

(08-016) - Development of a dynamic model for estimating radon concentration in a radon chamber

Noverques Medina, Aina ¹; Juste Vidal, Belén ¹; Sancho Fernández, Maria ¹; Verdú Martín, Gumersindo ¹

¹ ISIRYM, Universitat Politècnica de València

According to current legislation on health protection against risks arising from exposure to radon gas (RD 1029/2022), laboratories responsible for measuring radon in the air must be accredited under UNE-EN ISO/IEC 17025:2017, periodically calibrating detectors in controlled atmospheres such as radon chambers.

This research marks the starting point for accrediting the radon chamber acquired by ISIRYM, funded by GENERALITAT VALENCIANA (IDIFEDER/2021/047). With the aim of controlling and stabilizing different radon concentrations without long exposure periods, a dynamic model is developed based on differential equations that determine temporal variations in radon. Different processes of accumulation, decay, and/or gas extraction, as well as potential leaks, are considered. This mathematical model is fitted to experimental results for its subsequent validation. Consequently, it enables the prediction of the radon flow to introduce into the chamber and the ventilation flow to achieve a stable concentration of radon inside without many lengthy experimental measurements and the consequent saving of time and effort.

Keywords: radon chamber; AlphaGuard; dynamic models

Desarrollo de un modelo dinámico para la estimación de la concentración de radón en una cámara de radón

Según la legislación vigente sobre la protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a gas radón (RD 1029/2022), los laboratorios encargados de la medida de radón en aire deben estar acreditadas en la UNE-EN ISO/IEC 17025:2017, calibrando periódicamente los detectores en atmósferas controladas, como las cámaras de radón,

Esta investigación supone el punto de partida para la acreditación de la cámara de radón adquirida por el ISIRYM, mediante financiación de la GENERALITAT VALENCIANA (IDIFEDER/2021/047).

Con el objetivo de controlar y estabilizar diferentes concentraciones de radón sin necesidad de largos periodos de exposición, se desarrolla el modelo dinámico, basado en ecuaciones diferenciales, que determinan las variaciones temporales del radón. Se tienen en cuenta los diferentes procesos de acumulación, decaimiento y/o extracción de gas, así como sus posibles fugas. Este modelo matemático se ajusta a los resultados experimentales obtenidos para su posterior validación. Con ello, se puede predecir el flujo de radón a introducir en la cámara y el flujo de ventilación para obtener una concentración estable de radón determinada en su interior sin la necesidad de llevar a cabo un gran número de combinaciones de largas medidas experimentales y con el consecuente ahorro de tiempo y trabajo.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: cámara de radón; AlphaGuard; modelos dinámicos

Correspondencia: ainome@iqn.upv.es

Agradecimientos: IDIFEDER/2021/047. Proyecto RAD-NATURA. Estudio, control y mitigación de las fuentes de radiación natural.

1. Introducción

Clasificado como elemento cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud, el gas radón es un elemento radiactivo que se origina en suelos, aguas y ciertos materiales de construcción con contenido en radio (OMS, 2015). En espacios al aire libre o con la ventilación adecuada, su peligrosidad es prácticamente nula mientras que la exposición prolongada a concentraciones elevadas supone un aumento del riesgo de cáncer de pulmón, convirtiéndose en una preocupación de salud pública en los últimos años (Del Pozo, 2023). Su control y mitigación son objeto de estudio y han impulsado numerosos cambios legislativos.

En el reciente Real Decreto 1029/2022 por el que se aprueba el *Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes* se establece la obligatoriedad por parte de los laboratorios que realicen las medidas de estar acreditados de acuerdo con la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017. A su vez, esta norma exige que los equipos y detectores utilizados para la medida de radón en aire participen en programas de calibración manera periódica. La calibración adecuada de los detectores de radón en aire es un requisito para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones llevadas a cabo por los diferentes tipos de detectores, y para ello se necesitan cámaras de radón que estén también acreditadas.

Estas cámaras de radón deben facilitar unas condiciones controladas y reproducibles para la calibración de los equipos. En la Norma IEC 61577-4:2009 se presenta la guía que permite la puesta en marcha del sistema de generación de atmósferas controladas para los instrumentos de medida de radón y de sus descendientes (*System for Test Atmospheres with Radon, STAR*). Según esta norma, la concentración de radón en el interior del sistema STAR debe poder mantenerse constante a diferentes niveles pudiéndolos modificar, aumentado o disminuyendo la actividad de radón.

Muchos países desarrollan sus propias instalaciones para la calibración de detectores de radón en aire, que, a su vez, son utilizadas para investigaciones sobre el comportamiento de este gas en diferentes condiciones atmosféricas. No obstante, pocos de ellos están acreditados como laboratorios primarios debido a su dificultad de construcción. La mayoría trabajan como instalaciones de calibración secundaria y de exposición con técnicas y procedimientos propios estableciendo la trazabilidad hasta el patrón primario. La diferencia entre ambos tipos de laboratorios reside en el nivel de precisión de las medidas realizadas. Los laboratorios primarios son los que establecen los estándares de referencia para las calibraciones y generalmente están respaldados por organismos nacionales e internacionales de metrología. Los laboratorios secundarios a su vez reciben sus estándares de calibración y están trazados a los laboratorios primarios.

Las diferencias en el proceso de calibración dan lugar también a variaciones en las condiciones en el interior de la cámara: niveles y estabilización de la concentración de radón en aire, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.

Los requisitos exigidos para las cámaras varían también según el tipo de detector de radón a calibrar. Mientras que los monitores pasivos no requieren de la estabilización de la concentración de radón en aire, ya que esta se obtiene a partir del tiempo integrado, los detectores en continuo sí necesitan una atmósfera estable, dando que los niveles de radón se obtienen en función del tiempo.

Asimismo, para generar estas atmósferas de radón existen diferentes tipos de fuentes con diferentes tasas de emanación (natural o artificial) así como distintos modos de operación para el suministro del radón (acumulación, inyección puntual o flujo continuo). Las fuentes y el modo de operación influyen en la concentración máxima que se podrá alcanzar en el interior de la cámara y en el tiempo requerido para lograr ese nivel constante de actividad.

En el caso en que el modo de operación sea la acumulación, la fuente de radón se instala en el interior de la cámara o en la parte externa, creando un circuito cerrado con los detectores de radón en aire. (Tamakuma et al., 2023). Generalmente, la estabilización de la concentración con este método requiere de largos periodos de exposición, de hasta meses (Núñez, 2019), por lo que en estos casos las calibraciones tienden a ser procesos costosos.

Con el modo de operación de inyección puntual, la fuente generadora de radón se encuentra fuera de la cámara y se inyecta una cierta cantidad de gas radón en un breve espacio de tiempo. Cuando finaliza la inyección, como no hay ningún aporte adicional de gas radón, la concentración empieza a disminuir siguiendo su desintegración radiactiva (Colección INT-04.45, 2022; Janik et al., 2019). Estos ensayos suelen utilizarse para analizar la sensibilidad de los detectores en condiciones de disminución de radón y a bajas concentraciones.

Por último, el modo de operación de flujo continuo se basa en generar un flujo constante entre la fuente (o a través de ella) y el interior de la cámara, de manera que el aire se enriquece de radón más rápidamente (Tamakuma et al., 2023).

En los tres modos de operación hay que tener en cuenta la constante de desintegración del gas radón y las posibles pérdidas del sistema. La selección del tipo de fuente generadora de radón y de los métodos de operación varía en función de cada centro de investigación, teniendo en cuenta las planificaciones para campañas de intercomparación y calibración a realizar (tiempos requeridos, concentraciones a alcanzar, cantidad de detectores a calibrar, etc.) (Subber et al., 2015; Shweikani et al., 2005; Lee et al., 2004).

En este contexto, el Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) adquirió en 2022 una cámara de radón (IDIFEDER/2021/047) con la finalidad de investigar el comportamiento del gas radón, así como la sensibilidad de los detectores a diferentes exposiciones y condiciones de ensayo. El diseño de esta cámara permite trabajar con los tres modos de operación: acumulación, inyección puntual y flujo continuo. Una vez seleccionados el tipo de fuente y el modo de operación de la cámara se están llevando a cabo numerosos ensayos y muestreos para su puesta en marcha (Noverques, 2023). Los resultados experimentales obtenidos a partir de dichos ensayos se emplearán para obtener modelos dinámicos, basados en ecuaciones diferenciales, que tengan en cuenta todos los procesos generados en el interior de la cámara de radón durante su funcionamiento. Estos modelos permitirán predecir la tasa de emisión de la fuente, el flujo de radón que se introduce en la cámara, así como la concentración máxima alcanzable en esas condiciones de ensayo y el tiempo requerido para ello.

En este trabajo se presenta el modelo matemático obtenido para el funcionamiento en flujo continuo de la cámara, con una fuente de radón artificial.

2. Metodología

En este apartado se detalla la metodología desarrollada, incluyendo una breve descripción de la cámara, el desarrollo teórico del modelo matemático utilizado, el procedimiento de modelización y la descripción de los ensayos llevados a cabo.

2.1 Descripción de la cámara de radón

La cámara de radón (RDN-SENUBIO-UPV) es de acero inoxidable, como se muestra en la Figura 1, de dimensiones internas de (100 x 100 x 100) cm³ y volumen de 1 m³ (Noverques, 2023).

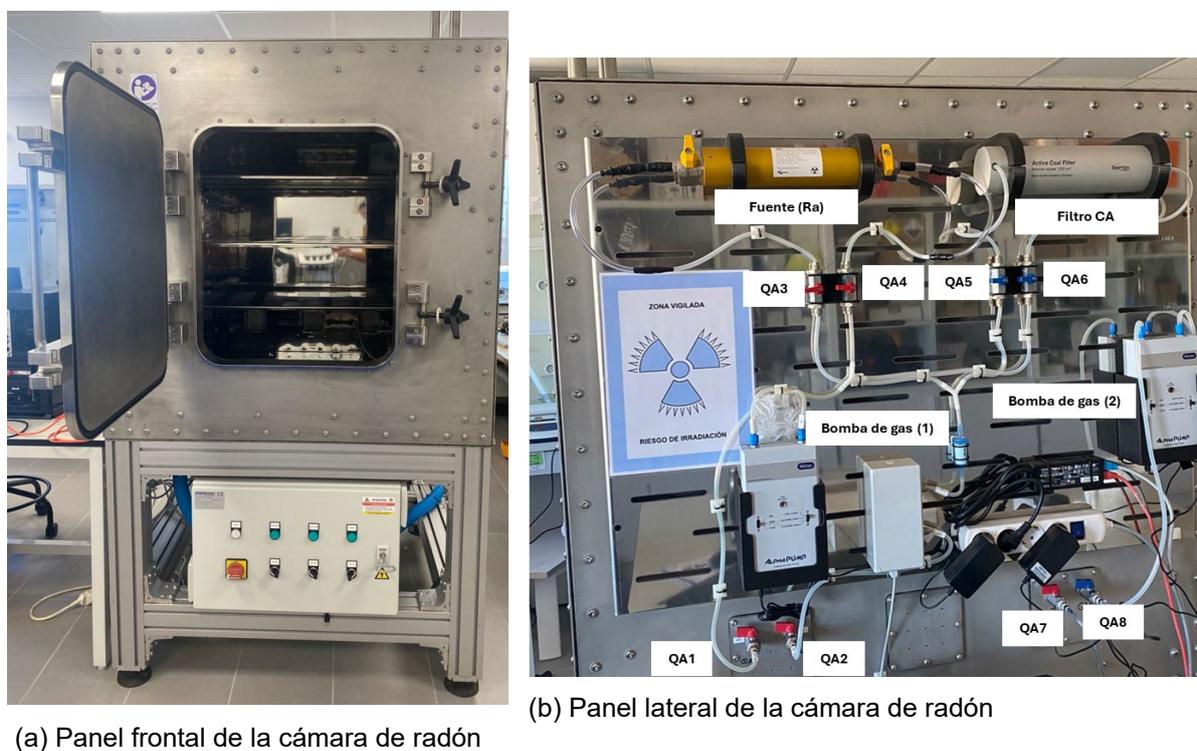
Entre otros dispositivos, esta cámara está equipada con una *Bomba de gas (1)* (AlphaPump Leakproof Gas Pump, Bertin Instruments), que permite generar hasta 6 flujos de corriente de aire diferentes: 1 - 0.5 - 0.3 - 0.1 - 0.05 - 0.03 L·min⁻¹. Permite operar en modo flujo continuo,

y está conectada a una fuente artificial, Pylon RF100, trazable a los estándares de medición CMI de actividad de Ra-226 (calibrada en Czech Metrology Institute).

El interior de la cámara dispone de tres bandejas de acero inoxidable, lo que permite ubicar un elevado número de detectores; una sonda metrológica (Sonda COMET T7610) que analiza la presión atmosférica, la humedad relativa y la temperatura del interior de la cámara; una webcam (Logitech C-270) que monitoriza en directo el interior de la cámara; dos ventiladores en los extremos inferiores de la cámara, garantizando la homogeneidad de gas radón en su interior y puntos de luz que permiten conectar los monitores en continuo para largas exposiciones. Asimismo, se ha instalado un panel de control en el exterior de la cámara, a la parte inferior con un interruptor general, y diferentes selectores para el encendido y apagado del vaciado de la cámara, los sistemas de circulación de aire y los sistemas de iluminación.

Se crea un circuito cerrado entre la fuente, la bomba de gas y la cámara. El flujo de aire que genera la bomba se hace pasar por el interior de la fuente, enriqueciéndolo en radón para ser inyectado en la cámara (Figura 1). Las válvulas QA3 y QA4 abren y cierran la rama del circuito entre la fuente y la bomba de gas. Las válvulas QA1 y QA2 controlan la entrada y salida de aire entre la bomba de gas y el interior de la cámara.

Figura 1. Cámara de radón RDN-SENUBIO-UPV



En el interior de la cámara se dispone de un equipo de referencia de medida de la concentración de radón (en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), el monitor AlphaGUARD S/N AG000395 (Bertin GmbH). La trazabilidad de la concentración medida está referida al "Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)".

El principio de funcionamiento de este detector es una cámara de ionización pulsada de 0.56 litros lo que permite unos rangos de medida que oscilan entre $2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ y $2 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Su sensibilidad a $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ es de 300 cph (cuentas por hora) y la incertidumbre asociada a $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ es inferior al 3%, lo que permite medir concentraciones de radón muy bajas. Este detector en continuo permite medir la concentración de radón a través de un proceso de difusión y de una bomba de flujo integrada en el equipo.

Ensayos previos han permitido analizar la hermeticidad de la cámara, con una constante de pérdidas de $\lambda_p=0.00675 \text{ h}^{-1}$, valor inferior al aceptado por la ISO 11665-13. Asimismo, se ha validado el funcionamiento del sistema de ventilación de la cámara y la homogeneidad del radón en su interior.

2.2 Modelo para la variación temporal de la concentración de radón

La variación temporal de la concentración de radón en aire en el interior de la cámara RDN-SENUBIO-UPV viene determinada por la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\phi}{V} - \lambda t \quad (1)$$

Siendo C la concentración de radón en aire ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), t tiempo de exposición (h), ϕ la producción de la fuente generadora de radón ($\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}$), V volumen de la cámara (m^3) y λ la constante de desintegración (h^{-1}).

A su vez, la constante λ se determina según la ecuación (2):

$$\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_p + \frac{v}{V} \quad (2)$$

Donde λ_{Rn} es la constante de desintegración del radón; λ_p , las pérdidas del sistema y v la tasa de flujo continuo ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).

Resolviendo la ecuación diferencial (1), se obtiene la concentración de radón en aire en función del tiempo:

$$C_{Rn}(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{\phi}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

Siendo C_0 la concentración de radón en aire inicial ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).

Simplificando la ecuación, teniendo en cuenta que las concentraciones de radón inicial en el interior de la cámara son prácticamente nulas, la ecuación utilizada para modelizar el comportamiento del gas radón es:

$$C_{Rn}(t) = \frac{\phi}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

El ajuste de los resultados obtenidos experimentalmente en el laboratorio según la ecuación (4), permite determinar la tasa de emisión de radón, ϕ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) para diferentes flujos de aire, así como la constante λ (h^{-1}) que incluye la tasa de flujo continuo v ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).

Por último, se ha de tener en cuenta que para tiempos de exposiciones elevados ($t \rightarrow \infty$), la concentración de radón en aire en el interior de la cámara se estabilizará y se mantendrá constante. Resolviendo la ecuación (4) para un tiempo $t \rightarrow \infty$ la concentración máxima teórica que se puede alcanzar es:

$$C_{Rn \text{ máx}}(t) = \frac{\phi}{\lambda V} \quad (5)$$

2.3 Procedimiento experimental y modelización de los resultados experimentales

El primer bloque de ensayos se basa en inyectar radón, mediante un flujo en continuo, en el interior de la cámara durante 420 minutos (7 horas). Se analiza la acumulación de gas radón en ese periodo y se modelizan los resultados experimentales. Se asume que inicialmente la concentración de radón es nula al inicio de los ensayos ($C_0 = 0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a un tiempo $t = 0 \text{ min}$). Los flujos de aire generados por la bomba de gas instalada en el panel frontal de la cámara son:

- $Q_1 = 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.
- $Q_2 = 0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

El procedimiento de modelización se basa en:

- **Tratamiento** de los datos experimentales, teniendo en cuenta las diferentes condiciones de ensayo, tanto caudales de entrada como atmósfera generada en el interior de la cámara y tiempos de exposición
- **Cálculo** de la tasa de producción de gas radón ϕ ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) y de la tasa de flujo continuo v ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) mediante la ecuación (4). A partir de los resultados experimentales de concentración de radón se busca la mejor aproximación numérica minimizando la suma cuadrática de los residuos, calculados como la diferencia entre la concentración estimada y la experimental.
- **Validación** de la tasa de producción mediante el recálculo de la concentración estimada y su posterior representación gráfica.

Es importante destacar la diferencia entre los caudales (Q_1, Q_2) y el flujo continuo (v_1, v_2) de la ecuación (2) obtenido a partir de la modelización, que reside en que, en el primer caso, se refiere a la cantidad de aire bombeado que circula a través de la fuente de radón, mientras que el flujo continuo es la cantidad de radón que se va recirculando durante el tiempo de exposición.

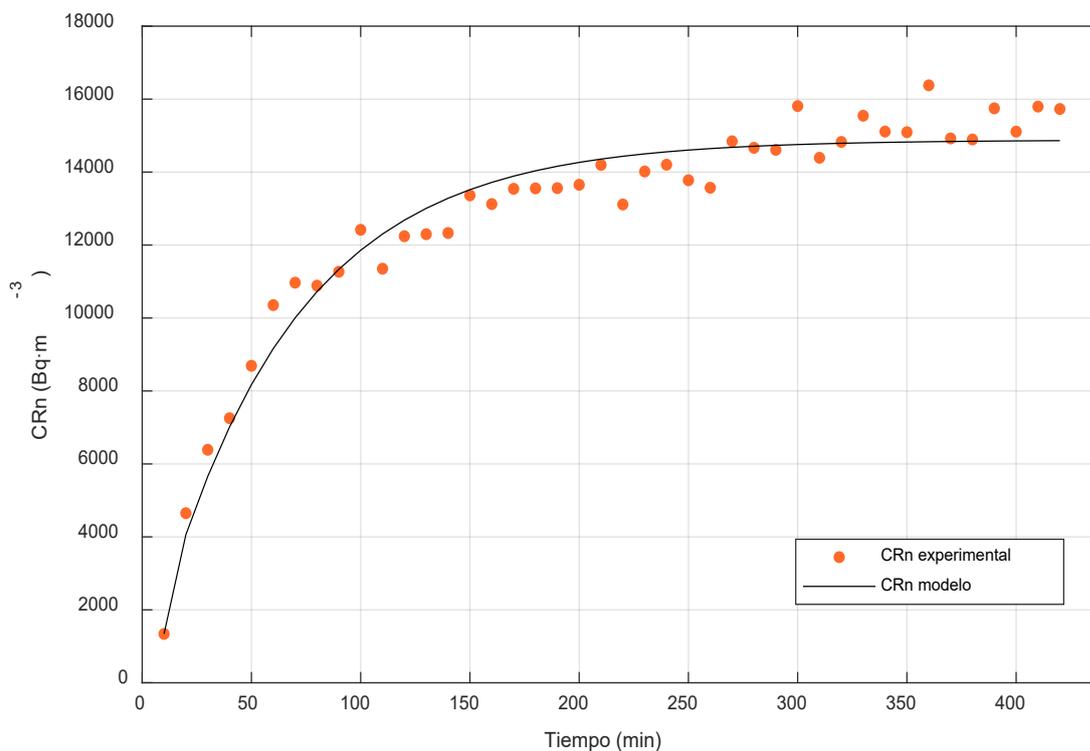
3. Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la modelización de gas radón en el interior de la cámara RDN-SENUBIO-UPV.

3.1 Modelización de la concentración de radón a diferentes caudales de entrada

Los resultados obtenidos para un caudal de la bomba de gas $Q_1 = 1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Acumulación de la concentración de radón para $Q_1 = 1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$



Tal y como se observa en la figura anterior, se produce acumulación de radón en el interior de la cámara, llegando a estabilizarse a partir de los 250 minutos con una concentración de $(1.50 \pm 0.11) \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

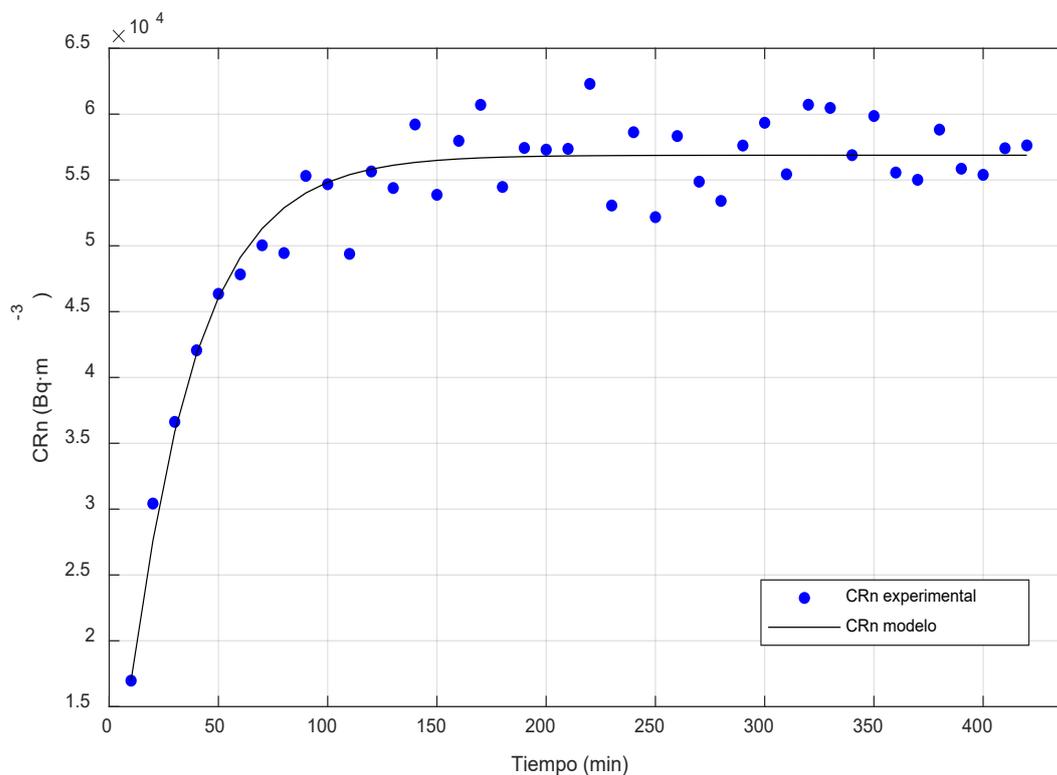
El modelo de la ecuación (4) se ajusta a los resultados experimentales de forma satisfactoria (Figura 2), con $R^2 = 0.95$, valor aceptable para medidas ambientales, establecido por el laboratorio. Este ajuste permite determinar la tasa de emisión de la fuente, así como el flujo continuo, que son $\phi_1 = (237.20 \pm 5) \text{ Bq}\cdot\text{min}^{-1}$ y $v_1 = 0.158 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ respectivamente.

En el ajuste de los resultados experimentales, se observa que tanto la constante de desintegración de radón (λ_{Rn}) como las pérdidas del sistema (λ_p) son despreciables frente a la ratio $\left(\frac{v}{V}\right)$ de la ecuación (2). Este término es un factor determinante en el tiempo de estabilización de la concentración de radón. Cuanto mayor sea esta ratio, menor tiempo será necesario para alcanzar unos niveles constantes de radón en el interior de la cámara.

Por último, teniendo en cuenta un $t \rightarrow \infty$ para este ajuste la concentración máxima alcanzable (ecuación (5)) será de $C_{Rn \text{ máx } 1} = (1.488 \pm 0.30) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

A continuación, en la Figura 3, se muestran los resultados experimentales obtenidos y su modelización para un caudal de bomba de gas de $Q_2 = 0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Figura 3. Acumulación de la concentración de radón para $Q_2 = 0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.



En este caso, se produce también una acumulación durante 420 minutos, alcanzando una concentración promedio de $(5.68 \pm 0.34) \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. De nuevo, se produce una rápida estabilización, pero en este caso, a los 150 minutos debido a que cuanto menor es el caudal de bomba de gas, mayor cantidad de radón es arrastrado desde el interior de la fuente generadora.

Se observa un ajuste satisfactorio del modelo de la ecuación (5) a los resultados experimentales con $R^2 = 0.91$. Mediante este ajuste se ha determinado la tasa de emisión de la fuente $\phi_2 = (1888.42 \pm 37.77) \text{ Bq}\cdot\text{min}^{-1}$ y el flujo continuo, $v_2 = 0.033 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

Teniendo en cuenta un $t \rightarrow \infty$, la concentración máxima alcanzable (ecuación (5)) será de $C_{Rn \text{ máx } 2} = (5.68 \pm 0.34) \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

De igual manera al caso anterior, las constantes λ_{Rn} y λ_p son despreciables frente a la ratio $\left(\frac{v}{V}\right)$, por lo que se logra una estabilización más rápida que si se operase con el modo de acumulación en el que no hay un flujo constante recirculándose.

Los resultados experimentales y los parámetros calculados a partir de la modelización muestran que cuanto mayor es el caudal de la bomba de aire (Q_1) frente a (Q_2) la concentración máxima alcanzada es menor ($C_{Rn \text{ máx } 1} < C_{Rn \text{ máx } 2}$) y también es menor el flujo continuo de radón ($v_1 < v_2$). Esto se debe a que cuando mayor es el caudal que circula a través de la fuente generadora de radón, menor cantidad de radón arrastra y, por tanto, menos enriquecido circula ese aire. En cambio, para un caudal menor, al circular más lentamente, es capaz de capturar una mayor proporción de radón que emite la fuente, enriqueciendo en mayor proporción el aire, tal y como muestran los resultados de ϕ_2 .

4. Conclusiones

La calibración de detectores de radón en aire es imprescindible para garantizar la fiabilidad de las mediciones realizadas en viviendas y lugares de trabajo tal y como exigen el Real Decreto 1029/2022. Es esencial que los detectores y equipos de medida estén calibrados periódicamente y por ello, las cámaras de radón desempeñan un papel crucial en estos procesos. Los protocolos de generación de atmósferas de radón (presión atmosférica, humedad relativa, temperatura) así como la selección del modo de operación de la cámara, los tiempos de exposición o la actividad de la fuente deben estar detallados conformando procedimientos acreditados por las entidades correspondientes.

Las cámaras de radón son dispositivos diseñados específicamente para generar concentraciones controladas de radón en el aire. Estas cámaras, al estar acreditadas, han pasado por rigurosas pruebas y han sido certificadas por organismos competentes, lo que garantiza su precisión y fiabilidad en la generación de concentraciones conocidas de radón.

En esta investigación se ha desarrollado un modelo dinámico, que determina el comportamiento del gas radón en el interior de la cámara, para el modo de operación de flujo continuo, y una fuente de radón artificial.

Para un caudal de la bomba de aire de $Q_1=1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, se ha alcanzado una concentración promedio de $(1.50 \pm 0.11) \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ en 250 minutos, mientras que para un caudal de bomba de aire $Q_2=0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, a partir de los 150 minutos la concentración promedio se estabiliza en $(5.68 \pm 0.34) \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Se puede concluir, por tanto, que mayores caudales de bomba de gas de aire producen una menor acumulación de radón en el interior de la cámara debido a que cuando el aire circula a través de la fuente, es capaz de capturar una menor cantidad de radón que si esa circulación se produce más lentamente.

Se han obtenido las tasas de emisión de la fuente según el caudal de aire bombeado, siendo 8 veces mayor para $Q_2=0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ($\phi_2=1888.42 \pm 37.77 \text{ Bq}\cdot\text{min}^{-1}$ frente a $\phi_1=237.20 \pm 5 \text{ Bq}\cdot\text{min}^{-1}$) para un caudal $Q_2=1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

Por último, a partir de la modelización, se ha calculado el flujo continuo del modo de operación seleccionado, siendo mayor en el segundo de los ensayos, a menor caudal.

Estos resultados validan el modo de operación seleccionado, así como el uso de la fuente empleada, ya que permiten una rápida estabilización de la concentración de radón en el interior de la cámara. Asimismo, dado que las concentraciones ensayadas durante esta investigación son altas, se incorporarán nuevas modificaciones a la cámara de radón, entre ellas la puesta en marcha de otra bomba de gas de aire de salida que permita la extracción de aire de manera simultánea al flujo continuo, para poder estabilizar la concentración de radón a niveles inferiores

Durante esta puesta en marcha de la cámara de radón RDN-SENUBIO-UPV, ha analizado únicamente uno de los modos de operación, el de flujo continuo. No obstante, investigaciones futuras se centrarán analizar y validar diferentes modos de operación (acumulación e inyección puntual) así como se planeará la posibilidad de probar diferentes combinaciones entre ellos. Esto contribuirá a un mejor entendimiento y control sobre la sensibilidad de diferentes detectores frente a variaciones en las exposiciones de gas radón.

5. Referencias

- Del Pozo Campos, E. (2023). El enemigo silencioso: Según la OMS, el radón es responsable de entre el 3 y el 15% de las muertes por cáncer de pulmón. *Alfa*, (55), 12-16.
- Janik, M., Tokonami, S., Kovács, T., Kávási, N., Kranrod, C., Sorimachi, A. and Ishikawa, T. (2009). International intercomparisons of integrating radon detectors in the NIRS radon chamber. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(9), 1691-1696.

- Lee, J. M., Ahn, K. H., Chai, H. S., & Park, T. S. (2004). Development of radon calibration chamber at KRISS. *Applied radiation and isotopes*, 61(2-3), 237-241.
- Manual de la OMS Sobre el Radón en Interiores: Una perspectiva de salud Pública. Organización Mundial de la Salud. 2015
- Noverques Medina, A., Juste Vidal, B. J., Trull Hernández, C., y Verdú Martín, G. (2023). Puesta a punto de la cámara de radón para validación de detectores. Colección 197 CIDIP 2023.
- Núñez Gómez, M. (2019). Homogeneidad de la concentración de gas radón en el interior de una cámara de referencia.
- Shweikani, R., & Raja, G. (2005). Design, construct and test of a calibration radon chamber. *Radiation measurements*, 40(2-6), 316-319.
- Subber, R., Noori, H. N., Ali, F. N., Jabbar, H. J., & Khodier, M. K. (2015). Constructasa simple radon chamber for measurement of radon detectors calibration factors. *Pelagia research library, Advances in applied Science research*, 6(2), 128-131.
- Tamakuma, Y., Kranrod, C., Hosoda, M., & Tokonami, S. (2023). Status of Radon Traceability and Calibration Techniques for Radon Gas. *Radiation Environment and Medicine*, 12(1), 12-24.
- UNE-EN ISO/IEC 17025:2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- UNE-EN ISO/TS 11665-13:2017. Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon 222 — Part 13: Determination of the diffusion coefficient in waterproof materials: membrane two-side activity concentration test method

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

