

MONITOR AUTOMATICO DE ELEMENTOS HIJOS DE RADON-222

por

E. V. BONZI y R. T. MAINARDI*

ABSTRACT – Se desarrolló una metodología para la determinación de la concentración de elementos radioactivos hijos del radón en aire. A los efectos de implementar este procedimiento se construyó un monitor (no continuo) de la concentración de esos elementos, haciendo espectroscopía alfa. En este trabajo se presentan los fundamentos del método y los detalles constructivos del monitor.

INTRODUCCION

El ser humano se encuentra expuesto a muchos riesgos, a consecuencia de habitar nuestro planeta. Uno de ellos es la concentración de elementos radioactivos en el ambiente. La presencia de estos elementos en materiales de construcción es un problema importante, pues el hombre permanece alrededor del 90 % de su vida en ambientes cerrados. Asimismo en zonas uraníferas, donde abundan materiales con alto contenido de radioactividad, es probable encontrar valores sumamente peligrosos de concentración de Ra-226. Este isótopo pertenece a la serie del U-238 y decae en un gas noble, Rn-222, el cual difunde posteriormente desde ese sitio de producción hacia la atmósfera.

Debido a que los productos decaídos del radón tienen cortas vidas medias, con predominio en radiación alfa de gran energía, son considerados más peligrosos que el gas del cual se derivan. El 69 % de esos productos decaídos del radón están ionizados y en adición a que son isótopos químicamente activos hace que éstos se ligan a los aerosoles del aire, dando como resultado aerosoles radioactivos Negro y Watnick, (1978). Estos son depositados sobre la superficie del aparato respiratorio, emitiendo importantes dosis de radiación sobre el epitelio.

Los niveles de concentración de esas sustancias deben ser monitoreadas y controladas permanentemente. La máxima concentración permisible en aire para 40 hs

G.E.A.N. Fa.M.A.F. U.N.Cba.

Laprida 854, 5000 Córdoba, Argentina.

*-Investigador del CONICET.

semanales de exposición regular es $3 \text{ E-04 } \mu \text{ Ci/L}$ IAEA (1963) $6 \text{ 3 E-05 } \mu \text{ Ci/L}$ ICRP (1959).

Muchos esfuerzos se realizan para determinar esta concentración de la manera más rápida y precisa posible y nuestra metodología, en adición con nuestro monitor, pretende ser un aporte más a este esfuerzo. Dicha metodología minimiza los errores en función de los intervalos, aprovecha el tiempo de muestreo para la determinación de radiación de fondo y realiza el conteo alfa discriminado por energía en dos canales simultáneamente, completando una medición en un tiempo menor de media hora. En función de este método se construyó nuestro monitor de elementos hijos del radón.

MODELO MATEMATICO

El modelo utilizado parte del desarrollado por Bonzit (1987) y consta de dos etapas, colección y detección. Colección: Si se colecta aerosoles en un filtro de papel, a los cuales están ligados los elementos hijos del Radón-222 (Po-218, Pb-214, Bi-214), la ecuación que describe el número de átomos radioactivos del i -ésimo elemento sobre el filtro es la siguiente:

$$\frac{dN_i(\Theta)}{d\Theta} = \lambda_{i-1} N_{i-1}(\Theta) - \lambda_i N_i(\Theta) + Q_i v f \quad [1]$$

donde:

$N_i(\Theta)t$ = número de átomos del i -ésimo tipo sobre el filtro durante el muestreo, con $N_i(0) = 0$.
 $i = 1, 2, 3$, denotan respectivamente Po-218, Pb-214 y Bi-214.

Θ = tiempo de realización del muestreo en el período $(0, T)$.

v = flujo de aire en l/min.

f = eficiencia del filtro.

Q_i = número de átomos del i -ésimo tipo por unidad de volumen del aire muestreado en átomos/litro.

λ_i = constante de decaimiento para átomos del i -ésimo tipo, en minutos, obtenidas de tabla Browne y Firestone (1986).

El Ra-226, tiene una vida media de 1602 años y puesto que ésta es mucho más larga que la vida media de sus hijos subsecuentes, podemos tomarlo como generador de radón a una actividad constante para tiempos cortos ($T \ll 1602$ años).

También notamos que después de que el Bi-214 decae, el Po-214 decae inmediatamente, pues su vida media es muy corta ($164 \mu\text{s}$), por lo que no tendremos en cuenta su concentración y su emisión alfa se la asignaremos al Bi-214 a los fines del modelo matemático. Finalmente, el Pb-210 tiene una vida media de 22 años, el cual para tiempos cortos,

como los de conteo, bloquea el decaimiento en cadena por lo que trabajaremos con los primeros tres hijos del Rn-222.

La solución de estas ecuaciones da el número de átomos de los elementos hijos de corta vida media del Rn-222 en el filtro, en función de la concentración de ellos en el aire colectado por el filtro. Estas pueden ser denotadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} N_1 &= Q_1 \nu f M_{11} \\ N_2 &= Q_1 \nu f M_{21} + Q_2 \nu f M_{22} \\ N_3 &= Q_1 \nu f M_{31} + Q_2 \nu f M_{32} + Q_3 \nu f M_{33} \end{aligned} \quad [2]$$

A estas ecuaciones las expresamos en forma matricial:

$$\mathbf{N} = \nu f \mathbf{M} \mathbf{Q} \quad [3]$$

Detección: Para diferenciar el período de colección (o muestreo) del período de detección (o decaimiento) de los radionucleidos colectados sobre el filtro, definimos una nueva variable t , donde $t = 0$ al final del muestreo. El segundo conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el decaimiento de los átomos colectados es:

$$\frac{d n_i(t)}{d t} = \lambda_{i-1} n_{i-1}(t) - \lambda_i n_i(t) \quad [4]$$

donde $n_i(t)$ es el número de átomos del i -ésimo tipo sobre el filtro al tiempo t después de finalizado el muestreo.

Las soluciones de estas ecuaciones las podemos expresar de la siguientes manera:

$$\begin{aligned} n_1 &= N_1(T) D_{11} \\ n_2 &= N_1(T) D_{21} + N_2(T) D_{22} \\ n_3 &= N_1(T) D_{31} + N_2(T) D_{32} + N_3(T) D_{33} \end{aligned} \quad [5]$$

notemos que los $D_{ij} = D_{ij}(t)$.

El número total de cuentas de partículas alfa registradas por el sistema de detección, después del muestreo será: 1) para el Po-218: en el k-ésimo intervalo de tiempo a partir de $TI(k)$ hasta $TF(k)$, tendremos:

$$C_{1k} = \int_{TI(k)}^{TF(k)} G \epsilon \lambda_1 n_1(t) dt \quad [6]$$

2) para Bi-214: en el r-ésimo intervalo de tiempo a partir de $TI(r)$ hasta $TF(r)$, será:

$$C_{2r} = \int_{TI(r)}^{TF(r)} G \epsilon \lambda_3 n_3(t) dt \quad [7]$$

con G = eficiencia del sistema de detección.

ϵ = coeficiente de autoabsorción alfa del filtro.

reemplazando $n_i(t)$ de [5] en [6] y [7], e integrando queda:

$$\begin{aligned} C_{1k} &= G \epsilon I_{k1} N_1(T) \\ C_{2r} &= G \epsilon (I_{r1} N_1(T) + I_{r2} N_2(T) + I_{r3} N_3(T)) \end{aligned}$$

Si realizamos para la ecuación [6] un único intervalo de medición, esto es $k = 1$ y para la ecuación [7] dos intervalos de medición que denotaremos con $r = 2, 3$; tendremos

$$C = G \epsilon D N, \text{ con}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{p1} \\ C_{p2} \\ C_{p3} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} I_{11} & 0 & 0 \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix}$$

y si reemplazamos $\mathbf{N} = \mathbf{v} + \mathbf{M} \mathbf{C}$ de [3] nos queda $\mathbf{C} = \mathbf{G} \mathbf{v} + \mathbf{D} \mathbf{M} \mathbf{C}$.

De esta manera obtendremos un sistema de 3 ecuaciones lineales con 3 incógnitas, por lo que la matriz $(\mathbf{G} \mathbf{v} + \mathbf{D} \mathbf{M})$ puede tener inversa, es decir

$$\mathbf{C} = (\mathbf{G} \mathbf{v} + \mathbf{D} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{C} \quad [8]$$

Finalmente podemos decir que la matriz \mathbf{M} es la matriz de muestreo de aire y está en función del intervalo del mismo, y la matriz \mathbf{I} es la matriz de detección que está en función de los intervalos de detección.

ANÁLISIS DE ERROR

La desviación estándar de las concentraciones se puede escribir como:

$$s_c = \frac{1}{\mathbf{G} \mathbf{v} + \mathbf{D} \mathbf{M}} \left[\sum_j (\mathbf{I} \mathbf{M}^{-1})_j C_j + \left[\sum_j (\mathbf{I} \mathbf{M}^{-1})_j C_j \right]^2 \left(\frac{\Delta \mathbf{G}^2}{\mathbf{G}^2} + \frac{\Delta \mathbf{v}^2}{\mathbf{v}^2} + \frac{\Delta \mathbf{D}^2}{\mathbf{D}^2} + \frac{\Delta \mathbf{M}^2}{\mathbf{M}^2} \right)^{1/2} \right]$$

donde:

$\Delta \mathbf{G}$: incerteza sistemática en la eficiencia de detección.

$\Delta \mathbf{v}$: incerteza sistemática en la eficiencia autoabsorción alfa.

$\Delta \mathbf{D}$: incerteza sistemática en el volumen de muestreo.

Δf : incerteza sistemática en la eficiencia del filtro.

$(IM^{-1})_{ij}$: son los elementos de la matriz $(IM)^{-1}$.

El error introducido por la corrección debida a la radiación de fondo se desprecia debido a que ésta es relativamente baja.

DESCRIPCION DEL METODO

El método utilizado es el de espectroscopía alfa, donde utilizamos un intervalo de muestreo o filtrado de aire de 5 min ($\Theta = 0, T$), durante el cual se realiza la determinación de radiación de fondo durante 4 minutos, que luego será sustraído de cada determinación de radiación alfa C_{11} , C_{22} y C_{23} ; en forma proporcional a cada período, según su duración.

La detección de la emisión alfa se realiza en tres intervalos superpuestos, que son:

para $k = 1$ desde $TI(1) = 0$ min hasta $TF(1) = 16$ min.

para $r = 2$ desde $TI(2) = 0$ min hasta $TF(2) = 8$ min.

para $r = 3$ desde $TI(3) = 8$ min hasta $TF(3) = 16$ min.

es decir que se utiliza un tiempo total para la detección de 16 minutos, estos intervalos son fijos al igual que el período de muestreo, lo que en conjunto nos da un tiempo total de determinación de 21 minutos.

La metodología fue desarrollada para lograr una determinación de la concentración de elementos hijos del radón en un tiempo corto y con un mínimo de error para cada concentración. Para ello estimamos aceptable un tiempo de muestreo próximo a los 5 minutos y para la detección un tiempo cercano a los 15 minutos.

A su vez proponemos como mejora a los métodos usuales de espectroscopía alfa, la determinación de la actividad en el canal de menor energía en un solo intervalo, igual a la adición de los dos intervalos realizados en el segundo canal.

Con estos dos requisitos se desarrolló un modelo del método, al cual se le aplicó un procedimiento numérico variacional, con el cual se logró ajustar los intervalos para alcanzar un mínimo en los errores de las concentraciones. En este procedimiento numérico variacional se utilizó una concentración relativa entre las actividades de los elementos hijos del radón que usualmente se encuentran en ambientes cerrados, para I_2/I_1 una relación de 0.5 y para I_3/I_1 de 0.37, esto se desprende del trabajo de Revzan y Nazaroff (1983).

El rango de las concentraciones que pueden ser determinadas varían desde el umbral permisible hasta cien veces, o más, este valor. El error con que se realiza una determinación, para valores de concentración del orden del umbral máximo permisible, es de aproximadamente el 20 %. El error disminuye para valores más grandes de concentraciones.

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE DETECCION

Para aplicar este método, con los intervalos traslapados, fue menester tener que desarrollar y construir un equipo a esos fines. Los requisitos que nos impusimos para alcanzar nuestro objetivo fueron que el mismo tuviera un bajo costo, fuese portable, con autonomía energética, automático y de fácil uso. Quizás el requisito más fuerte haya sido el que calculara, en forma inmediata, las concentraciones de estos elementos. El resultado es el equipo que en forma breve detallamos a continuación:

El sistema de detección consta de cuatro partes básicas que son:

- 1.: colector de aerosoles radioactivos sobre filtro de papel;
- 2.: detector de radiación alfa discriminada por energía;
- 3.: sistema electrónico de control, adquisición y procesamiento de datos;
- 4.: acumulador de energía, con cargador incorporado.

La colección de aerosoles se realiza con una bomba aspiradora a turbina, que funciona con un motor de 12 VCC, con un flujo de aire muestreado de 20 l/min., sobre la cuál va montado el soporte del filtro de papel. Estos filtros son de 0.8 μ m de tamaño de poro y de 45 mm de diámetro. El soporte del filtro es móvil y comandado electrónicamente, lo que permite tener un monitor automático y reducir en forma considerable el tiempo entre el final del muestreo de aire y el comienzo de la detección de partículas alfa, ya que el desplazamiento se produce en un tiempo del orden de 1 seg y es despreciable comparado con los intervalos de detección.

La detección de radiación alfa se realiza utilizando un detector Silicio-Au de barrera difundida, de 26 mm de diámetro, comercializado por INVAP-Argentina.

El sistema electrónico de control, adquisición y procesamiento de datos consta de hardware y software. El hardware está conformado principalmente de un microprocesador, memorias EPROM y RAM, una interfase entrada-salida, un conversor analógico-digital, discriminador de altura de pulsos y display. El software que está almacenado en memoria EPROM, consta de varias partes y en conjunto forman el programa monitor. En él esta almacenado la matriz $(G \in v f)^{-1} (D \cdot M)^{-1}$, que es la matriz determinada y calculada como la más apropiada según el cálculo realizado con el procedimiento numérico variacional. De esta manera se simplifica el software a crear, ya que se puede escribir en lenguaje de bajo nivel.

Las funciones realizadas por el sistema electrónico son las siguientes:

-Control: Del tiempo de muestreo (5 min. comandando el encendido y apagado de la bomba de aire), desplazamiento del filtro hasta situarlo frente al detector y de los intervalos de detección alfa, un intervalo de 16 minutos y 2 intervalos de 8 min. cada uno, superpuestos como anteriormente fue explicado.

-Adquisición: Convierte los pulsos analógicos en digitales, los discrimina por sus altura, realizando espectroscopía alfa y los almacena en dos canales, uno para energía de 5.998 MeV y el otro para energías de 7.68 MeV. Durante el tiempo de muestreo se realiza una determinación de nivel de fondo en un intervalo de 4 min, el cual es submúltiplo de los intervalos de detección, de esta manera se disminuye el error numérico cometido. Las cuentas obtenidas en la determinación de fondo y en los intervalos de detección son almacenados en memoria RAM.

-Procesamiento de datos: Una vez finalizados los intervalos de detección se procesan los datos, para obtener las concentraciones de los elementos hijos del radón en átomos/litro. Estos datos y las adquisiciones realizadas en las distintas etapas de detección, son visualizados en el display del equipo. Además, todos estos datos quedan grabados en RAM, cuya capacidad de memoria puede almacenar más de 20 lecturas o determinaciones.

Las fuentes de tensión necesarias están alimentadas por un acumulador de gel de 12 VCC y son de tensión estabilizada. La autonomía energética supera ampliamente las 10 horas de monitoreo continuo.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de la metodología elaborada para este monitor, pudimos apreciar que variaciones de tiempo del orden de algunos minutos, tanto para el muestreo como para la detección, no producían grandes variaciones en la disminución de los errores. Por ello solamente fue menester modificar en un minuto el tiempo final de detección de acuerdo a nuestro requisito.

Creemos que a los fines prácticos no es convenientes aplicar una metodología más elaborada, como podría ser el de cuadrados mínimo, para lo cual se necesitaría un programa más complejo para la realización de los cálculos numéricos.

El equipo se ha terminado de construir recientemente, por lo que está en las primeras etapas de prueba y revisión, sin todavía haber sido utilizado en campo, tarea para la que fue ideado y construido.

El monitor completo pesa unos cinco kilogramos y es del tamaño de una pequeña maleta de viaje, lo que lo hace realmente portatil.

La autonomía es a nuestro juicio altamente suficiente, ya que permite realizar toda una jornada de mediciones sin tener que regresar a una base de recarga, pero en el caso de que el acumulador se arruinara, puede ser alimentado directamente desde un automotor o del acumulador de éste.

De igual manera, el almacenamiento en RAM de una cantidad de determinaciones de concentraciones superior a 20, lo hace un equipo práctico, pues estos datos pueden ser leídos nuevamente al finalizar la jornada.

El tiempo total de cada determinación es inferior a los 22 minutos, por ello es posible realizar varias determinaciones por día, teniendo los cálculos de las concentraciones de una manera sumamente fácil y rápida.

REFERENCIAS

- E. BONZI, (1987) Trabajo final de Licenciatura, Fa.M.A.F., pt23.
E. BROWNE y R. FIRESTONE, (1986) Table of Radioactive Isotopes.
V. NEGRO and S. WATNICK, (1978) IEEE Transactions on Nuclear Science, VNS25, pt757.
K. REVZAN Y W. NAZAROFF, (1983) Health Physics Vt45 N-t2, p 509.

AUTOMATIC MONITOR OF RADON-222 DAUGHTER ELEMENTS CONCENTRATION

ABSTRACT – We have developed a method to determine the concentration of radon-222 daughter radioactive elements in air. In order to implement this procedure a non-continuous monitor was built to measure the concentration of those elements by means of alpha spectroscopy.

This work presents the fundamentals of the analytical method and construction details of the monitor.