

## Desarrollo de un prototipo económico para monitorear radón en instalaciones industriales y viviendas

Oscar Baltuano<sup>1,\*</sup>, Marco Munive<sup>2</sup>, Jorge Martínez<sup>3</sup>, Susana Gonzáles<sup>3</sup>, Yuri Hernández<sup>1</sup>, José Solís<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> División de Materiales, Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>3</sup> Dirección de Servicios, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Perú

### Resumen

El  $^{222}\text{Rn}$  se forma por la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$  y luego se desintegra en  $^{218}\text{Po}$  y  $^{214}\text{Po}$ . Los iones de Po producidos se pueden coleccionar electrostáticamente usando una cámara polarizada con una fuente de alta tensión, luego el  $^{218}\text{Po}$  decae a  $^{214}\text{Pb}$  emitiendo partículas  $\alpha$  de 6.003 keV y posteriormente el  $^{214}\text{Po}$  decae a  $^{210}\text{Pb}$  emitiendo partículas  $\alpha$  de 7.687 keV. Al medir la concentración de estas partículas  $\alpha$  en la cámara se puede determinar la concentración del radón en el aire de una forma indirecta. El prototipo que se ha desarrollado utiliza una cámara de medida de acero inoxidable de 2 L con un diodo PIN S3204-09 (Hamamatsu) de cuerpo desnudo como detector de partículas alfa. La cámara y el diodo están polarizados con una fuente de alta tensión (+500 V) para coleccionar los iones de Po y detectar las partículas alfas que se producen luego en la cadena de decaimiento. Las operaciones y funciones digitales son implementadas sobre un microcontrolador PIC18F4550 y este dispositivo cuenta con un módulo de comunicación USB interno para realizar la transferencia de los datos a una PC. La configuración de los parámetros básicos de operación se realiza a través de una laptop por medio del puerto USB. Se ha realizado la calibración del sistema usando un equipo comercial Alfaguard y una zona en donde se ha enterrado uranio para tener una fuente de radón y se han realizado las medidas en distintos puntos con diferentes concentraciones de radón. Se ha logrado monitorear el radón en oficinas cerradas y ventiladas observándose cómo es la variación de radón a lo largo de varios días.

### Development of an economic system to radon monitor in industrial and housing environments

#### Abstract

The  $^{222}\text{Rn}$  is formed by the desintegration of  $^{226}\text{Ra}$ , then it desintegrated in  $^{218}\text{Po}$  and  $^{214}\text{Po}$ . The produced Po ions were electrostatically collected using a polarized chamber connected to a high tension power supply, then the  $^{218}\text{Po}$  decay to  $^{214}\text{Pb}$  emitting  $\alpha$  particles of 6.003 keV and later the  $^{214}\text{Po}$  decay to  $^{210}\text{Pb}$  emitting  $\alpha$  particles of 7.687 keV. When the concentration of the  $\alpha$  particles is measured in the chamber, it is possible to indirectly determine the radon concentration in the air. The prototype was developed using a 2 L stainless steel chamber and a bare PIN diode S3204-09 (Hamamatsu) as an alpha particles detector. The chamber and diode were polarized with a HV power supply (+500 V) to collect Po ions and detect the alpha particles that are produced during the decay process. The operation and digital functions were implemented in a PIC18F4550 microcontroller and this device has an internal USB communication module to transfer data to a PC. The configuration of the operation basic parameters is done by a laptop using the USB port. The system was calibrated using an Alfaguard® commercial equipment, applied to an area where uranium was buried, in order to have a radon source; the measurements were done in different points with different radon concentrations. The radon concentration in close and ventilated offices was monitored and was observed how the radon concentration varies during several days.

### 1. Introducción

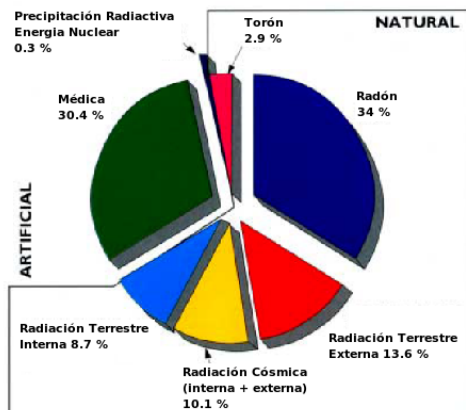
Inicialmente en la mayoría de los países, los científicos pensaban que la radiación natural no afectaba significativamente a la salud de la

población; sin embargo, ese punto de vista comenzó a cambiar a mediados del siglo

\* Correspondencia autor: obaltuano@ipen.gob.pe

XX. El cambio fue dramático en los años 70 y 80 cuando se descubrió que en algunos países de Europa, tenían concentraciones significativas de radón al interior de algunas viviendas.

El radón es un gas radioactivo natural que no tiene olor ni color y que pertenece a la cadena de desintegración natural del  $^{238}\text{U}$  presente en pequeñas cantidades en todos los suelos y rocas [1]. El  $^{222}\text{Rn}$  se forma en la desintegración del  $^{226}\text{Ra}$ , debido a que el radón tiene una vida media de 3,82 días se puede difundir en el suelo antes de decaer. Si escapa del suelo al aire se diluye rápidamente, pero con bajas concentraciones; sin embargo, las concentraciones de radón en ambientes cerrados pueden alcanzar niveles altos [2]. En la Figura 1 se muestra contribución del radón y otras fuentes radioactivas a la dosis que recibe la población.



**Figura 1.** Diagrama de porcentaje de radiación natural y artificial que está expuesta la población [4].

La existencia de una relación entre el riesgo a desarrollar un cáncer de pulmón y la exposición al radón y sus partículas descendientes presentes en el aire se puso de manifiesto hace ya bastante tiempo en la población minera. El riesgo de la exposición de  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  por 30 años de radón incrementa el riesgo de cáncer al pulmón entre 5 y 31 % [5]. Entonces, medir la concentración de radón en ambientes industriales y de vivienda cerrados es muy importante para prevenir la exposición del personal a altas concentraciones de radón.

Debido a la problemática por la presencia de radón en el medioambiente y de su incidencia en los casos de cáncer pulmonar, la medida y

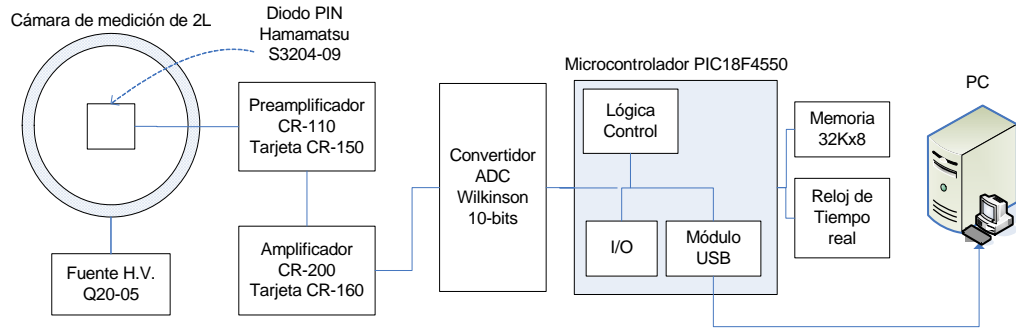
detección de la concentración de radón en el aire es de suma importancia; sin embargo, tal medición no es de práctica rutinaria y no se desarrolla en el país con continuidad debido al alto costo de los equipos necesarios. Por esta razón, se ha desarrollado el prototipo de un espectrómetro alfa de bajo costo que puede ser utilizado para cuantificar la concentración de radón función del tiempo.

## 2. Prototipo desarrollado

El prototipo desarrollado para detectar radón utiliza un diodo PIN, que es un semiconductor tipo fotodiodo sensible a las partículas alfa. Durante el decaimiento del radón se producen iones de  $^{218}\text{Po}$  y  $^{214}\text{Po}$ , estos se colectan cerca del diodo con un campo eléctrico y posteriormente decaen emitiendo partículas  $\alpha$ . Esto se realiza porque las partículas alfa tienen un recorrido libre medio muy corto (entre 2 y 4 cm en el aire) y pierden rápidamente su energía cinética a poca distancia de la fuente. La detección de estas partículas nos da indirectamente la concentración de radón [7]. El prototipo desarrollado (RadonGuard) para medir la concentración de radón se basa en la medición de la radiación alfa producida y la determinación de la distribución de energías (espectrometría) de dicha radiación.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques del prototipo y está basado en el microcontrolador PIC18F4550, el diodo PIN S3204-09 (Hamamatsu) y la electrónica asociada.

Las características específicas de este tipo de medición son: muy bajas tasas de conteo y señales de buena amplitud debido al elevado poder de ionización de las partículas alfa. Los iones de polonio son recolectados sobre la cara sensible del diodo PIN de ventana descubierta de tal forma que la energía de la radiación alfa emitida por estos isótopos no se ve afectada por la atenuación del aire. El polonio se deposita sobre el diodo PIN mediante colección electrostática producida por un potencial eléctrico positivo de +500 V sobre la carcasa de la cámara de medición respecto de la cara sensible del diodo PIN. Es conocido que los iones de Po producidos por la desintegración de radón quedan cargados positivamente durante un tiempo por lo cual pueden ser arrastrados por un campo eléctrico [8].



**Figura 2.** Diagrama de bloques general del prototipo RadonGuard desarrollado.

La instrumentación desarrollada es básicamente una cadena de espectroscopía alfa, adaptada a las condiciones que la aplicación impone. Un microcontrolador PIC18F4550 ha sido programado para operar en modo multicanal (MCA), construyendo el espectro de energías de la radiación alfa detectada con la información entregada por el convertidor analógico digital (ADC) de 10-bits. Los espectros y la información de la fecha y hora correspondiente son almacenados en una memoria externa de 32k bytes de capacidad, lo cual permite que el equipo pueda funcionar en modo stand-alone y con una capacidad de almacenamiento de hasta 15 espectros.

### 2.1 Cámara de detección

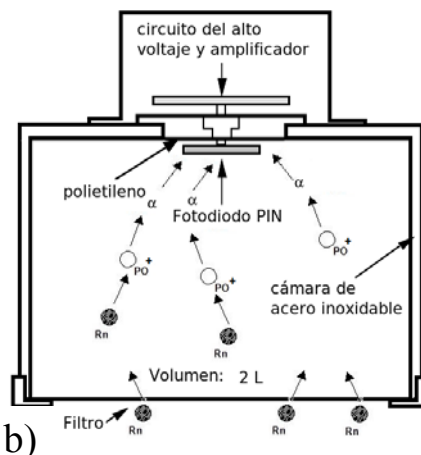
El diodo PIN Hamamatsu S3204-09 de 18 x 18 mm ha sido montado sobre la cámara de medición de acero inoxidable de 2L con la cara sensible del detector al interior de la cámara (Figura 3a).

Se ha fabricado el asiento correspondiente en polietileno negro de alta densidad, el cual además de proporcionar el soporte para el diodo, mantiene el aislamiento galvánico con el cuerpo de la cámara que debe ser mantenido con un potencial positivo mucho mayor respecto del diodo PIN para generar el campo eléctrico que se requiere. Ha sido necesario prestar especial atención en el diseño del blindaje y la forma de montaje de todas las partes interiores con la finalidad de mantener el alto voltaje de la cámara fuera del alcance del operador. Para permitir el intercambio de aire dentro de la cámara por difusión natural, se ha dejado una ranura de 4 mm en la parte externa del blindaje y que corre alrededor de la circunferencia de la misma (Figura 3b). Esta ranura permite la

entrada y salida de aire al interior del volumen sensible de la cámara además de evitar que el diodo PIN quede expuesto a la luz visible para la cual tiene una elevada sensibilidad.



a)



b)

**Figura 3.** (a) Diagrama panorámico de la cámara de medición. (b) Primer plano lateral del blindaje. Se observa la ranura de 4 mm para el ingreso de aire al interior de la cámara de medición.

## 2.2 Preamplificador

Se ha utilizado como primera etapa de procesamiento electrónico un preamplificador marca Cremat, modelo CR-110. Este es un preamplificador de alta ganancia sensible a carga el cual funciona sobre una tarjeta de montaje Cremat, modelo CR-150.

La tarjeta de montaje contiene los reguladores de voltaje necesarios para el funcionamiento del preamplificador; además de los componentes adicionales para la polarización adecuada del diodo PIN y los condensadores para desacoplar en AC la corriente de offset de operación del diodo. El diodo opera con una tensión inversa de +12V.



**Figura 4.** Fotografía del módulo preamplificador CR-110 y tarjeta de montaje CR-150 instalados en el soporte de polietileno sobre la cámara de medición.

La tarjeta de montaje CR-150 ha sido cortada y adaptada para ser instalada muy cerca del diodo PIN (Figura 4) y dentro de la tapa del blindaje de la cámara de medición para reducir al mínimo el ruido electrónico.

Sobre la tapa del blindaje del detector ha sido necesario montar los 3 conectores para el funcionamiento de la cámara de medición. Un conector Amphenol tipo SHV para proporcionar los +500V a la carcasa de la cámara de medición. Un conector BNC para la señal de salida del preamplificador (pulso exponenciales) y un conector DB9 para proporcionar el voltaje de operación de preamplificador y el voltaje de polarización inverso del diodo (Figura 4).

## 2.3 Amplificador

Como amplificador de espectrometría se ha utilizado un módulo conformador gaussiano CR-200-2  $\mu$ s marca Cremat montado sobre una tarjeta CR-160 que incluye las etapas de

ganancia fina, ganancia gruesa y cancelación de polos y ceros (P/Z). La ganancia de este amplificador ha sido calibrada utilizando como referencia un amplificador marca Canberra, modelo 2015A.

La constante de conformación de 2  $\text{Os}$  ha sido elegida como valor de compromiso entre el tiempo de duración del pulso y la relación señal a ruido (S/N) asociada con el ancho de banda para la constante de conformación utilizada. Debido a las bajas tasas de conteo obtenidas durante la medición, no ha sido necesario implementar los sistemas de corrección por altas tasas de conteo: restaurador de línea de base (BLR) y rechazador de pulsos apilados (PUR).

## 2.4 Convertidor ADC del MCA

Un convertidor ADC tipo Wilkinson de 11 bits máximo de resolución (2048 canales) ha sido construido para realizar la conversión de la altura de los pulsos provenientes del amplificador. Este ADC opera a una frecuencia de 4 MHz y tiene un tiempo de conversión máximo de 100  $\text{Os}$ . Este tiempo de conversión garantiza un tiempo muerto del ADC muy pequeño considerando que la medición de la progenie de  $^{222}\text{Rn}$  se realiza con tasas de conteo muy bajas.

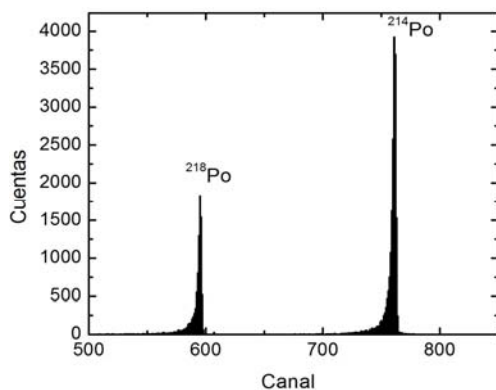
La palabra digital obtenida tras la conversión es enviada al módulo digital del MCA para el almacenamiento correspondiente y la elaboración del espectro de energía requerido. Este ADC puede operar en modo *stand-alone*, por lo que no necesita de ninguna señal de control proveniente del módulo digital del MCA. Esto permite reducir la carga de procesamiento del módulo digital, reduciendo al mínimo el tiempo muerto de almacenamiento en memoria.

De las pruebas de laboratorio se ha determinado que una resolución de 10-bits (1024 canales) es suficiente para los requerimientos. Esta resolución permite diferenciar perfectamente los dos picos de polonio que son de interés. El uso de una menor resolución que la máxima permitida por el MCA permite ahorrar espacio de memoria con la finalidad de almacenar mayor cantidad de espectros.

El microcontrolador es conectado a la computadora (PC) a través de un puerto USB y es programado para operación en modo

*stand-alone* o en modo esclavo. Un software de control (*RadonGuard*) ha sido desarrollado para ser utilizado en la PC y realizar las tareas de configuración, control y transferencia de información entre la PC y el microcontrolador.

Otro programa para la PC (*RadPlot*) ha sido desarrollado para la visualización y análisis gráfico de los espectros obtenidos con la finalidad de hacer la correlación entre los espectros obtenidos y la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ . La Figura 5 muestra el espectro típico de las partículas alfa medido con el prototipo desarrollado.



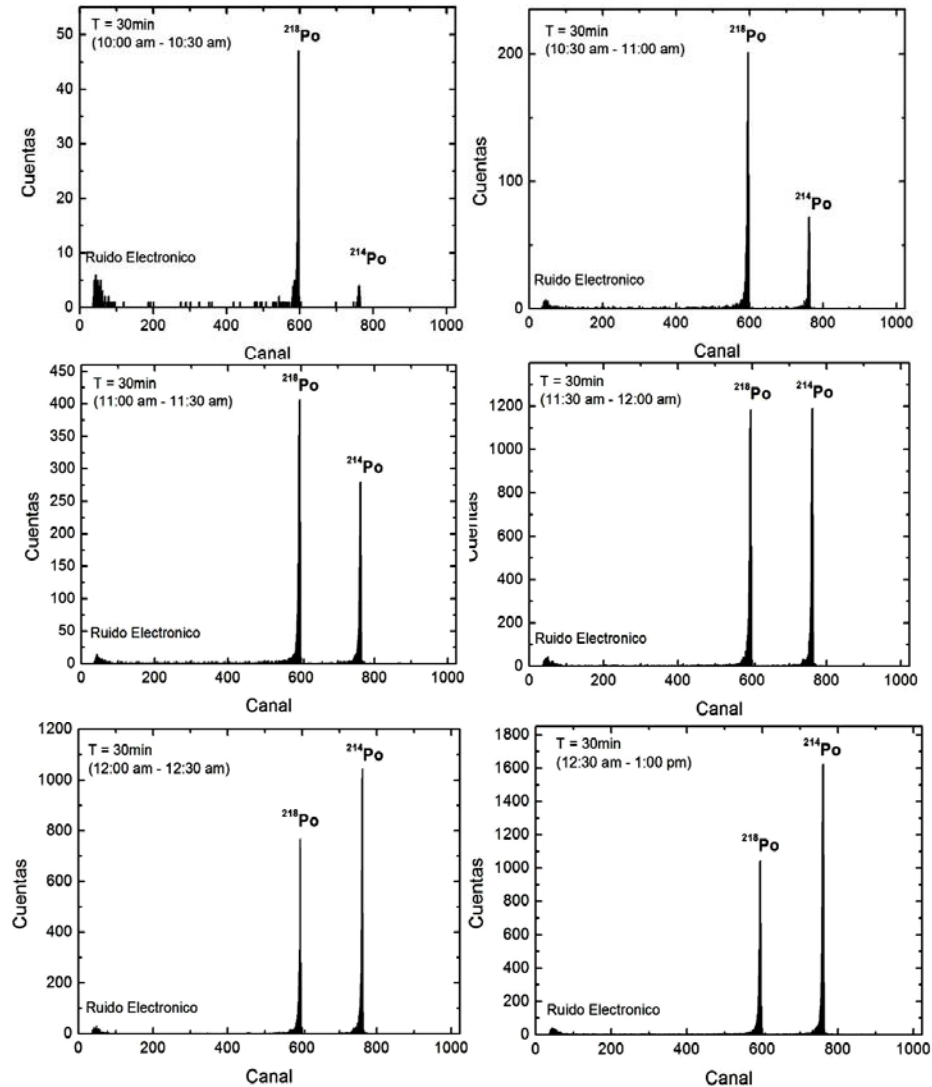
**Figura 5.** Espectro típico de las partículas alfa medidas con el prototipo desarrollado que son producidas por los productos de la desintegración del radón.

### 3. Calibración del prototipo

Para la prueba del prototipo se utilizó un área donde se enterró una muestra de uranio, muy cerca del lugar donde está el mineral, la emanación de radón era alrededor de  $400 \text{ kBq m}^{-3}$ , por lo que representa una fuente intensa de radón. Esto dará una buena estadística de medida en el prototipo desarrollado en poco tiempo. Para medir la emanación de radón se colocó la cámara de medida cubierta de una bolsa plástica para evitar que el radón se diluya en el aire.

Se programó al equipo para que registre un espectro cada media hora. En la Figura 6 se presentan los primeros 6 espectros obtenidos, en el que se observa que el pico correspondiente al  $^{218}\text{Po}$  aparece ni bien se inicia la medición; sin embargo, el pico correspondiente al  $^{214}\text{Po}$  aparece claramente después de 1 h.

Se puede observar que después de 3 h la concentración en la cámara alcanza un equilibrio, por tanto el tiempo mínimo para tener una medida representativa es de 4 h. Como el equipo se utilizará en zonas con poca concentración de radón se procedió a realizar la calibración usando un ambiente con bajos niveles de radón usando el AlfaGuard y el prototipo.

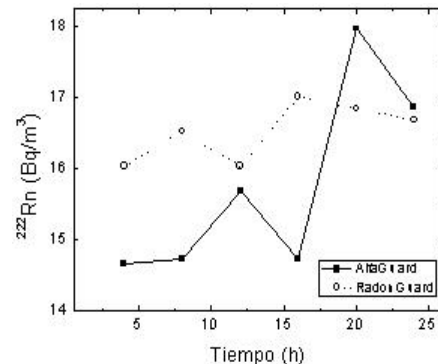


**Figura 6.** Espectro típico de las partículas alfa medidas con el prototipo desarrollado que son producidas por los productos de la desintegración del radón en función del tiempo tomadas cada 30 min.

#### 4. Resultados

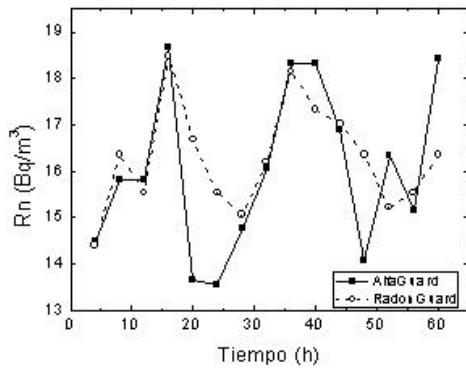
El prototipo fue sometido a pruebas en cuatro ambientes diferentes (A, B, C y D) todos ventilados en forma natural y con volúmenes diferentes. En todos los casos, se realizaron medidas simultáneas utilizando el prototipo desarrollado (RadonGuard) y el equipo comercial AlfaGuard. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran las lecturas de concentración de radón en estos ambientes.

Se tomaron espectros cada 4 h, tiempo con el que se obtiene una buena estadística de contaje. En todos los casos se ha observado una correlación entre la concentración de

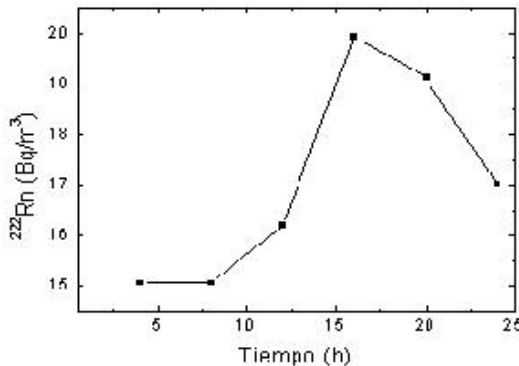


**Figura 7.** Monitoreo de radón durante un día en el ambiente ventilado A usando el equipo AlfaGuard y el prototipo RadonGuard.

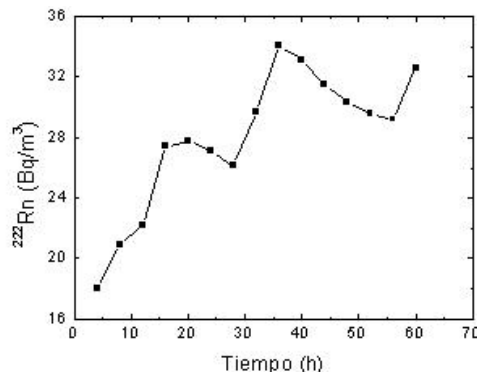
radón y la temperatura ambiente dependiente de la hora del día. Se ha demostrado que la concentración de radón se incrementa durante la noche cuando la temperatura decae y se reduce el movimiento de aire por convección natural.



**Figura 8.** Monitoreo de radón durante dos días y medio en el ambiente ventilado B usando el equipo AlfaGuard y el prototipo RadonGuard.



**Figura 9.** Monitoreo de radón durante un día en un ambiente ventilado usando nuestro prototipo RadonGuard.



**Figura 10.** Monitoreo de radón durante 60 horas en un ambiente ventilado usando nuestro prototipo RadonGuard.

## 5. Conclusiones

El prototipo ha sido probado satisfactoriamente y proporciona la concertación de radón con razonable exactitud si se obtiene una buena estadística de contaje, situación que de acuerdo con el volumen de medición de la cámara se logra después de 3 horas de medición.

Exceptuando el sensor o diodo PIN S3204-09 y debido al uso de componentes comerciales comunes, la instrumentación construida es de bajo costo. La medición de las partículas alfa emitidas por la progenie del radón (Po-218) es mucho más sencilla que la medición del isótopo mismo de Ra-222; sin embargo, se ha observado una correlación directa entre las concentraciones de ambos durante las mediciones. La calibración realizada utilizando el equipo comercial AlfaGuard como referencia ha demostrado que dentro de rangos bajos de concentración existe una buena linealidad; que sin embargo debe ser corregida para concentraciones inusualmente elevadas de Ra-222. Las mediciones realizadas han permitido comprobar algunos de los parámetros que influyen en la concentración de radón en ambientes cerrados, como son: la temperatura, la ventilación del ambiente, el nivel respecto del suelo, los materiales de construcción, etc.

Con las adaptaciones y mejoras respectivas, el prototipo desarrollado puede constituirse en una buena alternativa, económica y confiable a la de los equipos comerciales bastante más costosos. Esto permitiría masificar la medición de concentración de Ra-222 en diversos ambiente de vivienda y/o oficinas y tomar las acciones correctivas para reducir el riesgo de una exposición elevada de la población.

## 6. Agradecimientos

Deseamos agradecer al CONCYTEC por el financiamiento del presente proyecto.

## 7. Bibliografía

- [1] International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP Publication 39. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. Oxford, Pergamon; 1984.
- [2] Steck D. J, Field R. W, Lynch C. F. Exposure to atmospheric radon  $^{222}\text{Rn}$ .

- Environmental Health Perspectives. 1999; 107:123-127.
- [3] Health Protection Agency (HPA). Radon and Public Health: Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation. June 2009.
- [4] Quindos Poncela Luis. Radón: Un gas radioactivo de origen natural en su casa. Universidad de Cantabria, 1995.
- [5] Kaiser J, Heidenreich W, Monchaux G, Morlier JP, Collier C. Lung tumour risk in radon-exposed rats from different experiments: comparative analysis with biologically based models. Radiation Environment Biophysics. 2004; 43(3):189-201.
- [6] Durrani S, Ilic R, Editors. Radon measurements by etched track detectors. Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment. World scientific Publishing Co., Singapore, 1997.
- [7] Takeuchi Y, Okumura K, Kajita T, Tasaka S, *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. Development of high sensitivity radon detectors. 1999; 421(1-2):334-341.
- [8] Kotrappa P, Dua SK, Gupta PC, Mayya YS. Electret - A new tool for measuring concentrations of radon and thoron in air Health Physics. 1981; 41(1):35-46.