radón en un despacho del CUD-ENM», <https://calderon.cud.uvigo.es/items/60db1244-76bf-4253-94f8-d03027829287>
- [11] E. Giama, «Review on Ventilation Systems for Building Applications in Terms of Energy Efficiency and Environmental Impact Assessment», *Energies*, vol. 15, n.o 1, p. 98, ene. 2022, doi: 10.3390/en15010098.
- [12] «Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom».
- [13] «BOE-A-2022-21682 Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones

ionizantes.» Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-21682>

[14] «cte-db-hs6-proteccion-frente-a-la-exposicion-al-radon.pdf». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://assets.aldes.es/assets/documentos/cte-db-hs6-proteccion-frente-a-la-exposicion-al-radon.pdf>

[15] X. de Galicia, «Galicia impulsa una estrategia pionera a nivel nacional para reducir el nivel de exposición de la ciudadanía al gas radón», Xunta de Galicia. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.xunta.gal/notas-de-prensa/-/nova/006873/galicia-impulsa-una-estrategia-pionera-nivel-nacional-para-reducir-nivel-exposicion?langId=es_ES

[16] «El Consejo de ministros aprueba el Plan Nacional contra el Radón». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/gabinete/notasPrensa.do?id=6317>

[17] «RITE - Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/rite.html>

[18] World Health Organization, Ed., WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2009.

[19] «BOE-A-2019-9190 Orden EFP/660/2019, de 6 de junio, por la que, a propuesta de la Consejería de Educación, Juventud y Deportes de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, en ejecución de sentencia, se retrotraen los efectos del nombramiento de funcionaria de carrera del Cuerpo de Maestros a doña Leticia Hernández López.» Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2019-9190>

[20] T. Marks, «How a Vapor Barrier Can Help Mitigate Radon in New Residential Construction». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.stegoindustries.com/blog/how-an-effective-vapor-barrier-can-mitigate-radon-poisoning-in-residential-construction>

[21] P. Bagnoli, «Consumer's Guide to Radon Reduction - How to Fix Your Home», https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/2016_consumers_guide_to_radon_reduction.pdf

[22] «BOE-A-2007-15820 Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.» Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-15820>

[23] «Ventilation Methods for Improving the Indoor Air Quality and Energy Efficiency of Multi-Family Buildings in Central Europe». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/9/2232>

[24] L. Felicioni, M. Jiránek, B. Vlasatá, y A. Lupíšek, «An Environmental Evaluation of Ventilation Systems Aimed at Reducing Indoor Radon Concentration», Buildings, vol. 13, n.o 11, p. 2706, nov. 2023, doi: 10.3390/buildings13112706.

[25] «Numerical modelling of industrial indoor environments: A comparison between different turbulence models and supply systems supported by field measurements», Build. Environ., vol. 46, n.o 11, pp. 2365-2374, nov. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.05.019.

[26] «BOE.es - Código Técnico de la Edificación (CTE)». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/codigo.php?id=424&modo=2¬a=0&tab=2

[27] J. Ferdyn-Grygierek y K. Grygierek, «Ventilation Methods for Improving the Indoor Air Quality and Energy Efficiency of Multi-Family Buildings in Central Europe», Energies, vol. 17, n.o 9, p. 2232, ene. 2024, doi: 10.3390/en17092232.

[28] A. García Martínez, J. Díez, M. E. López Lambas, y S. Ricci, «From Car to Bike: Marketing and Dialogue as a Driver of Change», en Urban Transport XXIII | 17th International Conference on Urban Transport and the Environment | 5-7 septiembre 2017 | Roma, Italia, Southampton, Boston: E.T.S.I.

- Caminos, Canales y Puertos (UPM), 2017, pp. 221-230. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/176>
- [29] J. N. S.-F. Guitart, A. G. Gil, y S. U. Madriñán, «Determinación de la concentración de radón en aguas de consumo». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-12/documents/2016_consumers_guide_to_radon_reduction.pdf
- [30] «RADON EYE RD200 SECURITY SENSOR USER MANUAL», ManualsLib. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com/manual/1581257/Radon-Eye-Rd200.html>
- [31] «Raspberry PI 3 Revisión del modelo B: especificaciones, beneficios, características y aplicaciones». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ariat-tech.es/blog/Raspberry-Pi-3-Model-B-Review-Specs,Benefits,Features-and-Applications.html>
- [32] «Low-code programming for event-driven applications : Node-RED». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://nodered.org/>
- [33] «DataGrip | JetBrains for Data». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jetbrains.com/datagrip/>
- [34] Datadog, «Observabilidad y seguridad en todos los stacks de la empresa», Datadog. Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.datadoghq.com/es/dg/monitor/free-trial/>
- [35] «Herter Instruments - Catálogo Velocidad y Caudal de Aire». Accedido: 8 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://herterinstruments.es/wp-content/uploads/PDF/catalogo/HerterInstruments-Velocidad-y-caudal-de-aire.pdf>
- [36] «Fluids Modules». Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://web.mit.edu/fluids-modules/www/>
- [37] «Technical Resources | ashrae.org». Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources>
- [38] «Mosfet L7805Cv Datasheet at Anna Beyers blog». Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://vamosarema.com/>
- [39] «Anemómetro térmico testo 405i para smartphone», Testo. Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES/anemometro-testo-405i/p/0560-1405>
- [40] Isaac, «Nema 17: todo sobre el motor paso a paso compatible con Arduino», Hardware libre. Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.hwlibre.com/nema-17/>
- [41] B. de Bakker, «Cómo controlar un motor paso a paso con el driver A4988 y Arduino», Makerguides.com. Accedido: 9 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.makerguides.com/es/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial-es/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo del presente trabajo, centrado en la monitorización y control automatizado de la ventilación para la mitigación del gas radón en espacios interiores, presenta implicaciones relevantes desde el punto de vista social, económico y ambiental.

Implicaciones sociales

El radón es un gas radiactivo de origen natural considerado uno de los principales factores de riesgo de cáncer de pulmón en espacios interiores. En este contexto, la implementación de sistemas capaces de monitorizar y controlar su concentración contribuye directamente a la mejora de la salud y seguridad de los usuarios de los edificios. El sistema desarrollado permite adaptar la ventilación a las condiciones reales del recinto, reduciendo la exposición al radón y mejorando la calidad del aire interior. Esto resulta especialmente relevante en entornos de uso prolongado, como edificios docentes o administrativos, donde la exposición continuada puede tener efectos significativos sobre la salud.

Implicaciones económicas

Desde el punto de vista económico, la solución propuesta se basa en la automatización de un sistema existente, evitando la necesidad de realizar modificaciones estructurales complejas o la instalación de sistemas de mitigación más costosos, como la despresurización del subsuelo. Además, la optimización del caudal de ventilación permite reducir el consumo energético asociado a la climatización del aire exterior, evitando tanto la sobre ventilación como situaciones de ventilación insuficiente. Esto se traduce en una mejora de la eficiencia energética del edificio y en una reducción de los costes de operación a medio y largo plazo.

Implicaciones ambientales

El impacto ambiental del sistema está directamente relacionado con la gestión del caudal de ventilación. Una ventilación no controlada puede implicar un incremento innecesario del consumo energético, especialmente en sistemas donde el aire exterior requiere acondicionamiento térmico. La implementación de un sistema de control automático permite ajustar la ventilación a la demanda real, reduciendo el consumo energético y, por tanto, las emisiones asociadas. De este modo, la solución propuesta contribuye a mejorar la sostenibilidad del edificio, alineándose con los principios de eficiencia energética y reducción del impacto ambiental. El sistema desarrollado no solo mejora la calidad del aire interior y reduce la exposición al radón, sino que también optimiza el uso de los recursos energéticos. Esto pone de manifiesto la importancia de integrar tecnologías de monitorización y control en los sistemas de ventilación, como herramienta clave para avanzar hacia edificios más saludables, eficientes y sostenibles.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de sistemas automatizados para la monitorización y control de la calidad del aire interior plantea cuestiones que trascienden lo puramente técnico, situándose en el ámbito de la relación entre tecnología, salud y responsabilidad humana.

Desde una perspectiva ética, la utilización de estos sistemas responde a un principio fundamental: la protección de la salud. La posibilidad de reducir la exposición a contaminantes invisibles como el radón introduce una dimensión preventiva en la gestión de los espacios habitables, donde la tecnología actúa como mediadora entre el entorno y el bienestar de las personas. Sin embargo, esta mediación plantea la necesidad de confiar en sistemas cuya lógica de funcionamiento no siempre es evidente para el usuario, lo que introduce una dependencia creciente de la automatización.

Con todo ello, surge una cuestión relevante: hasta qué punto la toma de decisiones debe delegarse en sistemas automáticos. Si bien la automatización permite optimizar el funcionamiento y responder de forma más eficiente a las condiciones del entorno, también puede desplazar el control humano, generando una posible pérdida de comprensión sobre el propio sistema. Por ello, resulta necesario mantener un equilibrio entre automatización y supervisión, en el que la tecnología complemente, pero no sustituya completamente, el criterio humano. Por otro lado, el uso de datos ambientales introduce una dimensión adicional relacionada con la interpretación de la información. Aunque los datos recogidos no son de carácter personal, su análisis y uso influyen directamente en la toma de decisiones sobre el funcionamiento del sistema. Esto implica una responsabilidad en la gestión de la información, asegurando que las decisiones derivadas de estos datos sean coherentes y adecuadas al contexto. Desde una perspectiva social, la integración de este tipo de soluciones se enmarca en el avance hacia edificios más inteligentes, donde la interacción entre usuario y sistema evoluciona hacia modelos más automatizados. Este cambio, aunque positivo en términos de eficiencia y confort, requiere una adaptación por parte de los usuarios, así como una comprensión básica del funcionamiento del sistema para garantizar su correcta utilización.

En última instancia, el desarrollo de tecnologías como la presentada en este trabajo pone de manifiesto la necesidad de un enfoque equilibrado, en el que la innovación tecnológica se integre con criterios éticos y sociales. La tecnología, lejos de ser un fin en sí misma, debe entenderse como una herramienta al servicio de las personas, orientada a mejorar su calidad de vida sin perder de vista la importancia del control, la responsabilidad y la comprensión del entorno en el que se aplica.

ANEXO III: CÓDIGO EMPLEADO

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <math.h>

#define STEP_PIN 2
#define DIR_PIN 4
#define EN_PIN 15

#define SDA_PIN 21
#define SCL_PIN 22
#define AS5600_ADDR 0x36

const uint16_t SENSOR_RAW_POS0 = 183;
const uint16_t SENSOR_RAW_POS100 = 1379;

const bool SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100 = false;

const float MECH_MAX_DEG = 200.0f;

const bool MOTOR_DIR_INCREASES_POS = true;

const int STEP_HIGH_US = 900;
const int STEP_LOW_US = 900;

const int STEPS_PER_BLOCK = 4;
const long MAX_STEPS_PER_MOVE = 12000;

const float TARGET_TOLERANCE_POS = 0.8f;
const float LIMIT_MARGIN_POS = 0.5f;

const int MAX_NO_PROGRESS_LOOPS = 80;
const float MIN_PROGRESS_POS = 0.03f;

const char* WIFI_SSID = "wcud";
const char* WIFI_PASS = "33lnpd1wdC4dch0s";

const char* MQTT_SERVER = "193.146.212.7";
const uint16_t MQTT_PORT = 1880;
const char* MQTT_USER = "tfg_IoT_CUD";
const char* MQTT_PASS = "DUC_ToI_gft";
const char* MQTT_CLIENT_ID = "ESP32_MOTOR_VENT";

const char* TOPIC_POS = "SENSORES/MOTOR_VENT/pos";
const char* TOPIC_POS_SET = "SENSORES/MOTOR_VENT/pos/set";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
```

```
float currentPosition = 0.0f;
float currentMechDeg = 0.0f;
float targetPosition = 0.0f;
bool moveRequested = false;

float clampf(float x, float a, float b) {
    if (x < a) return a;
    if (x > b) return b;
    return x;
}

float rawToDeg(uint16_t raw) {
    return raw * 360.0f / 4096.0f;
}

uint16_t forwardArcRaw(uint16_t fromRaw, uint16_t toRaw) {
    if (toRaw >= fromRaw) return toRaw - fromRaw;
    return (uint16_t)(4096 - fromRaw + toRaw);
}

uint16_t backwardArcRaw(uint16_t fromRaw, uint16_t toRaw) {
    if (fromRaw >= toRaw) return fromRaw - toRaw;
    return (uint16_t)(fromRaw + 4096 - toRaw);
}

uint16_t getSensorSpanRaw() {
    if (SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100) {
        return forwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, SENSOR_RAW_POS100);
    } else {
        return backwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, SENSOR_RAW_POS100);
    }
}

float posToMechDeg(float pos) {
    pos = clampf(pos, 0.0f, 100.0f);
    return (pos / 100.0f) * MECH_MAX_DEG;
}

bool readRawAngle(uint16_t &rawOut) {
    Wire.beginTransaction(AS5600_ADDR);
    Wire.write(0x0C);
    if (Wire.endTransmission(false) != 0) return false;

    Wire.requestFrom(AS5600_ADDR, (uint8_t)2);
    unsigned long t0 = millis();
    while (Wire.available() < 2) {
        if (millis() - t0 > 50) return false;
    }
}
```

```
uint8_t msb = Wire.read();
uint8_t lsb = Wire.read();
rawOut = (((uint16_t)msb) << 8) | lsb) & 0xFFFF;
return true;
}

bool readPositionFromSensor(float &posOut, float &mechDegOut, uint16_t &rawOut) {
    if (!readRawAngle(rawOut)) return false;

    const uint16_t span = getSensorSpanRaw();
    uint16_t progress = 0;

    if (SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100) {
        progress = forwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, rawOut);
    } else {
        progress = backwardArcRaw(SENSOR_RAW_POS0, rawOut);
    }

    if (progress <= span) {
        posOut = 100.0f * ((float)progress / (float)span);
    } else {
        uint16_t distToStart = progress - span;
        uint16_t distToEnd = 0;

        if (SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100) {
            distToEnd = forwardArcRaw(rawOut, SENSOR_RAW_POS100);
        } else {
            distToEnd = backwardArcRaw(rawOut, SENSOR_RAW_POS100);
        }

        if (distToEnd < distToStart) posOut = 100.0f;
        else posOut = 0.0f;
    }

    posOut = clampf(posOut, 0.0f, 100.0f);
    mechDegOut = posToMechDeg(posOut);
    return true;
}

bool updatePositionFromSensor() {
    uint16_t raw;
    return readPositionFromSensor(currentPosition, currentMechDeg, raw);
}

void stepOnce() {
    digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(STEP_HIGH_US);
    digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(STEP_LOW_US);
}
```

```
void setMotorDirection(bool increasePos) {
    bool level = increasePos ? MOTOR_DIR_INCREASES_POS : !MOTOR_DIR_INCREASES_POS;
    digitalWrite(DIR_PIN, level ? HIGH : LOW);
}

bool moveToPosition(float targetPos) {
    targetPos = clampf(targetPos, 0.0f, 100.0f);

    if (!updatePositionFromSensor()) {
        Serial.println("ERROR: no se puede leer AS5600 al iniciar movimiento");
        return false;
    }

    Serial.print("Mover desde ");
    Serial.print(currentPosition, 2);
    Serial.print(" % hasta ");
    Serial.print(targetPos, 2);
    Serial.println(" %");

    long totalSteps = 0;
    int noProgressLoops = 0;

    while (totalSteps < MAX_STEPS_PER_MOVE) {
        if (!updatePositionFromSensor()) {
            Serial.println("ERROR: fallo leyendo AS5600 durante movimiento");
            return false;
        }

        float errorPos = targetPos - currentPosition;
        float absError = fabs(errorPos);

        if (absError <= TARGET_TOLERANCE_POS) {
            Serial.println("Objetivo alcanzado");
            return true;
        }

        bool increasePos = (errorPos > 0.0f);

        if (!increasePos && currentPosition <= LIMIT_MARGIN_POS) {
            Serial.println("Limite minimo alcanzado");
            return true;
        }

        if (increasePos && currentPosition >= (100.0f - LIMIT_MARGIN_POS)) {
            Serial.println("Limite maximo alcanzado");
            return true;
        }

        setMotorDirection(increasePos);
    }
}
```

```
float beforeBlockPos = currentPosition;

for (int i = 0; i < STEPS_PER_BLOCK; i++) {
    stepOnce();
    totalSteps++;
    if (totalSteps >= MAX_STEPS_PER_MOVE) break;
}

if (!updatePositionFromSensor()) {
    Serial.println("ERROR: fallo leyendo AS5600 tras bloque de pasos");
    return false;
}

float afterBlockPos = currentPosition;
float newErrorPos = targetPos - afterBlockPos;
float newAbsError = fabs(newErrorPos);

Serial.print("pos=");
Serial.print(afterBlockPos, 2);
Serial.print(" % | mech=");
Serial.print(currentMechDeg, 2);
Serial.print(" deg | err=");
Serial.println(newErrorPos, 2);

if (newAbsError > absError + 0.8f) {
    Serial.println("El error empeora; paro para evitar pasarme");
    return true;
}

if (fabs(afterBlockPos - beforeBlockPos) < MIN_PROGRESS_POS) {
    noProgressLoops++;
    if (noProgressLoops >= MAX_NO_PROGRESS_LOOPS) {
        Serial.println("Sin progreso en encoder; abortando");
        return false;
    }
} else {
    noProgressLoops = 0;
}

Serial.println("STOP: maximo de pasos alcanzado");
return false;
}

void connectWiFi() {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) return;

    Serial.print("Conectando a WiFi: ");
    Serial.println(WIFI_SSID);
```

```
WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);

unsigned long t0 = millis();
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - t0 < 20000) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}
Serial.println();

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.print("WiFi OK. IP: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
} else {
    Serial.println("WiFi KO");
}
}

bool connectMqtt() {
    if (client.connected()) return true;

    Serial.println("Conectando a MQTT...");
    if (client.connect(MQTT_CLIENT_ID, MQTT_USER, MQTT_PASS)) {
        Serial.println("MQTT OK");
        client.subscribe(TOPIC_POS_SET);
        return true;
    }

    Serial.print("MQTT fallo, state=");
    Serial.println(client.state());
    return false;
}

void publishPosition() {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
    if (!client.connected() && !connectMqtt()) return;

    if (!updatePositionFromSensor()) {
        Serial.println("ERROR: no se puede leer posicion para publicar");
        return;
    }

    char buf[16];
    dtostrf(currentPosition, 1, 2, buf);
    client.publish(TOPIC_POS, buf, true);

    Serial.print("Posicion publicada: ");
    Serial.println(buf);
}
```

```
void mqttCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    String topicStr = String(topic);
    String msg;

    for (unsigned int i = 0; i < length; i++) {
        msg += (char)payload[i];
    }
    msg.trim();

    Serial.print("MQTT recibido [");
    Serial.print(topicStr);
    Serial.print("] = ");
    Serial.println(msg);

    if (topicStr != TOPIC_POS_SET) return;

    targetPosition = clampf(msg.toFloat(), 0.0f, 100.0f);
    moveRequested = true;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(800);

    pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
    pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
    pinMode(EN_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(EN_PIN, LOW);

    Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);
    Wire.setClock(100000);

    connectWiFi();
    client.setServer(MQTT_SERVER, MQTT_PORT);
    client.setCallback(mqttCallback);
    connectMqtt();

    Serial.print("RAW pos 0   = ");
    Serial.println(SENSOR_RAW_POS0);
    Serial.print("RAW pos 100 = ");
    Serial.println(SENSOR_RAW_POS100);
    Serial.print("Span RAW   = ");
    Serial.println(getSensorSpanRaw());
    Serial.print("Direccion sensor 0->100: ");
    Serial.println(SENSOR_FORWARD_FROM_0_TO_100 ? "forward" : "backward");

    uint16_t raw;
    float pos, mech;
    if (readPositionFromSensor(pos, mech, raw)) {
```

```
    Serial.print("RAW inicial = ");
    Serial.print(raw);
    Serial.print(" | DEG = ");
    Serial.print(rawToDeg(raw), 2);
    Serial.print(" | POS = ");
    Serial.print(pos, 2);
    Serial.print(" % | MECH = ");
    Serial.println(mech, 2);
} else {
    Serial.println("ERROR: no se pudo leer la posicion inicial");
}

publishPosition();
Serial.println("Listo. Esperando consignas MQTT...");
}

void loop() {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) connectWiFi();
    if (!client.connected()) connectMqtt();

    client.loop();

    if (moveRequested) {
        moveRequested = false;

        bool ok = moveToPosition(targetPosition);

        if (ok) {
            updatePositionFromSensor();
            publishPosition();
        }
    }
}
```

ANEXO IV: DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se ha recurrido al uso puntual de herramientas basadas en inteligencia artificial como apoyo en tareas de redacción, revisión lingüística y mejora de la claridad expositiva del documento. El empleo de dichas herramientas se ha limitado a la reformulación de textos, corrección gramatical, mejora del estilo y estructuración de contenidos, con el objetivo de lograr una expresión más precisa, coherente y adecuada al contexto académico propio de un trabajo de ingeniería. En ningún caso se han utilizado estas herramientas para la generación autónoma del contenido técnico, ni para el diseño del sistema, la implementación del dispositivo electromecánico, el desarrollo del código en ESP32, la integración de sensores (como el *encoder* y los sistemas de medida), ni para el tratamiento de datos, análisis de resultados o elaboración de conclusiones.

Todos los aspectos técnicos del trabajo, incluyendo el diseño del sistema de control de ventilación, la automatización del regulador mecánico, la programación del microcontrolador, la comunicación mediante Node-RED y MQTT, así como la realización de pruebas experimentales y la interpretación de los resultados, han sido desarrollados íntegramente por el autor.

Destacar que se ha realizado una revisión crítica de todos los contenidos en los que se ha empleado apoyo de herramientas de inteligencia artificial, garantizando en todo momento la veracidad, coherencia y adecuación técnica de la información presentada. El uso de inteligencia artificial se ha llevado a cabo, por tanto, como una herramienta de apoyo complementaria, manteniendo en todo momento la autoría, responsabilidad y control sobre el contenido final del documento.