

SISTEMA MONITOR DE GASES RADIATIVOS: TRITIO, RADON, GASES NOBLES (N°856211)

Egey, J.Z.¹, Matatagui, E.²

RESUMEN

Se describe el sensor y su electrónica asociada, que fueron desarrollados para constituir un sistema monitor de la presencia de gases radiactivos en aire u otros portadores gaseosos. El sistema es de alta sensibilidad y de amplio rango de operación. El sensor es del tipo de cámara de ionización con circulación interna del gas a controlar y la electrónica asociada tiene una resolución menor a 10 E-15 A (fA). Permite detectar en forma de pulso la desintegración alfa del radón y sus hijas. El sistema de medición está constituido por un sistema adquirente de datos comercial acoplado a una computadora. Se almacenan y se presentan los datos en forma gráfica para su seguimiento y procesamiento. Se dispone así de un sistema monitor simple y versátil. Se presentarán aquí resultados experimentales obtenidos.

ABSTRACT

A system for monitoring the radioactive gases tritium, radon and noble gases is described. We present the description of the sensor and the associated electronics that have been developed to monitor the presence of radioactive gases in air or other gaseous effluents. The system has a high sensitivity and a wide range of operation. The sensor is an ionization chamber, featuring the internal circulation of the gas to monitor and the associated electronics has a resolution better than 10 E-15A (fA). It allows the detection of the individual pulses that are produced during the alpha decay of radon and its daughter elements. The measurement system is made up of a commercial data acquisition system connected to a computer. The acquired data is presented on a graphical display and it is stored for later processing and analysis. We have a system that is of simple construction and versatile. Here we present the experimental results.

¹ SOLYDES

jzegey@gmail.com

² Instituto Dan Beninson, UNSAM, SOLYDES

ematatagui@hotmail.com

1. INTRODUCCION

Una Central Nuclear guarda un inventario enorme de material radiactivo, el que debe permanecer confinado. Fugas de material radiactivo serán detectadas, cuantificadas y en lo posible, controladas.

A los efectos de tomar las acciones apropiadas, se debe vigilar la presencia de radiactividad. Ello se hará, mediante Monitores de Área, en zonas preestablecidas de la Instalación y la información generada sirve a la protección de los trabajadores. También se vigilará la radioactividad en los efluentes, y la correspondiente información servirá para tomar acciones para la protección del público y del medio ambiente.

La detección de gases nobles radiactivos merece especial atención, debido a su gran capacidad de dispersión y a las dificultades para su retención y confinamiento. Su presencia en el ambiente y en efluentes debe ser detectada y controlada con el manejo del sistema de ventilación.

La detección de tritio en el ambiente y efluentes es obligatoria. El inventario de tritio en el agua pesada de nuestras Centrales es muy importante, y su presencia en el ambiente es un indicador de posibles fallas de integridad del reactor.

El radón, un gas noble radiactivo de origen natural, es la principal contribuyente a la dosis colectiva de la población. Su detección y comportamiento en el ambiente exterior, sirve a la protección radiológica del público. La presencia de radón en una Central podría imponer un límite a la detección de tritio y otros gases radioactivos.

Este trabajo describe el desarrollo de un Sistema Monitor sensible, de gran rango dinámico y de simple realización, capaz de medir en forma continua gases nobles radiactivos, tritio y radón.

Propone, también, un análisis estadístico de los datos: El Sistema Monitor podrá, en casos favorables, cuantificar la contribución de diversos componentes radiactivos a la señal del Detector.

2. LINEAMIENTOS DEL PRESENTE TRABAJO

El Sistema Monitor usa un sensor de ionización como detector. La señal generada es una corriente eléctrica proporcional a la ionización presente en su volumen sensible. Esta corriente eléctrica es el resultado de la superposición de los pulsos eléctricos generados por el campo de radiación.

Estos pulsos son de muy bajo nivel y usualmente no pueden ser resueltos por la electrónica de medición. En consecuencia, lo que se mide es una corriente media, indicadora de la ionización media en el detector.

En la Figura 1. se muestra como sería la evolución de una señal típica, generada por un detector de ionización y un medidor de corriente, en función del tiempo.

Esquema de medición Básico

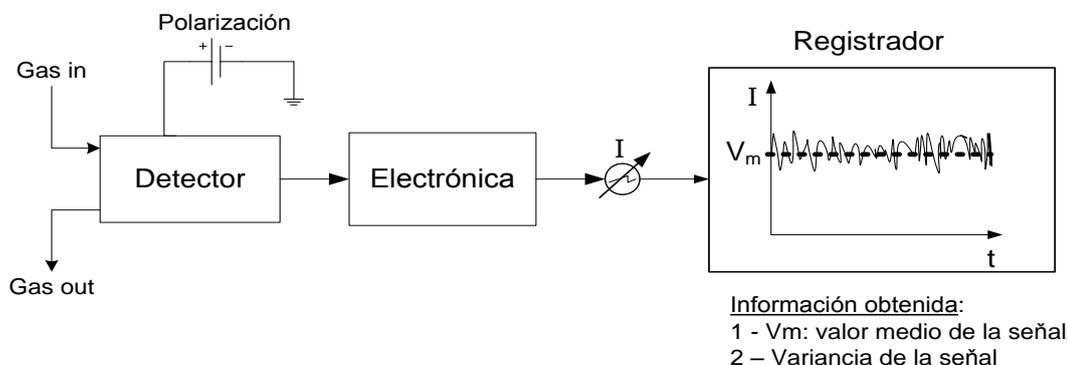


Fig 1

Se observa:

1. Una corriente promedio, indicadora de la ionización media en el detector.
2. Un ruido, o fluctuación, que se observa en la medición de la corriente. Es característico que esa fluctuación depende del ancho de banda utilizado por el instrumento medidor: Para reducir el nivel de ruido es necesario aumentar el tiempo de medición, lo que aumenta, a su vez, el tiempo de respuesta del sistema.
3. La corriente promedio medida no da información sobre la composición del campo de radiación y, por lo tanto, no podrá identificar los diversos radioisótopos que contribuyen a la señal. El análisis de la variancia puede brindar información adicional útil.

3. PROPUESTA DEL PRESENTE TRABAJO

Este trabajo propone:

1. Desarrollar un Sistema Monitor de gases radiactivos en aire.
2. Hacer un procesamiento estadístico de la señal de corriente, analizando su valor medio y sus fluctuaciones. Sus aplicaciones podrían ser:
 - a. cuantificar, en ciertos casos favorables, los radioisótopos responsables del campo de radiación bajo estudio.
 - b. reducir la interferencia, en ciertos casos favorables, de radiaciones no deseadas del campo de radiación bajo estudio.

El significado de “casos favorables” se indicará más adelante.

4. GASES RADIATIVOS

Durante la operación normal de una Planta Nuclear, gases radiactivos que fugan del reactor son diluidos y desechados en forma controlada, tal que no se excedan los límites preestablecidos. En el caso de ruptura de integridad del reactor (accidente) grandes cantidades de material radiactivo podrían pasar al sistema de contención. En particular, los gases nobles radiactivos son de difícil control y retención y podrían pasar al ambiente exterior con el aire de ventilación.

Los componentes gaseosos radiactivos más significativos son los gases nobles. La concentración relativa de los diversos radioisótopos que podrían presentarse es variable y depende de las condiciones de operación del reactor.

Para emisiones planificadas, la principal contribución proviene de gases de vida media larga, tales como el Xe-133 y el Xe-135.

Para emisiones de accidente, la composición dependerá de las características del accidente y del tiempo transcurrido desde el mismo. Gases de vida media corta, tales como Kr-87 y Kr-88 podrían ser significativos.

A largo tiempo, el Kr-85 es el gas noble más importante.

El tritio merece especial atención en nuestras Centrales. El tritio está diluido como DTO en el agua pesada del reactor, y su concentración va en aumento con el tiempo de operación de la Central. En consecuencia una fuga de agua pesada al recinto de contención se verá acompañada de una fuga de tritio a ese ambiente.

La Tabla 1. muestra algunas características nucleares de radioisótopos de interés y que definen su posibilidad de detección.

Tabla 1.

Isótopo	Energía Beta Media KeV	Periodo de Semidesintegración	Energía Gamma KeV	Intensidad Gamma %
H-3	5.68	12.3 a		
Ar-41	464	1.83 h	1293	99
Kr-87	1323	76.3 m	402	49
Kr-88	358	2.84 h	2392	34
Xe-133	100	5.24 d	81	37
Xe-135	302	9.4 h	250	90
Kr-85	250	10.7 a	514	0.43
	Energía Alfa KeV			
Rn-222	5490	3.82 d		

Conviene indicar que:

- . El radón es un gas noble radiactivo de origen natural, emisor alfa y se encuentra ampliamente distribuido. Es hija del Ra - 226, y pertenece a la cadena de desintegración del U- 238.
- . El tritio se acumula en el inventario de agua pesada del reactor.
- . El Ar - 41 se genera por activación del Ar - 40 del aire.
- . Los otros gases nobles radiactivos se generan por fisión.

5. SISTEMA MONITOR

5.1 Detector de Radiación

Un Sistema Monitor debe dar, en forma continua, información sobre la presencia de gases radiactivos en el ambiente o en efluentes. Esta información es necesaria para tomar las acciones de protección apropiadas.

Usualmente la identificación de un dado radioisótopo se hace por espectroscopia gamma y requiere de un sistema de detección complejo y delicado.

Por otro lado, los materiales radiactivos generados durante la operación del reactor son emisores beta. En algunos isótopos, la emisión beta va acompañada por emisión gamma, lo que permitiría su identificación, pero otros isótopos, de nuestro especial interés, son emisores beta puros (como el H - 3), o tienen emisión gamma de muy baja intensidad (como el Kr-85).

En principio, el interés está en cuantificar la presencia tritio y de gases nobles radiactivos en aire. Se considera que ello es suficiente para la toma de decisiones a partir de las mediciones del Sistema Monitor. Un conocimiento más detallado de la contribución de los diversos radioisótopos a la señal podría hacerse a posteriori, y con otros instrumentos.

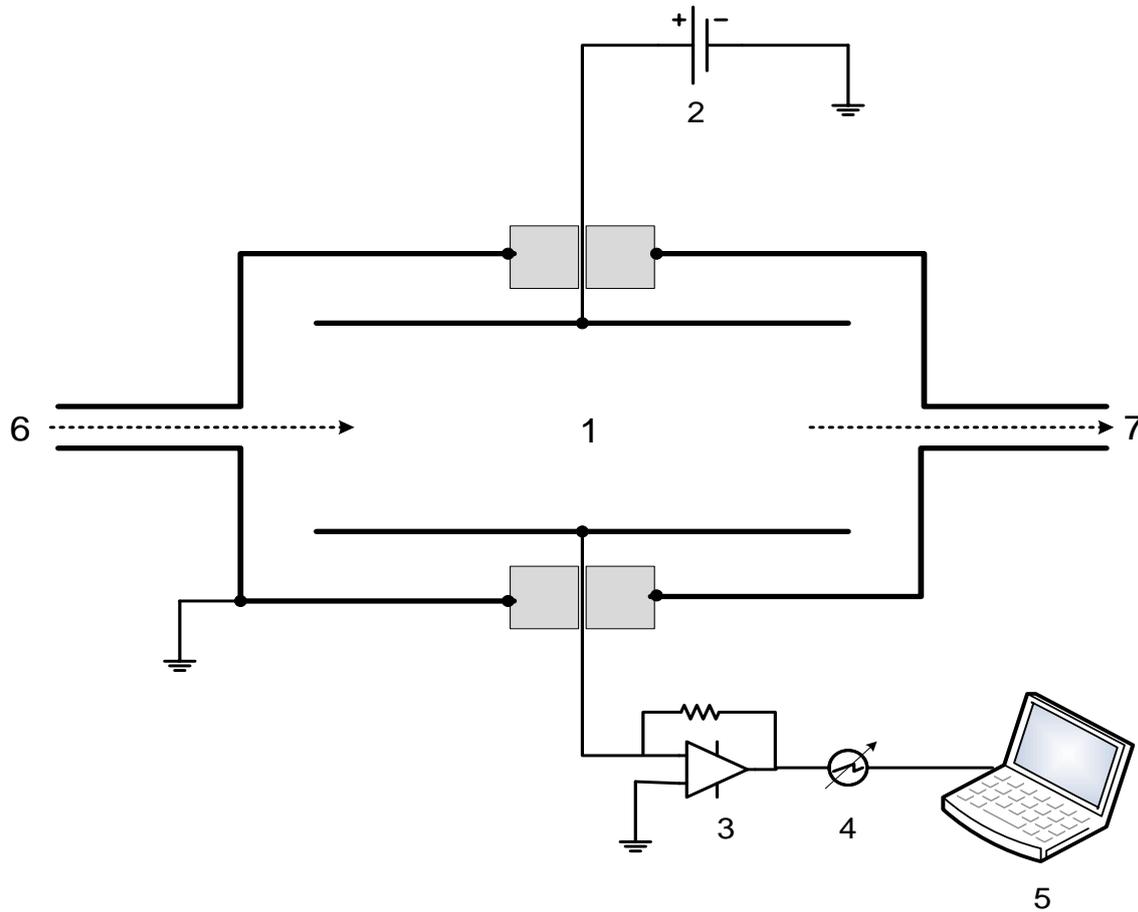
Cabe notar que el rayo beta generado en la desintegración del tritio (5.68 keV) es de muy baja energía y se absorbe en unos milímetros de aire. En consecuencia, para detectar tritio se requiere de un detector "sin ventana" (o "windowless") y el aire a controlar debe inyectarse en el volumen sensible del detector.

Un detector de este tipo es el indicado para detección de los otros radioisótopos gaseosos de interés. En efecto, su radiación beta (o alfa, en el caso del radón) es detectada en forma directa.

En consecuencia, el detector propuesto para esta aplicación es un detector de ionización beta de circulación interna.

Un esquema del detector y su electrónica asociada se muestra en la Figura 2.

Esquema conceptual del sistema de medición de gases radioactivos.



Referencias:

- 1: Cámara de ionización
- 2: Polarización
- 3: Amplificador de corriente a tensión
- 4: Voltímetro y Conversor AD
- 5: Graficación en una PC
- 6: Gas entrante
- 7: Gas saliente

Fig 2

DISPOSICIÓN FÍSICA DEL DETECTOR

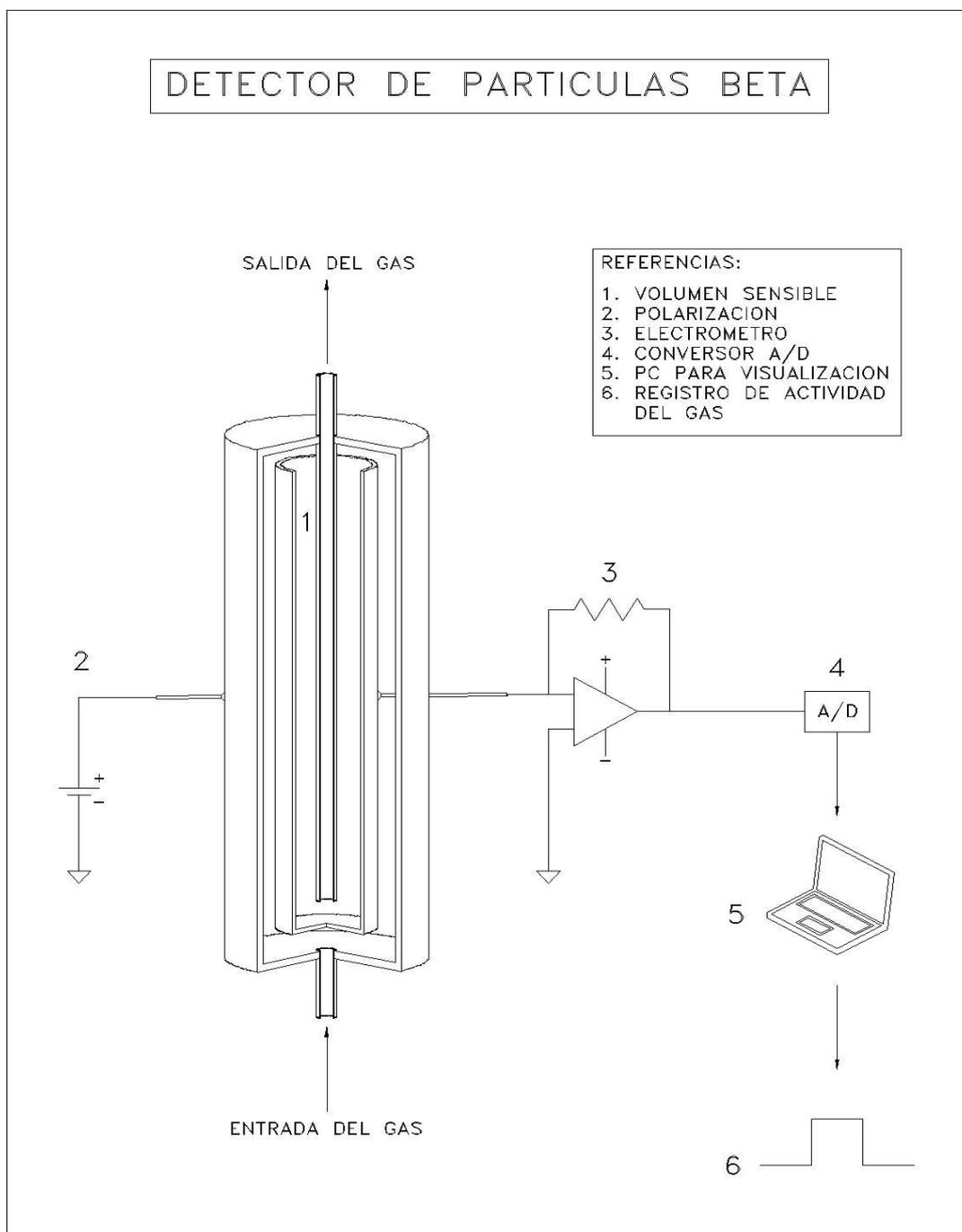


Fig. 2-2.

Algunas de sus características son:

1. Opera en modo cámara de ionización, sin multiplicación interna.
2. Alta sensibilidad beta, con volumen sensitivo de aprox. 2 litros.
3. Baja sensibilidad gamma.
4. Amplio rango dinámico de medición.

El detector actúa como una fuente de corriente de bajo nivel. La corriente generada será proporcional a la tasa de ionización en el interior del detector y sus valores típicos van desde corrientes “de fondo” menores al fAmp (10^{-15} Amp) a corrientes varios órdenes de magnitud superiores.

Otras características del detector son:

5. Construcción robusta.
6. Fácil desarmado para su descontaminación, de ser necesario.
7. La muestra no necesita tratamiento. El aire circulante a medir se inyecta en el volumen sensible del detector mediante una pequeña bomba.

5.2 Campo de Radiación

La señal que genera un detector depende del campo de ionización presente en su interior. En este caso, y considerando que éste es un dispositivo de circulación interna, los gases radiactivos a monitorear son incorporados, en forma directa, al volumen sensible del detector.

Este campo es de radiación beta en el caso de tritio y de gases nobles. Es de radiación alfa en el caso de radón. Sus características son:

5.2.1. Beta de gases nobles

La radiación corresponde a electrones energéticos. Su energía media es del orden de los cientos de keV, su poder de ionización es bajo y su rango en aire es del orden del metro. Su trayectoria dentro del detector es errática, y la probabilidad de que un electrón beta sea absorbido por los materiales estructurales del detector es grande. Una consecuencia es que la sensibilidad beta del detector es dependiente de su geometría.

5.2.2. Beta del Tritio

La energía beta del tritio es en extremo baja, y su rango en aire es de algunos milímetros. En consecuencia, en principio, es posible coleccionar, con alta eficiencia, toda la ionización producida por el tritio en el aire del volumen sensible del detector.

Una consecuencia interesante es la relación:

$$\text{Sensibilidad} = 1 \text{ uA} / \text{Curie} \quad (1)$$

Válida como sensibilidad aproximada del detector de ionización al tritio en aire.

5.2.3. Alfa del Radón

La energía alfa del radón es del orden de 5 MeV. Su poder de ionización es muy elevado, su trayectoria es rectilínea y su rango en aire es del orden de 4 cm. La señal generada es de tal magnitud que puede resolverse en pulsos eléctricos individuales, los que pueden ser fácilmente detectados con la electrónica aquí desarrollada.

En la Figura 3. se muestra, en forma esquemática, como sería el campo de radiación en el volumen sensible del detector. Notar que partícula que incide en un electrodo pierde su capacidad de ionizar el gas y deja de contribuir a la señal.

Representación esquemática de los mecanismos de ionización y colección de cargas para los tres casos analizados: Radón, Tritio y gases nobles.

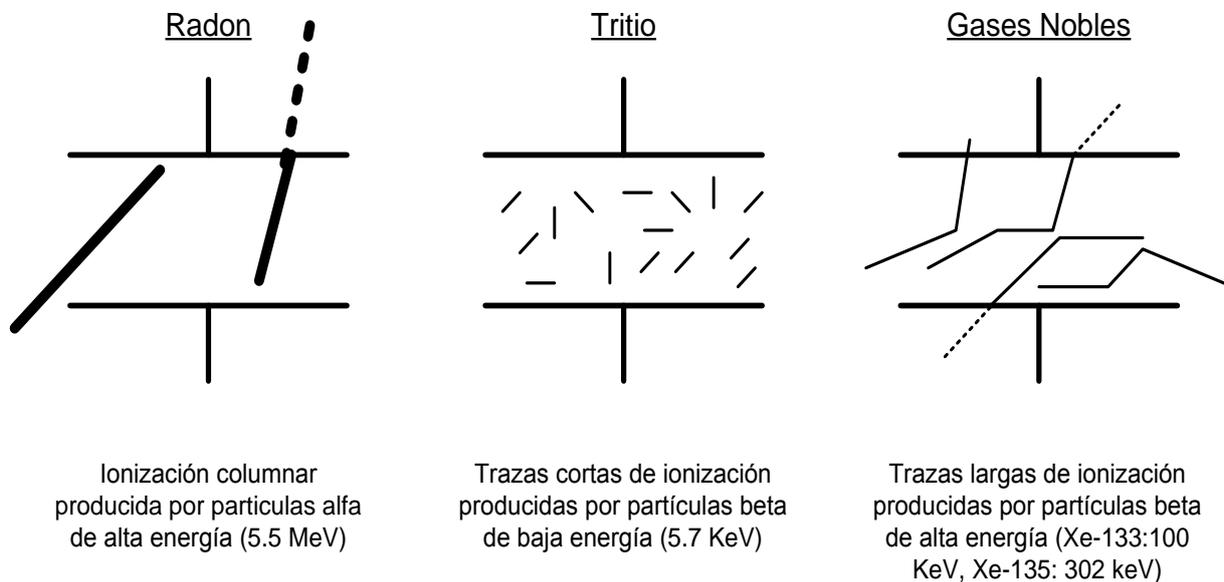


Fig 3

5.3 Sistema de Detección

El Sistema de Detección utilizado para estos ensayos está formado por:

5.3.1. **Un detector tipo cámara de ionización.** Los radioisótopos gaseosos a estudiar se introducen en su volumen sensible sea directamente o con la ayuda de una pequeña bomba de circulación.

5.3.2. **Un conversor corriente a tensión**, de muy bajo nivel, acoplado directamente al detector. Este preamplificador es un dispositivo esencial para este trabajo. Fue desarrollado, en nuestro laboratorio, para su aplicación al tratamiento de señales de muy bajo nivel. Sus características principales son:

- Conversión corriente a tensión de 1 femtoAmp/mVolt (10^{-15} amp / mVolt).
- Ruido y resolución menor al femtoAmp.
- Tiempo de respuesta del orden de 0.2 seg.

5.3.3. **Un sistema comercial de adquisición de datos.** Este instrumento (multímetro) se acopla a la salida del conversor corriente a tensión, y genera un valor digital para la

señal, que es enviada a la PC por un puerto USB. Este valor digital es el promedio de la señal en un intervalo de medición aproximado de 0.2 segundos. En consecuencia, la señal que se obtiene es proporcional a:

$$\int I(t) dt \quad (2)$$

En ese lapso de medición.

La medición se repite a intervalos regulares preestablecidos y es de 1 segundo en nuestro caso. Un software dedicado permite la visualización de la evolución temporal de la señal con la ayuda de una PC. Los datos de interés son guardados en la PC y podrán ser utilizados para su procesamiento por un Programa de Cálculo

5.3.4. **Una computadora personal**, para visualización, procesamiento y almacenamiento de datos.

5.3.5. **Una fuente de tensión**, de 100 volt, para polarizar al detector.

Este Sistema se muestra esquemáticamente en la Figura 2. La Figura 4 muestra una foto del Sistema durante los ensayos en Laboratorio.



Fig. 4.

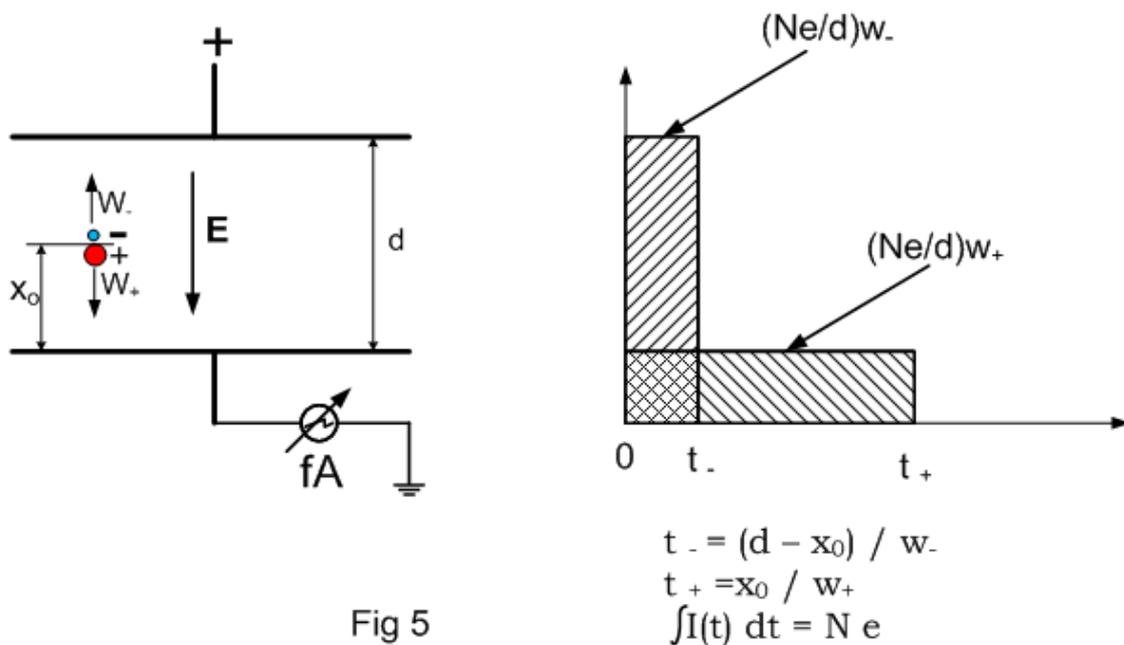
6. CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL

6.1 Forma de la Señal

En lo que sigue se considera una cámara de ionización gaseosa de geometría plana y con distancia d y campo eléctrico E entre electrodos, generado por una fuente de polarización externa. La corriente eléctrica que circula en estas condiciones es nula.

Supongamos que se produce un evento ionizante en la posición x_0 : Ello significa que en ese punto se generan N iones positivos, con una carga positiva $(+Ne)$ y N iones negativos, con una carga negativa $(-Ne)$. Un esquema de la situación se muestra en la Figura 5:

Esquema conceptual de la forma de la señal:



Debido al campo eléctrico presente, los iones negativos así generados se dirigen al ánodo con una velocidad de migración w_- durante un lapso t_- :

$$t_- = (d - x_0) / w_- \quad (3)$$

Siendo t_+ el tiempo de colección de los iones positivos.

Este movimiento de los iones negativos dentro del detector da lugar a una corriente eléctrica I_- en el circuito externo, y su valor es:

$$I_-(t) = (Ne / d) w_- \quad (4)$$

durante el tiempo de colección t_- y su valor es nulo fuera de ese intervalo.

En forma análoga, el movimiento de los iones positivos dentro del detector da lugar a una corriente eléctrica I_+ en el circuito externo. Su valor es:

$$I_+(t) = (Ne / d) w_+ \quad (5)$$

durante el tiempo de colección $t_+ = x_0 / w_+$ y su valor es nulo fuera de ese intervalo.

La señal de corriente $I(t)$ será

$$I(t) = I_-(t) + I_+(t) \quad (6)$$

Y la carga total colectada será Ne .

Es de destacar:

1. La forma y valor de $I(t)$ depende del lugar donde se ha producido el evento de ionización
2. La carga colectada $Q(t)$ también depende del lugar donde se ha producido el evento de ionización, pero, si se colectan todos los iones generados (positivos y negativos) la carga total colectada Q vale

$$Q = Ne \quad (7)$$

Y es independiente de donde se ha producido el evento ionizante.

Estos conceptos se extienden a una traza de ionización en el gas de colección del detector. En este caso, la forma del pulso de corriente es más compleja, pero, para nuestro caso, en que se realiza una medición tipo DC, ello es irrelevante.

Es importante saber que si se colectan todos los iones (positivos y negativos) creados por la partícula ionizante en el gas del detector, se medirá una carga colectada Q tal que

$$Q = Ne \quad (7)$$

Siendo N el número de pares (electrón ion) creados por la partícula ionizante en su traza en el gas colector del detector, y siendo e la carga del electrón

6.2 Amplitud de la Señal

La tasa de pérdida de energía de una partícula cargada ionizante en un material dado se relaciona con la ionización producida a través de la cantidad w . Si el material es aire, la cantidad w es

$$w = 34 \text{ eV / (par electrón ion)} \quad (8)$$

La Tabla 2. muestra, para los radioisótopos de nuestro interés, la carga máxima generada en aire. Esta será la carga máxima que contribuye a la señal por evento, y ocurre cuando la partícula ionizante pierde toda su energía en el gas y toda esa carga es colectada.

Tabla 2.

Isótopo	Energía Beta Media KeV	Pares	Carga Máxima femtoCoulomb
H-3	5.68	167	0.0267
Ar-41	464	13650	2.18
Kr-87	1323	38900	6.22
Kr-88	358	10530	1.68
Xe-133	100	2940	0.398
Xe-135	302	8800	1.42
Kr-85	250	7350	1.18
	Energía Alfa KeV		
Rn-222	5490	161470	25.8

Notar la carga relativamente grande generada por el radón. En principio la electrónica utilizada permitiría, con resolución de algunos femtoamperes, la detección del radón como pulsos individuales

6.3 Estadística de la Señal

Supongamos que estamos considerando la medición de un dado radioisótopo.

La señal se genera por procesos estocásticos:

1. Los eventos detectados aparecen al azar, siguiendo la estadística de Poisson.
2. La carga Q detectada tendrá también un carácter probabilístico.

Supongamos que observamos un número N_j de eventos, cada uno de carga Q , en un tiempo de medición T .

Una muestra de la señal de corriente será:

$$I_J = (1/T) Q N_J \quad (9)$$

Haciendo un promedio estadístico de estos valores muestrales:

$$\langle I \rangle = Q \langle N \rangle (1/T) \quad (10)$$

$$\langle I \rangle = Q \langle N' \rangle \quad (11)$$

Donde $\langle N' \rangle$ es la tasa media de eventos detectados, y Q es la carga generada por evento.

Consideremos también el valor de desviación cuadrática de la muestra J :

$$((\Delta I_J)^2) = (I_J - \langle I \rangle)^2 \quad (12)$$

$$(1/T Q N_J - 1/T Q \langle N \rangle)^2 = 1/T^2 Q^2 (N_J - \langle N \rangle)^2 \quad (13)$$

Y la variancia de las muestras, que toma la forma:

$$\text{Var}(I_J) = (1/T^2) Q^2 \langle (N_J - \langle N \rangle)^2 \rangle \quad (14)$$

Un aspecto fundamental es la suposición de que los pulsos detectados siguen la estadística de Poisson. En este caso vale la relación:

$$\langle (N_J - \langle N \rangle)^2 \rangle = \langle N \rangle \quad (15)$$

Y para la variancia tenemos la relación

$$\text{Var}(I) = (1/T^2) Q^2 \langle N \rangle \quad (16)$$

$$= 1/T Q^2 1/T \langle N \rangle \quad (17)$$

$$\text{Var}(I) = 1/T Q^2 \langle N' \rangle \quad (18)$$

Tenemos las relaciones

$$\langle I \rangle = Q \langle N' \rangle \quad \text{Para la corriente media} \quad (19)$$

$$\text{Var} (I) = Q^2 \langle N' \rangle 1 / T \quad \text{Para la variancia de la corriente} \quad (20)$$

Considerando que la carga Q y Q^2 presentan una distribución de valores, la corriente media y la variancia de la corriente toman la forma:

$$\langle I \rangle = \langle Q \rangle \langle N' \rangle \quad \text{Para la corriente media} \quad (21)$$

$$\text{Var} (I) = \langle Q^2 \rangle \langle N' \rangle 1 / T \quad \text{Para la variancia de la corriente} \quad (22)$$

Estas relaciones son la base del presente trabajo. Notar que:

1. La corriente media y la variancia de la corriente son indicadores de la tasa media de los eventos detectados $\langle N' \rangle$
2. La carga colectada por evento tiene un peso $\langle Q^2 \rangle$ en la variancia. El factor de peso es $\langle Q \rangle$ para corriente media.
3. El tiempo de medición T define el nivel de las fluctuaciones en la determinación de la corriente media: A mayor T menor error.
4. La relación $(\text{Var} (I) / \langle I \rangle)$ sería característica para cada radioisótopo (22)
5. Si varios radioisótopos contribuyen a la señal, valen las relaciones

$$\langle I \rangle = \langle I_1 \rangle + \langle I_2 \rangle + \langle I_3 \rangle + \dots + \langle I_0 \rangle \quad (23)$$

$$\text{Var} (I) = \text{Var} (I_1) + \text{Var} (I_2) + \text{Var} (I_3) + \dots + \text{Var} (I_0) \quad (24)$$

Donde se ha introducido $\langle I_0 \rangle$ y $\text{Var} (I_0)$ como las contribuciones a la señal DC y al ruido por parte de la electrónica.

6. Si son dos los radioisótopos de interés, y en casos favorables, se podría cuantificar la contribución de cada uno de ellos a la señal.
7. Casos favorables, en el caso de dos radioisótopos, significa que las cantidades

$$(\langle Q^2 \rangle / \langle Q \rangle)_1 \quad \text{y} \quad (\langle Q^2 \rangle / \langle Q \rangle)_2 \quad (25)$$

son significativamente diferentes.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El Sistema en desarrollo es caracterizado con radioisótopos "puros". Además de seguir la evolución temporal de la señal, se determinará, para cada radioisótopo i la cantidad

$$(\text{Var}(I) / \langle I \rangle)_i \approx (\langle Q^2 \rangle / \langle Q \rangle)_i \quad (26)$$

Y es un valor característico del radioisótopo en estudio, y debería ser independiente de la tasa media de eventos $\langle N' \rangle$. Consideremos los siguientes casos:

7.1. Medición del Fondo

El amplificador da lugar a una corriente media de fondo de unos 6 femtoAmp con un ruido del orden del femtoAmp. Esta corriente de fondo mostró un comportamiento estable durante los ensayos realizados. Se observan, con una baja tasa de repetición, algunos pulsos que exceden los niveles del amplificador. El origen de esos pulsos es incierto, y podrían deberse a restos de radón en el detector. La Figura 6 muestra un registro de una medición de fondo.

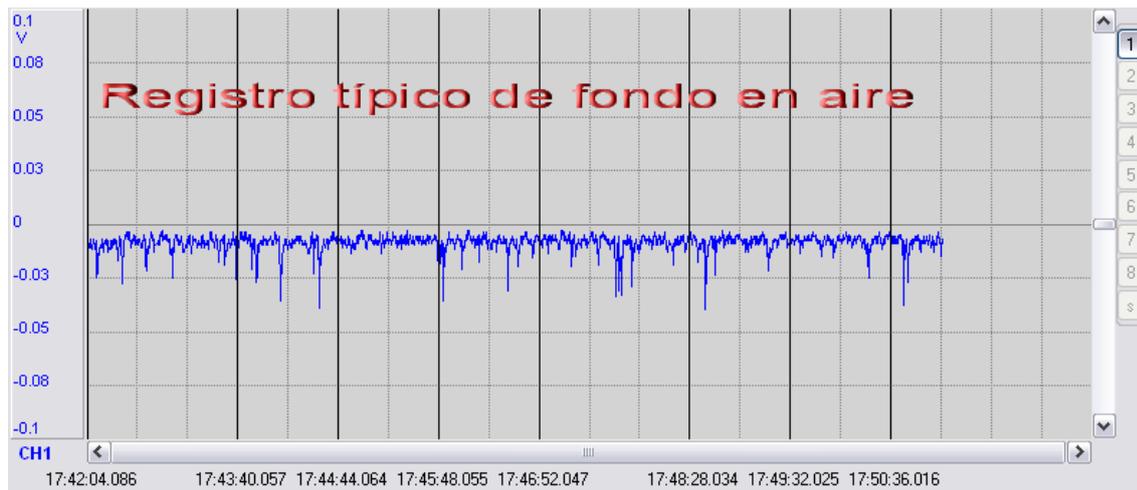


Fig. 6.

7.2. Medición con Rn-222

La Figura 7 muestra la evolución de la señal ante una inyección de radón. Se observa la contribución de las hijas a la señal, así como el decaimiento de su actividad luego de la noche,

La fuente del radón es la emanación de una piedra de mineral de uranio que es mantenida en un desecador, como se ve en Figura 8.

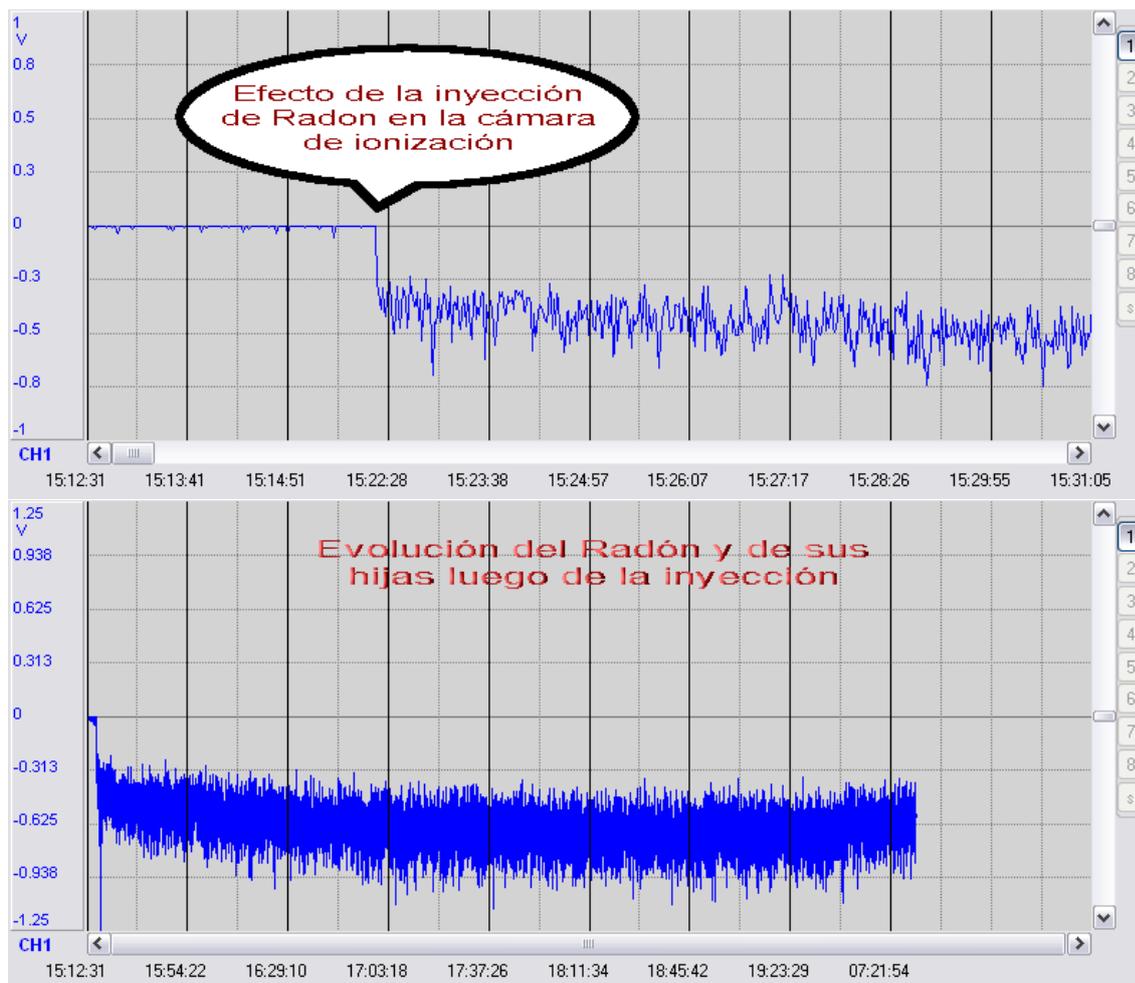


Fig. 7.



Fig. 8.

La correlación entre variancia y valor medio para el radón se muestra en las Figuras 9-1, 9-2, 9-3, 9-4 y 9-5, en aproximaciones sucesivas al cero. Se muestra una excelente correlación, incluso en las cercanías al cero, lo que podría indicar que los pulsos del fondo corresponden al radón.

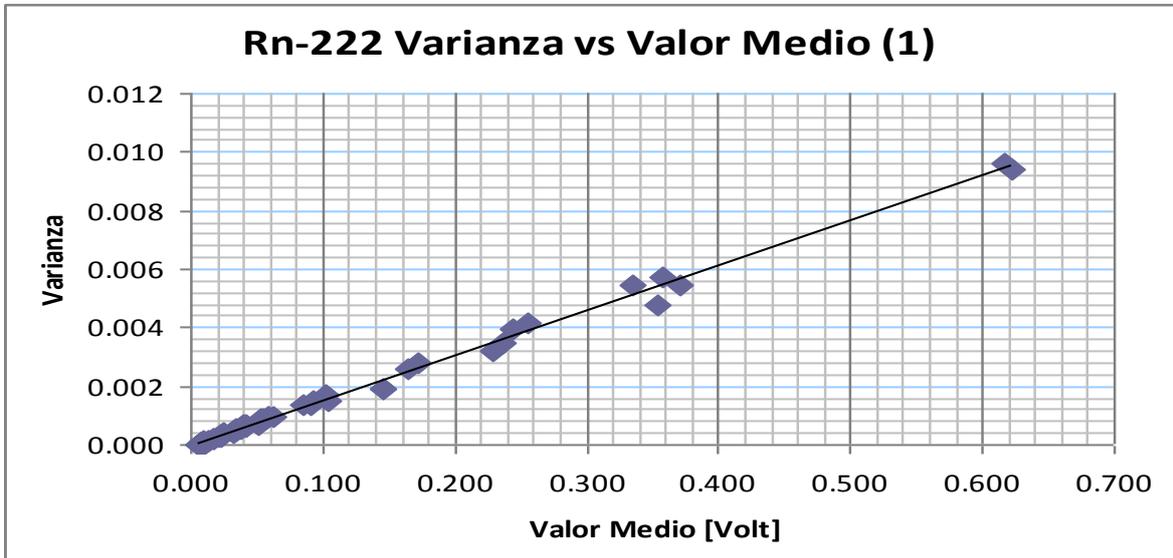


Fig. 9-1.

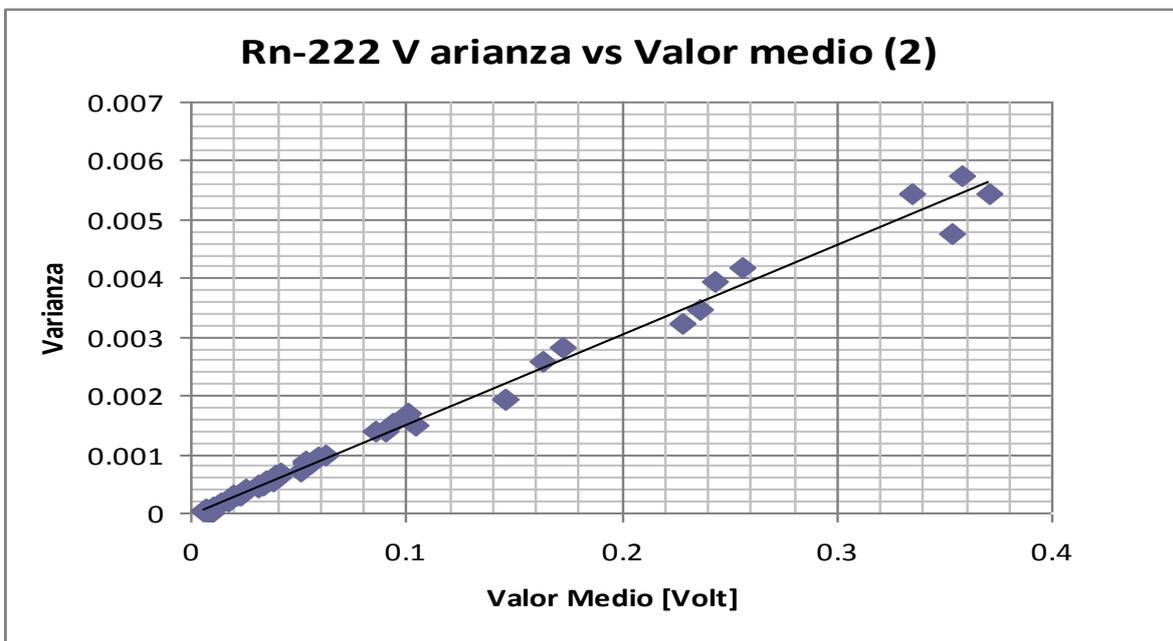


Fig. 9-2.

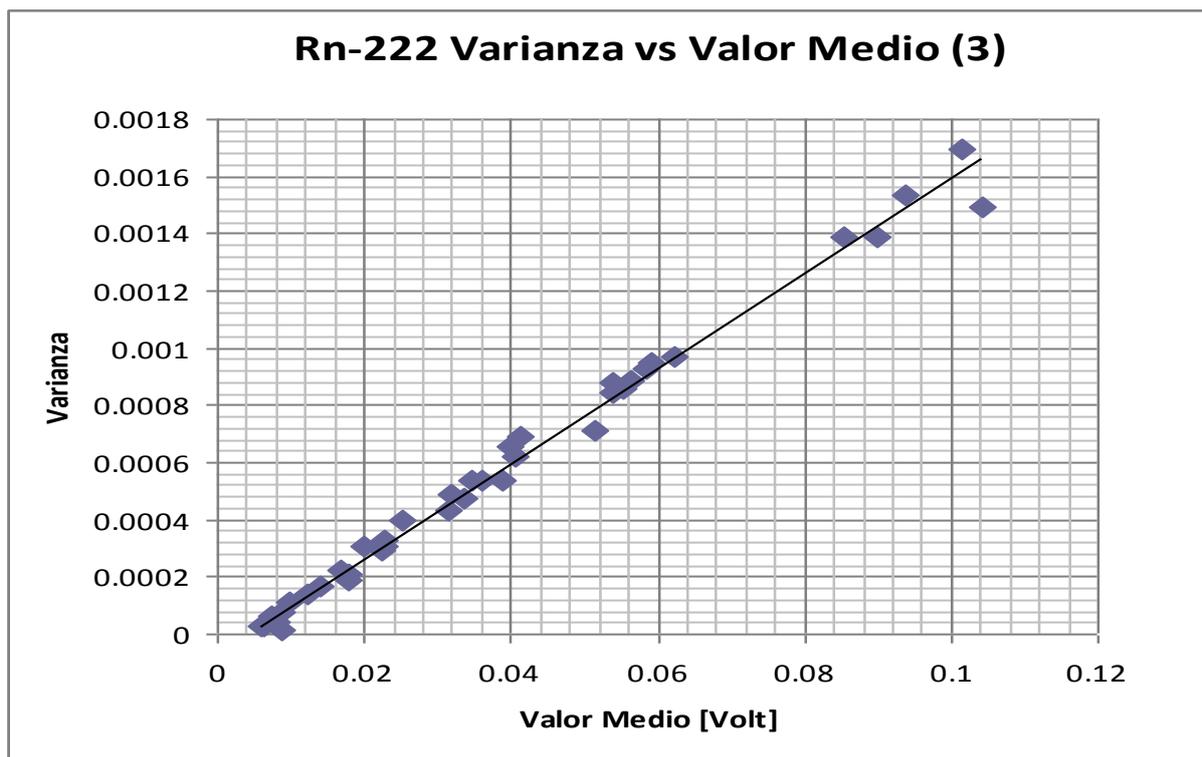


Fig. 9-3.

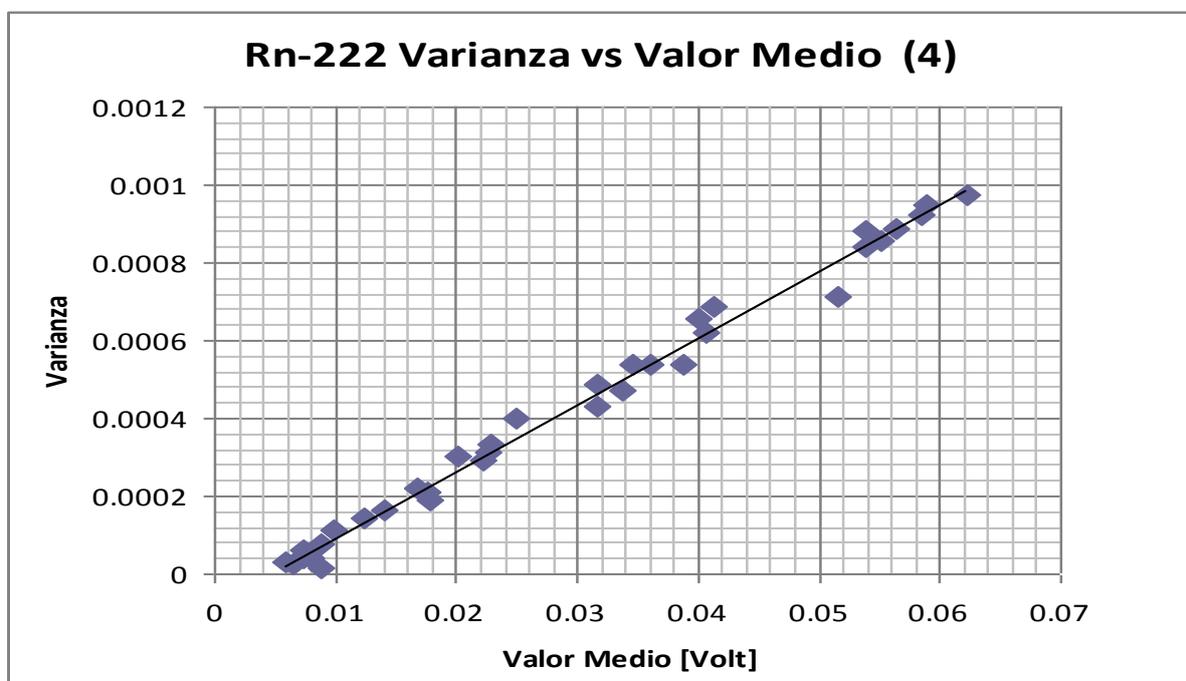


Fig. 9-4.

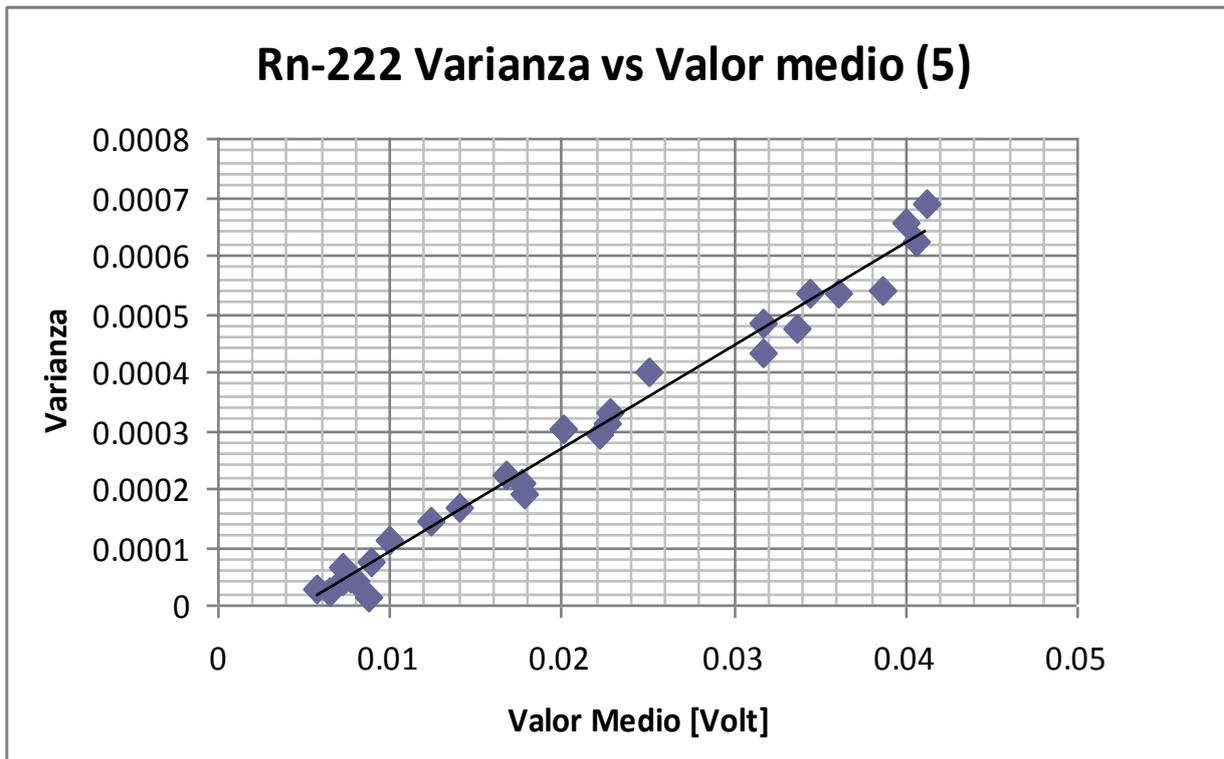


Fig. 9-5.

7.3. Medición con Xe-133

La Figura 10 muestra la evolución de la señal ante una inyección de Xe133, y sirve de base para establecer las correlaciones variancia a valor medio. Los sucesivos valores de $\langle N' \rangle$ se obtienen diluyendo con Nitrógeno el contenido del detector. También se observa una excelente correlación. La Figura 11 muestra esos resultados.



Fig. 10.

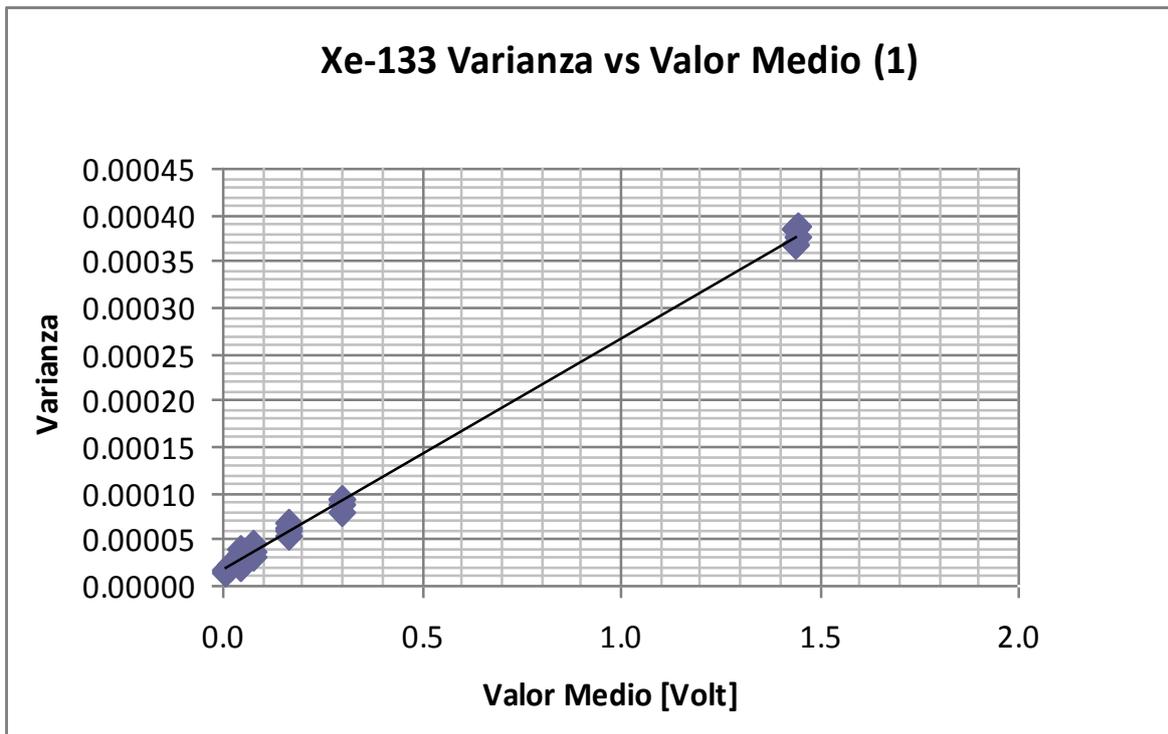


Fig. 11-1.

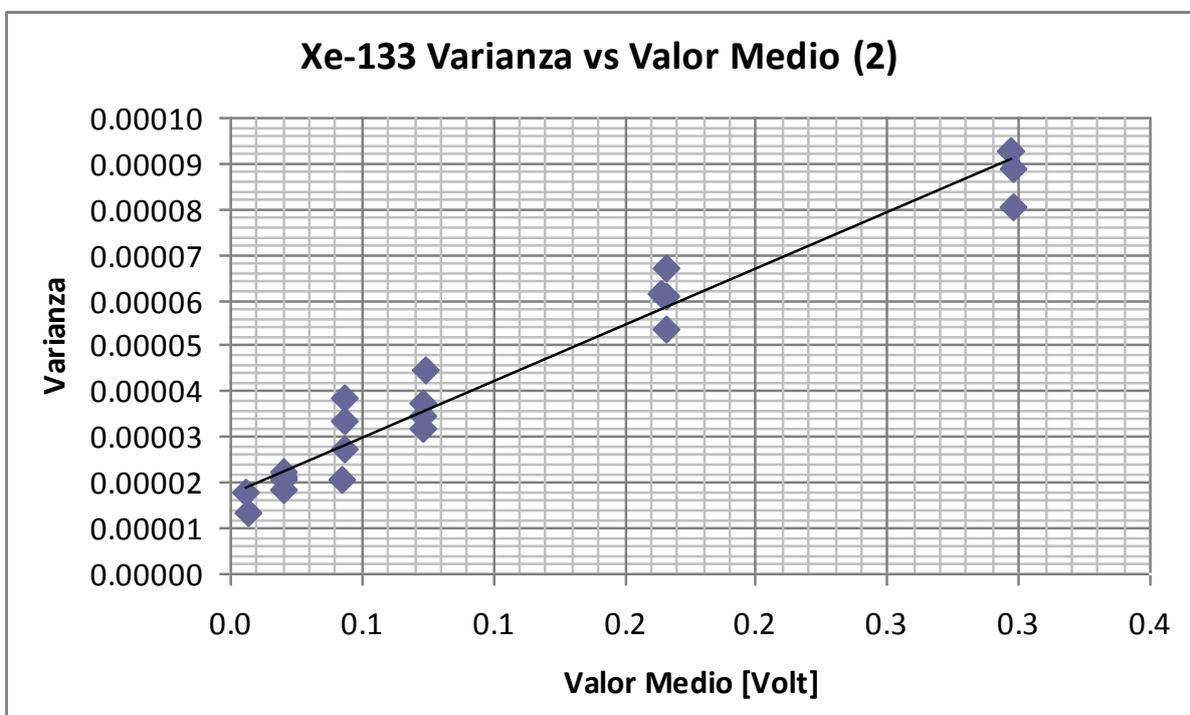


Fig. 11-2.

7.4. Medición con H-3

La Figura 12 muestra la evolución de la señal con la atmósfera de tritio. En este caso se inyecta una pequeña cantidad de agua tritiada en estado líquido dentro del detector, por lo que la señal va creciendo lentamente a medida que el agua se evapora.

Los sucesivos valores de $\langle N' \rangle$ también se obtienen por dilución con Nitrógeno del gas mantenido en el detector. En este caso prácticamente no se observa correlación lineal entre variancia y valor medio. Debido a la muy baja energía beta del tritio, este radioisótopo genera, en la práctica, una corriente casi sin fluctuación.

La Figura 13 muestra los resultados de la correlación para el tritio.

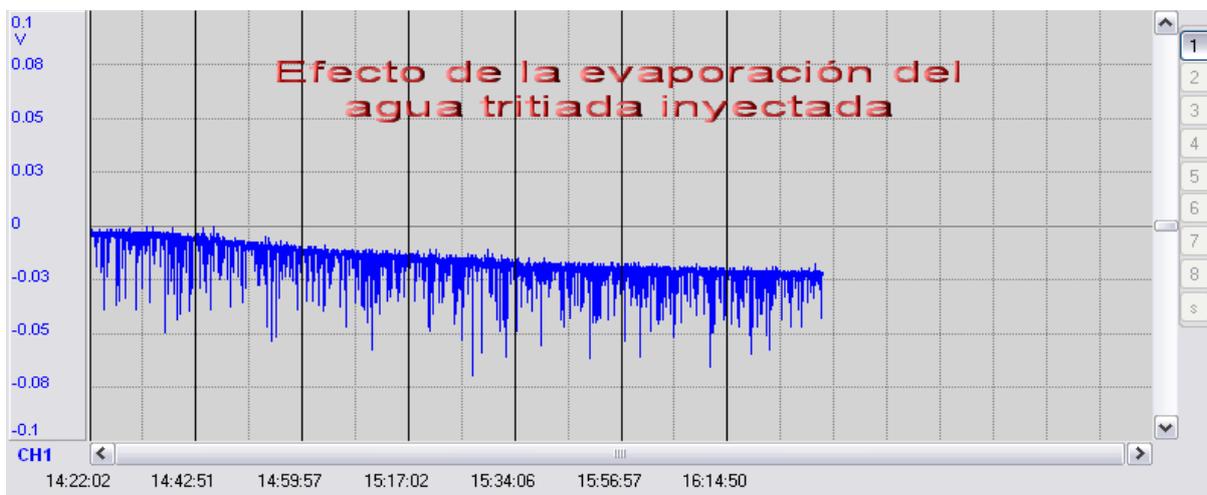


Fig. 12.

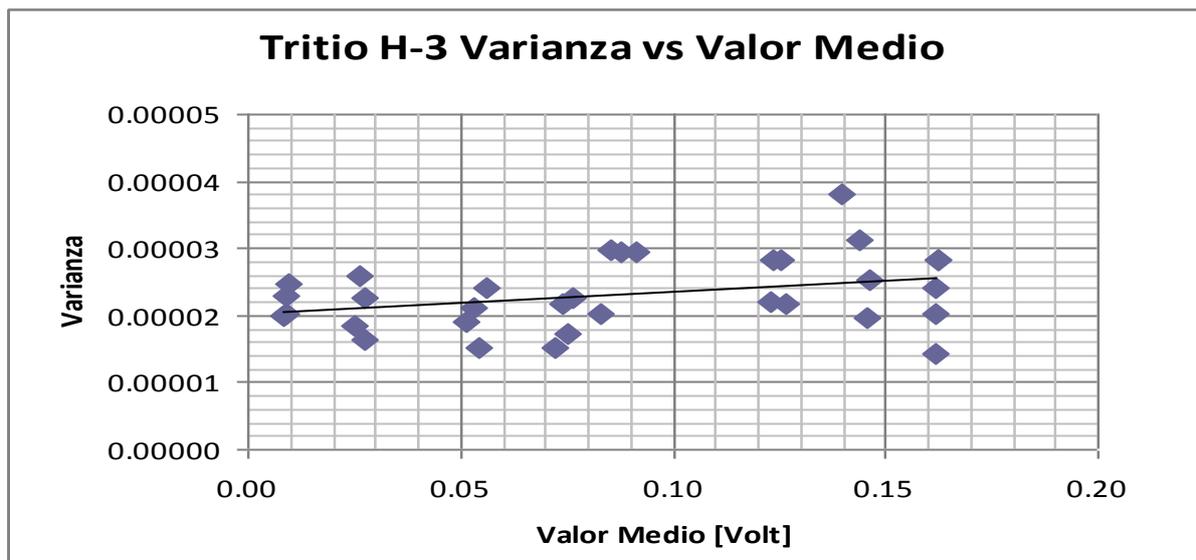


Fig. 13.

7.5. Resumen de Resultados

Se han determinado los valores del parámetro P, que es la pendiente en la relación Variancia vs Valor Medio, válidos para Rn-222, Xe-133 y H-3 para un detector de ionización de nuestro diseño. Se tienen los siguientes valores:

$$P (\text{Rn-222}) = 0.014454 \quad R=0.9182 \quad (27)$$

$$P (\text{Xe-133}) = 0.000248 \quad R=0.9992 \quad (28)$$

$$P (\text{H-3}) = 0.000035 \quad R=0.3342 \quad (29)$$

Para el caso del Rn-222 y Xe-133, se observa que la correlaciones de Varianza vs Vmedio son excelentes.

Para el H-3, se observa que la correlación entre el Valor medio y la Varianza es muy pobre y el parámetro P (H-3) es cercano a cero: el Tritio presenta una señal DC casi sin fluctuación.

Se observa que los pares (Rn-222 ; H-3) ; (Rn-222 ; Xe-133) y (Xe-133 ; H-3) se constituyen en "casos favorables" para ser seguidos por el Sistema Monitor de nuestro diseño.

Notar que el Tritio podría ser eliminado del gas a monitorear mediante un procedimiento de secado adecuado. Se podría, de este modo, reducir la influencia del Tritio en la medición de otros gases radioactivos.

Otro caso de interés, el par (Xe-133 ; Xe-135), si bien no fue estudiado, se considera que podría ser considerado como "caso favorable", ya que las energías beta promedio toman los valores de 100 KeV para el Xe-133 y 302 KeV para el Xe-135.

8. CONCLUSIONES

Se han diseñado y construido los componentes básicos de un Sistema Monitor de Gases Radiactivos con excelentes resultados.

Se propone un método que se supone novedoso. Se basa en el análisis estadístico de la señal generada por el detector de ionización. Este procedimiento sirve para el seguimiento, en muchos casos de interés, de pares de gases radioactivos por el Sistema Monitor objeto del presente trabajo.

9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Gabriela Cerutti (CAE , CNEA) y a Ariel Novello (CAE , CNEA) por la colaboración prestada en la realización del presente trabajo.