

theremino
•the•real•modular•in-out•

Sistema theremino

Cámara de Ionización para medir radón

La cámara de ionización terminada



Para los que quieran saber más, acerca de las cámaras de ionización, las palabras de búsqueda aconsejadas son: **"Tipo de cámara de ionización a difusión, para la medición continua de radón a través de calculo, de acuerdo con el método de la EPA CR"**

Este documento, analiza las características de las cámaras de ionización en general y la medición de la actividad del radón. Para obtener más información sobre la construcción de las partes mecánicas y electrónicas, las especificaciones técnicas y información detallada sobre el radón, por favor consulten los documentos adjuntos:

Una cámara de ionización para Radón (este documento en formato PDF):

Radon_IonChamber_ITA
Radon_IonChamber_ENG
Radon_IonChamber_JPN
Radon_IonChamber_ESP

Mecánica:

Radon_IonChamberConstruction_ITA
Radon_IonChamberConstruction_ENG
Radon_IonChamberConstruction_JPN

Electrónica:

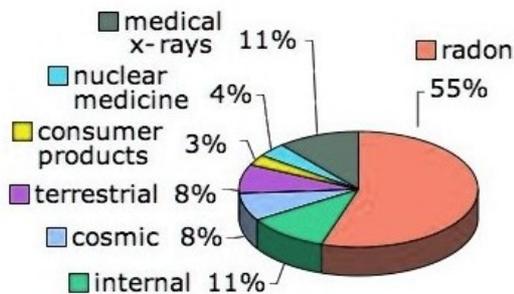
Radon_IonChamberElectronics_ITA
Radon_IonChamberElectronics_ENG
Radon_IonChamberElectronics_JPN

La información sobre el radón:

Radon_Info_ITA
Radon_Info_ENG
Radon_Info_JPN

En primer lugar, ¿por qué medir el radón?

En los últimos años se ha comprobado que el radón, es mucho más peligroso de lo que se creía anteriormente y que tiene la misma importancia que el consumo de cigarrillos, como causa de cáncer de pulmón.



En el pasado, hemos tenido una gran preocupación sobre los rayos X (radiografías), pero estos y todas las otras fuentes de radiación todos juntos, no son ni la mitad de la radiación que recibimos en promedio, todo lo demás está ligado al radón.

El peligro del radón, es debido al hecho de que es incoloro e inodoro, químicamente no reactivo, presente en todos los hogares, casi desapercibido y que a menudo es muy concentrado, hasta cien veces el límite que se considera

peligroso.

En un buen porcentaje de hogares (uno de cada diez) y en algunas habitaciones (sobre todo en la planta baja), la concentración de radón, puede llegar a los 10.000 Bq/m³ (400 pCi / L 270 pCi / l). Quien vive y fuma toda su vida en esas habitaciones (debido al efecto sinérgico de fumar en presencia de radón), tiene una alta probabilidad de contraer cáncer de pulmón.

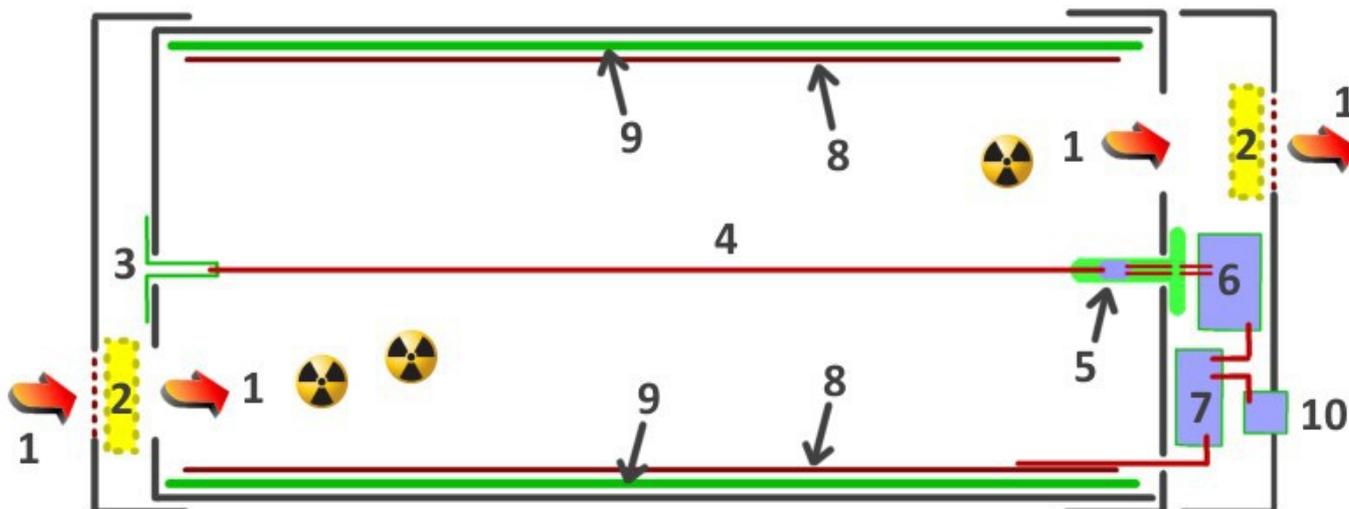
Al conocer este peligro existen soluciones, como cambiar de habitación, permitir la circulación del aire, o parar el radón antes de que se extienda a otras habitaciones, o poniendo un extractor de aire en el sótano. Sin dejar de fumar, con sólo la eliminación del radón, el riesgo no sólo se reduce de la mitad, sino disminuye de un 90%.

Desde hace muchos años existen estudios, olvidadas por la mayoría, que advierten sobre el riesgo. Recientemente, estadísticas sobre el radón se multiplican y no hay más dudas sobre sus peligros.

- http://www.epa.gov/iaq/espanol/radon_riesgos_para_la_salud.html
- http://www.usc.es/radongal/pdf/exposicion_radon.pdf
- <http://www.cancer.gov/espanol/recursos/hojas-informativas/riesgo-causas/radon>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Rad%C3%B3n>
- <http://www.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=1174930>
- http://elpais.com/diario/1984/04/14/sociedad/450741610_850215.html

Estos documentos explican los peligros del radón, mucho mejor de lo que podemos hacer aquí. Nuestra contribución, será principalmente para facilitar las mediciones, con un dispositivo "hágalo usted mismo", que puede ser construido con materiales baratos, disponible en cualquier almacén de material. Un dispositivo portátil que, una vez construido, será capaz de medir, no sólo todas las habitaciones de la casa, sino que también podrá ser prestado a amigos, haciendo posible hacer cientos de pruebas, sin gasto alguno. Desafortunadamente, pruebas "oficiales" cuestan bastante (más de 50 euros cada una) y se llevan a cabo sólo en los lugares públicos, como las escuelas. Sólo en raras ocasiones y sólo a petición, en casas particulares.

Esquema de la cámara de ionización



La cámara de ionización consiste en un cilindro, con un diámetro de 8 cm y 20 cm de altura, con un volumen total de un litro y tres tapones que protegen los componentes electrónicos, de ruido eléctrico y el polvo. El cilindro y las tapas (**Barras negras**) son **en hojalata**, todos ellos están conectados juntos eléctricamente y mecánicamente unidos, con hilos de cobre soldados.

El aire y los isótopos radiactivos, entran en la cámara (**1 flechas rojas**) por difusión y convección, a través de dos agujeros de 25 mm con rejillas de cobre, para el aislamiento del ruido eléctrico y trabajando como filtros de polvo (**2 Amarillo**)

Al interior del cilindro, se le aplica un electrodo de cinta adhesiva de aluminio (o de cobre), (**8 rojo**) aislado del cilindro exterior por medio de una hoja de cinta aislante de plástico (**9 verde**), y cargado con 400 voltios positivos, creado por un generador de alto voltaje (**7 púrpura**)

Un electrodo central (**4 rojo**), se mantiene tensado entre los dos extremos de la cámara, entre un tirante de nailon (**3 verde**) y un FET de bajo nivel de ruido (**5 púrpura**). El FET, que se encuentra dentro de la misma cámara para minimizar el ruido, proporciona una señal robusta, ya no influenciada por el ruido eléctrico.

El amplificador y el discriminador de ancho de pulso, (**6 púrpura**) aísla los impulsos producidos por el radón y sus hijas y emite pulsos rectangulares de anchura constante, fuertes y fáciles de contar.

El conector de salida, (**10 púrpura**) puede ser conectado directamente a un pin estándar del Sistema Theremino. Normalmente se utiliza un módulo Master, que proporciona la energía para la cámara de ionización y envía los datos a través del USB, al software ThereminoGeiger.

Un solo Master puede alimentar hasta seis cámaras de ionización con cableado de cientos de metros, recogiendo todos los datos. Algunas de las seis cámaras, también se pueden sustituir por sondas Geiger para Alphas, Betas y Gammas u otros sensores ambientales.



Contando las desintegraciones con una cámara de ionización

Hay dos tipos de cámara de ionización, cámaras por calculo y las cámaras de integración. Aquellos que normalmente se encuentran en la literatura, son de tipo de integración y miden la corriente media producida por las desintegraciones. Las cámaras de integración, son extremadamente dependientes de factores ambientales tales como la humedad, la temperatura y presión del aire. Muy a menudo, se leen informaciones engañosas sobre la inestabilidad y la falta de precisión de las cámaras de ionización. Estos informes no son aplicables a nuestro método, que no se basa en la medición de la corriente media (integración), sino en el cómputo de eventos individuales.

La correcta definición del método que utilizamos es "Contador a cámara de ionización" y su funcionamiento es similar a un tubo Geiger que opera en digital. Para una definición precisa de nuestra tecnología, lea el Apéndice 1 (al final de este documento), para enumerar todos los métodos clasificados por la EPA (Environmental Protection Agency). Nuestro método se clasifica como "CR"

Contando las desintegraciones en un momento preciso y en un volumen dado, la calibración es estable y fácilmente repetible.

Esta tecnología es tan simple como el huevo de Colón, pero se utiliza muy poco, ya que según la literatura, necesitaría de "circuitos electrónicos Preciosos y delicados". Esto era cierto en el pasado, pero ahora hay FET de muy bajo ruido de corriente y amplificadores operacionales, con excelentes características. Con estos componentes, es fácil aislar eventos individuales y contarlos.

Diferencia entre "calcular" y "medir la corriente media"

Como el dato a recoger es el número de desintegraciones, no hay mejor manera de contarlos uno por uno. La forma alternativa de tratar de calcular su número, mediante la medición de la corriente media y dividiendo a continuación, por lo que se supone que es la corriente producida por cada una de desintegraciones, es inexacta ya que es fácil tener errores, por variables tales como la humedad, la temperatura, la presión del aire y el humo.

Con el aire húmedo, se puede producir una corriente mayor, que la que hay que medir. Otras variables ambientales afectan mucho también y con sólo la más mínima presencia de humo en el aire, se puede reducir en gran medida la corriente medida.

Finalmente, el número de átomos ionizados (y por lo tanto, la corriente producida) cambia si la desintegración tiene lugar cerca de una pared, o en el centro de la cámara. Puede cambiar también, dependiendo de la dirección aleatoria de las partículas beta que causan ionización. Si la partícula aparece cerca de una pared y se desplaza hacia el centro, desarrolla su energía y produce el número máximo de átomos ionizados. Si por el contrario, se desplaza en la dirección opuesta, choca inmediatamente con la pared de la cámara y produce pocos átomos ionizados, lo que resulta en una muy pequeña corriente eléctrica. Diferentes eventos de desintegración por lo tanto, pueden contribuir a la corriente media en una manera diferente, con diferencias entre un evento y el otro, de incluso diez veces.

¿Cómo es posible hacer mediciones precisas con las cámaras de integración es un misterio. Bromas aparte, es muy difícil de compensar todo. La eventual presencia de humo se debe comprobar también (pero nunca se hace)

Las patentes de cámaras de iones

Afortunadamente, las cámaras de ionización que calculan pulsos son tecnología de hace tiempo. Las primeras versiones conocidas (pero no patentadas) se remontan al 1954, también hay las patentes 4.827.224 y 4.859.854, por Carl J. Kershner y Edward T. Burgess, de mayo y agosto de 1989 (estando en 2013, significa que expiraron ya hace 4 años) Para comprobar las patentes, recomendamos el excelente Google Patents. En los mayores países, las patentes tienen un plazo de 20 años y una vez vencido, la tecnología es pública y no patentable. Por lo tanto, las cámaras de ionización (tanto calculadoras, que cámaras de integración) ahora están disponibles gratuitamente.

¿Es necesaria la calibración?

El calculo no depende de la humedad y la presión de aire, sino por el volumen real de la zona activa, que a su vez sólo depende de las dimensiones geométricas. Todos estos factores, no cambian de una unidad a otra, y por lo tanto, no se requiere una calibración individual.

Respetando las dimensiones exactas que se dan aquí, es suficiente establecer un coeficiente de calibración, para obtener una precisión aún mejor del +/-20%. Para mayor seguridad, declararemos una precisión de +/-50%, lo que limita la medidas en el orden de magnitud, como la siguiente tabla:

pCi/litro	Bq/m3	Pulsos/minuto	Pulsos/secondo	Resultado
0.01	0.4	0.02	-	Estas en un tanque sellado
0.1	3.7	0.2	-	Estas tranquilo
1	37	2	0.03	Controla a menudo
10	370	22	0.3	Te tienes que preocupar
100	3700	220	3	Haz algo de inmediato
1000	37000	2200	33	Dificil de creer

No importa, si se mide 0,33 o 1,22, en lugar de 0.88pCi/litro. En relación con el riesgo de peligro físico, no cambia prácticamente nada. Lo que necesitamos estar seguros, es que no es 50 pCi/litro o peor, 500. Nuestra cámara, puede dar esta seguridad incluso sin calibración. Por otra parte, las mediciones y el cálculo son simples, lo que hace difícil hacer errores peligrosos.

Tamaño de la cámara de ionización

¿Por qué hacer una cámara de ionización de un litro? Se podría hacer fácilmente una cámara 4 por 4 cm, alta 1 cm, que sería más fácil de construir y menos sensible a las vibraciones. Todos los fabricantes de aparatos comerciales con precios inferiores a \$ 2.000, tienen cámaras de unas pocas decenas de centímetros cúbicos. Lamentablemente, sin embargo, la exactitud de medición en cámaras pequeñas es menor y hace necesario el uso de tiempos demasiado largos.

Quedando en uno o dos días el tiempo de medición necesario, se hace difícil medir todas las habitaciones de una casa, experimentando con extractores o abriendo las ventanas, para ver qué pasa. Tomaría un mes, para hacer un número razonable de pruebas y estando todos los días ocupados. De lo contrario usando tiempos más cortos, es posible hacer muchas pruebas en el mismo día y realizar cambios en el sistema de extracción de aire de inmediato y ver el efecto. Por lo tanto, hemos intentado reducir el tiempo de medición, tanto como sea posible, maximizando el volumen.

La relación de la sensibilidad, entre las cámaras grandes y pequeñas, es mayor que la relación entre los dos volúmenes, ya que en habitaciones pequeñas el porcentaje de volumen activo es más bajo. El recorrido libre de los rayos alfa en el aire, es cerca de 4 pulgadas y cuando la cámara se acerca a este tamaño, la mayor parte de su volumen se encuentra cerca de las paredes, lo que impide a las desintegraciones, de convertir toda su energía en iones.

En las tablas de la página siguiente, se muestran los resultados en términos de rendimiento.

Los efectos debidos al tamaño de la cámara de ionización

Para demostrar los efectos debidos al tamaño de la cámara, se compararon las características con el estupendo instrumento Rstone, desarrollado por la Universidad de Pisa y el INFN, y que utiliza una de las técnicas más recientes: "revelación en estado sólido en cámara a difusión" , Con el popular Safety Siren Pro3.

Características dependiendo del tamaño de la cámara

	Tamaño del cámara	Sensibilidad (Cpm/pCi/l)	Sensibilidad (Cuentas/hora 100 Bq/m3)	Los recuentos espurios de fondo	Notas
Seguridad Siren Pro3	20 cm3	0.03	2.5	(Nota 1)	En dos horas se obtiene una medida fiable, para niveles peligrosos > 400 Bq/m3
Rstone (2)	50 cm3	0.06	5	1,2 Bq/m3 0,03 pCi / l	En una hora, tenemos una medida fiable para niveles peligrosos > 400 Bq/m3
Theremino Cámara de ionización (3)	1000 cm3	2	160	0,4 Bq/m3 0,01 pCi / l	En una hora, habrá una medida fiable para el medio ambiente también <10 Bq/m3

Tiempo requerido para obtener una medida razonablemente estable (ondulaciones menos de 20%)

	Seguridad Siren Pro3	Rstone (2)	Theremino Cámara de ionización (3)	Notas
10 000 Bq/m3	12-24 acta	6-12 minutos	3-6 segundos	Niveles nunca medidos en los hogares
1.000 Bq/m3	2-4 horas	1-2 horas	40-80 segundos	Estos niveles son muy raros
500 Bq/m3	4-8 horas	2-4 horas	1-2 minutos	Sólo en casos raros
100 Bq/m3	20-40 horas	De 10-20 horas	6-12 minutos	Los niveles que se encuentran normalmente
10 Bq/m3	8-16 días	4-8 días	1-2 horas	

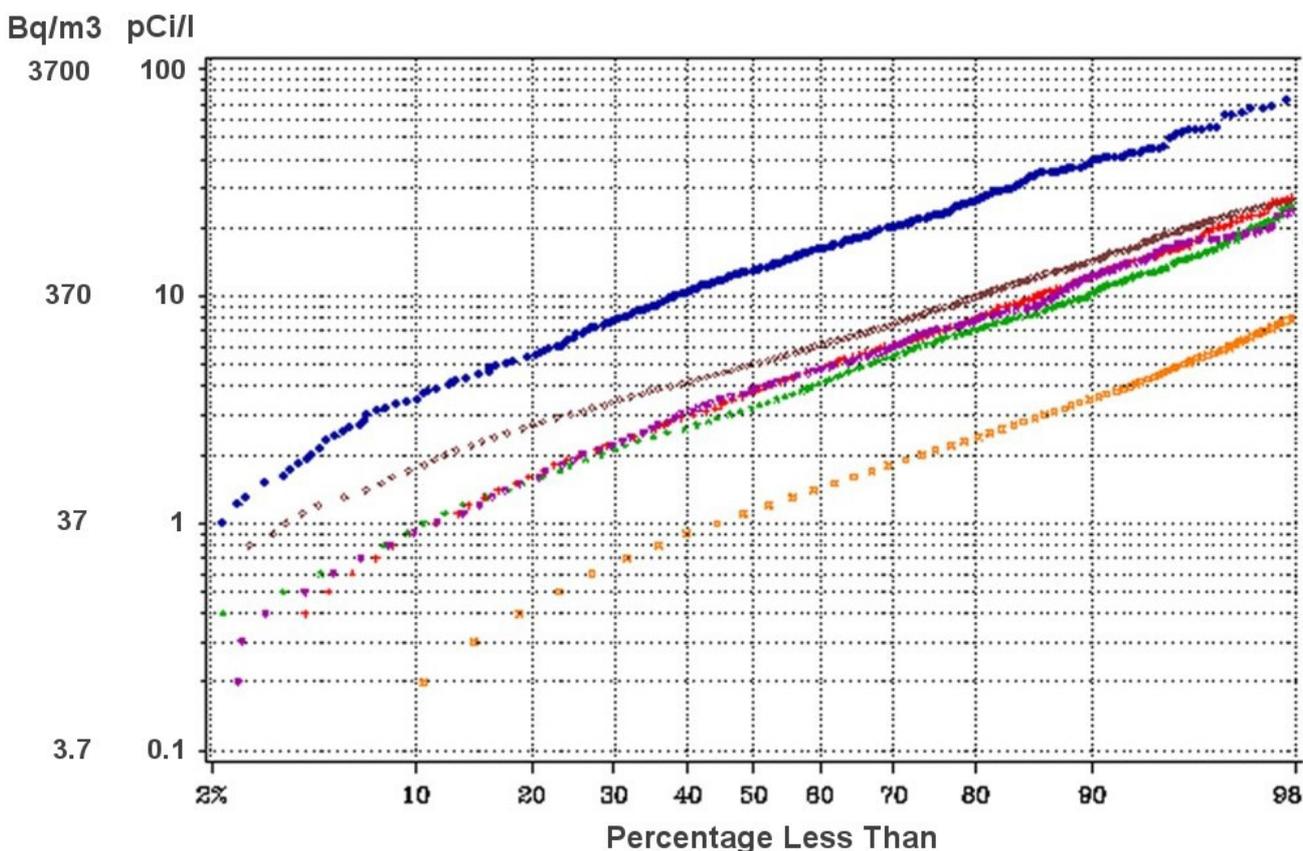
(1) De acuerdo con las especificaciones publicadas en el "Security Siren Pro3, Manual de Usuario". El fondo no se especifica en el manual de usuario, ni en la documentación de Internet.

(2) De acuerdo con los datos Rstone, publicado en "La radiactividad natural: técnicas de medición actuales y perspectivas de desarrollo (Parte III) – G. Batignani, Universidad y INFN Pisa"

(3) La relación entre la sensibilidad y luego entre los tiempos, es mucho mayor que las 20 veces que se podrían esperar, a partir de la relación entre los dos volúmenes, como en una cámara pequeña, el área activa es proporcionalmente más pequeño, debido a la muchos ionización que se producen, cerca de las paredes.

¿Cuáles son los valores mínimos y máximos a medir?

Esta imagen muestra los datos recogidos por una extensa campaña de muestreo realizada en los EE.UU., en un gran número de casas, tiendas y escuelas (las escuelas están en amarillo, las guarderías en verde, las tiendas son de color azul, las casas de color marrón, rojo y morado) Muchos estudios de todo el mundo, confirman estos mismos resultados, pero este gráfico muestra, mejor que el otro, los niveles mínimos y máximos que se pueden encontrar en las mediciones.



En una muestra de miles de casos, ninguna medición fue menor que el clásico 0.2 pCi/litro (8 Bq/m³), que se mide al aire libre, o excedió 70 pCi/litro (2,600 Bq/m³)

Podemos entonces establecer con certeza, que el rango de valores a medir, es de 0,1 pCi / l (4 Bq/m³) a 100 pCi / l (3.700 Bq/m³)

Nuestra cámara de ionización, mide de 0,01 pCi / l (0,4 Bq/m³) a 2.800 pCi / l (100 000 Bq/m³), abarcando de una décima parte de los requisitos mínimos, hasta unos treinta veces el máximo.

Comprobar el funcionamiento y el fondo de ruido

Se realizará una prueba de funcionamiento simple, mediante la colocación de la cámara de ionización al aire libre o en un área bien ventilada. En estas condiciones, se debe medir unos 10 Bq/m³ (0.3 pCi/l). Esta no sería una calibración, no importa si la concentración medida realmente, sea 10,2, 15,9 o 7 Bq/m³, sólo tenemos una curva visiblemente en su lugar, sin saltos causados por las interferencias, con el fin de comprobar que la electrónica cuenta regularmente y que el fondo es suficientemente bajo, de no influir en las medidas. Las directrices de la EPA, especifican que el fondo, debe ser inferior a 40 Bq/m³ (1 pCi/litro), un valor muy fácil de obtener. Nuestra cámara al aire libre, por lo general mide alrededor de 10 Bq/m³ (aproximadamente 0,3 pCi/litro).

Pulsos de fondo

Las directrices de EPA fijan los impulsos del fondo, a ser por debajo de 40 Bq/m³ (alrededor de 1 pCi /litro). Este control también es importante para asegurarse de que no hay cálculos erróneos relacionados con el ruido mecánico o eléctrico.

Para eliminar los impulsos debido al radón, la cámara debe ser sellada, esperando a que el radón se desintegre a un nivel suficientemente bajo. Por desgracia, es muy difícil de sellar la cámara, ya que el radón pasa a través de casi todos los materiales. Se debe cerrar la cámara en un cilindro grande de aluminio, con tapón de rosca de aluminio y tener especial cuidado con el conector de salida. Incluso el más pequeño espacio en la junta de resina plástica, podrían dejar entrar el radón, dentro de los 15 días o más, en que tarda en decaer bastante.

Afortunadamente, hay otro método. Tener una reserva de aire en el cilindro de un compresor de aire normal, sin encenderlo, por alrededor de un mes. Como el radón decae en 3,8 días y que sus hijas tienen un tiempo mucho más corto, en un mes la radiactividad cae a una 250a parte de la radiactividad inicial, un nivel casi imposible de medir. EPA en sus notas, llama a este aire, "aire envejecido". Con este aire es fácil de limpiar la cámara y luego mantenerla en este estado, con una brizna de aire, todo el tiempo de la medición.

Las pruebas preliminares indican que con una cámara muy bien construida, puede obtener los recuentos más bajos de un pulso por hora, lo que significa menos de 0,4 Bq/m³ (menos de una centésima de pCi/litro).

La circulación del aire y el radón

El funcionamiento de la cámara de ionización, se basa en la suposición de que el aire dentro de la cámara, es una muestra representativa del aire en el entorno que se está supervisando. El radón se propaga muy fácilmente en el aire, el agua e incluso a través de muchos materiales sólidos, entonces entra fácilmente en la cámara de difusión y pronto trae la concentración interna en equilibrio con el externo.

Variaciones de concentración en el interior, siguen con sólo un cierto retraso, los cambios de concentración del ambiente externo. En nuestras pruebas **el tiempo de retardo es insignificante**, sólo unas pocas decenas de minutos, **a pesar de que la cámara tenía pequeñas aberturas, cubiertas con filtros de polvo**.

Un reemplazo suficientemente rápido usando solo la difusión, permite trabajar sin una bomba de aire. La bomba traería una variedad de problemas, el principal entre ellos, la rápida acumulación de polvo en los filtros. Este, además de aumentar los costes de mantenimiento, evita las mediciones automáticas para un tiempo muy largo.

Los iones o los electrones?

Las cámaras de calculo, a su vez, se dividen en dos subtipos, dependiendo de lo que se amplifica, es el producto de impulsos eléctricos por los electrones o los iones.

Al principio, pensamos que la elección, entre los iones y electrones, depende de la polaridad, siguiendo este razonamiento: Si el exterior es negativo, entonces el electrodo central es positivo y captura electrones. Al contrario, si sería negativo, capturaría iones. Pero, ya que se mide la corriente eléctrica como una "diferencia de potencial", en el primer análisis, se podría pensar que no hay diferencia entre la amplificación de la corriente iónica o el electrónico.

Una diferencia debe existir: los electrones son muy pequeños y viajan más rápidamente que los iones grandes y pesados, por lo tanto, los impulsos eléctricos producidos por los electrones son cortos (unos micro-segundos), sino las relativas a los iones, son miles de veces más largos (unos pocos milisegundos)

Por esta razón, nos hemos equipado con generadores de alta tensión, con la posibilidad de cambiar rápidamente, entre polaridad positiva y negativa, para verificar de esta manera, las calidades y debilidades de la corriente de ionización de amplificación o la electrónica.

En seguida hicimos un descubrimiento interesante: amplificar la corriente producida por los electrones, es muy difícil. Se debería amplificar un ancho de banda de varios Mhz (tarea ya bastante difícil). Incluso peor, el ruido de los componentes electrónicos, aumenta con el aumento del ancho de banda, lo que hace casi imposible distinguir pulsos generados por los electrones, del ruido de fondo del circuito de entrada (en nuestro caso un FET de bajo nivel de ruido)

A continuación, hemos limitado el ancho de banda a unos pocos cientos de Hz y optimizado el circuito de amplificación, para obtener la máxima relación entre la señal y el ruido, para los impulsos generados por iones. Por lo tanto, hemos obtenido, una relación señal/ruido de aproximadamente 40dB (100 veces), lo que permite aislar los impulsos producidos por las desintegraciones del ruido, de una manera absolutamente fiable. El ancho de banda, debe ser de 10Mhz para los electrones, pero la relación caería a unos pocos dBs, lo que hace muy difícil aislar los pulsos del ruido.



Noten los pulsos limpios, de color amarillo (unos pocos voltios) en relación con el ruido de fondo (decenas de milivoltios). Los pulsos verdes son los impulsos cuadrados de salida y se normalizaron a 5 milisegundos, con un disparador de Schmitt, para evitar doble calculo.

Contando iones, disminuye la frecuencia de conteo máxima?

Esto es cierto. En teoría, con los electrones, podríamos llegar a algún Mhz, alcanzando **22000000 pico Curie** por litro, al contrario, contando los iones, se puede llegar a **sólo 100 Hz.**, igual a aproximadamente **2800 pico Curie** por litro (alrededor de **103.600 Becquerel por metro cúbico**)

En cuanto a la medición del radón, es suficiente medir hasta 100 pCi / l, con un margen de veinte y ocho veces.

Acercándose a la frecuencia de conteo máximo, el número de pulsos perdidos, aumenta gradualmente. Este efecto, puede ser compensado mediante el ajuste del parámetro "BKG" del software de conteo (Theremino_Geiger), que hace un cálculo estadístico y restaura casi a la perfección, la linealidad de la parte superior de la escala.

La polaridad de tensión

Una vez decidido amplificar la corriente de los iones, la teoría dice que es mejor recoger los iones en el electrodo central. Alto voltaje positivo entonces, en el exterior de la cámara y el negativo en el electrodo central, para atraer los iones positivos.

Siendo un poco quisquillosos, queríamos experimentar nosotros mismos, esto llevó a otro descubrimiento interesante:

Si amplificamos la corriente de ionización, con ancho de banda optimizado para los impulsos de unos pocos milisegundos, no hay ninguna diferencia entre las dos polaridades (o que es tan pequeña, que es irrelevante)

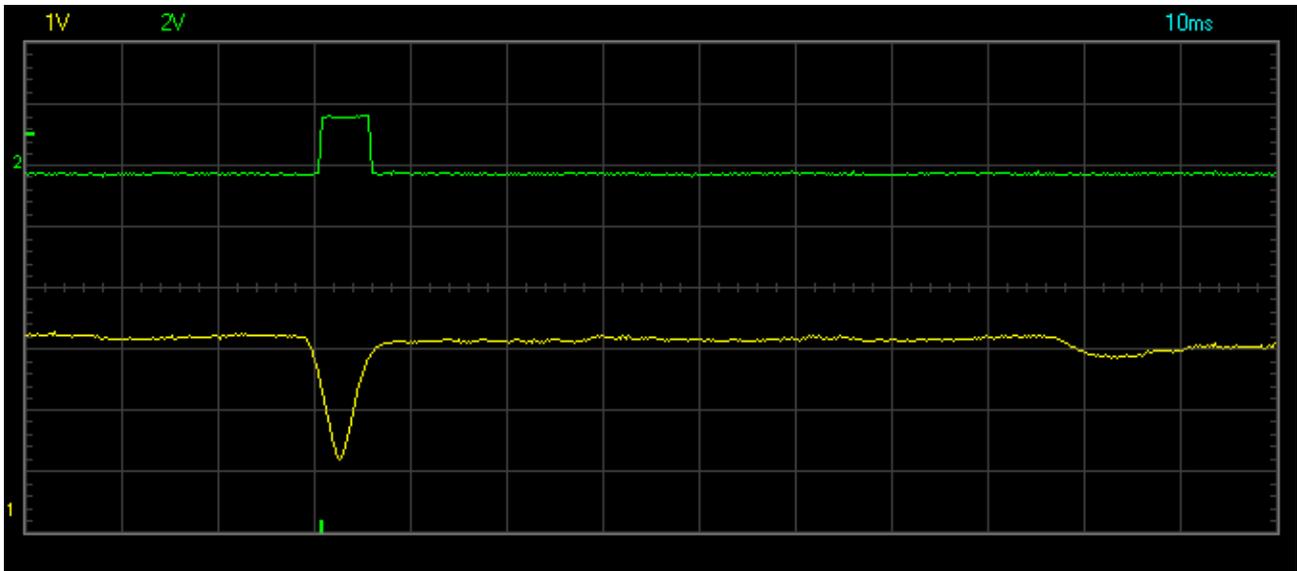
Probablemente no hay ninguna diferencia, ya que lo que se mide no es el actual, sino la "diferencia de potencial", producido por la corriente. Si alguien encuentra una explicación mejor, por favor háganoslo saber.

En conclusión: ya que es preferido por consideraciones teóricas y que construir transformadores de tensión positiva es aún más fácil, hemos decidido **polarizar el revestimiento exterior con voltaje positivo.**

Una ventaja adicional de la utilización de voltaje positivo es que el FET, se estabiliza en un tiempo mucho más corto, (unos pocos segundos) después de haber dado tensión a la electrónica. Esto es porque en positivo, la unión limita el voltaje de la puerta a menos de un voltio. Con alta tensión negativa al contrario, al no estar ninguna limitación, la puerta se baja a 30 voltios negativos y más, tardando casi un minuto antes que la corriente de pérdidas, lo traiga de vuelta a tensión cero.

Discriminación de las energías

En nuestra implementación, el circuito de amplificación contiene un disparador de Schmitt temporizado que, además de evitar el doble recuento causado por el ruido, establece un umbral de voltaje mínimo por debajo del cual, los pulsos no se cuentan.



La traza superior es la salida producida por el activador discriminador y de impulsos.

La traza inferior muestra la señal antes del disparo. A la izquierda un pulso producido por el radón, mientras que a su derecha, uno o tal vez dos estrechamente espaciados, cuya amplitud, siendo menos de 500 mV, no se cuenta.

El umbral se fija aproximadamente en 500 mV.

Las desintegraciones alfa del radón y sus hijas, (5 a 8 MeV) producen impulsos con una amplitud de 1 a 3 voltios. Las desintegraciones beta y gamma, producen pulsos muy pequeños, de amplitud de menos de 0,1 voltios.

Las desintegraciones beta y gamma, aparte de tener energías máximas de menos de 1 MeV, crean una serie de pares de electrones-iones, 100 veces menor que las desintegraciones alfa.

Los iones presentes en el aire no causan calculo, ya que siempre están iones individuales o grupos de un pequeño número de ellos, lo que resulta en una tensión mínima producida. Una desintegración alfa del radón, produce aproximadamente cienmil pares de electrones-iones, generando señales de por lo menos, mil veces mayores.

Incluso colocando un generador de ozono, justo al lado de la cámara de medición, los recuentos no se elevarían, ya que los iones y los electrones libres, no pueden pasar a través de la densa red de la malla de metal, estándolo conectada a la tierra, y entrar en la cámara.

Discriminar el radón, de sus hijas

Para discriminar las hijas del radón mismo, es necesario añadir una capa de polietileno fina y transparente (bolsa de plástico), además de los dos filtros de polvo. El polietileno deja pasar el radón, pero no sus hijas. Con estos filtros, ya que el radón se difunde lentamente a través de polietileno, el tiempo de estabilización de las cámaras, se convierte en mucho más largo, que la normal media hora.

Podría parecer contra-intuitivo, pero si se ponen los filtros que no permiten a las hijas del radón entrar, no hay necesidad de cambiar el coeficiente de calibración. Esto porque el radón que entra, pronto desarrolla una condición de equilibrio entre la producción de las hijas y de su desintegración.

Algunas investigaciones han demostrado que, bajo ciertas condiciones, la concentración de radón y sus hijas puede ser anormal, debido a la diferente velocidad de difusión causada por su diferente peso atómico. Esto sólo ocurre si el aire no se mueve. En una verdadera casa habitada, el transporte convectivo, predomina sobre la difusión y los errores en la medición, debido a la falta de equilibrio entre el radón y sus hijas, son mínimos, muy por debajo del +/- 30%, nuestro propio objetivo.

No estamos interesados en la precisión en detrimento de la velocidad. Hacer una medida que requiere un día entero, se limita a una sola búsqueda en un día. Este solo calculo podrá ser preciso de un 10%, pero es suficiente con abrir una puerta o ir a otra habitación, para medir valores completamente diferentes, hasta de un 300% más o menos. Con esto en mente, en nuestra opinión, es mejor quedarse en un 30% de precisión, con la posibilidad de hacer muchas mediciones en diferentes condiciones, ventanas abiertas y cerradas, diferentes salas, etc ...

Desintegraciones producidas por el radón, tienen una energía muy similar a la de sus hijas (5,5, 6 y 8 MeV), esto significa que las hijas, hacen el mismo daño biológico, que las desintegraciones del padre radón. Esto nos lleva a pensar que es correcto medir la mezcla de aire, el radón y sus hijas, así como está presente en el ambiente, sin cambiar las proporciones de los componentes por medio de filtros. Sin embargo, la legislación requiere que el valor, se exprese en términos de actividad en comparación con unidad de volumen, o sea la colección indistinta de las decaídas, directamente o indirectamente atribuibles al radón.

El equilibrio entre el radón y sus hijas

La relación entre la concentración de radón y sus hijas, se expresa normalmente como:

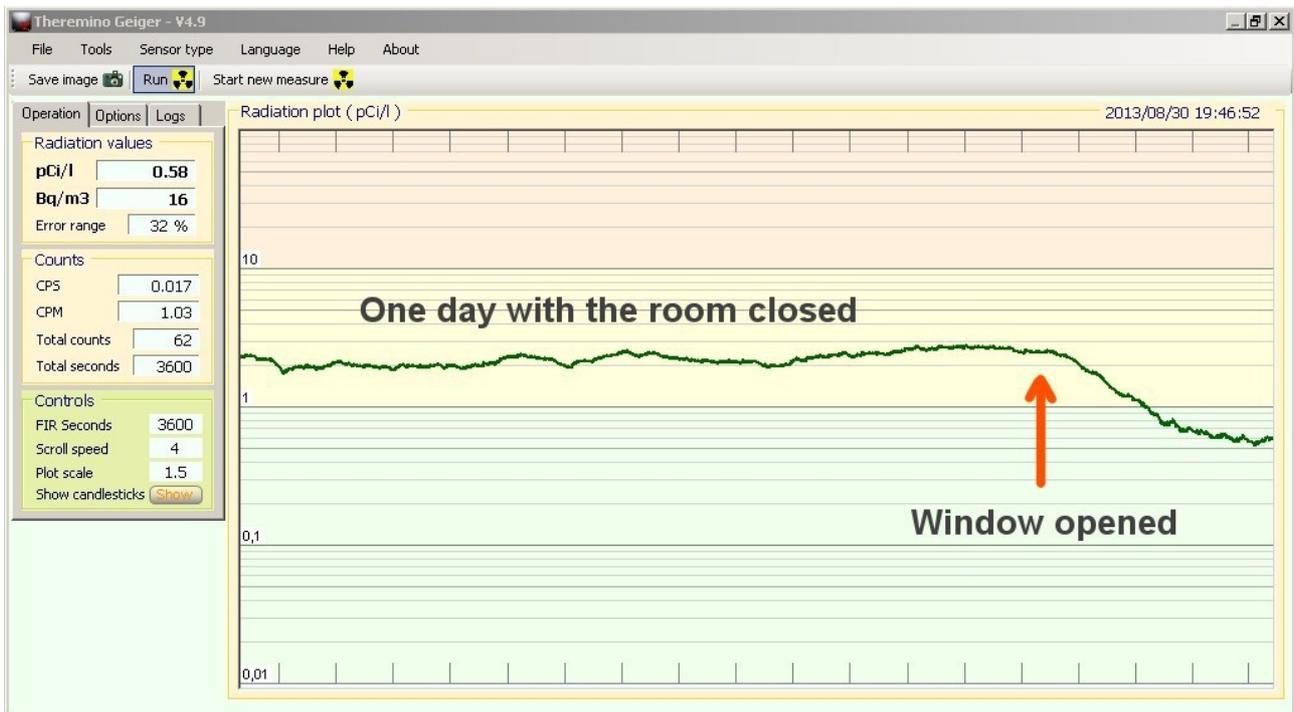
$F = \text{Concentración de radón en equilibrio} / \text{Concentración efectiva del radón en el aire}$

F (en ambiente interior) es normalmente, desde 0,4 hasta 0,5

Sólo en ambientes muy concretos, (por ejemplo, minas), este valor toma valores significativamente diferentes de las normas.

Una cámara de ionización sin filtros para las hijas del radón, está influenciada por el valor de F, pero en los ambientes de nuestro interés, esta influencia es mínima.

Gráficos de prueba



En este gráfico podemos ver una habitación bastante normal, quedada cerrada por un día entero y que se ha estabilizado en alrededor de 3 pCi / l (100 Bq/m3). En la parte derecha, tan pronto como se abre la ventana, la concentración comienza a disminuir, y en unas pocas horas, se llevó a aproximadamente a 0,5 pCi / l (alrededor de 20 Bq/m3), que es poco más que la normal concentración del aire exterior.



Aquí podemos ver que al cierre de la ventana, la concentración comienza a subir de nuevo, pero más lentamente a medida que toda la habitación poco a poco se llena de radón.

Gráficos de prueba de aparatos comerciales

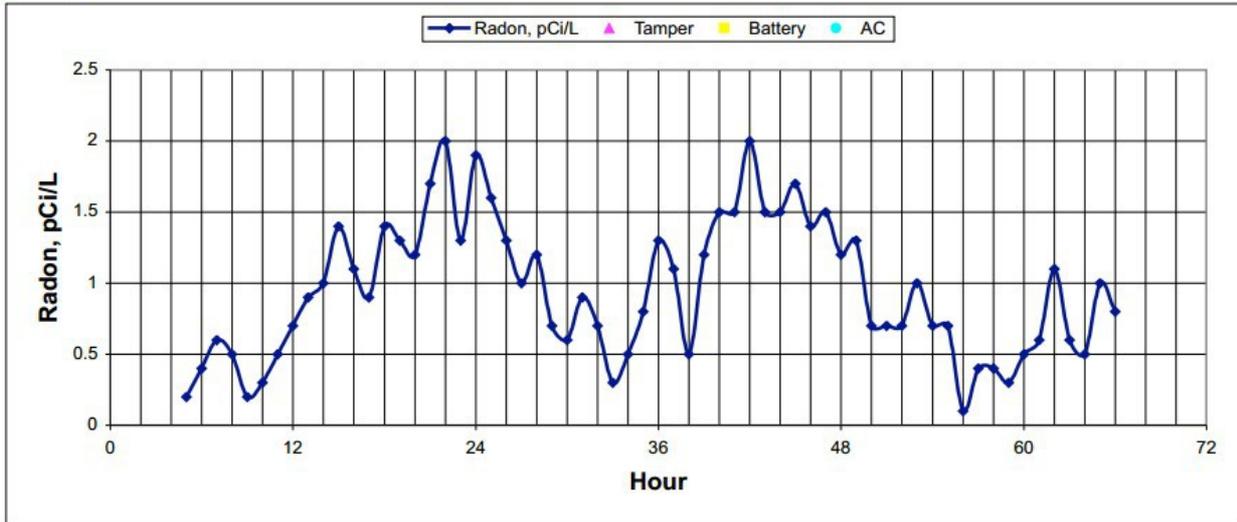
Estos gráficos dan una idea de cual valores hay que esperar y cuáles son las variaciones normales en el tiempo, en la concentración del radón.

RS300 Radon Test

Serial #01394
Calib. #31022
TestID #30008

Address
Location Living Room
Technician DeWitt Kimball

Average Radon Level, pCi/L: 0.9



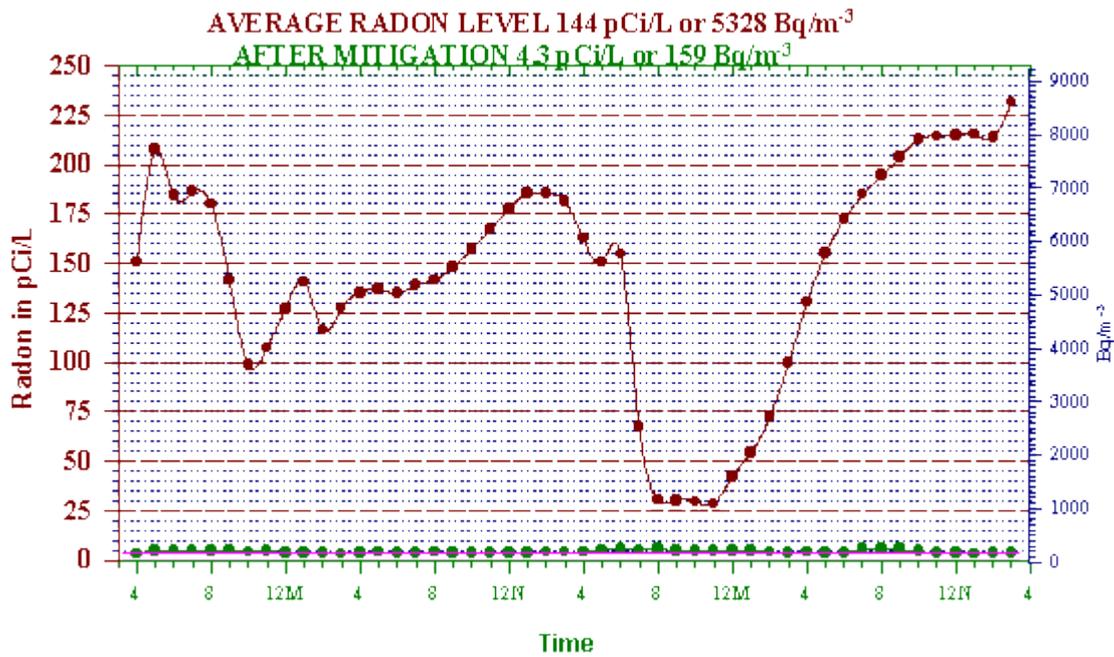
Como se puede ver en esta tabla, es muy normal ver incluso grandes variaciones durante el día. En unas pocas horas, se puede cambiar de un máximo de 2 pCi / l (74 Bq/m³), a un mínimo de 0,1 pCi / l (3,7 Bq/m³), con una relación entre el mínimo y el máximo, de 20 veces. El aparato que se utiliza, es bastante caro (unos 200 dólares) y lo suficientemente rápido, por ser un dispositivo comercial. Aparatos comerciales por lo general, transmiten datos cada hora, nuestros gráficos son en lugar, de uno por segundo.

Estas variaciones se deben a cambios en la temperatura, que a su vez causan cambios en la presión, entre las diferentes partes de la casa. Incluso el viento y gente que se mueve alrededor, ayudan al radón, el cual tendería a estancarse en la parte inferior, a mezclarse con las capas superiores de aire. No se debe ignorar la apertura y cierre de puertas y ventanas. Un gráfico así, sin más indicaciones, deja fácilmente imaginar que ha habido movimientos de personas y otros factores de alteración.

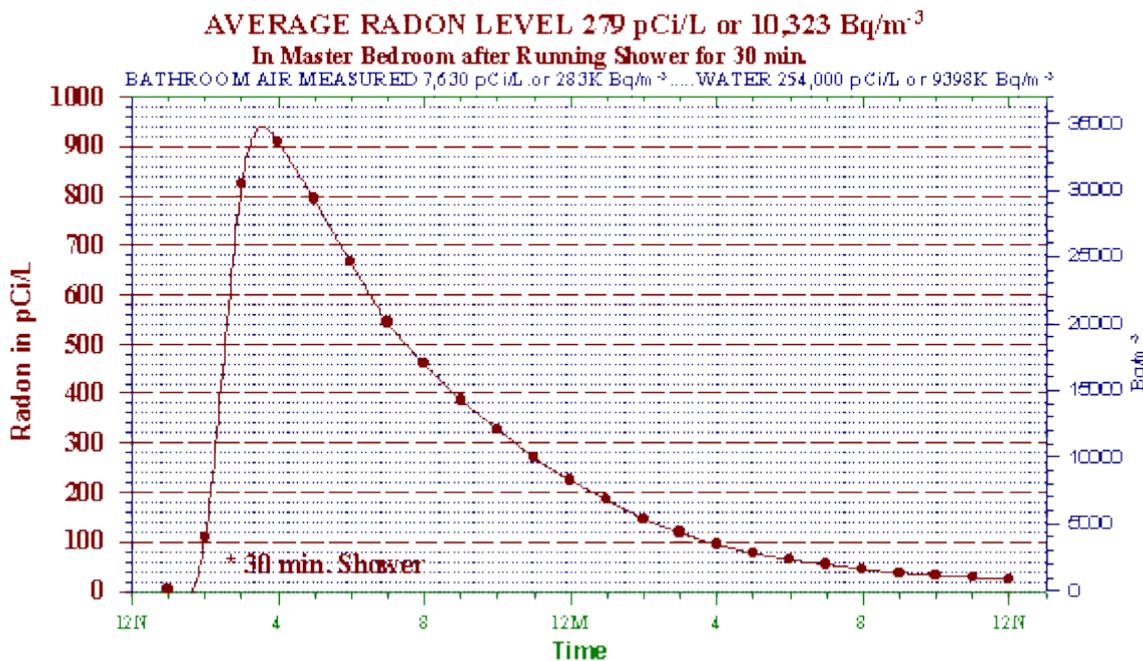
Para comparación, este es un gráfico de una habitación libre, cerrada durante casi un día.

Tenga en cuenta la estabilidad de la medición en el tiempo. Las ondulaciones residuales, se deben más a las desintegraciones aleatorias, que a las variaciones de la concentración de radón.





Esta imagen es un buen ejemplo de lo que puede esperarse, en caso de peligro real. El gráfico fue realizado por una empresa estadounidense, que realiza operaciones bajo pedido y se refiere a una casa que requiso una intervención de "mitigación". Antes de la intervención el nivel era veinte veces el 400 Bq/m3 que la EPA considera como máximo, para las casas más viejas. Después del proceso, el radón se ha reducido hasta alrededor de 200 Bq/m3 (alrededor de 5 pCi / l), un nivel perfectamente seguro.



Aquí tenemos un gráfico muy curioso, que muestra cómo el radón se comporte a menudo, de una manera inesperada. En un cuarto de baño (pequeño y completamente cerrado), con sólo abrir la ducha durante treinta minutos, se ha elevado la concentración hasta niveles increíbles. Esto sólo ocurre si se utiliza agua de un pozo, no debería suceder normalmente, con agua del suministro de agua.

Características

Características de la Theremino IonChamber

Detector	a cámara de ionización por pulsos
Muestreo	a difusión pasiva
Rango medición	0,5 a 74.000Bq/m3 (0,01 hasta 2.000pCi/l)
Sensibilidad	0.05cpm/Bq/m3 (2.0cpm/pCi/l)
Precisión	+/-50% (Calibración no necesaria)
Volumen cámara	1000cc.
Memoria	ilimitada, intervalos ajustables
Precio	unos 30 euros (Proyecto hazlo tu mismo)



Características de un dispositivo profesional – Monitor de CRM 510

Detector	cámara de ionización por pulsos
Muestreo	difusión pasiva
Rango medición	36-7400Bq/m3 (1 a 200pCi/l)
Sensibilidad	0.008 cpm/Bq/m3 (0.3 cpm / pCi / l)
Precisión	+/-10% (Calibraciones frecuentes)
Volumen cámara	aproximadamente 150 cc
Memoria	intervalos de 100 horas (4 días)
Precio	unos 4.000 dólares (con accesorios)



Características de un dispositivo profesional – Security Siren Pro3

Detector	cámara de ionización por pulsos
Muestreo	difusión pasiva
Rango medición	5-37000Bq/m3 (0,1 a 999,9pCi/l)
Sensibilidad	0.0008cpm/Bq/m3 (0,03cpm/pCi/l)
Precisión	+/-20% (Calibrado en fábrica)
Volumen cámara	aproximadamente 20cc.
Memoria	5 años
Precio	cerca de 130 dólares



Los medidores más populares (ordenado por sensibilidad)

Instrumento	Principio de Detección	Sensibilidad (Cpm/pCi/l)	Precio (Aprox)
Security Siren Pro3	Pulsos ioniz.	0.03	\$ 130
RSENS Rstone	Estado sólido	0.06	\$ 1.500
Passive Sun Nuclear	Estado sólido	0.17	\$ 925
Passive RS500	Estado sólido	0.30	\$ 2.145
Passive Femto CRM-510	Pulsos ioniz.	0.30	\$ 3.000
Passive Radon Scout	Estado sólido	0.31	\$ 1.000
Passive E-Smart	Corriente ioniz.	1.2	\$ 2.000
Active Radonics	Centellador	2.0	\$ 8.000
Theremino IonChamber	Pulsos ionizantes	2.0	\$ (*)
Passive Alfa Guard	Pulsos ionizantes	2.8	\$ 6.000
Active Durridge	Estado sólido	2.8	\$ 4.500
Active Pylon AB-5	Centellador	5.7	\$ 3.500
Active DOE	Centellador	8.4	\$ 3.000
Active Eberline	Centellador	24.0	\$ 6,000

Los tipos de centelleo, no proporcionan una medición continua. Antes del uso, hay que cargar un filtro de polvo, medirlo, cambiar el filtro para todas las medidas y hay que usar una bomba con un flujo de aire calibrada y tiempo constante.

(*) El precio no es comparable debido a que Theremino, es un proyecto "hágalo usted mismo", mientras que los otros son dispositivos con caja y accesorios terminados.

Apéndice 1 – Los métodos de la lista de la EPA

La EPA (Environmental Protection Agency) considera 15 métodos para la medición del radón y les acorta con las abreviaturas de dos letras.

Las primeras trece son métodos discontinuados y constan de dos fases separadas de recogida y medición. Estos métodos son caros y poco fiables y que requieren personal experimentado y procedimientos difíciles de seguir. Son todavía muy populares, ya que en el pasado, las unidades de medida eran tan grandes y caras, que era más fácil mantenerlas en el laboratorio y transportar sólo las muestras.



- AC – Absorción de carbón activado
- LS – Carbón y líquido de centelleo
- AT – Detección Trazas Alfa (filtrado)
- UT – Detección Trazas Alfa (Sin filtrar)
- EL – Cámara de iones Electret (a tiempos largo)
- ES – Cámara de iones Electret (a tiempos cortos)
- GC – Carbón activado/Coge Radón
- GB – Coge Radón/Bolsa bomba plegable
- GS – Coge Radón/Centellador
- SC – Centellador con integración de tres días
- PB – Bolsa bomba plegable (1 día)
- GW – Captura y manipulación temporizadas
- RP – Unidad integrada de muestreo, para hijas del radón

Los dos últimos métodos (CW y CR), permiten la medición continua del radón.

CW – Monitoreo continuo (24 horas)

Este método se basa en una bomba que acumula polvo en un filtro y se clasifica como "continua", a pesar de que está encendida 24 o 48 horas a lo máximo. Antes de cada medición, (normalmente 24 horas) el filtro debe ser sustituido, se necesita una calibración de la respuesta con una fuente de muestra y se mide la velocidad de flujo de la bomba. Para completar la tarea, hay que tener lo siguiente: filtros de repuesto – fuente de prueba partículas alfa – instrumento de medición del flujo de aire. Dispositivos de este tipo cuestan miles de euros, el precio de los filtros, tampoco es despreciable.



CR – Monitoreo continuo de radón

El método CR incluye la cámara de ionización y algunas variaciones más complejas con bomba de aire y/o con un centellador. En las siguientes páginas, se puede leer una breve explicación de cada método. Tenga en cuenta la simplicidad del método de CR, en comparación con todos los demás.



Métodos discontinuos para la medición de radón

AC – Absorción con carbón activado

En este método, un recipiente hermético con carbón vegetal activado, se abre en el área a muestrear y el radón en el aire se adsorbe por los gránulos de carbón vegetal. Al final del periodo de muestreo, el recipiente se sella y puede ser enviado a un laboratorio para su análisis. El decaimiento Gamma del radón, adsorbido por el carbón, se cuenta con un detector de centelleo y un cálculo basado en los datos de calibración en un sitio de ejemplo, para calcular la concentración de radón. Los detectores a carbón, dependiendo del diseño, se despliegan en el sitio, de 2 a 7 días. Ya que el carbón adsorbe y también libera radón, el método no da una verdadera medida integrada en el tiempo de exposición. El uso de una barrera de difusión sobre el carbón, reduce los efectos de las corrientes de aire y alta humedad.

LS – Carbón y líquido de centelleo

Este método emplea un pequeño vial, que contiene carbón activado, para probar el radón. Después de un periodo de exposición de 2 a 7 días (dependiendo del diseño), el vial se sella y se manda a un laboratorio para su análisis. Mientras que la absorción de radón en el carbón, es la misma que en el método de AC, el análisis se lleva a cabo mediante el tratamiento del carbón con un fluido de centelleo, a continuación, se analiza el líquido usando un contador de centelleo. La concentración de radón en el sitio de la muestra, se determina contando pulsos por minuto, la conversión se realiza con comprobación de tablas.

AT – Revelación de trazas alfa (filtrado)

El detector es una pequeña pieza de plástico o una película especial, dentro de un pequeño recipiente. El aire que se prueba, se difunde a través de un filtro que cubre un agujero en el recipiente. Cuando las partículas alfa del radón y sus productos de desintegración golpean el detector, causan daños a forma de trazas. Al final de la prueba, el recipiente se sella y se vuelve ad un laboratorio para la lectura. El detector de plástico o película es tratada para mejorar las trazas de los daños, éstos se calculan a continuación, en un área predeterminada, utilizando un microscopio o un lector óptico. El número de trazas por zona analizada, se utiliza para calcular la concentración de radón en el sitio de prueba. La exposición de los detectores de trazas alfa es generalmente de 3 a 12 meses. Estos detectores son dispositivos que integran verdadamente y pueden estar expuestos durante períodos cortos de tiempo, para medir concentraciones de radón superiores.

UT – Detección de trazas alfa (sin filtrar)

El detector de trazas alfa sin filtrar, opera sobre el mismo principio que el detector de pista alfa, excepto que no hay presencia de filtro, para eliminar los productos de desintegración del radón u otros emisores de partículas alfa. Sin un filtro, la concentración de los productos de desintegración del radón, medidos desde el detector, depende de la relación de equilibrio de los productos de desintegración del radón, en el área que está siendo probada, no simplemente por la concentración del radón. Detectores sin filtro, con película de nitrato de celulosa, presentan dependencia energética. Esto reduce, pero no totalmente compensa, la dependencia del factor de calibración, a partir de la relación de equilibrio. Es por eso que la EPA no recomienda el uso de estos dispositivos, cuando la fracción de equilibrio, es menos de 0,35 o superior a 0,60, antes de ajustar el factor de calibración. EPA está evaluando actualmente este dispositivo otra vez, para determinar con mayor precisión los efectos de la fracción de equilibrio y otros factores, en el rendimiento. Estas pruebas darán lugar a la decisión, si seguir desarrollando el protocolo actual, o eliminar el método de la lista.

EL – Cámara de iones electret (tiempos largos)

En este método, un detector de disco cargado electrostáticamente (electret), está situado dentro de un pequeño recipiente (cámara de litio). Durante el período de medición, el radón se difunde a través de una abertura del filtro cubierto en la cámara, donde la ionización, que resulta de la descomposición del radón y sus hijas, reduce la tensión en el electret. Un factor de calibración, relaciona la caída en el voltaje medido a la concentración de radón. Las variaciones en el diseño de electret, determinan si los detectores son adecuados para la toma de mediciones a largo plazo o corto plazo. Detectores de este tipo, pueden ser desplegados durante 1 a 12 meses.

ES – Cámara de iones electret (tiempo cortos)

El procedimiento es exactamente el mismo que el método anterior, pero ya que las cámaras de ionización de electret son verdaderos detectores de integración, pueden estar expuestos a intervalos más cortos, si los niveles de radón son lo suficientemente altos.

GC – Captura del radón y carbón activado

Este método requiere un técnico especializado, para muestrear el radón mediante el uso de una bomba, que aspira aire a través de un cartucho lleno con carbón vegetal activado. Dependiendo del diseño del cartucho y el flujo de aire, se toman muestras de 15 minutos a 1 hora. Después del muestreo, el cartucho se coloca en un recipiente sellado y se lleva a un laboratorio, donde el análisis es aproximadamente la misma que los métodos CA o LS.

GB – Captura del radón con bomba y bolsa plegable

Este método utiliza una bolsa de muestra hecha de material inaccesible al radón. En el sitio de la muestra, un técnico experto usando una bomba portátil, llena la bolsa con el aire, y luego la transporta al laboratorio para su análisis. Por lo general, el aire se transfiere desde una bolsa a una célula de centelleo, la realización de un análisis es como se describe en el método GS a continuación.

GS – Captura de radón y centelleo

Con este método, un operador experto aspira aire a través de un filtro, para eliminar los productos de desintegración del radón, en una célula de centelleo, ya sea abriendo una válvula en la centellador, que ha sido vaciado previamente, usando una bomba de vacío o aspirando el aire a través de la celda, hasta que el aire interior está en equilibrio con la exterior, a continuación se sella. Para analizar la muestra de aire, el extremo de la ventana de la celda, se coloca en un tubo fotomultiplicador, para contar los centelleos, (pulsos de luz) producidos cuando las partículas alfa procedentes de la descomposición del radón, golpean el revestimiento de sulfuro de zinc en el interior de la célula. El cálculo se hace para convertir las cuentas, a las concentraciones de radón.

SC – Integración de tres días y centelleo

En este método, una célula de centelleo está equipada con una válvula de limitación y un medidor de presión negativa. Antes del despliegue, se aspira la célula de centelleo. En el sitio de la muestra, un técnico especializado, comprueba la presión negativa y abre la válvula. El flujo a través de la válvula es bastante lento, por lo que es necesario un período de muestreo de más de 3 días, para llenar la célula. Al final del período de la muestra, el técnico cierra la válvula, comprueba el contador medidor de presión negativa, y vuelve con la célula para el laboratorio. El procedimiento de análisis es aproximadamente el mismo que el método GS, que se ha descrito anteriormente. Una variación de este método, implica el uso de la válvula, pero en un contenedor rígido, que requiere que el aire muestreado, sea transferido a una célula de centelleo para el análisis.

PB – Bomba de bolsa plegable (1 día)

Con este método, una bolsa de muestras de un material donde el radón no puede pasar, se llena durante un período de 24 horas. Esto se logra generalmente bombeando pequeñas cantidades de aire a intervalos predeterminados, durante el período de muestreo. Después del muestreo, los procedimientos de análisis son similares a los del método de GB.

GW – Captura y procesamiento temporizado

En este método, un volumen conocido de aire es arrastrado a través de un filtro, que recoge los productos de la desintegración del radón. El tiempo de muestreo suele ser de 5 minutos. Los productos de desintegración se cuentan usando un detector alfa. El cálculo se debe hacer en un momento preciso, una vez tomada la muestra de filtro. Los dos procedimientos de cálculo más utilizados son el Kusnitz y los métodos Tsivoglou.

RP – Unidad Integrada para el muestreo de las hijas del radón

En este método, una bomba de aire de bajo flujo, empuja el aire continuamente a través de un filtro. Dependiendo del detector usado, la radiación emitida por los productos de desintegración atrapadas en el filtro, se registra en dos dosímetros termoluminiscentes (TLD), un detector de trazas alfa, o un electret. Los dispositivos disponibles actualmente, requieren acceso a un suministro eléctrico de la casa, pero no requieren de un operador experto. El período de muestreo debe ser de al menos 72 horas. Después del muestreo, el detector se envía a un laboratorio, donde se realiza el análisis de la trazas alfa y electret, usando los procedimientos descritos en los dispositivos AT, EL, y ES. Los detectores TLD son analizados por un instrumento, que calienta el muestreo y mide la luz emitida. Un cálculo convierte la medición de la luz, con la concentración de radón.

Métodos continuos para la medición de radón

La agencia EPA (Environmental Protection Agency), enumera sólo dos métodos para la medición continua de radón, el CW y el CR

CW – Control de nivel ininterrumpido (24 horas)

Este método incluye aquellos dispositivos que registran en tiempo real, la medición de los productos de desintegración del radón. Productos de desintegración del radón son muestreados por el bombeo continuo de aire, a través de un filtro. Un detector de cruce por cero o un detector de barrera superficial, calcula las partículas alfa producidas por los productos de desintegración del radón mientras decaen, en este filtro. El monitor contiene típicamente un microprocesador, que almacena el número de recuentos en intervalos de tiempo predeterminados, para su posterior recuperación. El tiempo de medición para la prueba de medición del programa, es de aproximadamente 24 horas.



Defectos:

- Alto Precio de los equipos y accesorios de medición
- La bomba debe proporcionar un flujo constante.
- La medición también depende de la humedad del aire.
- El bombeo continuo de polvo del aire, se acumula rápidamente, por lo que tiene que ser limpiado regularmente.
- El filtro debe ser cambiado antes de cada medición (por lo menos cada 24 o 48 horas).
- La velocidad de flujo disminuye gradualmente, con la acumulación de polvo, alterando el calculo en el tiempo.
- Las medidas no se toman en un volumen definido, lo que significa que la calibración, se tiene que hacer antes de cualquier medición, con una fuente de prueba.
- Los filtros de aire, fuente de calibración y medidores de flujo, hacen que estos dispositivos, sean aún más caros.
- A pesar de ser anunciada como "continua", en realidad la medida, debe ser detenida periódicamente, para cambiar los filtros.

Por último, siempre traduciendo de las notas de la EPA, tenemos el método CR, que incluye nuestra cámara de ionización y dos variaciones similares.

CR – Vigilancia de radón continua

Estos dispositivos miden continuamente las variaciones de la concentración de radón. El aire se bombea o se **difunde** en una cámara de recuento, que es típicamente una célula de centelleo o una **cámara de ionización**. Circuitos electrónicos, calculan las **desintegraciones en un volumen conocido**, la concentración del radón se calcula con un coeficiente.

Hemos resaltado en negrita, las partes que se relacionan con nuestra cámara de ionización, por consiguiente clasificada como: "**Cámara de ionización, de tipo a difusión, para la medición continua del radón a través de calculo, de acuerdo con el método de la EPA, CR**"

