



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Herramienta de monitorización y control de la concentración de
radón en espacios interiores*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Sánchez-Ferragut Guitart

DIRECTORES: Arturo González Gil
Pablo Falcón Oubiña

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Herramienta de monitorización y control de la concentración de
radón en espacios interiores*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El radón es un potente contaminante que afecta a la calidad del aire interior en todo el mundo. Estudios epidemiológicos han demostrado un vínculo claro entre la respiración de altas concentraciones de radón y la incidencia de cáncer de pulmón. De hecho, después del tabaco, se trata de la segunda causa más importante de cáncer de pulmón.

Por lo tanto, conociendo estos datos, resulta de vital importancia conocer los niveles de radón en los interiores de viviendas y habitáculos para proceder a una posterior renovación del aire si fuese necesario. Existen medidores de radón que permiten obtener el nivel de existencia de este gas en un entorno cerrado pero estos datos deben ser recolectados a través de aplicaciones del fabricante y no siempre es sencillo acceder a estos datos para su posterior procesamiento.

En el presente trabajo se pretende desarrollar una herramienta de monitorización de gas radón para analizar de manera remota los datos y un sistema automatizado de ventilación para casos en los que se superen niveles establecidos por la normativa.

PALABRAS CLAVE

Concentración de radón, monitorización, ventilación, Raspberry Pi, Internet of Things.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a los directores, Arturo González Gil y Pablo Falcón Oubiña, por su dedicación, su trabajo y su empeño en hacer un buen trabajo, sin los cuáles no hubiese sido posible la elaboración del mismo. También a todos los profesores del Centro Universitario de la Defensa y a los profesores militares que me han transmitido sus conocimientos, aconsejado y formado durante estos últimos 5 años.

También me gustaría agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mi madre, por ser el ejemplo a seguir en mi vida, sin la cuál no habría conseguido alcanzar muchas de mis metas. Asimismo, agradecer a Clara su consejo y apoyo durante mis 5 años en la ENM.

Por último, a mis compañeros, especialmente a aquellos con los que he convivido este último año.

CONTENIDO

Contenido	2
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción y contextualización	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	10
2 Estado del arte	12
2.1 Conceptos relacionados con el radón.....	12
2.2 Radón en espacios cerrados	12
2.2.1 Mecanismos y factores que aumentan la fuga de radón hacia espacios cerrados.....	12
2.2.2 Criterios para la aplicación de medidas correctivas.....	13
2.3 Dispositivos de medida	14
2.3.1 ¿Cómo se detecta el gas radón?	14
2.3.2 Tipos de detectores de gas radón	14
2.3.3 Medición de radón en otros medios.....	18
2.4 Corrección o mitigación del gas radón	18
2.4.1 Medidas previas a la mitigación	18
2.4.2 Tipos de medidas correctivas.....	19
2.5 El Internet de las Cosas.....	24
2.5.1 ¿Qué es? ¿Cuándo surge?	24
2.5.2 Aplicación de IoT en sensores	25
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Herramientas empleadas	27
3.1.1 Radoneye RD200	27
3.1.2 Raspberry Pi 3 Modelo B	29
3.1.3 Sistema operativo Raspbian.....	30
3.1.4 Python	30
3.1.5 Node-RED	31
3.1.6 Base de datos InfluxDB	31
3.1.7 Grafana	31
3.2 Elaboración de la herramienta <i>IoT</i> de monitorización de radón.	32
3.2.1 Comunicaciones de la herramienta de monitorización.	32

3.2.2 Instalación de SO Raspbian y configuración inicial de la Raspberry Pi	33
3.2.3 Conexión Bluetooth entre Raspberry Pi y RadonEye RD200. Radonreader.....	36
3.2.4 Comunicación mediante protocolo MQTT. Broker Mosquitto.	37
3.2.5 Enlace de nodos en Node-Red e inserción de la medida en base datos InfluxDB.	40
3.2.6 Creación de dashboard en herramienta Grafana.	41
3.3 Uso de medidas correctivas.....	42
3.3.1 Automatización del uso de medidas correctivas.....	42
3.3.1 Conexión eléctrica entre el ventilador y el relé.	45
4 Resultados	47
4.1 Pruebas de monitorización del radón	47
4.2 Pruebas de control de radón.	52
5 Conclusiones y líneas futuras.	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Líneas futuras	56
6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Código modificado de la fuente expuesta en la bibliografía	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Gráfica de exposición a la radiación [1].	7
Figura 1-2: Mapa de zonificación por municipio de radón [3].	8
Figura 1-3: Posibles puntos de entrada de gas radón [6].	9
Figura 2-1: Detector de pistas CR-39 [12].	15
Figura 2-2: Imagen colector de carbón activo. Fuente [14]	16
Figura 2-3: Sistema E-PERM de medición de gas radón. Fuente: [16]	16
Figura 2-4: Micro manómetro de presión diferencial ManoAir500-1 [18].	19
Figura 2-5: Esquema de ventilación de radón [19].	20
Figura 2-6: Esquema de barrera de protección anti-radón [19].	21
Figura 2-7: Barrera de protección anti-radón [17].	22
Figura 2-8: Despresurización natural del terreno [17].	23
Figura 2-9: Despresurización activa del terreno (DAS) [17].	24
Figura 2-10: <i>Internet of Things</i> [23].	25
Figura 3-1: Sensor RadonEye RD200.	27
Figura 3-2: Sensor RadonEye RD200.	28
Figura 3-3: Principales componentes de una Raspberry Pi.	29
Figura 3-4: Sistema operativo Raspbian [31].	30
Figura 3-5: Grafana [38].	32
Figura 3-6: Esquema general de las comunicaciones de la herramienta de monitorización de radón.	33
Figura 3-7: Opciones de descarga de Raspbian [30].	34
Figura 3-8: Descarga de Raspbian con escritorio [29].	34
Figura 3-9: <i>balenaEtcher</i> [42].	35
Figura 3-10: Mensaje de bienvenida a Raspberry Pi Desktop. Autoría propia.	35
Figura 3-11: Configuración de idioma y zona horaria. Autoría propia.	36
Figura 3-12: Actualización del software. Autoría propia.	36
Figura 3-13: Ejecución de radonreader.py para obtener valor de radón.	37
Figura 3-14: Funcionamiento protocolo MQTT [42].	37
Figura 3-15: Sistema de funcionamiento <i>topics</i> MQTT [45]	38
Figura 3-16: Código de envío MQTT.	38
Figura 3-17: Editor de <i>crontab</i> .	39
Figura 3-18: Comando <i>crontab</i> .	39
Figura 3-19: Flujo de nodos en Node-Red.	40
Figura 3-20: Nodo de entrada MQTT.	40

Figura 3-21: Nodo de base de datos InfluxDB.....	40
Figura 3-22: Características de conexión del nodo InfluxDB.....	41
Figura 3-23: Nodo de salida <i>debug</i>	41
Figura 3-24: Creación de <i>dashboard</i> en carpeta TFG05.....	41
Figura 3-25: Menú de modificación de tiempo.	42
Figura 3-26: Pines GPIO Raspberry Pi 3 [46].....	43
Figura 3-27: Conexión GPIO-relé.....	43
Figura 3-28: Conexión real de relé y Raspberry Pi.	44
Figura 3-29: Librería GPIO.	44
Figura 3-30: Código GPIO.	44
Figura 3-31: Conexiones relé.	45
Figura 3-32: Conexión entre el relé y la ventilación.	46
Figura 4-1: Ubicación del sensor 1 en el cuartel Almirante Francisco Moreno [50].	47
Figura 4-2: Gráfica de concentración de radón en estudio del cuartel Almirante Francisco Moreno.	48
Figura 4-3: Ubicación de los sensores 1 y 2 en el despacho 114 [50]	49
Figura 4-4: Gráfica sensor 1 en despacho 114. (2 marzo-4 marzo)	50
Figura 4-5: Gráfica sensor 1 en despacho 114. (4 marzo-6 marzo)	50
Figura 4-6: Gráfica sensor 2 en despacho 114. (4 marzo-6 marzo).	51
Figura 4-7: Gráfica sensor 1 de ventilación a partir de 200 Bq/m ³	53
Figura 4-8: Gráfica sensor 1 de ventilación a partir de 100 Bq/m ³	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tabla de las distintas tecnologías de detección de concentraciones de radón.	18
Tabla 3-1: Comparación de RadonEye RD200 con sensores del mercado. Autoría propia.	29

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción y contextualización

El radón es un gas noble radioactivo indetectable por los sentidos humanos, puesto que es inodoro, insípido e invisible. Además, en condiciones normales, el radón también es incoloro, excepto cuando se enfría por debajo de su punto de congelación. El radón es de origen natural y se genera a partir de la desintegración radiactiva natural del uranio, que está presente en suelos y rocas [1]. En esta cadena de descomposición, el radio se descompone en radón, cuyo isótopo más estable tiene una vida media de 3823 días. El radón también puede originarse en el proceso de descomposición del torio o el actinio, pero en este caso la vida media es de 55,6 y 4 segundos respectivamente. En estas cadenas de descomposición comentadas, el radón es gaseoso en condiciones normales por lo que se puede inhalar de forma sencilla, lo cual es perjudicial para la salud humana.

Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición al radón es la segunda causa más común de cáncer de pulmón después del tabaco, y es la causa principal de cáncer de pulmón entre personas que nunca han fumado [2].

En base a los datos que facilita la Organización Mundial de la Salud la proporción de los casos de cáncer de pulmón a nivel nacional atribuibles al radón con respecto al total varía entre un 3% a un 14%, en función de la concentración media nacional de radón y de la prevalencia de tabaco del país. Los efectos del radón en la salud se registraron por vez primera en el siglo XVI al observar las enfermedades que padecían los mineros en Oriente de Europa, pero no fue hasta la década de 1950 cuando se determinó que la principal causa de cáncer en los mineros era el radón. A día de hoy, la Asociación Nuclear Mundial considera al radón como la radiación más contribuyente a los seres humanos, aunque cabe destacar que su impacto varía de una región geológica a otra [3].

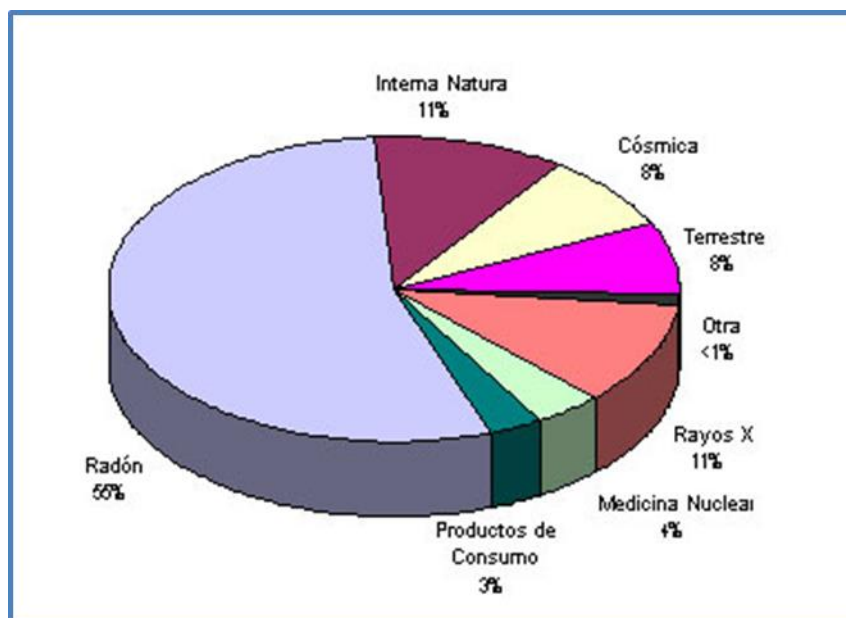


Figura 1-1: Gráfica de exposición a la radiación [1].

La concentración de radón en la atmósfera se mide generalmente en Becquerelios¹ por metro cúbico (Bq/m^3). La concentración del radón en exteriores oscila entre 5 y $15 \text{ Bq}/\text{m}^3$, mientras que los valores en interiores varían entre 10 y $10000 \text{ Bq}/\text{m}^3$. El suelo y ciertos materiales de construcción generalmente son considerados como fuentes dominantes de radón. De hecho, el radón es particularmente común en regiones con suelos que contienen granito o pizarra, que tienen ciertas concentraciones de uranio.

Según los datos del Consejo de Seguridad Nuclear, Galicia es la comunidad con más presencia de radón natural en su subsuelo, con un 70% del territorio afectado [4].

En la Figura 1-2, mapa de zonificación por municipio de radón, se obtiene directamente el mapa de zonas de actuación prioritaria, es decir, aquellas en las que el potencial de radón es superior a $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$. El potencial de radón en una zona es el percentil 90 de la distribución de niveles de radón de los edificios de esa zona. Por ejemplo, $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ significa que:

- El 90% de los edificios tienen concentraciones inferiores a $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$.
- El 10% de los edificios superan este nivel.

En este mapa se representan, con color rojo destacado, los municipios en los que hay población que reside en zonas de actuación prioritaria. Se muestran en grande aquellos en los que esta población representa más del 75% de la total del municipio [5]. Como se puede observar, la comunidad de Galicia, es una de las áreas españolas con más municipios en zonas de actuación primaria.

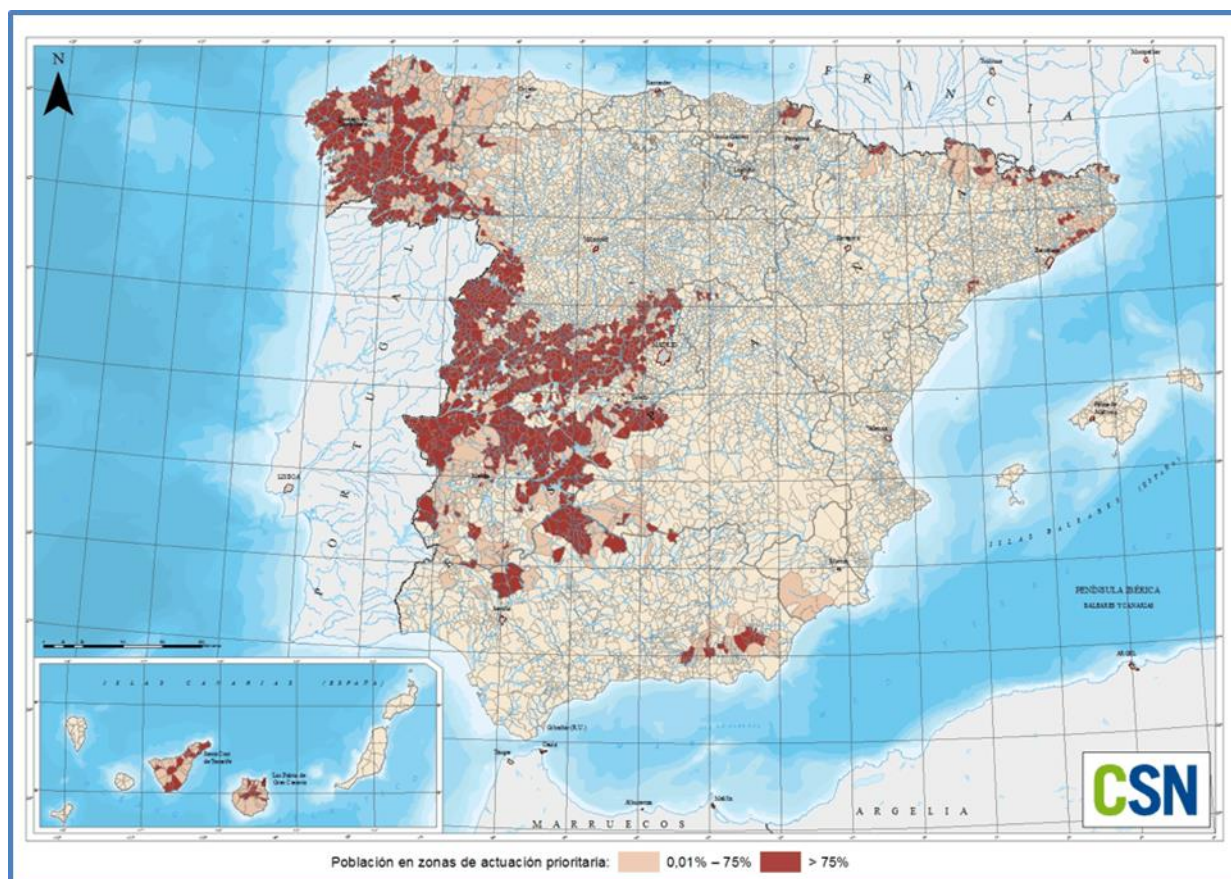


Figura 1-2: Mapa de zonificación por municipio de radón [3].

¹ Un Becquerelio equivale a una desintegración nuclear por segundo.

A pesar de su corta vida media, el gas radón puede acumularse en edificios, especialmente en áreas bajas como sótanos debido a su alta densidad. También puede aparecer en aguas subterráneas como manantiales o aguas termales, y su concentración puede llegar a variar mucho en función de la estación del año y las condiciones atmosféricas.

La Figura 1-3 muestra los puntos de entrada de mayor relevancia del gas radón en un edificio. Como se puede observar, las líneas rojas representan como el radón emana de forma natural del subsuelo fracturado a través del aire o de aguas subterráneas. Por lo tanto, el radón puede penetrar en un edificio a través de tuberías, grietas en paredes, agujeros en pisos, huecos alrededor de las tuberías, cavidades de las paredes o suministros de agua. Puesto que los puntos de entrada más típicos en los edificios son las grietas, los edificios herméticamente sellados y mal ventilados son los que sufren mayor riesgo de exposición al gas radón.

La EPA² recomienda tomar medidas correctivas a partir de concentraciones que superen los 148 Bq/m³ [6], mientras que la OMS fija dicho nivel en 100 Bq/m³.

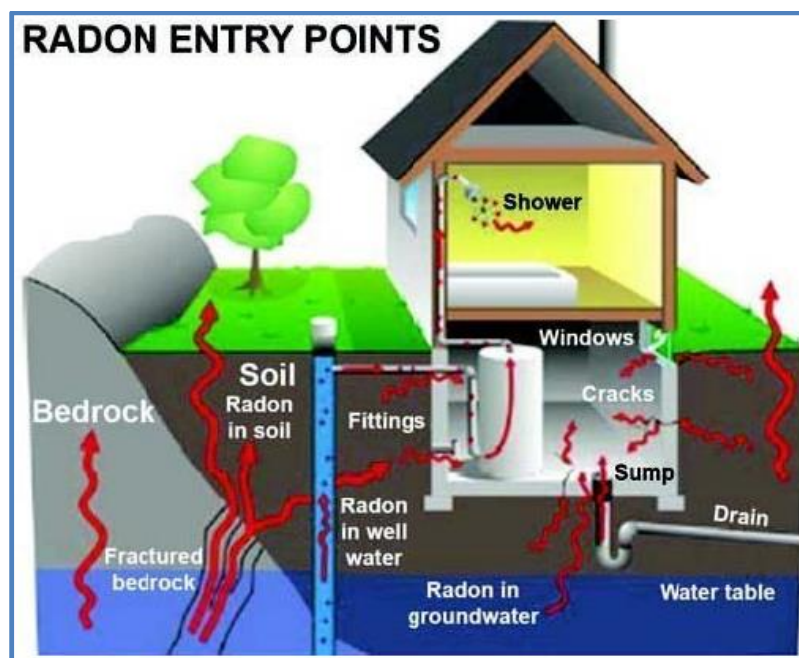


Figura 1-3: Posibles puntos de entrada de gas radón [6].

1.2 Objetivos

En base a la problemática que genera el radón en nuestro país y a un mejor y más sencillo manejo de los datos de concentración de radón registrados por los sensores que existen actualmente, en este TFG se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

1. Desarrollar una herramienta que permita la monitorización remota de los datos de concentración medidos por un detector RadonEye RD200.
2. Analizar los valores de concentración de radón obtenidos mediante la herramienta de monitorización con el fin de estudiar las variaciones en diferentes estancias de la Escuela Naval Militar.

² Agencia de Protección Ambiental de EEUU.

3. Detectar las situaciones en las que se sobrepasan los límites recomendados por la normativa vigente.
4. Tomar medidas frente a las altas concentraciones de radón mediante la activación automática de mecanismos correctivos basados en la renovación del aire.
5. Concienciar del peligro real que supone la exposición prolongada al radón.

1.3 Estructura de la memoria

En este apartado se explica en términos generales cómo se encuentra estructurado el contenido de este Trabajo de Fin de Grado:

- En el capítulo 1 se hace una introducción del radón y los peligros que éste puede causar en el ser humano. También se presentan los objetivos a alcanzar en este trabajo.
- En el capítulo 2 se exponen los factores que provocan la circulación del radón hacia espacios interiores, así como los criterios actuales para poder aplicar medidas correctivas. Se estudian los distintos sistemas de medición del gas y las medidas correctivas más usadas. Por último, se hace una introducción del Internet de las Cosas.
- En el capítulo 3, se muestra el desarrollo del TFG, explicando las herramientas empleadas y los pasos seguidos para la elaboración del mismo.
- En el capítulo 4 se muestran y analizan los resultados obtenidos para poder extraer una serie de conclusiones.
- En el capítulo 5 se enumeran las conclusiones a las que se han llegado tras la realización de este TFG y se proponen varias líneas futuras para servir de inspiración a futuros estudios.
- Por último, en el capítulo 6 se presenta la bibliografía empleada para la realización de este TFG. Tras ella, los diferentes anexos para complementar la información proporcionada.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Conceptos relacionados con el radón

En este apartado se presentan diferentes conceptos relacionados con el gas radón. Se describirá el flujo del gas radón hacia los espacios cerrados y los factores más importantes que le llevan a ello, normativa y criterios a la hora de llevar a cabo medidas correctivas, una clasificación de los distintos sistemas o dispositivos de medición de gas radón, una explicación de los diferentes métodos de medidas de mitigación y por último una breve introducción al Internet de las Cosas y sus aplicaciones a los sensores.

2.2 Radón en espacios cerrados

2.2.1 *Mecanismos y factores que aumentan la fuga de radón hacia espacios cerrados*

La concentración de gas radón en espacios cerrados puede verse influenciado por múltiples factores, entre ellos se encuentran los fenómenos atmosféricos y sísmicos, barreras arquitectónicas, etc.

La penetración de gas radón en espacios interiores ha sido estudiada en base a los mecanismos básicos que favorecen su afluencia a construcciones. Existen básicamente dos de estos mecanismos, el primero de ellos podría estar enmarcado dentro de los mecanismos de “difusión de gas”, y está causado por el gradiente en el nivel de concentración de radón en el ambiente. El segundo mecanismo, es causado por el gradiente de la presión atmosférica que existe entre la fachada del edificio y el suelo mismo, y es conocido como “mecanismo de advección”.

En relación con los factores anteriormente mencionados, aquellos que influyen de manera directa sobre el aumento de la concentración de gas radón en el interior de edificios deben de ser destacados y se puede hacer una clasificación de ellos diferenciando dos grupos: factores internos y factores externos.

- Los factores internos están referidos a aquellas características que son inherentes al edificio y a su emplazamiento, como pueden ser los materiales de construcción, el sistema de ventilación instalado, el suelo sobre el que el edificio está localizado, entre otros.
- Entre los factores externos cabe destacar los fenómenos meteorológicos (lluvia, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura y dirección y velocidad del viento), fenómenos sísmicos e inestabilidad atmosférica.

En lo referido a factores asociados a la lluvia, se ha comprobado que grandes cantidades de lluvia en suelos secos podría dar como resultado una reducción inicial del nivel de concentración de radón en las capas altas del subsuelo debido a la solubilidad del gas. Si la lluvia fuerte persistiese, el suelo podría alcanzar niveles de concentración cercanos a la saturación, estableciendo un límite que podría evitar la fuga del gas hacia la superficie. Además, teniendo en cuenta las estaciones del año, se ha observado que la concentración del radón es normalmente mayor en invierno que en verano [7]. En las noches y estaciones del año frías, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de los edificios llega a su máximo. Esta es la razón por la cual aparece un gradiente de presión atmosférica entre espacios interiores y exteriores del edificio, causando que el radón se filtre y se acumule dentro. Cuando se tienen en cuenta las franjas horarias, se ha observado que el nivel de concentración de radón es mayor durante la noche que durante el día, con valores máximos a horas tempranas de la mañana y mínimos al anochecer. Estas diferencias están debidas a una disminución en la actividad de los residentes durante la noche, y por lo tanto las tasas de ventilación son más pequeñas [8]. Además, el grado de ventilación interior, el uso de dispositivos de aire acondicionado, o el comportamiento de los residentes en casa pueden resultar distintos en función de la región. Por lo tanto, las diferencias culturales y sociales son también factores importantes y han de ser tenidas en cuenta a la hora de estudiar los problemas del radón.

Tanto la difusión como los mecanismos de advección pueden corregirse de manera preventiva. Los factores internos suelen ser constantes, con una poca sensibilidad a cambios, a menos que se realice modificaciones en la construcción. Sin embargo, los factores externos muestran mayor variabilidad a lo largo del año, son más sensibles al cambio, y por consecuencia su influencia en las concentraciones de radón es mayor.

En cualquier caso, la reducción de la concentración de gas radón debe ser una prioridad nacional a la hora establecer los códigos técnicos de construcción y las regulaciones que afectan a los edificios, debido a la indudable influencia en la salud de sus usuarios. Tener disponible una metodología fácil de aplicar y que se pueda confiar en sus recomendaciones podría implicar una mejor determinación en el riesgo derivado de la exposición al gas y una adopción de medidas dirigidas a un mejor manejo de los espacios cerrados, y una mejora en los hábitos de vivienda relacionados con la ventilación y el tratamiento de aire. Todo aquello que contribuirá a una mejor calidad de vida de los habitantes, no solo reduciendo su exposición al gas radón y, por lo tanto, el riesgo de sufrir enfermedades asociadas, sino también mitigar sus efectos a medio y a largo plazo y sirviendo a su vez como un medio de medida de sensibilización.

2.2.2 Criterios para la aplicación de medidas correctivas

Para la aplicación de medidas correctivas se necesita establecer unos niveles o límites a partir de los cuáles se pueda actuar frente al gas radón. En este subapartado se hace un estudio de la evolución de la normativa en España y sus diferentes actualizaciones.

El 12 de junio de 1985 España pasa a formar parte de la Comunidad Europea de la Energía Atómica (Euratom) después de la firma del Tratado de Madrid, con el fin de mejorar el nivel de vida de los Estados miembros y establecer unas condiciones que contribuyan a la creación y desarrollo seguro de las industrias nucleares. El pertenecer a esta organización hace que España se comprometa al cumplimiento de medidas de seguridad para la protección radiológica de la población y trabajadores.

Las referencias normativas en España se remontan a la Directiva 96/29 (1996), cuya trasposición a la normativa española se realizó a través del RD 783/2001 – Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. En este Real Decreto ya se recoge la necesidad de realizar estudios necesarios en actividades laborales en las que los trabajadores puedan estar expuestos a concentraciones de torón o radón en lugares como cuevas, minas o lugares de trabajos subterráneos [9].

Tras nueve años de este Real Decreto del año 2001 se publica una nueva modificación mediante el Real Decreto 783/2001 y cuyo contenido se limita a la nueva redacción de los artículos 4.2 y 62, en los cuáles se describía la no aplicación del reglamento en las situaciones de exposición al gas radón en las viviendas, ni a los niveles naturales de radiación [10].

El año 2012, el CSN³ publica la Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural cuyo objeto es establecer criterios radiológicos sobre los siguientes aspectos relacionados con la exposición a la radiación natural en lugares de trabajo.

El 8 de febrero de 2018, entra en vigor la Directiva Europea (2013/59/Euratom) del año 2013, la cual establece la normativa de seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes.

A día de hoy, dicha Directiva permanece pendiente de transposición en España, aunque su entrada en vigor ha impulsado el interés por el radón y ha originado el crecimiento constante de las medidas de seguridad en los centros de trabajo. Los empresarios correspondientes han de medir el nivel de radón en

³ Consejo de Seguridad Nuclear

centros de trabajo y edificios públicos que gestionan asegurando que el nivel medio anual de gas radón en el ambiente no supere los 300 Bq/m³.

Asimismo, se sigue esperando la aprobación de la sección HS6 del documento básico de salubridad del Código Técnico de la Edificación en el cual se incluye el radón como uno de los parámetros a tener en cuenta a la hora de edificar. Además, se espera la nueva instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, la cual aportará nuevos aspectos sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural [9].

2.3 Dispositivos de medida

2.3.1 ¿Cómo se detecta el gas radón?

Las mediciones de radón son relativamente sencillas y son de vital importancia para evaluar la concentración de gas radón en interiores de viviendas y edificios con el fin de no alcanzar niveles peligrosos para la salud de sus usuarios. A día de hoy, estas mediciones están basadas en directrices normalizadas, por lo que están estandarizadas. Como se señala en el apartado anterior, las concentraciones de gas radón varían en consecuencia de multitud de factores como el tipo de construcción, los hábitos de ventilación, la climatología o la estación del año y la hora del día. Por lo tanto, es necesario que la medición del gas se extienda a lo largo de un tiempo prolongado, a mayor tiempo mayor exactitud en la medición. Las mediciones poco duraderas nos proporcionan una aproximación de la concentración de radón.

La detección del gas radón se puede realizar mediante distintas técnicas activas o pasivas, dependiendo de si se utiliza o no aire forzado para captar la muestra del gas. En base a este criterio existen tres métodos para la detección:

- Métodos instantáneos: Con este método lo que se pretende es hacer estudios generales sobre el gas y se estudian las principales rutas que sigue el radón para penetrar en el interior de las viviendas.
- Métodos de lectura continua: Estas técnicas nos permiten monitorizar continuamente la evolución de la presencia de gas radón y comprobar la eficacia de las medidas correctivas.
- Métodos integrados: A través de este tipo de métodos se suelen estudiar las medidas tomadas después de 3 meses de implementación, comprobando así su idoneidad y el resultado obtenido.

Es fundamental que la medición del nivel de concentración de gas radón esté certificada, dado que de esta manera podremos acceder a las ayudas que existen en el Plan Estatal de Vivienda para reparar casas afectadas por el radón.

Hay diferentes dispositivos para poder medir de manera fiable y eficiente la concentración de gas radón en una vivienda, que en el apartado siguiente se describirán:

- Detector de pistas alfa.
- Detector de carbón activado.
- Cámara iónica de electreto.
- Dispositivo de integración electrónico.
- Monitor continuo de radón.

2.3.2 Tipos de detectores de gas radón

a. Detectores de pistas alfa

Un detector de pistas alfa consta de una pieza de sustrato plástico encerrado dentro de una cámara de difusión cubierta por un filtro que excluye la entrada de productos de desintegración del radón. Cuando las partículas alfa son generadas por radón o productos de

desintegración del radón cerca del material de detección, pueden golpear a éste, produciendo lo que se conoce como pistas alfa latentes, que son áreas microscópicas de daño. El grabado químico del plástico del detector aumenta el tamaño de las pistas alfa, haciéndolas observables por microscopia para que se puedan contar de manera automática o mediante un sistema de conteo automático. El número de pistas por unidad de superficie, es directamente proporcional a la concentración de radón.

Los detectores de pistas alfa se implementan generalmente durante un período de exposición que varía de 1 mes a 1 año. Los detectores alfa no se ven afectados por factores como la temperatura, la humedad o la radiación beta o gamma, pero las mediciones a altas altitudes requieren ajustes debido a la distinta densidad del aire que puede afectar a la distancia que pueden llegar las partículas alfa [11].



Figura 2-1: Detector de pistas CR-39 [12].

b. Detectores de adsorción de carbón activado

Un detector de adsorción de carbón activado es un dispositivo pasivo que se implementa durante una semana aproximadamente para medir el radón en espacios cerrados. El principio de detección es la adsorción de radón en los lugares activos del carbón activado. Tras el muestreo, el detector se sella y se pasa a equilibrar los productos de desintegración del radón con el radón recolectado. Después de una espera de 3 horas, los colectores se pueden contar directamente con rayos gamma o prepararse analíticamente para técnicas de recuento por centelleo líquido. El centelleo líquido es un proceso en el cual un líquido se mezcla para que se homogenice con la muestra y que al interaccionar con la radiación ionizante genera luz. [13]. En el método de recuento gamma, los botes de carbón contienen de 25 a 90 g de carbón activado. En el método de recuento alfa, se utilizan viales de centelleo líquido de 20 ml que contienen de 2 a 3 g de carbón activado. Los botes pueden ser abiertos o equipados con una barrera de difusión para extender el período de medición a 7 días. Las distintas respuestas de estos dispositivos se ven afectadas por la humedad, por lo que deben calibrarse dependiendo del grado de humedad que tenga el ambiente. También han de calibrarse para todas las duraciones de exposición y las temperaturas que resulten probables en las condiciones reales de uso. Como el carbón permite la adsorción y desadsorción continua de radón, el método solo proporciona una buena estimación de la concentración del radón si las variaciones de estos niveles de concentración son muy pequeñas. El uso de una barrera de difusión reduce los efectos de las corrientes de aire y humedad elevada. Debido a la corta semivida del gas radón, los detectores deben devolverse para su análisis lo antes posible tras el periodo de exposición. En algunos laboratorios, este plazo es de unos 8 días [11].

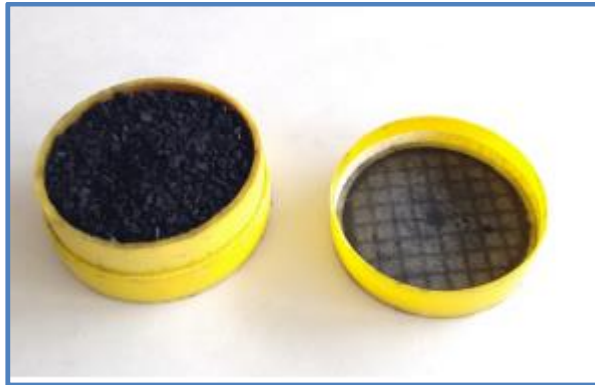


Figura 2-2: Imagen colector de carbón activo. Fuente [14]

c. Cámaras iónicas de electreto

Las cámaras iónicas de electreto son dispositivos pasivos que funcionan como detectores integradores para medir la concentración media de gas radón durante el periodo de medición. Consisten en una cámara de ionización en las cuáles los iones que se crean son colectados por un electreto. Un electreto es un material dieléctrico, normalmente teflón, que posee una carga eléctrica casi permanente [15]. El electreto funciona a la vez como generador de campo eléctrico y como sensor en la cámara iónica. El radón, penetra en la cámara por difusión pasiva a través de una entrada equipada con un filtro. La radiación emitida por el radón y sus productos de desintegración formados en el interior de la cámara ioniza el aire contenido en la cámara. La descarga del electreto, medida en voltios, se calcula mediante un lector de electreto que funciona sin contacto. A partir de este valor y de un factor de duración se obtiene el nivel de concentración de radón en unidades deseadas. Las cámaras típicas para periodos cortos están diseñadas para medir el radón durante periodos de 2 a 15 días en concentraciones de 150 Bq/m^3 . Y las cámaras iónicas de electreto para periodos largos miden el radón durante 3 a 12 meses.



Figura 2-3: Sistema E-PERM de medición de gas radón. Fuente: [16]

En la Figura 2-3, se puede observar un sistema E-PERM para la medición pasiva de gas radón. Se trata de un monitor pasivo basado en la cámara de ionización de electretos, el cual

realiza mediciones de gas radón en el ambiente con una precisión similar a los monitores electrónicos de radón [16].

d. Dispositivos de integración electrónicos

La mayoría de estos dispositivos llevan integrado un detector de silicio de estado sólido en el interior de una cámara de difusión para contar las partículas alfa emitidas por los productos de desintegración del radón. Al tener la cámara de difusión unas dimensiones reducidas, cuando las concentraciones de radón son moderadas, se necesitan tiempos de integración prolongados para obtener una lectura estable. Es posible lograr sensibilidades mayores simplemente aplicando una tensión elevada para recoger electrostáticamente los productos de desintegración cargados del radón por contacto directo con el detector. La medición se puede ver afectada por la humedad que haya en el ambiente.

e. Monitores continuos de radón

En el mercado se pueden encontrar distintos tipos de monitores continuos de radón, que emplean diferentes tipos de sensores. Estos sistemas recogen el aire que van a analizar mediante una pequeña bomba o dejando que se difunda hacia el interior de una cámara sensor. Todos los monitores continuos de radón cuentan con circuitos eléctricos que proporcionan un informe resumido y un registro con resolución temporal, lo cual permite calcular la concentración de radón para periodos específicos. Algunos de estos dispositivos permiten evitar la sensibilidad cruzada con la humedad del ambiente secando el aire de entrada. Además, requieren una calibración periódica para garantizar un funcionamiento correcto y unos resultados fiables.

Tecnología	Muestreo de aire	Técnica/método	Duración	Descripción
Detector de pistas alfa	Pasivo	Integrado	Tiempos de estudio largos (1 mes-1 año)	Basado en el recuento de pistas alfa (áreas microscópicas de daño) generadas por el golpeo del radón cercano al material
Detector de adsorción de carbón activado	Pasivo	Integrado	Periodos de estudio cortos (1 semana aproximadamente)	El principio de detección es la adsorción de radón en los lugares activos del carbón activado
Cámaras iónicas de electreto	Activos o pasivos	Integrado	Pueden estar diseñados para periodos cortos (2-15 días) o largos (3-12 meses)	Consiste en una cámara de ionización en la cual los iones que se crean son colectados por un electreto

Dispositivos de integración electrónicos	Pasivo	Integrado	A elevadas concentraciones, tiempos prolongados	Estos dispositivos llevan integrado un detector de silicio en estado sólido en el interior de una cámara de difusión para contar las partículas alfa emitidas por los productos de desintegración del radón
Métodos continuos de radón	Activo	Lectura continua	Duraciones específicas dependiendo el dispositivo	Recogen el aire que van a analizar mediante una pequeña bomba. Cuentan con circuitos eléctricos que proporcionan informes que permiten calcular la concentración del radón

Tabla 2-1: Tabla de las distintas tecnologías de detección de concentraciones de radón.

2.3.3 Medición de radón en otros medios

Como se ha visto en apartados anteriores, el radón puede penetrar en las viviendas a través del agua también, aunque en menor cantidad.

En los casos en que se sospeche de que existe un nivel considerable de concentración de radón en el agua potable, es conveniente tomar muestras del agua y analizarlas en un laboratorio acreditado. En la mayoría de los casos, cuando el agua que contiene radón procede de agua superficial, no supone un problema. La probabilidad de que exista radón en el agua aumenta si el agua procede de una fuente subterránea [17].

Entre las técnicas para la medición del radón en el agua figuran el recuento directo de radiación gamma, las cámaras iónicas de electreto y la transferencia de gas mediante membranas. El recuento por centelleo líquido y las técnicas de medición del radón mediante desemanación son los métodos más frecuentes para medir las concentraciones de radón en el agua [11].

2.4 Corrección o mitigación del gas radón

2.4.1 Medidas previas a la mitigación

Antes de llevar a cabo las medidas de corrección o mitigación del radón en las viviendas, es necesario realizar un estudio diagnóstico previo en función de los datos obtenidos por los distintos medidores del gas para determinar cuál será la medida correctiva idónea analizando distintos factores como las características del terreno, la tipología constructiva de la edificación, la viabilidad de las medidas, el coste económico, etc.

Lo primero es hacer una inspección visual del edificio teniendo los posibles puntos de entrada del radón ya comentados en este escrito anteriormente, las principales fuentes de despresurización existentes en la vivienda, los dispositivos de combustión que puedan emitir contaminantes al exterior o las posibles modificaciones que haya sufrido la vivienda a lo largo del tiempo.

Si existen sospechas de infiltraciones de gases del terreno generada por diferencia de presiones, se podrá usar humo químico, ampolla de polvo o un micro manómetro para comprobar la diferencia entre la presión del suelo o del exterior y la del interior de la vivienda.



Figura 2-4: Micro manómetro de presión diferencial ManoAir500-1 [18]

En caso de que se prevea la necesidad del uso de ventilación mecánica, puede resultar de ayuda hacer un test de estanqueidad del edificio para determinar la estanqueidad al aire de las paredes del edificio.

Un diagnóstico previo incorrecto puede dar lugar a la elección de medidas correctivas equivocadas que no provoquen el efecto de mitigación que esperamos o incluso que, poniéndonos en el peor de los casos, que se eleve el nivel de concentración de gas radón en la vivienda.

2.4.2 Tipos de medidas correctivas

Existen numerosas medidas correctivas o de mitigación para la eliminación del radón, tras haber hecho las mediciones del gas y en función del análisis previo, de la ubicación de la vivienda y de sus características. A la hora de mitigar el gas radón, muchas variables entran en juego, por lo tanto, no existe solo una solución concreta y no es posible garantizar la eficacia de la técnica utilizada.

Los distintos sistemas de mitigación han de cumplir una serie de requisitos como la capacidad de reducir la concentración de radón, ser funcional a lo largo de la vida útil del edificio en cuestión, permitir un control sencillo de funcionamiento, que sean seguros, silenciosos y discretos y presentar costes reducidos de instalación, funcionamiento y mantenimiento [17].

A continuación, se describirán los distintos tipos de medidas correctivas:

- Ventilación:
La ventilación se puede aplicar en el interior de la vivienda o cuando ésta cuente con forjado sanitario, en la cámara de aire existente bajo el mismo, es decir, en espacios habitables o en espacios no habitables. En ambos casos, además, puede ser natural o forzada.



Figura 2-5: Esquema de ventilación de radón [19].

En función del tipo de espacio, la ventilación será:

a) Ventilación en el interior de la vivienda:

La ventilación en la zona habitable de la vivienda es una técnica muy utilizada cuando las concentraciones de radón son bajas. El hecho de ventilar abriendo ventanas no suele ser suficiente para eliminar el gas por completo de la vivienda.

Es necesario alcanzar tasas de ventilación de entre 2 y 5 renovaciones de aire a la hora, para conseguir un ambiente saludable [20]. Por eso no solo basta con abrir ventanas y puertas, es necesario también instalar un sistema de ventilación forzada que consiga alcanzar estas tasas de ventilación de forma constante y duradera.

El uso de técnicas de ventilación forzada supone un aumento considerable en la renovación del aire interior para conseguir reducir los niveles de concentración del gas radón en la vivienda. Esto puede tener como consecuencia el aumento del coste energético para así poder mantener las condiciones de confort térmico.

Es importante tener en cuenta que cuando sólo se expulsa aire de la vivienda o el aire que entra en ella es insuficiente, puede generar una depresión en el interior de la vivienda que provoque la succión del radón proveniente del terreno y producir un aumento en los niveles de concentración de gas radón en el interior. Debido a esto, es muy importante controlar la relación de tasas de entrada y salida del gas.

b) Ventilación de la cámara de aire en forjados sanitarios:

La ventilación de los espacios no habitables existentes entre el suelo y el espacio habitado (Cámaras sanitarias, por ejemplo) puede reducir las concentraciones de radón en el suelo, y por consecuencia, al estar separado el interior del suelo, la concentración de la vivienda [11].

La ventilación se puede llevar a cabo a través de los muretes de apoyo, permitiendo la entrada de aire renovado desde los muretes opuestos, con la ayuda de un sistema de ventilación forzada. Esta ventilación, es capaz de conseguir reducir las diferencias de presión entre el suelo y el interior de la vivienda, consiguiendo de esta manera la reducción del radón existente en la vivienda.

Cuando la concentración de radón es muy elevada, conviene añadir un sistema de barrera a la ventilación forzada con el fin de conseguir una protección mayor.

- Sellado de grietas y fisuras:

El sellado de superficies se suele utilizar como un paso inicial para la mitigación. Ha de ir acompañada de otra medida correctiva complementaria.

El sellado de grietas suele hacerse con silicona acrílica, aunque a veces se usan otro tipo de materiales como morteros de cemento modificados con polímeros, cuando el tamaño de las grietas y fisuras es considerable.

Esta medida correctiva, como única estrategia de prevención, presenta un potencial limitado de reducción de radón, especialmente con el paso del tiempo debido a la dificultad de conseguir un sellado eficiente al no resultar fácil encontrar las distintas entradas como juntas, fisuras o encuentros, por la durabilidad del material sellado, por las dilataciones o por nuevas fisuras que se puedan generar a lo largo del tiempo.

- Barrera de protección anti-radón:



Figura 2-6: Esquema de barrera de protección anti-radón [19].

La barrera de protección anti-radón es una medida pasiva basada en la colocación de una lámina prefabricada o en la proyección de una membrana continua sobre la totalidad de las superficies de la vivienda en contacto con el terreno. Al igual que el sellado de fisuras y grietas, puede utilizarse también en conjunto con otra medida correctiva, aunque en este caso también se puede aplicar como única estrategia.

Estas barreras de protección son más eficaces en zonas de climas templados, donde las diferencias de presión son más pequeñas debido a las temperaturas.

Para que las membranas resulten efectivas, han de cumplir las siguientes características:

- Impermeabilidad frente al gas radón.
- Estanqueidad durante la obra y cuando se sometan a movimientos diferenciales.
- Altas resistencias mecánicas para evitar el punzonamiento, el desgarramiento y la tracción, para evitar fisuras durante su vida útil.

- Alta capacidad de elongación para absorber dilataciones.
- Compatibilidad química con los elementos de soporte.

En líneas generales, es muy complicado conseguir la estanqueidad total de las membranas. De hecho, si las membranas se perforan durante su colocación o uso, pueden conseguir el efecto contrario al deseado, recogiendo el radón del suelo y filtrándolo hacia la vivienda a través de las grietas o fisuras.

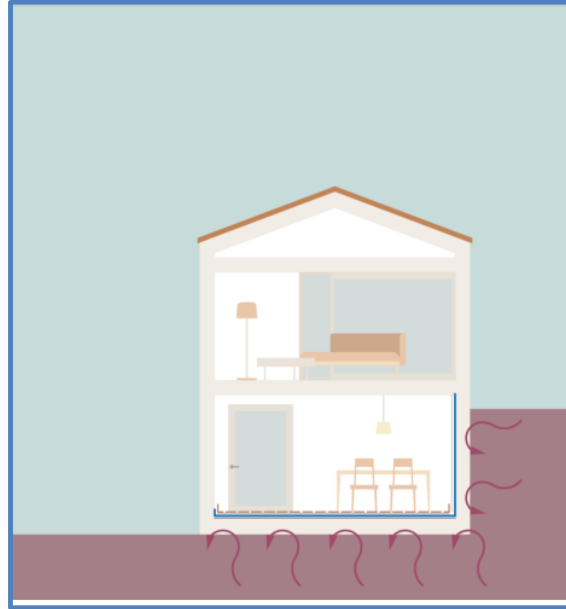


Figura 2-7: Barrera de protección anti-radón [17].

- Despresurización natural del terreno:

Los sistemas de despresurización del terreno se basan en la extracción del aire desde el área en la que se asienta el edificio. Su función es crear una vía de escape del radón del terreno reduciendo el flujo que se pueda filtrar en el interior de la vivienda.

Para llevar a cabo esta extracción será necesario un punto de captación en el terreno conectado a un conducto de evacuación del gas hacia el exterior que funciona por diferencia de presiones. A este método de despresurización también se le conoce como despresurización pasiva ya que no es necesario el accionamiento de un sistema para forzar la salida del gas. Cuando las concentraciones de radón sean excesivas y no se resulte suficiente el método pasivo, será necesario la instalación de un extractor mecánico.

Cuando la extracción del gas se produce de forma natural sin el uso de extractores, es fundamental para el correcto funcionamiento la permeabilidad del terreno. Los mejores resultados de extracción se producen cuando la permeabilidad del terreno es alta, ya que favorece el desplazamiento del radón entre los poros del mismo, alcanzando el punto de captación para llegar al conducto de extracción.

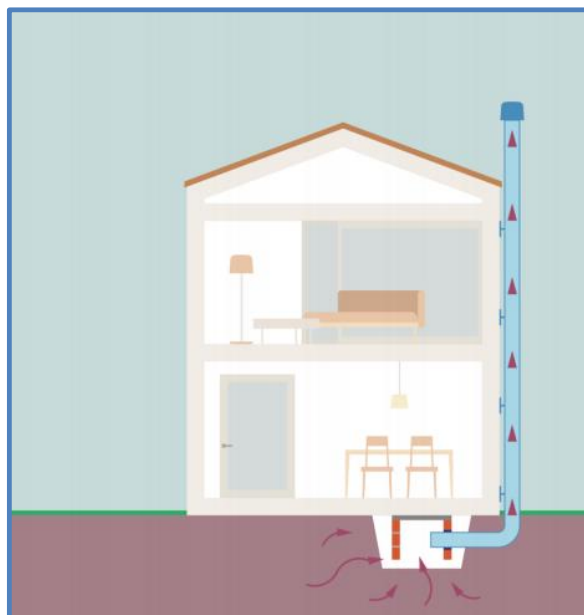


Figura 2-8: Despresurización natural del terreno [17].

- Despresurización activa del suelo (DAS):

La despresurización activa del suelo (DAS), también llamada extracción forzada, es la más indicada para viviendas ya que aporta una gran fiabilidad y eficacia en la reducción de niveles de radón. Es el método más utilizado por la mayoría de países.

El funcionamiento de estos sistemas es muy parecido al de los sistemas de despresurización natural, salvo que incorporan un extractor para forzar la evacuación del gas, consiguiendo de esta manera una mayor y constante succión desde el punto de captación.

Habitualmente, los sistemas de despresurización activa del suelo incluyen los siguientes componentes:

- Uno o más puntos de aspiración situados por debajo de la solera en contacto con el terreno o situado en el exterior de la vivienda.
- Un punto de salida ubicado de tal manera que se evite al máximo la probabilidad de exposición humana. Además, suele estar por encima de la cubierta más alta, para evitar también su entrada en la vivienda.
- Un ventilador en línea, de funcionamiento continuo, situado fuera y por encima del espacio acondicionado de la vivienda. Una diferencia importante de la DAS en viviendas existentes y de nueva construcción es que, en estas últimas, el uso de una capa permeable y un sistema de sellado permiten utilizar ventiladores más pequeños con mayor eficiencia energética [11].
- También puede utilizarse un manómetro de tubo en forma de U como indicador del sistema para comprobar el desempeño, por ejemplo, midiendo las diferencias de presión en el tubo de ventilación.
- Marcaje del sistema en todos los niveles accesibles, para evitar su confusión con la red de tuberías de agua.

Se pueden utilizar distintos modelos de puntos de captación:

- Una oquedad en el terreno, conectada a un tubo de evacuación que extrae el radón.
- Arqueta de captación “in situ”, con orificios en las paredes, normalmente hecha con ladrillo perforado.
- Arqueta prefabricada para captación de radón.

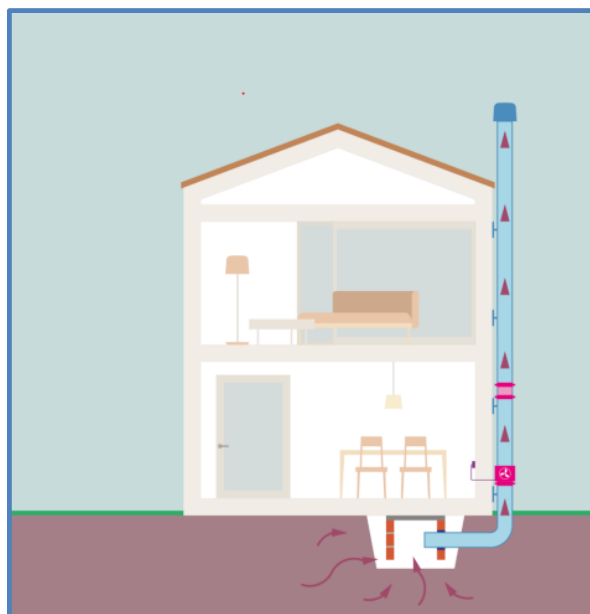


Figura 2-9: Despresurización activa del terreno (DAS) [17].

Hasta ahora, se han descrito las generalidades del gas radón y de los problemas que éste genera a día de hoy a las personas, se han clasificado los distintos dispositivos y sistemas de medición de radón y de las medidas correctivas y de mitigación para eliminar o reducir el gas radón en las viviendas.

El objetivo de este trabajo es realizar una herramienta de monitorización y control del gas radón, por lo tanto, en el siguiente subapartado se tratará de explicar un concepto básico para el control y la gestión remota de datos y la conexión entre diferentes dispositivos, el Internet de las Cosas.

2.5 El Internet de las Cosas

2.5.1 ¿Qué es? ¿Cuándo surge?

Vivimos en un mundo interconectado. Desde hace tiempo, el término de Internet de las cosas o *IoT* en su versión inglesa (*Internet of Things*) está muy presente en nuestras vidas y no son pocos los fabricantes que hoy en día lanzan al mercado dispositivos basados en el Internet de las Cosas u orientados a ello [21]. Pero, ¿qué es el Internet de las cosas? ¿y por qué se llama así?

Este concepto de Internet de las Cosas consiste en la agrupación e interconexión de los dispositivos y objetos a través de una red (Internet), dónde todos ellos podrían ser visibles e interaccionar entre ellos. Es decir, básicamente consiste en que tanto personas como objetos pueden conectarse a Internet en cualquier momento y lugar en el que se encuentren [22]. Respecto al tipo de objetos o dispositivos, podrían ser cualquiera. Ya no solo se conectan entre sí los teléfonos móviles, televisores inteligentes u ordenadores. Desde sensores y dispositivos mecánicos hasta objetos cotidianos como pueden ser la puerta de una casa, el frigorífico o incluso el calzado o la ropa. Cualquier cosa que se pueda imaginar podría ser conectada a Internet e interaccionar sin necesidad de la intervención humana.

Por lo tanto, una vez que ya sabemos qué es el Internet de las Cosas, se puede intuir el porqué de su denominación. Cualquier “cosa” (objeto) puede comunicarse con otros conectándose a Internet. Por ejemplo, la conexión entre un Smartphone y los distintos dispositivos “smart” que hay en una casa para controlar la iluminación o el aire acondicionado o un robot aspirador que se configure desde un teléfono móvil para que limpie una casa automáticamente.

-Dispositivos de gestión: Aquí se agrupan todas aquellas máquinas o dispositivos cuya labor es la de gestionar datos.

-Dispositivos M2M: Son aquellos dispositivos que se conectan de forma remota a cualquier máquina, recogen la información y se mantiene en comunicación con el servidor. En ocasiones también tienen la capacidad para procesar información individualmente.

-Servidor: Es aquel sistema que envía y recibe dicha información de las máquinas y a su vez hace una gestión eficiente de ella.

-Red de comunicación: Es el medio físico mediante el cual viaja la información. Puede ser de dos tipos: cableado o inalámbrico. El método inalámbrico es el más habitual entre ambos puesto que no tiene mucho sentido implementar Internet de las Cosas para posteriormente comunicarse mediante cable, a no ser que sea un dispositivo muy específico [25].

3 DESARROLLO DEL TFG

Tras haber tratado en el estado del arte las generalidades del gas radón, las distintas técnicas y sistemas de medición y de mitigación del mismo y hacer una introducción acerca del Internet de las Cosas, en este apartado se describe de forma resumida las distintas herramientas que han sido necesarias a la hora de realizar el trabajo. También se explica la metodología empleada para elaborar la herramienta *IoT* de bajo coste, de monitorización y control del gas radón en espacios cerrados.

3.1 Herramientas empleadas

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario utilizar el material, software y aplicaciones que a continuación se describen:

3.1.1 Radoneye RD200

El Radoneye RD200 es un detector de radón de origen coreano e inteligente para uso en viviendas cuya máxima sensibilidad es de 10000 Bq/m^3 , entre 20 y 30 veces más que un detector convencional, gracias a la tecnología de circuito de alta estabilidad de *FTLAB (Future Technology Laboratory)*.



Figura 3-1: Sensor RadonEye RD200.

El primer dato de confianza que recoge el sensor (Figura 3-2) llega a la hora de ser iniciado aproximadamente. La especificación de precisión fue aprobada por el *KTL (Korea Testing Laboratory)* administrado por Corea.

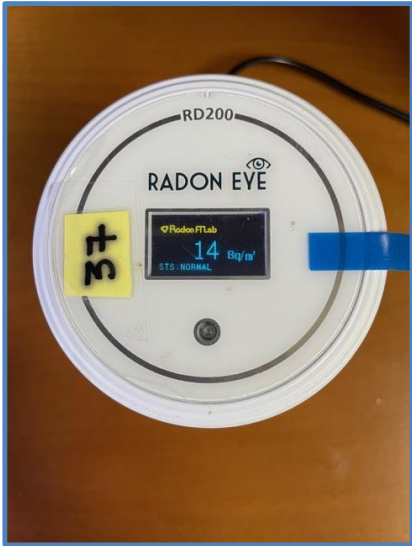


Figura 3-2: Sensor RadonEye RD200.

En cuanto a las principales características del RD200 cabe destacar:

- Conexión bluetooth con *Smart phone*.
- El microprocesador instalado asegura un excelente rendimiento y precisión.
- Individualmente calibrado.
- Primer dato de confianza: 1 hora aproximadamente.
- Intervalo de recogida de datos: actualización de 10 minutos.
- Rango operativo de temperatura y humedad: 10°C-40°C/ Humedad relativa <90%.
- Consumo de potencia: DC 12V, 65mA [26].

En la Tabla 3-1 se puede ver una comparativa de las características, rendimiento y precio del sensor RD200 con distintos sensores del mercado.

Sensor	Pro3	Canary	Canary Pro	Sun nuclear 1028	RAD7	Alpha Guard	CRM510	RadonEye
								
Origen	USA	Noruega	Noruega	USA	USA	Alemania	Canadá	Corea
Sensibilidad (cpm/ 1000Bq/m³)				1.35	13.5	50	8.1	13.5

Tiempo mínimo midiendo(h)	48	24	1	10	0,5	0,2	1	1
Registra datos	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Precio en euros	125	165	1080	990	7895	8140	1200	220

Tabla 3-1: Comparación de RadonEye RD200 con sensores del mercado. Autoría propia.

Como se puede observar en la tabla, el RadonEye RD200 es uno de los detectores de radón de uso casero de mayor calidad y confianza en relación calidad-precio de las distintas opciones que se ofrecen en el mercado.

3.1.2 Raspberry Pi 3 Modelo B

La Raspberry Pi es un ordenador de bajo coste y tamaño reducido, que al ser conectada a un monitor, un teclado y un ratón, actúa igual que cualquier otra computadora [27].

Realmente la Raspberry Pi es simplemente una placa base en el que se aloja un chip con procesador de hasta 1 GHz de velocidad y 1GB de memoria RAM [28] y periféricos de entrada-salida (ethernet, USB, etc.). En cuanto al precio, normalmente no asciende de los 40 euros, de ahí su gran popularidad entre los que se inician en la programación.

En la Figura 3-3 se observan gráficamente los principales componentes, entradas y salidas de una Raspberry Pi 3.

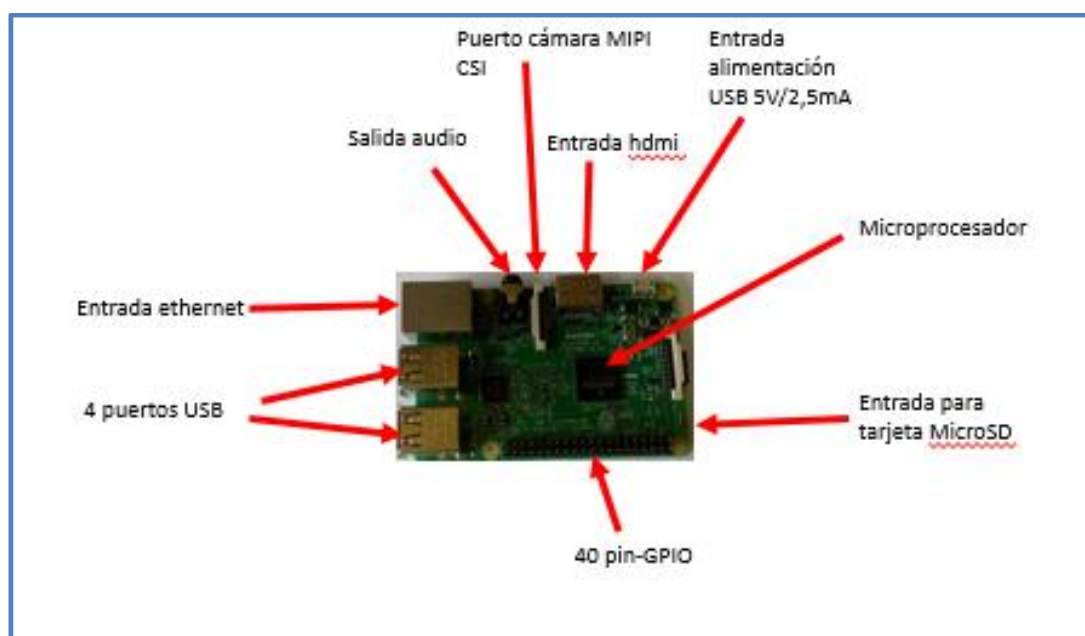


Figura 3-3: Principales componentes de una Raspberry Pi.

Para el desarrollo del presente trabajo se ha empleado la tercera versión de la Raspberry Pi, modelo B. Esta versión sucedió a la Raspberry Pi 2 modelo B en febrero de 2016 [29]. A priori, parece idéntica a las versiones anteriores, pero la Raspberry Pi 3 posee un nuevo procesador, mucho más rápido y con mayor capacidad de procesamiento. Adicionalmente, incorpora el chip BCM43143 que le proporciona

conectividad Wifi y Bluetooth de bajo consumo y cuenta con administración de energía mejorada que permite trabajar con más dispositivos USB externos al mismo tiempo [30].

Por todas estas características, la Raspberry Pi 3 ha sido elegida para la elaboración de este trabajo, puesto que es un ordenador de bajo consumo ideal para la elaboración de proyectos. En ella, se puede navegar por internet igual que con cualquier otro ordenador o programar en Python y otros lenguajes de programación de manera sencilla y con un gran apoyo de la comunidad de desarrolladores.

3.1.3 Sistema operativo Raspbian

Raspbian es un sistema operativo gratuito basado en Debian, una distribución de software libre para sistemas de ordenadores con diferentes arquitecturas de hardware. Raspbian ha sido el sistema operativo elegido para la elaboración de este trabajo puesto que está optimizado para el hardware de una Raspberry. Además, ofrece más que un sistema operativo puro, viene con más de 35000 paquetes, software precompilado incluido en un formato agradable para una fácil instalación en Raspberry Pi. En la Figura 3-4 vemos en la parte izquierda los símbolos de Raspberry Pi y Debian respectivamente, los cuales forman la suma imprescindible a la hora de desarrollar el sistema operativo Raspbian.

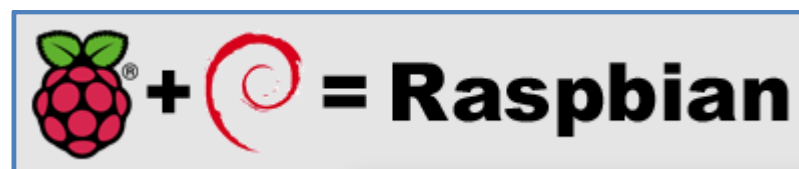


Figura 3-4: Sistema operativo Raspbian [31].

Adicionalmente, a la hora de instalar Raspbian en la Raspberry Pi, se presentan tres opciones diferentes para que cada usuario pueda elegir la que mejor se adapte a sus necesidades.

Por un lado, se puede instalar la edición más completa que incluye el escritorio, programas recomendados y una gran cantidad de software recomendado. Con esta edición de Raspbian, se incluye todo desde el primer momento que se pone en marcha. Obviamente, es la que más memoria ocupa.

Por otro lado, está la versión que contiene el escritorio y los programas más básicos, sin software recomendado habitual.

Y, por último, la versión “*Lite*”. Esta es la imagen mínima basada en Debian, ocupa solo 400MB e incorpora lo justo para que arranque el dispositivo, es el usuario el que tiene que descargar programas necesarios. No trae interfaz gráfica, por lo que requiere mayor conocimiento por parte del usuario.

De entre todas estas versiones, se escoge la que contiene escritorio y los programas básicos. Esta versión no ocupa tanta memoria como la completa, solo 1,1 GB, además es más sencilla y el usuario instala lo que necesite. Puesto que para la elaboración de la herramienta que en este documento se presenta no es necesario el uso de softwares y programas avanzados, esta es la versión más conveniente y cómoda ya que incluye también escritorio, lo cual ayuda a un manejo más sencillo.

3.1.4 Python

Python es el lenguaje de programación utilizado a la hora de desarrollar la herramienta que se presenta en este trabajo. Es un lenguaje independiente de la plataforma y orientado a objetos, preparado para hacer cualquier tipo de programa. Es un lenguaje interpretado, por lo tanto, no es necesario compilar el código fuente para poder ser ejecutado [32]. Esto, ofrece ventajas como la rapidez del desarrollo e inconvenientes como una menor velocidad a la hora de realizar cálculos muy pesados.

Entre las razones a destacar a la hora de la elección del lenguaje Python para la realización de la herramienta, cabe destacar que es totalmente gratuito y que se puede instalar prácticamente en cualquier

plataforma, además de una mayor sencillez y velocidad que otros lenguajes como Java o C a la hora de elaborar los códigos.

Adicionalmente, sus aplicaciones no se limitan a un ámbito en concreto y cuenta con un gran respaldo por parte de una enorme comunidad [33]. Esto es debido a que su carácter gratuito hace que continuamente se estén desarrollando nuevas librerías y aplicaciones.

3.1.5 Node-RED

Node-RED es la herramienta de programación usada a la hora de establecer la interconexión entre el sensor RadonEye RD200 y la base de datos, la cual se describe en el siguiente apartado. Node-RED proporciona un editor de flujo basado en navegador que facilita la conexión de flujos utilizando una amplia gama de nodos [34].

Básicamente, se trata de una herramienta de programación visual que permiten al usuario programar sin tener que escribir ningún tipo de lenguaje. Muestra visualmente las relaciones y funciones y se pueden añadir o eliminar nodos y conectarlos entre sí con el fin de hacer que se comuniquen entre ellos [35].

El tiempo de ejecución se basa en Node.js, aprovechando al máximo su modelo sin bloqueo impulsado por eventos. Esto hace que sea ideal para ejecutarse en hardware de bajo coste como Raspberry Pi.

3.1.6 Base de datos InfluxDB

InfluxDB es un sistema de gestión de bases de datos. Es un software de código abierto y se puede usar de forma gratuita.

A la hora de recoger los datos medidos por el sensor, que se generan en poco tiempo y junto a su marca temporal, se requiere unas bases de datos para gestionarlos. InfluxDB ha sido concebido para bases de datos de time series (TSDB), que almacenan series temporales de datos. Y, estas bases de datos, se usan, entre otras cosas, para almacenar y evaluar datos recogidos por un sensor o protocolos con marcas temporales durante un período de tiempo preestablecido [36].

Todos estos factores comentados, hacen de InfluxDB una herramienta ideal a la hora de recoger miles de datos, como los que proporcionan equipos del Internet de las cosas, como el sensor RadonEye RD200. Estos datos se procesan rápidamente en cuanto llegan a la base de datos. Por ello, InfluxDB cuenta con un servicio de tiempo real que usa el *Network Time Protocol (NTP)* para garantizar que el tiempo está sincronizado con todos los sistemas [37].

En las bases de datos de InfluxDB se guardan obviamente todos los datos recogidos, pero también la fuente de los datos y la marca temporal correspondiente a dicho valor.

3.1.7 Grafana

El software libre Grafana es la herramienta escogida para mostrar los datos recogidos por el sensor para su posterior análisis.



Figura 3-5: Grafana [38].

Grafana es una herramienta para visualizar datos de series temporales. A partir de una serie de datos recolectados de forma temporal, se obtiene un gráfico de la situación muy sencillo de interpretar y visualizar. Los gráficos de los que se disponen son rápidos y flexibles, con numerosas opciones. Se pone a la disposición del usuario paneles dinámicos y reutilizables para poder modificar distintos aspectos de las gráficas [39].

Una de las principales ventajas de Grafana es que dispone de una versión gratuita, versiones *Enterprise* y versiones en la nube. Además, Grafana puede recopilar de forma nativa datos de InfluxDB.

Por lo tanto, Grafana es una herramienta que se adecúa de forma perfecta a la monitorización de las mediciones del gas radón, ya que proporciona directamente gráficas de fácil visualización y sencillo manejo, para posteriormente ser analizadas y obtener unos resultados, sin la necesidad de recoger datos y elaborar gráficas de manera manual.

3.2 Elaboración de la herramienta *IoT* de monitorización de radón.

A lo largo de este apartado, se describe la metodología aplicada a la hora de elaborar la herramienta de monitorización de gas radón, previo paso a comenzar la fase experimental y del uso de medidas correctivas mediante la automatización de la ventilación. Se comienza haciendo un resumen global de las comunicaciones y conexiones establecidas para elaborar la herramienta y posteriormente se explica de manera escalonada, los pasos necesarios a seguir para implantar dichas configuraciones, interconexiones y automatizaciones.

3.2.1 Comunicaciones de la herramienta de monitorización.

Antes de explicar los pasos y métodos realizados para elaborar la herramienta, este apartado trata de dar una visión general del sistema de conexiones y comunicaciones entre dispositivos, programas y aplicaciones que se tienen que establecer para el correcto funcionamiento de la herramienta.

En la Figura 3-6, se observa un esquema gráfico de las comunicaciones de la herramienta de monitorización, con los principales componentes: sensor, Raspberry Pi, el *Broker* de MQTT *Mosquitto*, Node-Red, la base de datos InfluxDB y por último el visor gráfico Grafana.

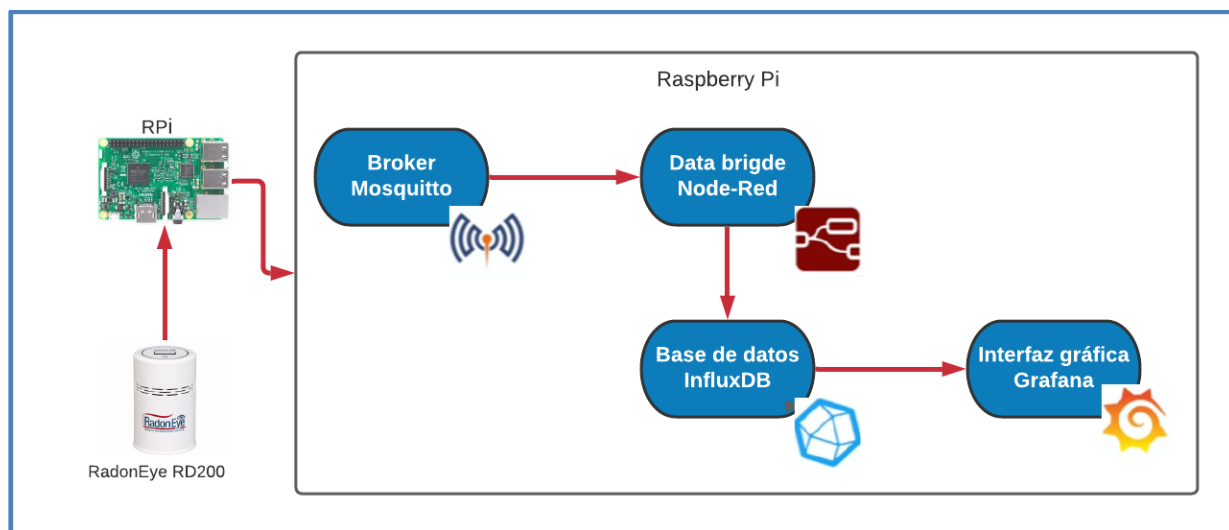


Figura 3-6: Esquema general de las comunicaciones de la herramienta de monitorización de radón.

El funcionamiento general del sistema es el siguiente:

- El sensor RadonEye RD200 toma medidas de radón durante el tiempo que se estime necesario en un espacio cerrado para poder hacer un análisis fiable. Estos datos de radón, se insertan en la Raspberry Pi por conexión Bluetooth, enlazando dichos dispositivos.
- Una vez que ya se tienen los datos del gas en la Raspberry Pi, estos tienen que ser enviados a la base de datos InfluxDB. Esta comunicación se consigue mediante el protocolo MQTT y el uso de un *topic* particular para hacer entrega del mensaje al cliente correcto.
- Se hace uso de la herramienta Node-Red para enlazar y direccionar la recepción del mensaje con la base de datos InfluxDB. Con la herramienta Node-Red se puede observar el flujo entre los nodos conectados y añadir o eliminar nodos si fuese necesario.
- Con la inserción de los datos en InfluxDB, ya se tienen las medidas registradas por el sensor almacenadas en la base de datos, listas para poder ser graficadas y posteriormente analizadas.
- Por último, como se puede observar en el último nodo de la Figura 3-6, se enlaza la base de datos con Grafana. Con este último paso, el proceso ya está automatizado desde que el sensor recoge los datos hasta que se van añadiendo a la gráfica con su correspondiente unidad y hora a la que fueron medidos, en Grafana.

Como se ha explicado, este es el funcionamiento de los distintos niveles de la herramienta de monitorización de gas radón de forma básica y resumida. En los siguientes apartados, se explica con más detalle la función que tiene cada nivel, las configuraciones, programaciones y distintos procesos que se han requerido para llevar a cabo la elaboración de la herramienta.

3.2.2 Instalación de SO Raspbian y configuración inicial de la Raspberry Pi

El primer paso previo a comenzar a trabajar con Raspberry Pi, es la instalación de un sistema operativo para poder darle uso. Como se ha descrito anteriormente, el sistema operativo elegido para trabajar con la Raspberry Pi es Raspbian.

Para ello simplemente se accede a la página oficial de Raspberry Pi y se descarga. Como se observa en la Figura 3-7, Raspberry Pi nos ofrece su descarga para Windows, para macOS y para Ubuntu. Al estar trabajando en Windows, se decide su descarga para este sistema operativo.

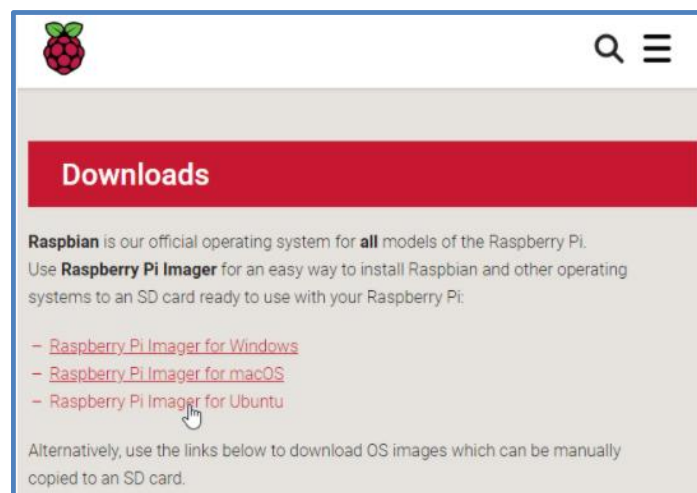


Figura 3-7: Opciones de descarga de Raspbian [30].

Una vez seleccionada la descarga para Windows se ofrecen las tres versiones de Raspbian comentadas anteriormente (3.1.3). De entre ellas se escoge la versión que ofrece los programas básicos y escritorio debido a su fácil manejo y la poca memoria que ocupa, entre otros factores.

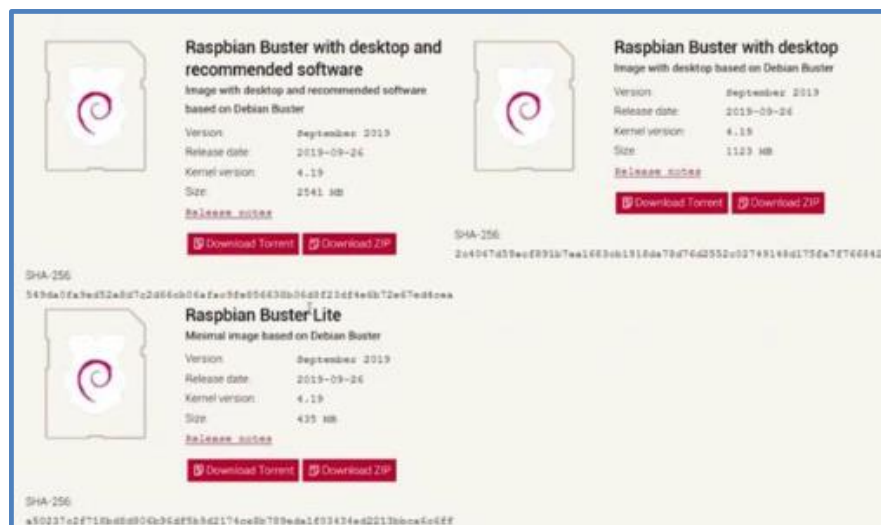


Figura 3-8: Descarga de Raspbian con escritorio [29].

Como se puede observar en la Figura 3-8, se tiene la versión con escritorio en la parte superior derecha (*Raspbian with desktop*). Se descarga el ZIP y por último se tiene que proceder a su instalación en la tarjeta microSD que se utiliza en la Raspberry Pi. Para este último paso, se utiliza *balenaEtcher*, una herramienta cuya función es precisamente esa.

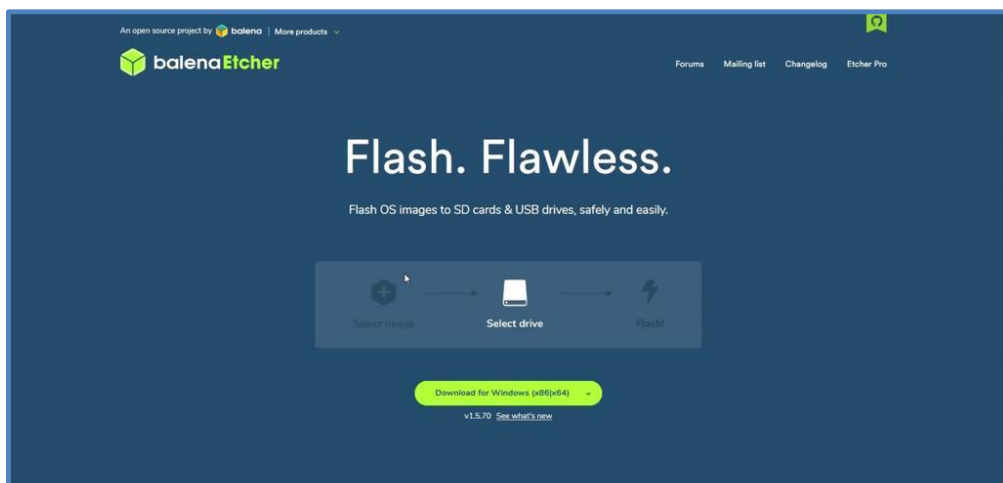


Figura 3-9: balenaEtcher [42].

Con tres pasos sencillos se instala el sistema operativo en la tarjeta SD. Se elige la carpeta ZIP con el sistema operativo, se selecciona la tarjeta microSD y se instala en un escaso tiempo. Una vez instalado el sistema operativo en la tarjeta microSD, se procede a la configuración inicial de la Raspberry Pi.

Lo primero es conectar los distintos cables y periféricos a la Raspberry Pi, mencionados en el apartado 3.1.2, fuente de alimentación, cable ethernet de conexión, cable hdmi y periféricos de teclado y ratón, además de insertar la tarjeta microSD.

En segundo lugar, la Raspberry Pi se enciende automáticamente al conectarlo a la corriente. Una vez ya se enciende, se procede a la configuración inicial. En unos simples pasos se configura el idioma y la zona horaria, si se necesita conexión Wifi (en este caso ya está conectado por cable ethernet) y una actualización del sistema.

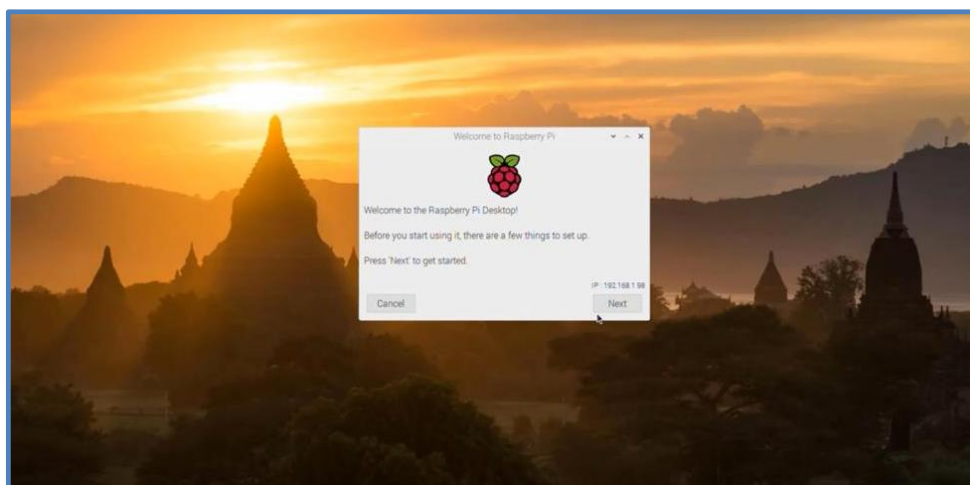


Figura 3-10: Mensaje de bienvenida a Raspberry Pi Desktop. Autoría propia.

Se selecciona el idioma español y la zona horaria de Madrid.

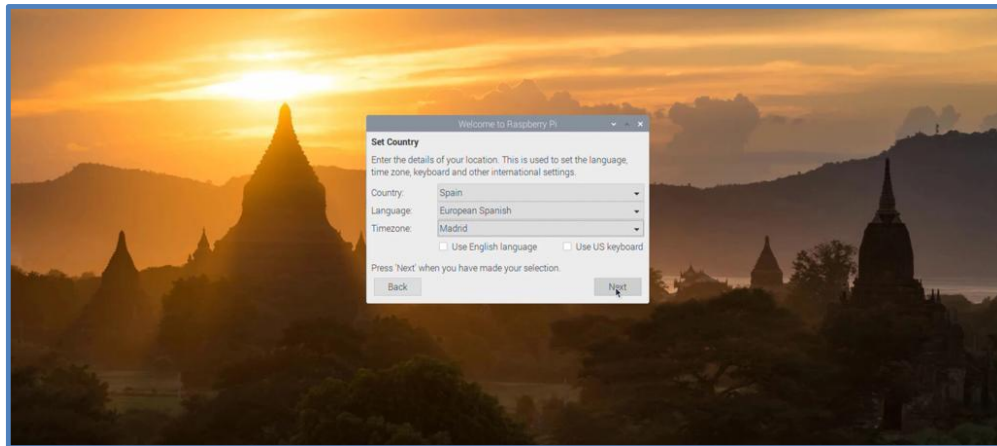


Figura 3-11: Configuración de idioma y zona horaria. Autoría propia.

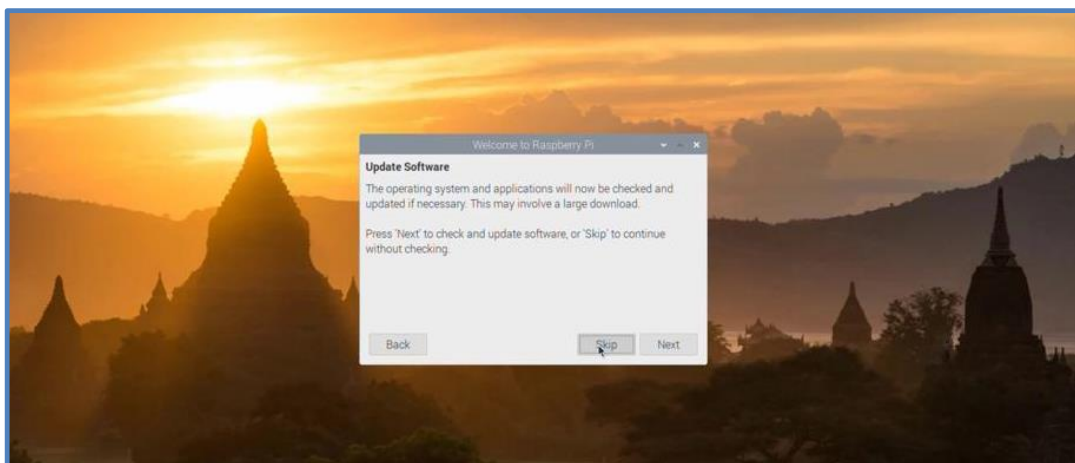


Figura 3-12: Actualización del software. Autoría propia.

Por último, se realiza la actualización del sistema (Figura 3-12) y la Raspberry Pi con el sistema operativo Raspbian está lista para el usuario.

3.2.3 Conexión Bluetooth entre Raspberry Pi y RadonEye RD200. Radonreader

Una vez encendida la Raspberry Pi con el sistema operativo, hay que establecer la conexión entre el sensor de radón RadonEye RD200 y la Raspberry Pi. En este apartado, se explica el proceso seguido para establecer dicha conexión.

Como se explicó en el apartado 3.1.1, el sensor RadonEye tiene asociada una aplicación para teléfono móvil. La conexión entre sensor y teléfono móvil se establece por Bluetooth. Pero la aplicación, recoge el primer dato a la hora de encender el sensor. A partir de ese momento transmite datos medidos cada hora, haciendo la media de los valores recogidos cada diez minutos. Además, como la conexión entre sensor y teléfono móvil es Bluetooth, no permite al usuario estar lejos del sensor si quiere recoger datos, debido a la cobertura bluetooth.

Por lo tanto, la conexión Bluetooth no será entre sensor y teléfono móvil, sino que será entre el sensor y Raspberry Pi. Para establecer dicha conexión, es necesario el uso de Python.

Como paso previo e imprescindible, se descarga la librería de *bluepy* para disponer de los recursos necesarios para ejecutar el *script*. Se instala la librería con *sudo pip install bluepy*. Tras descargar la librería, ya se podría establecer la conexión, con la herramienta *Radonreader*. *Radonreader* es la herramienta que permite a los usuarios recopilar los datos de radón del sensor RadonEye RD200. Para

el uso de *Radonreader* solo se requiere del sensor RadonEye RD200, la Raspberry Pi y compatibilidad con Bluetooth. El código de la herramienta *Radonreader* se puede visualizar en el anexo 1 y fue descargado gracias a la fuente de Internet *github.com* [40]. Este código se guarda como fichero *radonreader.py*.

Una vez que se tiene la librería y el *script*, se ejecuta el código en el terminal con *python -a* más la dirección Bluetooth del dispositivo. Con el argumento *-a* (del inglés *adress*), se conecta con la dirección Bluetooth que posteriormente se escribe. Además, como argumento opcional, se puede añadir tras la dirección bluetooth, *-b*, para obtener el valor de radón en Becquerelios por metro cúbico. Cuando se ejecuta el script se recibe en pantalla un mensaje con el valor del radón con la hora de medición del dato.

```
pi@raspberrypi:~/TF005/radonreader-master $ python radon_reader.py -a E2:DF:71:FB:D1:CD -b  
2021-03-03 [22:22:56] - E2:DF:71:FB:D1:CD - Radon Value: 426.98 Bq/m^3
```

Figura 3-13: Ejecución de *radonreader.py* para obtener valor de radón.

Después de este proceso, ya se tiene el valor del radón insertado en la Raspberry Pi, pero tiene que ser subido la base de datos para poder ser procesado y almacenado. Se utilizará un protocolo de envío y recepción de mensajes denominado MQTT, que se explica en el siguiente apartado.

3.2.4 Comunicación mediante protocolo MQTT. Broker Mosquitto.

Teniendo el dato de la concentración de radón en la Raspberry Pi, el siguiente paso es realizar su envío a la base de datos con el protocolo MQTT (*Message Queing Telemetry Transport*), un protocolo *IoT* de comunicación del tipo “M2M” [41]. Es un servicio de mensajería “pub-sub” (publicador/suscriptor).

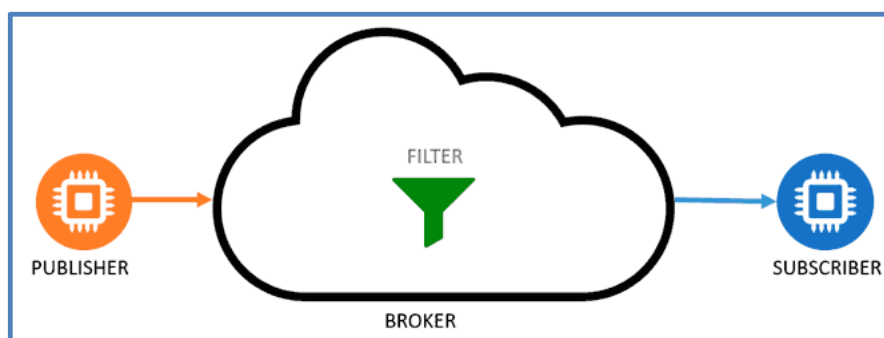


Figura 3-14: Funcionamiento protocolo MQTT [42].

En la Figura 3-14 se observa el esquema del funcionamiento del protocolo MQTT. En la parte central se encuentra el *broker*. El *broker* es el programa que se encarga de recibir los mensajes por los clientes, los filtra y los distribuye en base al sistema pub-sub. Existe una gran variedad de *brokers* MQTT disponibles, cada uno tiene sus características, ventajas y desventajas. Es importante elegir el *broker* correcto para el proyecto a realizar, ya que éste condiciona el correcto funcionamiento y éxito del mismo.

Para elaborar la herramienta que en este documento se presenta el *broker* elegido ha sido el que probablemente sea más conocido, el *broker Mosquitto*. Se trata de un *broker* de código abierto multiplataforma programado en C. Es un *broker* adecuado para servidores de baja potencia.

Otro componente fundamental son los denominados *topics*. Como se ha explicado anteriormente, los *brokers* MQTT aplican un filtro a los mensajes que son recibidos desde los publicadores, para decidir a que clientes suscritos son enviados. Estos filtros son conocidos como *topics* en MQTT. Simplemente consisten en una cadena de texto y están formados por uno o más niveles separados entre sí por una barra inclinada (“/”).

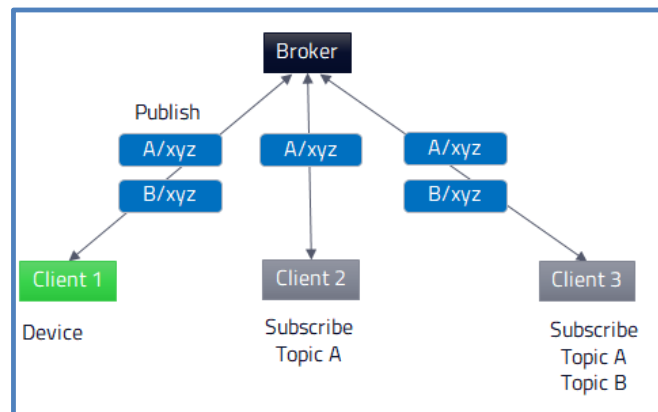


Figura 3-15: Sistema de funcionamiento *topics* MQTT [45]

La Figura 3-15 es un esquema del funcionamiento de los *topics* MQTT. Es un funcionamiento sencillo de intuir y aplicar. Cada cliente recibirá los mensajes desde el *broker* según a que *topic* esté suscrito. El nombre del *topic* puede ser cualquiera.

En el caso de esta herramienta, el *topic* elegido es el siguiente: TFG05/1/radoneye. Al publicar el mensaje del dato de concentración de radón, éste se escribe indicando el *topic* anteriormente mencionado. El mensaje con el *topic* llega al *broker*, que encuentra las suscripciones que cumplan con el filtro del *topic* y transmite el mensaje a los clientes suscritos.

Para ejecutar el código y enviar el dato vía MQTT es necesario, además de los argumentos *-a* y *-b* es necesario añadir los siguientes argumentos:

- *-v*: modo *verbose*.
- *-m*: Para habilitar la salida de envío MQTT.
- *-ms*: Para elegir la dirección IP asociada. En este caso 197.146.212.7.
- *-mp*: En este caso se escoge el puerto de servicio de MQTT (1880).
- *-mu*: Con el nombre de usuario del servicio MQTT.
- *-mp*: Con la contraseña asociada a dicho nombre de usuario.

```

pi@raspberrypi:~/TFG05/radonreader-master $ python radon_reader.py -a E2:DF:71:FB:D1:CD -b -v -m -ms 193.146.212.7 -mp 1880 -mu tfg_IoT_CUD -mw DUC_ToI_gft
Connecting...
Writing...
Reading...
2021-03-03 [22:23:47] - E2:DF:71:FB:D1:CD - Radon Value: 392.20 Bq/m^3
Sending to MQTT...
MQTT Server: 193.146.212.7 | Port: 1880 | Username: tfg_IoT_CUD | Password: DUC_ToI_gft | Output: EmonCMS
OK
  
```

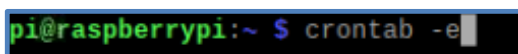
Figura 3-16: Código de envío MQTT.

En la Figura 3-16 se muestra el momento en el que se ejecuta el código con los argumentos mencionados, recibiendo como respuesta el valor de la concentración de radón con la hora a la que fue medido y también con los datos del servidor MQTT, con un aprobado cuando termina el proceso.

Una vez que se ha llegado a este punto, cabe destacar que es necesario ejecutar el código cada vez que se quiera enviar un dato de la concentración de radón en ese preciso instante. Esto haría que la herramienta no fuese efectiva ya que no se automatiza el proceso desde la medición del radón hasta que dicho dato se introduce en la gráfica.

Para poder generar una frecuencia de envío de los mensajes a la base de datos es necesario el uso del comando *crontab*. Con este comando, se consigue enviar los mensajes a intervalos regulares que el propio usuario elige de manera sencilla. Los pasos que se han seguido son los siguientes:

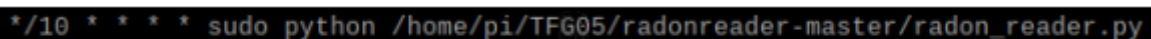
- Lo primero es cambiar el editor para usar el que queremos utilizar. Se teclea *export EDITOR="nano"*. En este caso se usa "nano" pero podría utilizarse otro cualquiera.
- Para poder editar el *crontab* se escribe *crontab -e*, que permite acceder al fichero de *crontab*.



```
pi@raspberrypi:~ $ crontab -e
```

Figura 3-17: Editor de *crontab*

- Ya en el fichero de *crontab*, se comienza a editar la frecuencia con la que se quiere ejecutar el código.



```
* /10 * * * * sudo python /home/pi/TFG05/radonreader-master/radon_reader.py
```

Figura 3-18: Comando *crontab*.

- Como se demuestra en la Figura 3-18, con una simple línea en *crontab* se consigue establecer la frecuencia deseada. Con **/10* se establecen los minutos (cada diez minutos). Los demás "*" establecen las horas, los días y los meses. En este caso es todas las horas, todos los días y todos los meses.
- Finalmente, se escribe a la derecha el comando que se quiere ejecutar. En este caso *sudo python* y el fichero donde se encuentra el código.

Debido a que el sensor RadonEye RD200 toma medidas de concentración de radón cada diez minutos, sería improductivo establecer una frecuencia menor a este tiempo. Por consiguiente, se decide establecer la frecuencia en diez minutos, para graficar y analizar los niveles de concentración de radón una manera más precisa ya que la fluctuación de esta concentración es continua en espacios cerrados.

3.2.5 Enlace de nodos en Node-Red e inserción de la medida en base datos InfluxDB.

Con el fin de direccionar los mensajes con los datos de concentración de radón usando el protocolo MQTT hacia la base de datos, se hace uso de la herramienta Node-Red.

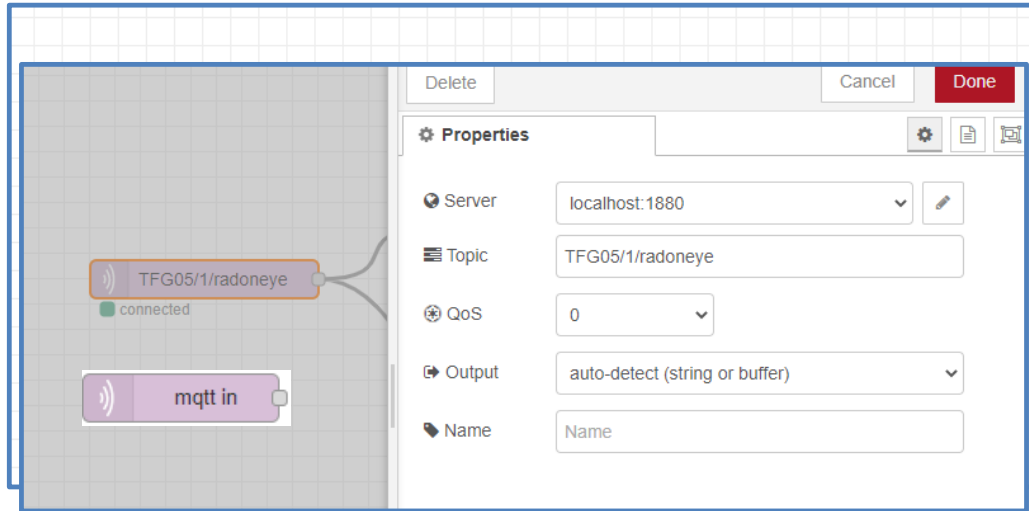


Figura 3-20: Nodo de entrada MQTT.

Los nodos establecidos, se explican a continuación:

En esta primera imagen (Figura 3-20), se analiza el nodo de entrada MQTT. En el menú de la derecha se pueden modificar las distintas características del nodo. Para este nodo se establece el puerto del servidor, en este caso es 1880 y el *topic* TFG05/1/radoneye anteriormente mencionado.

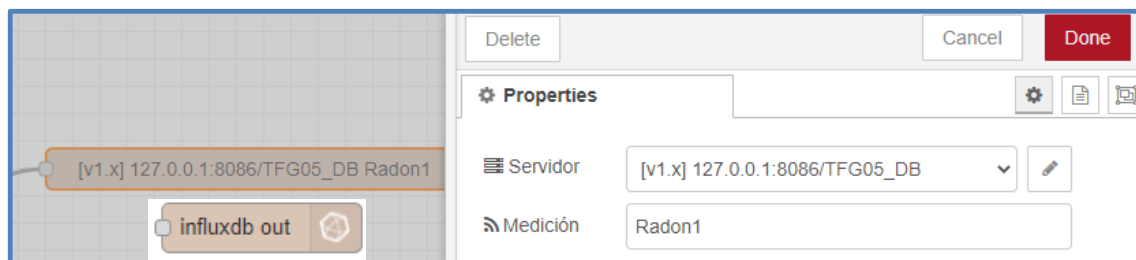


Figura 3-21: Nodo de base de datos InfluxDB.

Desde el nodo de entrada MQTT se direcciona el flujo hacia otros dos nodos. El primero de ellos, que se muestra en la Figura 3-21, es el de la base de datos InfluxDB. En él, también se tienen que modificar las características de conexión.

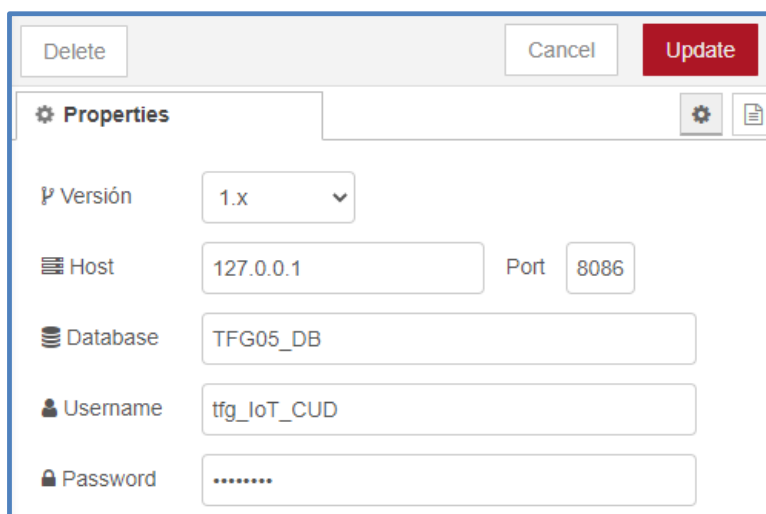


Figura 3-22: Características de conexión del nodo InfluxDB.

Los parámetros de conexión son los que se observan en la Figura 3-22. El servidor 127.0.0.1, el puerto 8086, la base de datos TFG05 y el nombre de usuario con la contraseña.

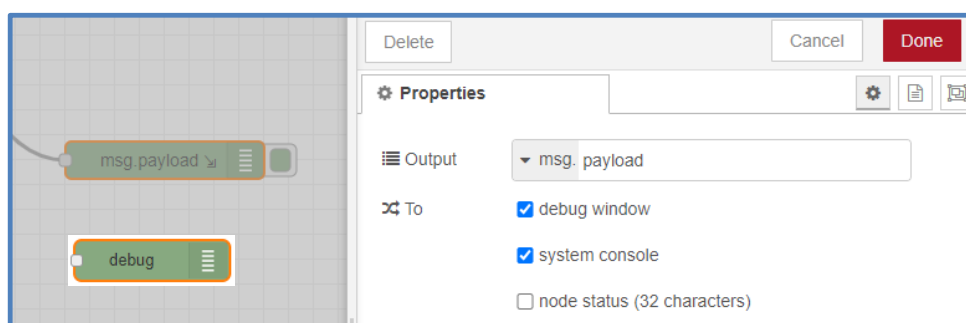


Figura 3-23: Nodo de salida *debug*.

El último nodo del flujo es el de salida de *debug*. Este nodo permite recibir los datos enviados en la opción del menú *debug* de la herramienta Node-Red.

3.2.6 Creación de *dashboard* en herramienta Grafana.

El último paso para tener automatizado el proceso de monitorización de la concentración de gas radón en espacios cerrados es la creación de un *dashboard* en Grafana en el que se grafiquen los datos.

Para la creación del tablero, primero se crea una carpeta TFG05 donde serán guardados los distintos tableros. Una vez en la carpeta, se genera un tablero que tiene que ser editado.

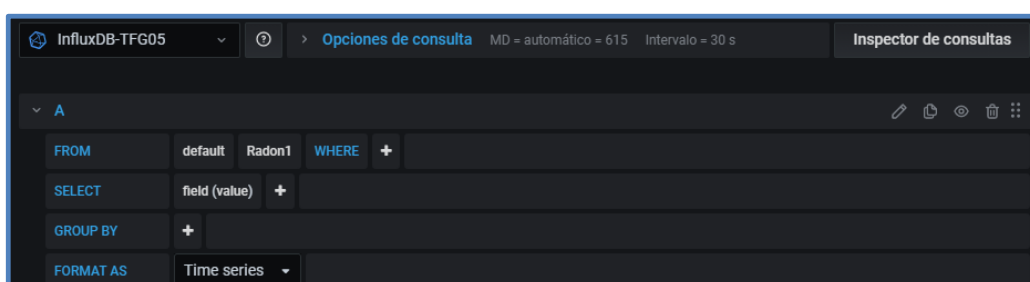


Figura 3-24: Creación de *dashboard* en carpeta TFG05

Para editar el *dashboard*, se enlaza primero con la base de datos de InfluxDB TFG05. Este es el factor fundamental ya que en ese momento, al establecer la conexión entre la base de datos y el tablero, ya se puede generar la gráfica por si misma con el intervalo antes comentado en el apartado 3.2.4. El resto de factores a modificar son de carácter secundario, como el nombre de la gráfica para que se tenga una visión instantánea de qué gráfica corresponde a cada uno de los sensores, las unidades, los ejes o el tipo de gráfico.

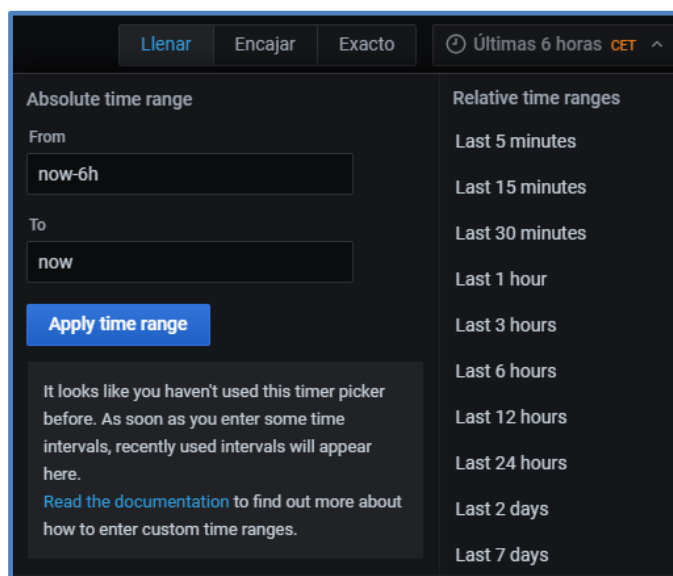


Figura 3-25: Menú de modificación de tiempo.

La gráfica generada muestra la concentración de radón en Bq/m^3 frente al tiempo. En el menú que se muestra en la Figura 3-25 se puede modificar el tiempo del eje de abscisas. Se puede establecer desde los últimos 5 minutos hasta los últimos 7 días o un periodo determinado por el usuario.

3.3 Uso de medidas correctivas

En el presente TFG se mencionan las diferentes medidas correctivas que se pueden emplear frente a las concentraciones de gas radón en interiores (2.4.2). Para el control del radón en este trabajo, se decide aplicar la ventilación como medida correctiva puesto que otros tipos de medidas como barreras de protección anti-radón o el sellado de grietas y fisuras requieren tiempo y obras. Y, otros como la despresurización del terreno requieren equipos no disponibles. Durante este apartado se explica la automatización en el proceso de ventilación y la conexión eléctrica necesaria para un uso de medida correctiva eficaz.

3.3.1 Automatización del uso de medidas correctivas.

Con el objetivo de hacer más mecánico y eficiente la aplicación del ventilado de espacios cerrados se decide automatizar el proceso. Para esta mecanización del proceso se utiliza un relé JQC-3FF-S-Z para actuar como interruptor entre el ventilador y la Raspberry Pi.

Las herramientas necesarias son el relé, los pines GPIO (*General Purpose input output*) de la Raspberry Pi e implementar el código que establezca el nivel a partir del cual se encienda la ventilación. Se tiene: el relé que actúa como interruptor para poder conectarse eléctricamente al ventilador, los pines GPIO que son las distintas entradas y salidas de la Raspberry Pi, y el código que mande la señal a los pines de encendido y apagado.

Los pines GPIO de la Raspberry Pi empleada en este trabajo, es decir, la tercera versión, son los que aparecen en la Figura 3-26. En ella se aprecia que existen distintos tipos de entradas y salidas, pines de

alimentación de 3,3 y de 5 voltios, pines de conexión a tierra (GND) y pines para entrada o salida de señal según se configure.

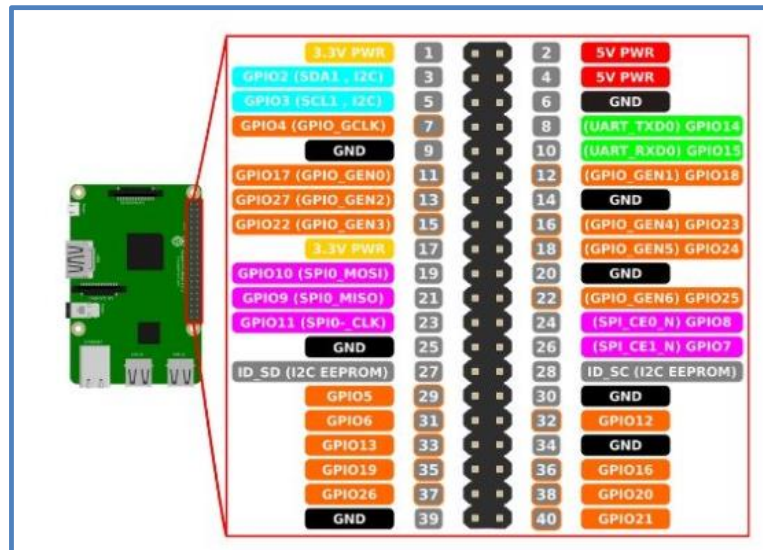


Figura 3-26: Pines GPIO Raspberry Pi 3 [46].

En el caso de este trabajo, la conexión GPIO que se establece es la que se observa en la Figura 3-27. El cable de alimentación (VCC) se conecta a 5 voltios con el cable de color naranja. El segundo cable, de color amarillo, se conecta al pin 6 (GND). Y, por último, de entre todos los pines de entrada y salida GPIO, se escoge el pin 7 (GPIO 4) para la señal transmitida por comodidad debido a la longitud de los cables.

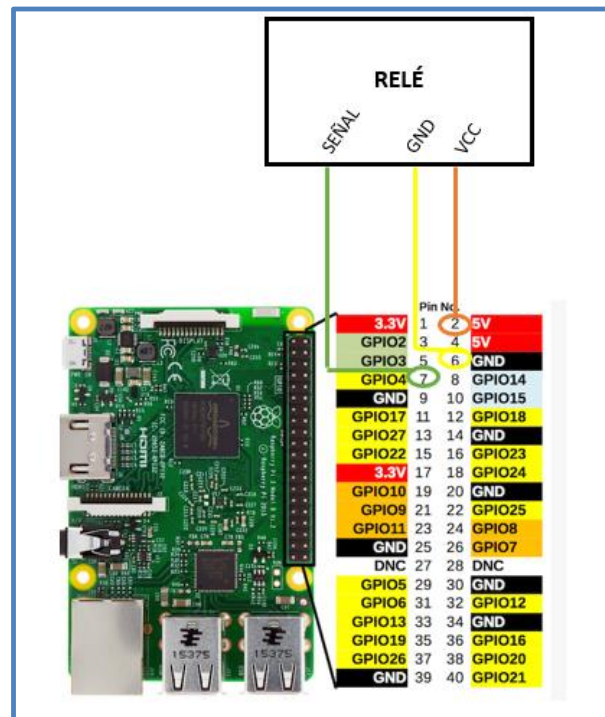


Figura 3-27: Conexión GPIO-relé.

Para establecer el GPIO4 como salida de señal es necesario hacer unas modificaciones en el código. Lo primero es importar la librería necesaria GPIO para poder trabajar con los pines.

```
import RPi.GPIO as GPIO
```

Figura 3-29: Librería GPIO.



Figura 3-28: Conexión real de relé y Raspberry Pi.

Una vez se importa la librería, ya se puede añadir el código necesario para que funcione correctamente.

```
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(4,GPIO.OUT)
if RadonValue > 100:
    GPIO.output(4,True)
    print("Nivel de Radon alto.")
else:
    GPIO.output(4,False)
    print("Nivel admisible de Radon")
```

Figura 3-30: Código GPIO.

En la Figura 3-30 se presentan varios comandos:

- La primera línea establece el modo en el que se trabaja. En este caso, en modo *BCM*, es decir las salidas se nombran por GPIO, y no por el número de pin correspondiente. Por ejemplo: *GPIO4 (BCM)* - pin 7 (*BOARD*).
- En la segunda línea se fija el *GPIO4* como salida, para ser activada y desactivada cuando se estime oportuno.
- Por último, el comando *if* provoca el encendido de la salida *GPIO4* (*GPIO.output(4, True)*) cuando se superan concentraciones de más de 100 Bq/m³. Y con el *else* se ejecuta el apagado del ventilador (*GPIO.output(4, False)*).

Una vez explicada la conexión del relé con los pines y el código necesario para automatizar el encendido del ventilador cuando se supera el nivel establecido de concentración de radón, queda ver la conexión eléctrica entre el ventilador y el relé.

3.3.1 Conexión eléctrica entre el ventilador y el relé.

La conexión entre el ventilador y el relé no puede hacerse de cualquier manera si se quiere un correcto funcionamiento del sistema. En este apartado se explica la manera de proceder a la hora de conectar el cableado.

Continuando con la Figura 3-27 de conexión entre el relé y los pines de la Raspberry Pi, se muestra en la Figura 3-31 las conexiones de entrada del relé y también las de salida del circuito secundario. El circuito secundario también tiene tres salidas: C, NC Y NA.

Uno de los polos, se conecta a C, que es el terminal central y el otro se puede conectar a NA o NC (Normalmente abierto o normalmente cerrado) para establecer la diferencia de voltaje. La diferencia entre ellos es que NC mantendrá el circuito cerrado, ya que normalmente está cerrado, es decir, el interruptor estará encendido. Mientras que NA se encuentra normalmente abierto, por lo que el circuito estará abierto y no circulará corriente.

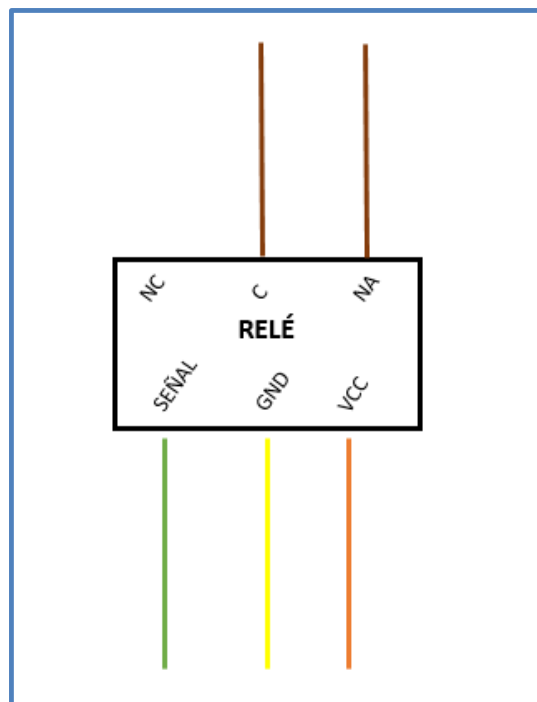


Figura 3-31: Conexiones relé.

Para este trabajo se conectan los polos al C y al NA. Es decir, el circuito normalmente estará abierto. Cuando el código ejecute la orden de activar la salida *GPIO4*, mandará la señal de salida y el interruptor se pulsará para cerrar el circuito y poder encender la ventilación.

Por último, queda conectar la salida del relé con el interruptor de la ventilación. En la Figura 3-32, se observan los cables salientes de NA y de C. En este caso, no importa la conexión que se haga ya que al trabajar con dos cables y con corriente alterna, el cable de corriente y el de tierra se irán alternando debido al carácter sinusoidal de la corriente alterna.

Con esta conexión, el circuito ya está completamente cerrado y automatizado, desde el momento en el que el sensor recoge una medida de concentración de radón, hasta comparar dicha medida con un umbral para decidir si encender la ventilación o no. Por lo tanto, ya se ha conseguido una herramienta

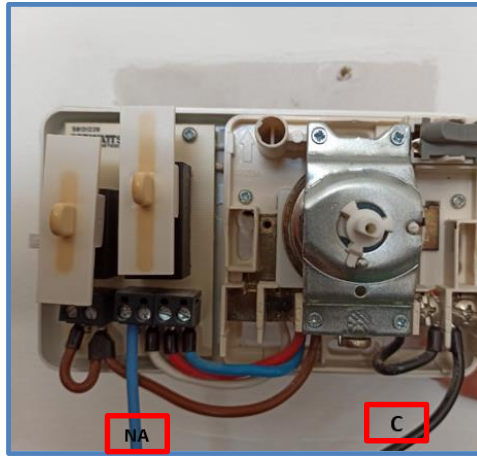


Figura 3-32: Conexión entre el relé y la ventilación.

IoT de bajo coste, que monitorice la concentración de radón en espacios cerrados y controle los niveles de esta densidad de radón para que no sobrepase unos límites establecidos.

4 RESULTADOS

Tras haberse expuesto los procesos de elaboración de la herramienta de monitorización y control de la concentración de radón en espacios cerrados en el 3 Desarrollo del TFG, a lo largo de este apartado se explica la fase experimental llevada a cabo para realizar las pruebas de un funcionamiento efectivo del sistema de monitorización y control de radón y una interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Pruebas de monitorización del radón

Con el fin de efectuar la demostración del correcto funcionamiento de la herramienta descrita en este trabajo y analizar los datos, se toman medidas con dos sensores RadonEye RD200, a los cuáles, se les denomina durante este documento sensor 1 y sensor 2 para hacer más cómoda y sencilla su lectura e interpretación.

Todas las zonas de pruebas realizadas para el análisis de este trabajo se realizan en habitáculos de edificios de la Escuela Naval Militar de Marín.

El sensor 1 es colocado de forma inicial en un estudio del cuartel Almirante Francisco Moreno de la primera planta. Concretamente en la sala de estudio 111, en el ala noroeste.

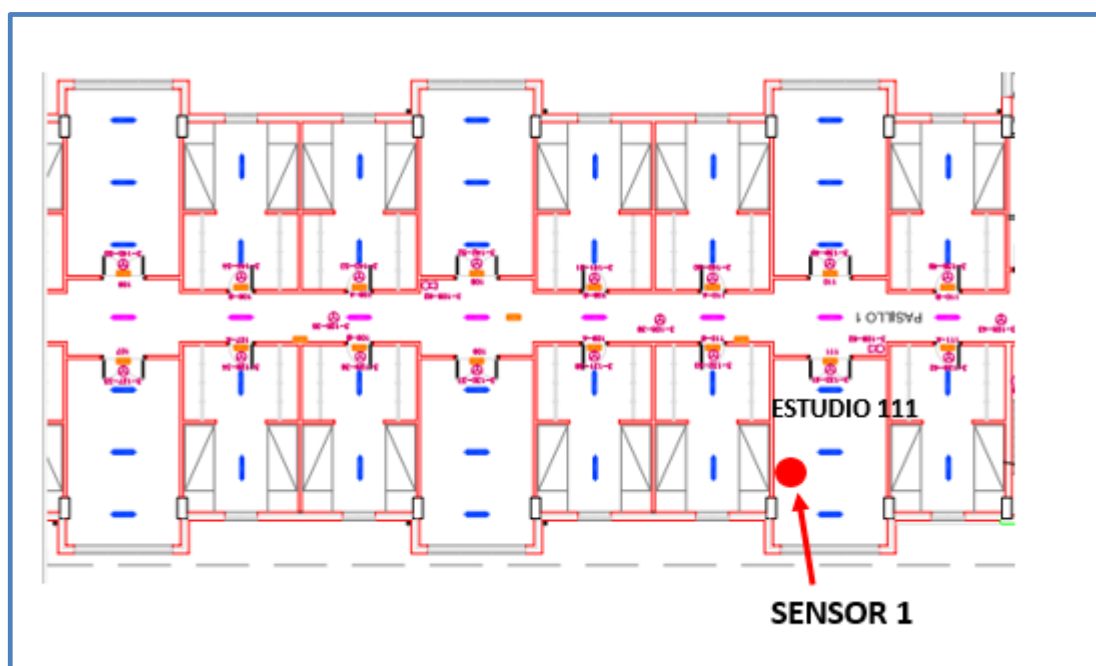


Figura 4-1: Ubicación del sensor 1 en el cuartel Almirante Francisco Moreno [50].

La situación aproximada del sensor 1 en el cuartel Almirante Francisco Moreno se aprecia en la Figura 4-1. Como se ha comentado, hay que destacar el importante factor de que se trata de una primera planta. Además, al tratarse de una estancia en la que suelen permanecer personas durante un tiempo

prolongado, suele ventilarse de una a tres veces al día. Estos dos factores afectarán de manera considerable a la bajada de concentración de radón respecto a un espacio cerrado de una planta baja.

La gráfica facilitada por la herramienta Grafana es la que se muestra en la Figura 4-2.

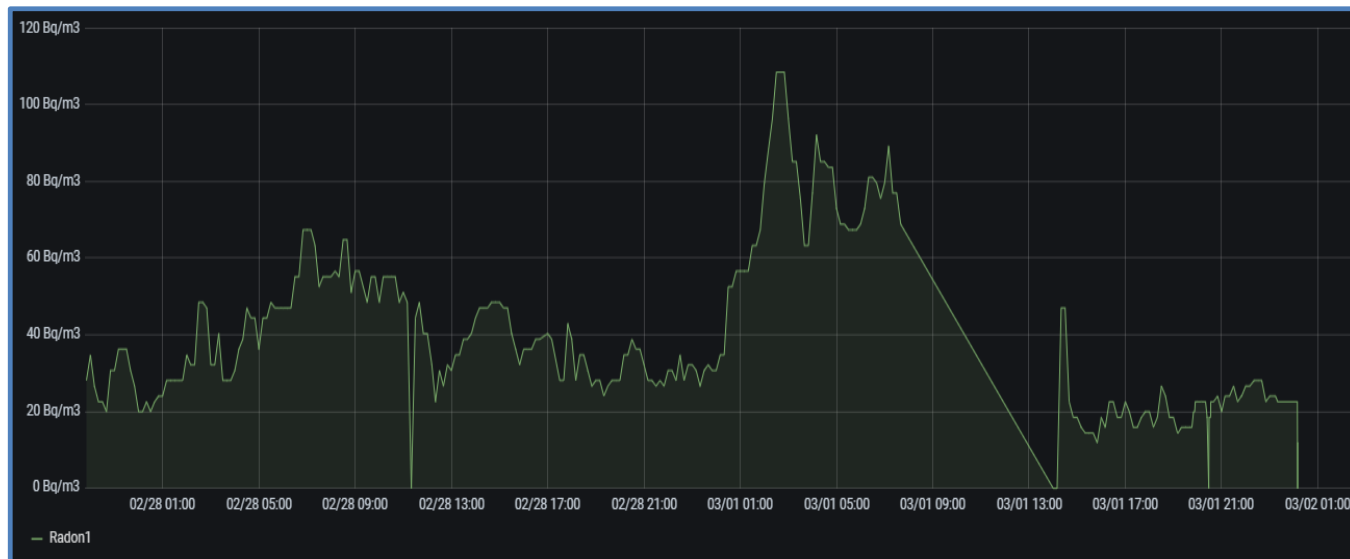


Figura 4-2: Gráfica de concentración de radón en estudio del cuartel Almirante Francisco Moreno.

La gráfica proporcionada presenta la concentración de radón medida en Bq/m³ frente al tiempo, medido en horas. Como se puede ver, se monitoriza la medición del radón en este espacio cerrado durante aproximadamente dos días y medio, desde el día 28 de febrero a las 09:00 hasta el 2 de marzo hasta las 13:00.

1. Resultados en sala de estudio 111 del cuartel Almirante Francisco Moreno:

- Análisis del funcionamiento de la monitorización:

Durante estos días, viendo la gráfica, se puede comprobar que la herramienta de monitorización funciona de manera correcta por regla general. Los datos se van registrando de manera continua cada diez minutos durante un tiempo prolongado de acuerdo con el valor que marca el sensor 1. A pesar del correcto funcionamiento, se pueden observar algunos valores nulos durante estos días. Estos errores de medida pueden estar producidos por desconexiones del sensor, ya que después de su encendido, el sensor tarda un tiempo en registrar el dato. Aunque también cabe la posibilidad, que al probar el funcionamiento de la herramienta ejecutando el código de manera manual, se tome el segundo valor como nulo si se hace en un espacio breve de tiempo. La tercera posibilidad, es que en algún momento se hayan alcanzado verdaderamente estos niveles cercanos o iguales a 0. Aunque esta posibilidad, debido a las observaciones hechas, es remota, ya que raramente el valor del radón registrado por el sensor 1 baja de los 10 Bq/m³.

- Análisis de los datos registrados:

En líneas generales, los niveles de concentración de radón no exceden los 100 Bq/m³, debido a los factores de altura respecto al suelo y ventilación prácticamente continua. Se observan dos picos de aumento de la concentración durante horas nocturnas ya que las ventanas y puerta se dejan cerradas

durante estas horas. Aun así, estos picos no llegan a niveles alarmantes, 70 y 110 Bq/m³, de izquierda a derecha.

La siguiente fase en la medición del radón se realiza en la planta baja del edificio del CUD⁵, específicamente en el despacho 114. En la Figura 4-3 se presenta de manera aproximada la ubicación tanto del sensor 1 como del sensor 2 en el despacho 114 del edificio del CUD.

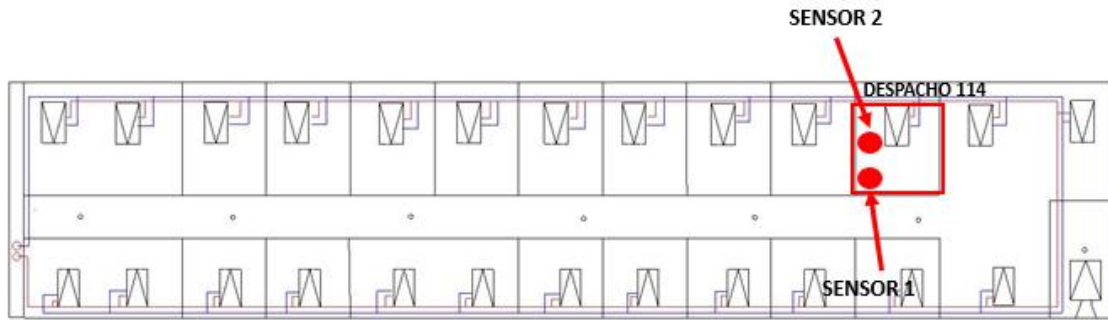


Figura 4-3: Ubicación de los sensores 1 y 2 en el despacho 114 [50]

A pesar de encontrarse en la misma habitación, los resultados de ambos sensores varían ligeramente. Esto es debido a la diferencia de altura entre ambos. El sensor 1 se encuentra a 75 centímetros respecto al nivel del suelo de la estancia, mientras que el sensor 2 se encuentra a 2,25 metros.

A continuación, se exponen gráficas de ambos sensores durante el tiempo de pruebas del uso de la herramienta de monitorización en dicho despacho 114:

⁵ Centro Universitario de la Defensa

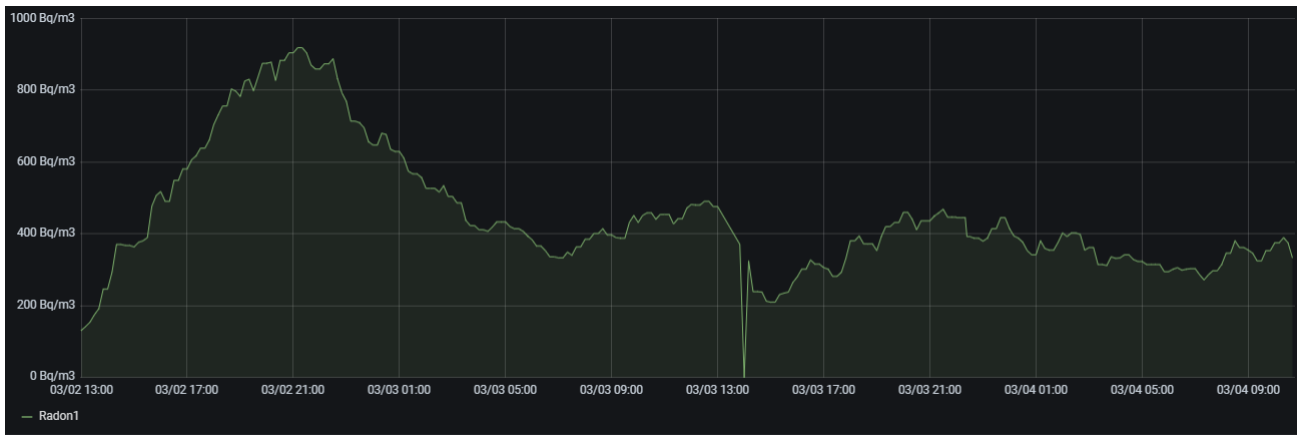


Figura 4-4: Gráfica sensor 1 en despacho 114. (2 marzo-4 marzo)

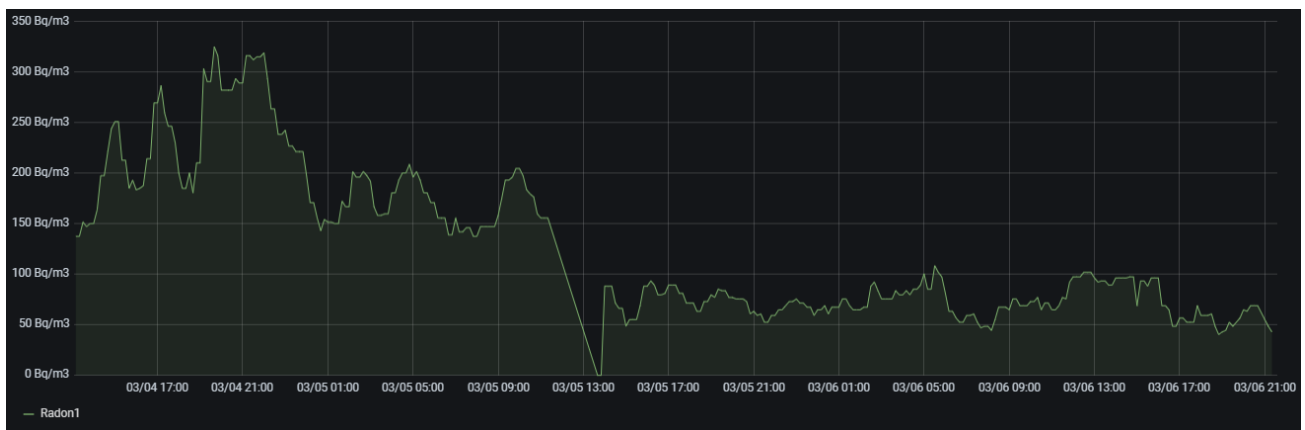


Figura 4-5: Gráfica sensor 1 en despacho 114. (4 marzo-6 marzo)

La gráfica proporcionada por Grafana de la Figura 4-4 corresponde con la medición de concentración de radón entre el 2 de marzo a las 13:00 hasta las 12:00 del día 4. Y seguidamente la Figura 4-5 es la gráfica que muestra el nivel de radón entre las 13:00 del día 4 de marzo hasta las 21:30 del 6.

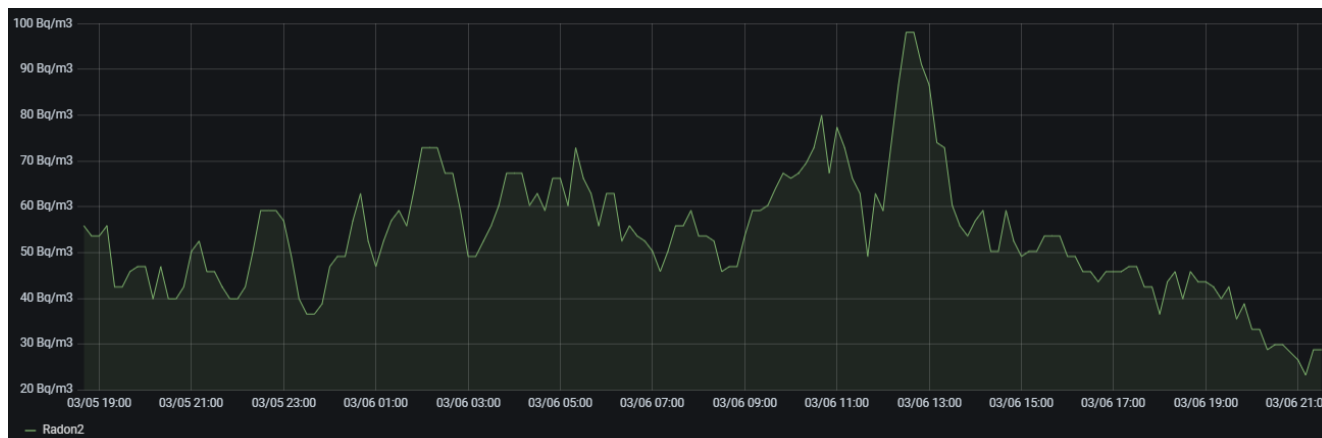


Figura 4-6: Gráfica sensor 2 en despacho 114. (4 marzo-6 marzo).

Y, por último, la gráfica de la Figura 4-6 muestra la concentración de radón medida con el sensor 2 desde el 5 de marzo a las 17:00 hasta el 6 de marzo a las 21:30.

2. Resultados en el despacho 114 del CUD:

• Análisis del funcionamiento de la monitorización:

Por lo que a las mediciones de concentración de radón en el despacho 114 respecta, se vuelve a apreciar en las gráficas de los sensores 1 y 2 en el citado despacho que la herramienta de monitorización vuelve a funcionar de manera correcta. En este caso la monitorización sí se realiza de manera remota, pues la Raspberry Pi se encuentra en el despacho junto a los sensores 1 y 2, y se maneja de manera distante desde el ordenador gracias a VNC Viewer, un software libre de control remoto.

Al igual que en las pruebas de monitorización del radón en el estudio del cuartel Almirante Francisco Moreno, en este caso también se puede observar un error en la gráfica del sensor 1. Aproximadamente a las 14:00 del 3 de marzo se registra un valor nulo de radón cuando la anterior medición era de alrededor de 400 Bq/m³. Esto carece de sentido pues según los análisis hechos, no se observan cambios tan bruscos en un espacio de tiempo tan reducido. El error es debido, posiblemente, a una desconexión del sensor 1. En el caso del sensor 2, no hubo ningún tipo de percance en la monitorización. Los valores graficados corresponden al completo con los ofrecidos y registrados por el sensor.

• Análisis de los datos registrados:

A diferencia del análisis realizado en el estudio del cuartel Almirante Francisco Moreno, en este caso el habitáculo se encuentra en un estado sin ventilación.

En dicha estancia, existe una entrada de aire de renovación constante del exterior por medio de la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA). La recirculación del aire se controla mediante un manómetro, que regula la velocidad del fancoil de falso techo.

Esta es la principal causa de la diferencia de datos con respecto a las medidas hechas en el estudio del cuartel, además de encontrarse en una planta baja que facilita la entrada y flujo de radón hacia el cuarto. Durante los primeros días, el sensor 1 registra concentraciones de radón considerablemente altas, llegando a alcanzar un máximo de 900 Bq/m³ el 2 de marzo a las 21:00. Tras estos niveles altos, los siguientes días (3 al 4 de marzo) la media diaria de radón fue de unos 350-400 Bq/m³.

A la hora de analizar los valores de concentración de radón de los sensores 1 y 2 en el despacho 114, el primer detalle significativo que se observa es la menor concentración de radón medida por el sensor

2 respecto al sensor 1. Como se ha comentado, esto es debido a la diferencia en la altura (el sensor 1 se encuentra 1,25 metros por debajo del 2). Como muestran las gráficas, el sensor 1 registra valores de 80 Bq/m³ aproximadamente el 5 y el 6 de marzo, con picos de más de 100 Bq/m³ y mínimos que no bajan de los 50 Bq/m³. Sin embargo, el sensor 2 registra valores de entre 80 y 20 Bq/m³, una diferencia respecto al 1 de entre 30 y 40 Bq/m³.

Para finalizar, por norma general, en ambos sensores se registran mayores concentraciones de radón durante las horas frías del día que durante las calurosas. Normalmente en horas nocturnas y matutinas se obtienen los picos máximos de radón y durante las horas próximas al mediodía los valores mínimos.

4.2 Pruebas de control de radón.

Tras haber hecho el análisis de los resultados del funcionamiento de la herramienta de monitorización y de las concentraciones de radón destacando las situaciones en las que se supera los niveles establecidos por la normativa, durante este apartado se estudian los resultados del control del radón mediante la ventilación.

Antes de analizar los resultados obtenidos, se tiene que puntualizar ciertos aspectos de la fase experimental:

- El uso de medidas correctivas solo se aplica en el despacho 114 del edificio del CUD, puesto que es donde se dispone de un sistema de ventilación que poder utilizar. No son aplicables en la sala de estudio del cuartel al no disponer de sistemas de renovación de aire, a parte de las ventanas.
- El sistema de ventilación no provoca una reacción inmediata en la concentración del radón. Cuando la tendencia es ascendente y se activa la ventilación, la curva no comenzará a descender hasta pasado cierto tiempo. Lo mismo ocurre en caso contrario, una vez que la ventilación es apagada, la inercia del aire sigue provocando un descenso en la concentración.
- En tercer lugar, la ventilación se automatiza respecto a los valores registrados por el sensor 1. Es decir, el sensor 1 es el que marca si la ventilación se encuentra encendida o apagada dependiendo de si se supera o no el umbral establecido. Esto es debido, como se ha analizado en el apartado 4.1, a que el sensor 1 se encuentra, en cuanto a altura se refiere, por debajo del sensor 2 y registra niveles de concentración mayores. Por lo tanto, de esta manera se asegura una reacción más veloz frente a la concentración del gas.
- Por último, cabe destacar que frente a los cambios en los niveles de radón debidos a ventilación natural por la entrada y salida de personal u otros factores, se decide variar el umbral de iniciación de medidas correctivas para poder observar de esta manera si se realiza una ventilación efectiva.

Puesto que el nivel establecido como límite por muchas de las organizaciones internacionales y nacionales de concentración máxima de radón son 300 Bq/m³, inicialmente se fija el umbral en 200 Bq/m³ para no llegar a dichos niveles.

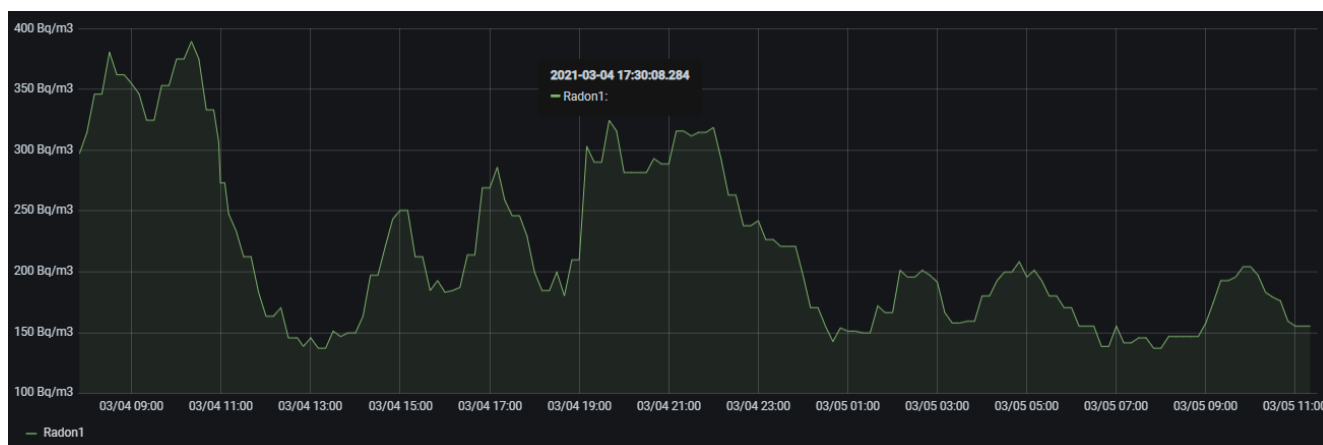


Figura 4-7: Gráfica sensor 1 de ventilación a partir de 200 Bq/m³.

En la gráfica de la Figura 4-7 se presenta la concentración de radón entre el 4 y el 5 de marzo, con actuación de ventilación cuando se sobrepasan los 200 Bq/m³.

Lo primero apreciable en la gráfica son las constantes subidas y bajadas de la concentración con picos de casi 400 Bq/m³ y mínimos de 140 Bq/m³. En el primer máximo que se alcanza, se activa la ventilación puesto que se alcanzan 400 Bq/m³, y en aproximadamente dos horas se consigue reducir el radón por debajo de los 200 Bq/m³. Tras llegar al umbral, por efecto de la renovación de aire, el radón sigue descendiendo hasta los 150 Bq/m³. Tras cada activación del sistema de ventilación y el correspondiente descenso del gas, se vuelve a producir un aumento en el habitáculo al estar en un espacio sin ventilación. Después de este primer máximo comentado, ya no se vuelven a alcanzar niveles tan altos. En los siguientes aumentos de concentración de radón, solo se sobrepasan 300 Bq/m³ en una ocasión. Además, cabe decir que se sobrepasa ligeramente y durante un periodo escaso de tiempo. En el resto de crecidas, se consigue mitigar de manera efectiva sin sobrepasar los límites recomendados. En general, desde la activación de la ventilación hasta apreciar un descenso de radón, transcurren 30 minutos y desde la desactivación hasta que vuelve a aumentar, una hora.

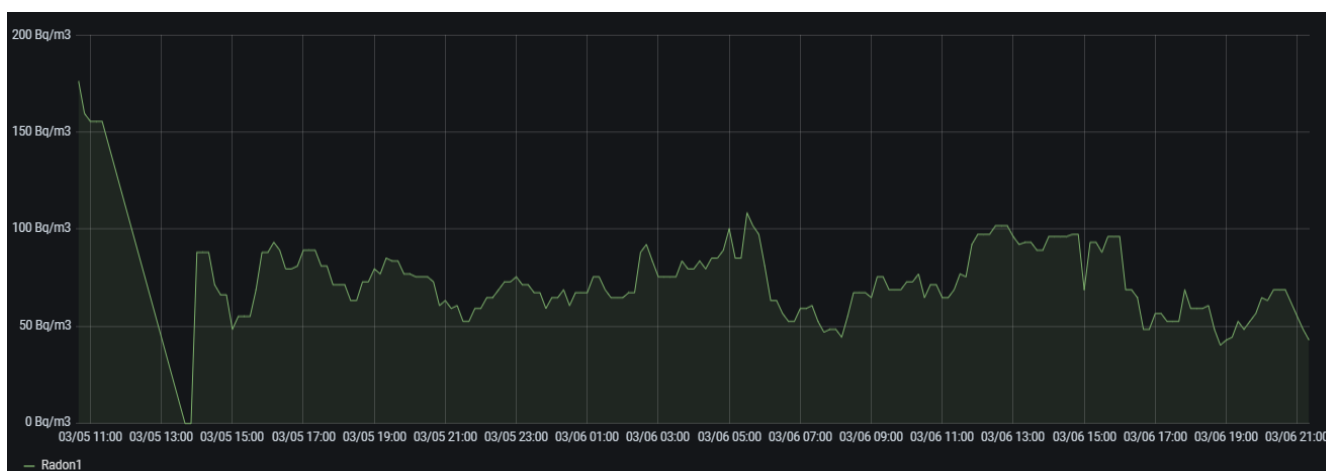


Figura 4-8: Gráfica sensor 1 de ventilación a partir de 100 Bq/m³.

A partir del día 5 de marzo, debido a niveles menores de concentración de radón, se reduce el umbral a 100 Bq/m³ para poder aplicar las pruebas de ventilación. La Figura 4-8 muestra la concentración del radón entre el 5 de marzo a las 10:00 y el 6 de marzo a las 21:00. En este caso, quitando el primer

descenso que es generado por un error o desconexión en el sensor, se superan 100 Bq/m³ en dos ocasiones. En ambas ocasiones se consigue reducir la concentración rápidamente y mantener por debajo del umbral. Hay que destacar también, que durante estos días la fluctuación del radón fue considerablemente menor que en los primeros días de mediciones. En cualquier caso, no se llegaron a niveles límites establecidos por la normativa vigente.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

5.1 Conclusiones

Tras la realización de este trabajo y un posterior análisis de los resultados obtenidos, se obtienen numerosas conclusiones que durante este apartado se resumen. Las conclusiones extraídas son las siguientes:

- Los niveles de radón medidos en la planta baja del edificio del CUD superan de manera general el límite de la normativa, ya que tiene un promedio de 400 Bq/m^3 . Sin embargo, los registrados en la primera planta del cuartel Almirante Francisco Moreno no alcanzan los 150 Bq/m^3 . Por lo tanto, se demuestra que las estancias en plantas bajas sufren en mayor medida el aumento de la concentración de radón. Además, los hábitos y costumbres de las personas son factores a tener en cuenta, ya que, en base a la ventilación que éstos hagan, el aire estará más renovado y el nivel de radón será considerablemente inferior.
- En espacios cerrados en los que no existe renovación natural del aire, la concentración de radón aumenta durante las horas frías del día y disminuye durante las calurosas. Se producen máximos en horas matutinas y mínimos en horas cercanas al mediodía.
- Dados los sensores y métodos de obtención de datos actuales, una herramienta de monitorización de radón resulta notablemente más efectiva y cómoda a la hora de detectar situaciones en las que se sobrepasen los límites de concentración de radón establecidos por la normativa.
- En términos generales, la herramienta *IoT* de monitoreo de radón funciona de manera correcta salvo en errores puntuales de desconexión del sensor o de actuación manual a la hora de ejecutar el código.
- En base a los distintos resultados obtenidos, a la hora de mantener una habitación con un nivel de concentración de radón por debajo del límite establecido, resulta fundamental una ventilación natural del habitáculo. Con el simple acto de abrir ventanas o puertas, los niveles de radón se reducen de manera drástica evitando así situaciones de riesgo al exponerse durante un tiempo prolongado a altas concentraciones.
- La ventilación natural, es el método de renovación de aire más efectivo. Las diferencias en concentración de radón observadas en un mismo espacio cerrado, con y sin ventilación, son significativas.
- A la hora de establecer un límite a partir del cual se active un sistema de ventilación, conviene hacerlo de manera preventiva puesto que los cambios en la concentración de radón no son instantáneos. Según los experimentos realizados en la planta baja del edificio del CUD, desde la activación de la ventilación hasta el comienzo de la caída en los valores de concentración de radón medidos transcurren 30 minutos aproximadamente. Sin embargo, pasan alrededor de 60 minutos desde la desactivación del sistema de ventilación hasta el crecimiento.
- A grandes rasgos, la renovación del aire mediante un sistema de ventilación probada en el despacho 114 del edificio del CUD, controla en gran medida el acrecentamiento de la concentración de radón en espacios interiores.
- Como conclusión personal, este TFG me ha concienciado del peligro que supone el radón en la actualidad, además de una iniciación en el lenguaje de programación Python y en el concepto de Internet of Things. Asimismo, con la elaboración de este TFG he consolidado algunos conocimientos estudiados en asignaturas del Grado como: Fundamentos de redes de ordenadores, Teoría de estructuras y construcciones industriales o Fundamentos de automática.

- Todas las conclusiones extraídas se ven limitadas por el escaso tiempo de medidas. Para poder dar resultados más claros y fiables sería necesario periodos de medidas prolongados. A mayor tiempo, mayor exactitud.

5.2 Líneas futuras

En este Trabajo de Fin de Grado se proponen las siguientes líneas futuras como incentivo o motivación para posibles estudios e investigaciones:

- Una vez probada la herramienta de monitorización, se plantea realizar una fase de experimentación extensa que permita obtener datos más diversos para un posterior análisis exhaustivo.
- Tras comprobar el correcto funcionamiento automático de la ventilación, se propone implementar distintas variantes en el sistema como, por ejemplo: distintos umbrales de nivel de radón para de esta manera accionar la ventilación a una determinada potencia dependiendo de dicho nivel, tomar medidas con varios sensores y fijar el límite, a partir del cual se activa la ventilación, en la media de los datos registrados por ellos o añadir un dispositivo de alarma conectado a los sensores para alertar de situaciones en las que se sobrepasen unos límites preestablecidos por el usuario.
- Impartir conferencias de concienciación sobre el radón o la incorporación de conocimientos básicos en asignaturas del Grado, como por ejemplo en “Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales” para contribuir a una mayor difusión de los riesgos que puede generar el radón en el ser humano.
- En base al estudio realizado por la AF Camacho Martín sobre la determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la Escuela Naval Militar [42], implantar el sistema de monitorización y control de radón en aquellas aulas o espacios de la ENM que estén más afectados.
- Estudiar la posible aplicación de morteros para el sellado de grietas y fisuras en edificios de la Escuela Naval Militar, como medida correctiva frente al radón.
- Llevar a cabo investigaciones sobre la concentración de radón a bordo de los buques de la Armada Española, en especial cuando éstos se encuentran atracados en puerto.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades,» [En línea]. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.html. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [2] Organización Mundial de la Salud. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective; WHO Press: Geneva, Switzerland, 2009, Génova, 2009.
- [3] «CSN. Consejo de Seguridad Nuclear,» [En línea].
- [4] «Organización Nuclear Mundial,» [En línea]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx>.
- [5] «Organización Nuclear Mundial,» [En línea]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx..>
- [6] «Health Canada, Radon: Is It in Your Home?,» [En línea]. Available: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/radiation/radon-your-home-health-canada-2009.html>. [Último acceso: 25 Enero 2021].
- [7] T. V. Ávila, Radiaciones Ionizantes y su Impacto. Primer Simposio Internacional sobre Medioambiente (ISE 2017), Quito, 2018.
- [8] R. C. A. D. a. P. P. C.J. Groves-Kirkby, «Climatic and Seasonal Influences on Radon Time Series in an Environment of».
- [9] «SGS. Normativa de referencia del gas radón y proyecto Real Decreto,» [En línea]. Available: <https://www.sgs.es/es-es/news/2019/10/radon>. [Último acceso: 28 Enero 2021].
- [10] *Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.*
- [11] *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública..*
- [12] «Amazon,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/Detector-gas-Radon-pistas-CR-39/dp/B08BG41PN7>. [Último acceso: 22 febrero 2021].
- [13] «Desarrollo de procedimientos para la determinación de radioisótopos en muestras ambientales mediante técnicas de bajo recuento por centelleo líquido y radiación Cerenkov. Universidad de Huelva,» [En línea]. Available: <http://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/3749/b1548046x.pdf?sequence=2>. [Último acceso: 30 Enero 2021].
- [14] M. F. Lastra, *Trabajo de Fin de Máster: Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos.*
- [15] *Estudio de la determinación del radón-222 en un monitor de radiación gamma ambiental en aerosoles por filtro de papel..*

- [16] «Radiansa Consulting,» [En línea]. Available: <https://tienda.radiansa.com/E-PERM-sistema>. [Último acceso: 1 Febrero 2021].
- [17] «Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes. Xunta de Galicia.,» Noviembre 2018. [En línea]. Available: http://igvs.xunta.gal/ipecos-opencms-portlet/export/sites/default/PortalVivenda/Biblioteca/Lexislacion/Calidade/RADON_GUIA_V1_es_20190308.pdf. [Último acceso: 4 Febrero 2021].
- [18] «pce-iberica,» [En línea]. Available: <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-presion/micromanometro-manoair-500.htm>. [Último acceso: 5 Febrero 2021].
- [19] «Geomniaradón,» [En línea]. Available: <https://geomnia-radon.es/que-ofrecemos/prevencion-y-remediacion>. [Último acceso: 12 Febrero 2021].
- [20] B.Frutos, «Radon concentration control by ventilation and energy efficiency improvement.,» 2015.
- [21] «HZ hard zone,» [En línea]. Available: <https://hardzone.es/reportajes/que-es/internet-cosas-iot/>. [Último acceso: 2021 02 20].
- [22] «El Internet de las Cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes,» 2016.
- [23] «Irix galicia,» [En línea]. Available: <https://www.irix.es/blog/internet-de-las-cosas-iot-internet-of-things/>. [Último acceso: 21 febrero 2021].
- [24] «NESPRA. Smart devices. Sensores IoT: características y aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://www.nespra.net/blog/sensores-iot-caracteristicas-y-aplicaciones/>. [Último acceso: 20 02 2021].
- [25] «Demo Desk,» [En línea]. Available: <https://www.domodesk.com/221-a-fondo-que-es-iot-el-internet-de-las-cosas.html>. [Último acceso: 21 febrero 2021].
- [26] «RadonFTLab,» [En línea]. Available: <http://radonftlab.com/radon-sensor-product/radon-detector/rd200/>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [27] «Xataka.com,» [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/makers/cero-maker-todo-necesario-para-empezar-raspberry-pi>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [28] «Computerhoy.com,» [En línea]. Available: <https://computerhoy.com/noticias/hardware/que-es-raspberry-pi-donde-comprarla-como-usarla-8614>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [29] «Raspberrypi.org,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [30] «Raspberryshop.es,» [En línea]. Available: <https://www.raspberryshop.es/raspberry-pi-3.php>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [31] «Raspbian.org,» [En línea]. Available: <https://www.raspbian.org/>. [Último acceso: 27 febrero 2021].
- [32] «desarrolloweb.com,» [En línea]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>. [Último acceso: 28 febrero 2021].

- [33] «ESIC. Business&Marketingschool,» [En línea]. Available: <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/para-que-sirve-python>. [Último acceso: 1 marzo 2021].
- [34] «nodered.org,» [En línea]. Available: <https://nodered.org/>. [Último acceso: 1 marzo 2021].
- [35] «toptal.com,» [En línea]. Available: toptal.com/nodejs/programacion-visual-con-nodered-conectando-el-internet-de-las-cosas-con-facilidad. [Último acceso: 1 marzo 2021].
- [36] «Influxdata.com,» [En línea]. [Último acceso: 1 marzo 2021].
- [37] «ionos.es,» [En línea]. Available: <https://www.ionos.es/digitalguide/hosting/cuestiones-tecnicas/que-es-influxdb/>. [Último acceso: 1 marzo 2021].
- [38] «influxdata.com,» [En línea]. Available: <https://www.influxdata.com/integration/grafana/>. [Último acceso: 2 marzo 2021].
- [39] «ubunlog.com,» [En línea]. Available: <https://ubunlog.com/grafana-software-analisis-supervision/>. [Último acceso: 2 marzo 2021].
- [40] «github.com,» [En línea]. Available: <https://github.com/ceandre/radonreader/blob/master/README.md>. [Último acceso: 17 febrero 2021].
- [41] «LuisLlamas.es,» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/que-es-mqtt-su-importancia-como-protocolo-iot/>. [Último acceso: 3 marzo 2021].
- [42] C. C. Martín, *Gestión de la presencia de radón en lugares de trabajo: determinación de concentraciones y evaluación de riesgos en la Escuela Naval Militar.*, Marín, 2021.
- [43] «Organización Mundial de la Salud,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [44] «Consejo Nacional de Seguridad,» [En línea].
- [45] «W.R MEADOWS,» [En línea]. Available: <https://www.wrmeadows.com/technical-bulletins/radon-technical-bulletin/>. [Último acceso: 24 Enero 2021].
- [46] «Geomniaradón,» [En línea]. Available: <https://geomnia-radon.es/que-ofrecemos/prevencion-y-remediacion>. [Último acceso: 12 Febrero 2021].
- [47] «balenaEtcher,» [En línea]. Available: <https://www.balena.io/etcher/>. [Último acceso: 2 marzo 2021].
- [48] «doc.qt.io,» [En línea]. Available: <https://doc.qt.io/QtMQTT/mqtt-overview.html>. [Último acceso: 3 marzo 2021].
- [49] «studytonight.com,» [En línea]. Available: <https://www.studytonight.com/post/raspberry-pi-gpio-pins>. [Último acceso: 5 marzo 2021].
- [50] M. d. Defensa, *Subdirección general de tipificación y supervisión.*

ANEXO I: CÓDIGO MODIFICADO DE LA FUENTE EXPUESTA EN LA BIBLIOGRAFÍA

```
import argparse, struct, time, re, json
import RPi.GPIO as GPIO
import paho.mqtt.client as mqtt

from bluepy import btle
from time import sleep
from random import randint

parser = argparse.ArgumentParser(formatter_class=argparse.RawDescriptionHelpFormatter,description=__progname__)
parser.add_argument('-a',dest='address',help='Bluetooth Address (AA:BB:CC:DD:EE:FF format)',required=True)
parser.add_argument('-b','--becquerel',action='store_true',help='Display radon value in Becquerel (Bq/m^3) unit', required=False)
parser.add_argument('-v','--verbose',action='store_true',help='Verbose mode', required=False)
parser.add_argument('-s','--silent',action='store_true',help='Output only radon value (without unit and timestamp)', required=False)
parser.add_argument('-m','--mqtt',action='store_true',help='Also send radon value to a MQTT server', required=False)
parser.add_argument('-ms',dest='mqtt_srv',help='MQTT server URL or IP address', required=False)
parser.add_argument('-mp',dest='mqtt_port',help='MQTT server service port (Default: 1883)', required=False, default=1883)
parser.add_argument('-mu',dest='mqtt_user',help='MQTT server username', required=False)
parser.add_argument('-mw',dest='mqtt_pw',help='MQTT server password', required=False)
parser.add_argument('-ma',dest='mqtt_ha',action='store_true',help='Switch to Home Assistant MQTT output (Default: EmonCMS)', required=False)
args = parser.parse_args()

args.address = args.address.upper()

if not re.match("^[{0-9A-F}{2:}{5}{0-9A-F}{2}$", args.address) or (args.mqtt and (args.mqtt_srv == None or args.mqtt_user == None or args.mqtt_pw == None)):
    parser.print_help()
    quit()

def GetRadonValue():
    if args.verbose and not args.silent:
        print ("Connecting...")
    DevBT = btle.Peripheral(args.address, "random")
    RadonEye = btle.UUID("00001523-1212-efde-1523-785feabcd123")
    RadonEyeService = DevBT.getServiceByUUID(RadonEye)

    if args.verbose and not args.silent:
        print ("Writing...")
    uuidWrite = btle.UUID("00001524-1212-efde-1523-785feabcd123")
    RadonEyeWrite = RadonEyeService.getCharacteristics(uuidWrite)[0]
    RadonEyeWrite.write(bytes("\x50"))

    if args.verbose and not args.silent:
        print ("Reading...")
    uuidRead = btle.UUID("00001525-1212-efde-1523-785feabcd123")
    RadonEyeValue = RadonEyeService.getCharacteristics(uuidRead)[0]
    RadonValue = RadonEyeValue.read()
    RadonValue = struct.unpack('<f',RadonValue[2:6])[0]

    DevBT.disconnect()

    if ( RadonValue > 1000 ) or ( RadonValue < 0 ):
        raise Exception("Very strange radon value. Debugging needed.")

    if args.becquerel:
        Unit="Bq/m^3"
        RadonValue = ( RadonValue * 37 )
    else:
        Unit="pCi/L"

    if args.silent:
        print ("%0.2f" % (RadonValue))
    else:
        print ("%s - %s - Radon Value: %0.2f %s" % (time.strftime("%Y-%m-%d [%H:%M:%S]"),args.address,RadonValue,Unit))

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(4, GPIO.OUT)
if RadonValue > 100:
    GPIO.output(4,True)
    print("Nivel de Radon alto.")
else:
    GPIO.output(4,False)
    print("Nivel admisible de Radon")
```

```
if args.mqtt:
    if args.verbose and not args.silent:
        print ("Sending to MQTT...")
    if args.mqtt_ha:
        mqtt_out="Home Assistant"
    else:
        mqtt_out="EmonCMS"
    print ("MQTT Server: %s | Port: %s | Username: %s | Password: %s | Output: %s"
          % (args.mqtt_srv, args.mqtt_port, args.mqtt_user, args.mqtt_pw, mqtt_out))

    REkey = args.address[9:].replace(":", "-")

    clientMQTT = mqtt.Client("RadonEye_%s" % randint(1000,9999))
    clientMQTT.username_pw_set(args.mqtt_user,args.mqtt_pw)
    clientMQTT.connect(args.mqtt_srv, args.mqtt_port)

    if args.mqtt_ha:
        ha_var = json.dumps({"radonvalue": "%0.2f" % (RadonValue)})
        clientMQTT.publish("environment/RADONEYE/"+REkey,ha_var,qos=1)
    else:
        clientMQTT.publish("TFG05/1/radoneye",RadonValue,qos=1)

    if args.verbose and not args.silent:
        print ("OK")
    sleep(1)
    clientMQTT.disconnect()

try:
    GetRadonValue()
except Exception as e:
    if args.verbose and not args.silent:
        print (e)
    for i in range(1,4):
        try:
            if args.verbose and not args.silent:
                print ("Failed, trying again (%s)..." % i)

            sleep(5)
            GetRadonValue()

        except Exception as e:
            if args.verbose and not args.silent:
                print (e)

            if i < 3:
                continue
            else:
                print ("Failed.")
    break
```

Fuente: *github.com* [40].