

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

*Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de
Cataluña, dentro del programa de Doctorado “Ingeniería Nuclear”*

**CONTRIBUCIÓN A LA
CARACTERIZACIÓN DE
AEROSOLAS RADIATIVOS
DERIVADOS DEL RADÓN**

Autor: Arturo Vargas Drechsler
Director: Xavier Ortega Aramburu

CAPÍTULO V

DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPOS

V.1 Introducción

En este capítulo se describen los sistemas de medida desarrollados en este trabajo para la determinación del factor de equilibrio, la fracción libre y el espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libres.

Se ha diseñado y puesto en marcha un sistema de medida del factor de equilibrio y de la fracción libre con el objetivo de estudiar la evolución temporal de estos parámetros en recintos cerrados. El sistema debe ser capaz de medir en continuo (intervalos de 1 hora) niveles bajos de concentración de radón usuales en viviendas (30 Bq/m^3) con un buen nivel de precisión. Este sistema de medida lo forman un equipo de medida de la concentración de radón, otro para la determinación de la concentración total de descendientes y un tercero que se utiliza para la determinación de la concentración de descendientes adheridos a partículas de aerosol.

El sistema de análisis del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre se ha desarrollado con el objetivo de llevar a cabo determinaciones de esta característica en atmósferas controladas. El principio de selección de partículas está basado en la utilización de tubos de difusión (capítulo IV) y tamices metálicos (apartado III.4.1). Se pretende que sea capaz de realizar medidas de forma continuada de tal manera que permita efectuar el estudio de las evoluciones temporales del espectro dimensional en diferentes condiciones ambientales. Para la deconvolución de los datos obtenidos (apartado III.5) con este sistema se ha adaptado una técnica denominada Randomwalk (RW) (Butterweck-Dempewolf y col. 1998). En este trabajo se propone un algoritmo de diseño propio basado en el método RW y que ha sido implementado en un programa de cálculo escrito en FORTRAN. Se efectuó un análisis de este programa de cálculo en el marco de una intercomparación de los distintos métodos habitualmente utilizados y que fue organizado en el marco del Proyecto Europeo RARAD (Butterweck-Dempewolf y col. 2000).

Para la puesta en marcha de los sistemas desarrollados en este trabajo ha sido necesario disponer de una cámara de radón de atmósfera controlada. En el último apartado de este capítulo se describen las características de dicha cámara de radón, que ha sido instalada en el Instituto de Técnicas Energéticas de la Universidad Politécnica de Cataluña.

V.2 Descripción del sistema de medida del factor de equilibrio y de la fracción libre

Este sistema de medida, inspirado en el utilizado por la Universidad de Göttingen (Alemania), lo componen un equipo para la determinación de la concentración de radón y dos dispositivos para la medida de la concentración de descendientes y de los adheridos a partículas de aerosoles. Una descripción detallada de estos equipos se encuentra en el trabajo de Vargas 1992. Se presenta una breve descripción de cada uno de estos sistemas de medida.

V.2.1 Sistema de medida de la concentración de radón

El principio de medida de este sistema se basa en la realización de la espectrometría alfa de los descendientes del radón depositados en un detector. El aire aspirado que entra en el volumen de detección se hace pasar previamente por un filtro con la finalidad de retener los descendientes del radón, y así permitir únicamente la entrada del gas radón. El volumen de detección consiste en una esfera de 5 litros provista de un detector de semiconductor de partículas alfa, tal como se muestra en la figura V1.

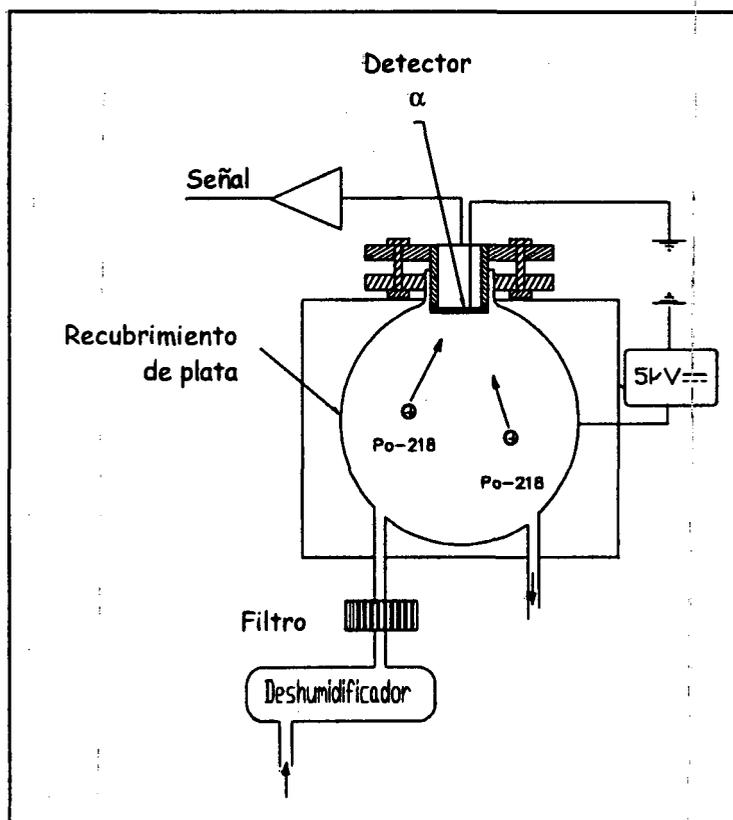


Fig. V.1. Esquema del equipo de medida de la concentración de radón.

Este volumen de detección se encuentra recubierto en su interior por una fina capa de un material conductor (normalmente plata) de manera que entre éste y el detector se aplica una diferencia de potencial de 15 kV. Del orden del 80 % de las desintegraciones del gas radón genera iones positivos de Po-218 que son atraídos hacia la superficie del detector por el campo eléctrico existente en el interior del volumen de detección. Sin embargo, el ion de Po-218 puede ser neutralizado por moléculas de agua antes de alcanzar el detector y no ser contabilizado, por lo que el aire se seca antes de su entrada en el volumen de detección mediante gel de sílice.

Aproximadamente la mitad de las desintegraciones alfa de los átomos de ^{218}Po depositados en el detector dan lugar a una detección en el correspondiente canal de energía previamente establecido. El número de detecciones de ^{218}Po está directamente relacionado con la concentración de radón.

La elección de un sistema de estas características se debe a diversos factores entre los que destacan su gran sensibilidad a la concentración de radón, fondo radiactivo prácticamente nulo y su capacidad de detectar gas radón. Estas características permiten al equipo disponer de unas prestaciones de medida superiores a los equipos comerciales. El equipo desarrollado tiene un factor de conversión a concentración de radón de 0.10 cpm (cuentas por minuto) por Bq m^{-3} que es dos veces superior al mejor equipo comercial.

V.2.1.1 Verificación de funcionamiento

En la cámara de radón del INTE, descrita en el apartado V.5, se llevó a cabo un análisis comparativo entre el equipo desarrollado y tres equipos comerciales: Alphaguard modelo PQ2000PRO, Atmos modelo 12x y Prassi. En este estudio se comprobó que todos los equipos tenían una respuesta rápida a los cambios bruscos de la concentración de radón. Para estimar el error de cada uno de ellos fueron expuestos a tres concentraciones de radón distintas durante largos periodos de tiempo de manera a poder determinar su desviación respecto al valor medio. Los resultados se presentan en las tablas V.1, V.2 y V.3. El error se ha calculado suponiendo que la concentración en la cámara es estable y que la calibración de cada equipo no tiene error.

Equipo	Media Bq m^{-3}	2σ Bq m^{-3}	Mínimo Bq m^{-3}	Máximo Bq m^{-3}	% Error relativo (2σ)
INTE	1667.6	41.5	1634.0	1698.4	2.4
Atmos	1584.6	84.7	1511.6	1668.3	5.3
Alphaguard	1635.6	108.0	1533.3	1736.0	6.6
Prassi	1549.0	53.6	150.6	1606.2	3.4

Tabla V.1. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de 1500 Bq m^{-3} con 21 medidas de una hora de duración.

Equipo	Media Bq m ⁻³	2 σ Bq m ⁻³	Mínimo Bq m ⁻³	Máximo Bq m ⁻³	% Error relativo (2 σ)
INTE	296.5	11.8	286.4	305.6	3.9
Atmos	285.1	38.2	256.3	317.0	13.4
Alphaguard	296.4	36.8	270.0	333.7	12.4
Prassi	278.7	20.0	262.0	299.7	7.1

Tabla V.2. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de 300 Bq m⁻³ con 16 medidas de una hora de duración.

Equipo	Media Bq m ⁻³	2 σ Bq m ⁻³	Mínimo Bq m ⁻³	Máximo Bq m ⁻³	% Error relativo (2 σ)
INTE	42.7	5.1	38.7	48.4	12.0
Atmos	46.1	14.8	34.6	63.8	32.0
Alphaguard	44.7	12.6	36.7	57.7	28.0
Prassi	37.0	9.1	31.0	45.7	24.6

Tabla V.3. Resultado de la intercomparación a un nivel de concentración de radón de 50 Bq m⁻³ con 18 medidas de una hora de duración.

V.2.2 Sistema de medida de la concentración de descendientes totales y de descendientes adheridos a partículas de aerosoles

El principio de funcionamiento se basa en la realización de espectrometría alfa de filtros por los que se ha hecho circular el aire cuya actividad se pretende medir. Mediante un análisis del espectro obtenido y el correspondiente algoritmo de cálculo se dispone del sistema de medida más preciso que se conoce para la determinación en continuo de las actividades en el aire de los descendientes de vida corta del radón (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb y ²¹⁴Bi (²¹⁴Po)). En la figura V.2 se muestra el esquema básico de funcionamiento de una unidad de medida de la concentración de los descendientes de vida corta del radón.

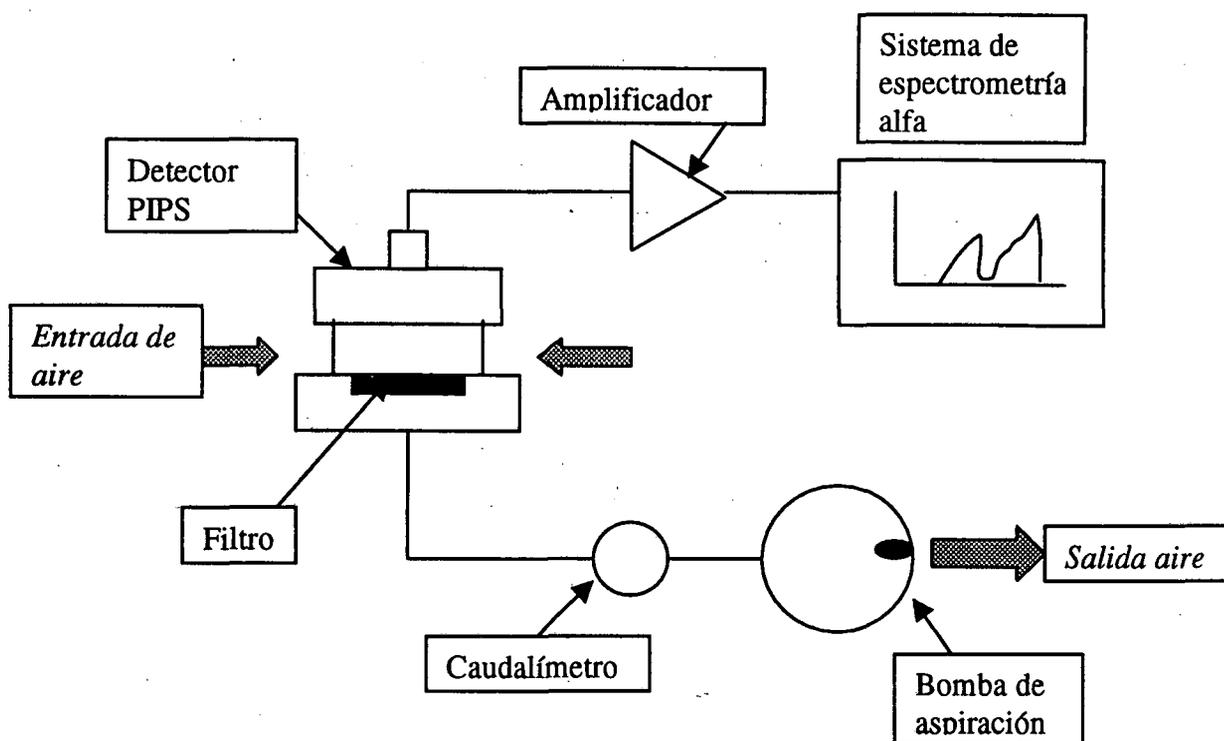


Fig. V.2. Esquema básico de funcionamiento de una unidad de medida de la concentración de los descendientes de vida corta del radón en el aire, utilizando espectrometría alfa.

Para disponer de información sobre la concentración en actividad del tamaño de los descendientes del radón no adheridos a partículas de aerosol se coloca un tamiz selectivo previo al filtro, de manera que los descendientes del radón son filtrados de acuerdo con su curva de penetración.

V.2.2.1 Ciclo de medida

Para un sistema como el diseñado en este trabajo se utilizan ciclos de medida formados por tres fases o etapas: una primera de aspiración y realización del espectro de partículas alfa emitidas, una segunda de espera y una última etapa de medida del espectro de partículas alfa emitidas. En el primer espectro obtenido se detectan tanto las partículas alfa de las desintegraciones del ^{218}Po como las del ^{214}Po ; mientras, en el segundo espectro sólo se observa el pico de las desintegraciones del ^{214}Po , ya que el ^{218}Po se ha desintegrado en la etapa anterior debido a su corto periodo de semidesintegración.

Durante la etapa de aspiración la ecuación de la variación temporal de la actividad en el filtro de cada uno de los descendientes es:

$$\frac{\partial A_i(t)}{\partial t} = Q\lambda_i C_i + \lambda_i A_{i-1}(t) - \lambda_i A_i(t) \quad (\text{V.1})$$

donde:

$A_i(t)$ es la actividad en Bq del descendiente i , que puede ser 1 (^{218}Po), 2 (^{214}Pb) y 3 ($^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$). El valor de $A_0(t)$ es igual a 0 ya que el radón no queda retenido en el filtro,

Q es el caudal en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ de aire que pasa por el filtro,

λ_i son las constantes de desintegración de los tres descendientes (s^{-1}), y

C_i es la actividad por unidad de volumen del descendiente i en el aire de aspiración.

Las condiciones iniciales se refieren a la actividad de cada descendiente que hay en el filtro al inicio de cada ciclo, o sea, en el momento de iniciarse la aspiración. Para el primer ciclo esta actividad es igual a cero y para los siguientes ciclos se calcula despejando de las ecuaciones de la variación temporal de la actividad de los descendientes en el filtro cuando no hay aspiración (estas ecuaciones se verán más adelante en este mismo apartado):

$$A_i(0) = A_{i-1}(t_{\text{final}}) \quad (\text{V.2})$$

El periodo de semidesintegración de los tres descendientes de vida corta del radón es de 3.11 min, 26.8 min y 19.9 min, por tanto, para que la actividad que se va a medir sea óptima, es suficiente realizar la aspiración durante un tiempo de unos 20 minutos ($t_{\text{asp}}=20 \text{ min}$).

La ecuación de la variación de actividad en el filtro de cada descendiente del radón durante las etapas en las que no hay aspiración de aire es:

$$\frac{\partial a_i(t)}{\partial t} = \lambda_i a_{i-1}(t) - \lambda_i a_i(t) \quad (\text{V.3})$$

donde $a_i(t)$ es la actividad del descendiente i en el filtro durante las etapas en las que no se produce aspiración de aire. Las condiciones iniciales son:

$$a_i(0) = A_i(t_{\text{asp}}) \quad (\text{V.4})$$

En la primera etapa de detección el número de partículas alfa del ^{218}Po que son detectadas, ND_{218}^1 , se determinan con la siguiente ecuación:

$$ND_{218}^1 = \varepsilon \int_0^{t_1} A_{218}(t) dt \quad (\text{V.5})$$

donde ε es la eficiencia de detección del correspondiente módulo de medida y t_1 es el tiempo de aspiración. Para esta misma etapa pero para el número de partículas alfa de ^{214}Po , la ecuación es:

$$ND_{214}^1 = \varepsilon \int_0^{t_1} A_{214}(t) dt \quad (\text{V.6})$$

En la segunda etapa de espectrometría alfa sólo se detectan partículas alfa de ^{214}Po :

$$ND_{214}^2 = \epsilon \int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_2} a_{214}(t) dt \quad (\text{V.7})$$

donde t_2 es el tiempo de espera y Δt_2 es el tiempo de medida de la tercera etapa del ciclo.

Las tres ecuaciones anteriores forman un sistema en el que las incógnitas son las concentraciones en actividad de los tres descendientes de vida corta del radón.

El tiempo de espera de la segunda etapa debe ser suficiente para permitir la desintegración prácticamente total del ^{218}Po . Así, esta etapa tiene una duración de 20 minutos. Para determinar el tiempo óptimo de duración del espectro de la tercera etapa se han llevado a cabo simulaciones del proceso de medida (Vargas 1992) en donde se estableció un tiempo óptimo de 20 minutos de manera a poder detectar la mayor parte de las desintegraciones del ^{214}Po y llevar a cabo medidas de las concentraciones de descendientes del radón en intervalos de 1 hora.

V.2.2.2 Tamiz metálico y caudal de aire

Diseñado el sistema de medida es necesario determinar el caudal de paso del aire así como el tamiz metálico selectivo del módulo de medida. El caudal de aire se escoge en función del nivel de concentración de descendientes que se trata de medir. En el trabajo de Vargas 1992 se realizaron las simulaciones para determinar como caudal óptimo para la realización de medidas en viviendas con una elevada precisión, el valor de $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

El tamiz metálico utilizado debe permitir el paso del 50 % de las partículas de un tamaño de 4 nm (diámetro de corte al 50 %, $d_p(50\%) = 4 \text{ nm}$) según se aconseja en los estudios de la determinación de la fracción libre (Ramamurthi 1989). Para obtener este $d_p(50\%)$ se han ubicado en la ranura de entrada de la unidad de medida dos tamices en serie de diámetro de hilo de 36 μm con una apertura de 280 mesh (280 retículas por pulgada) y fracción sólida en volumen α de 0.319.

V.2.2.3 Verificación de funcionamiento

El dispositivo de medida de la concentración de descendientes de radón y de descendientes adheridos a partículas de aerosol fue intercomparado con el equipo desarrollado por la Universidad de Brest (Francia) en la cámara de radón del INTE para verificar su correcto funcionamiento. Para la medida de la concentración total de descendientes del radón, el equipo desarrollado por la Universidad de Brest consiste en un módulo de características similares al construido en este trabajo. Para la medida de la fracción de descendientes adheridos a partículas de aerosol, este grupo utiliza un sistema selectivo de partículas basado en un tubo anular de difusión de manera a conseguir el $d_p(50\%) = 4 \text{ nm}$ (Kerouanton y col. 1996, Tymen y col. 1999). En la figura V.3 se

muestra que los resultados de la intercomparación entre estos equipos son satisfactorios. En la intercomparación realizada, la medida de radón se llevó a cabo mediante el equipo descrito en el apartado anterior. De manera a comprobar el correcto funcionamiento en un amplio rango de valores se modificó tanto la concentración de radón como la de aerosoles de manera a variar los valores del factor de equilibrio y la fracción libre.

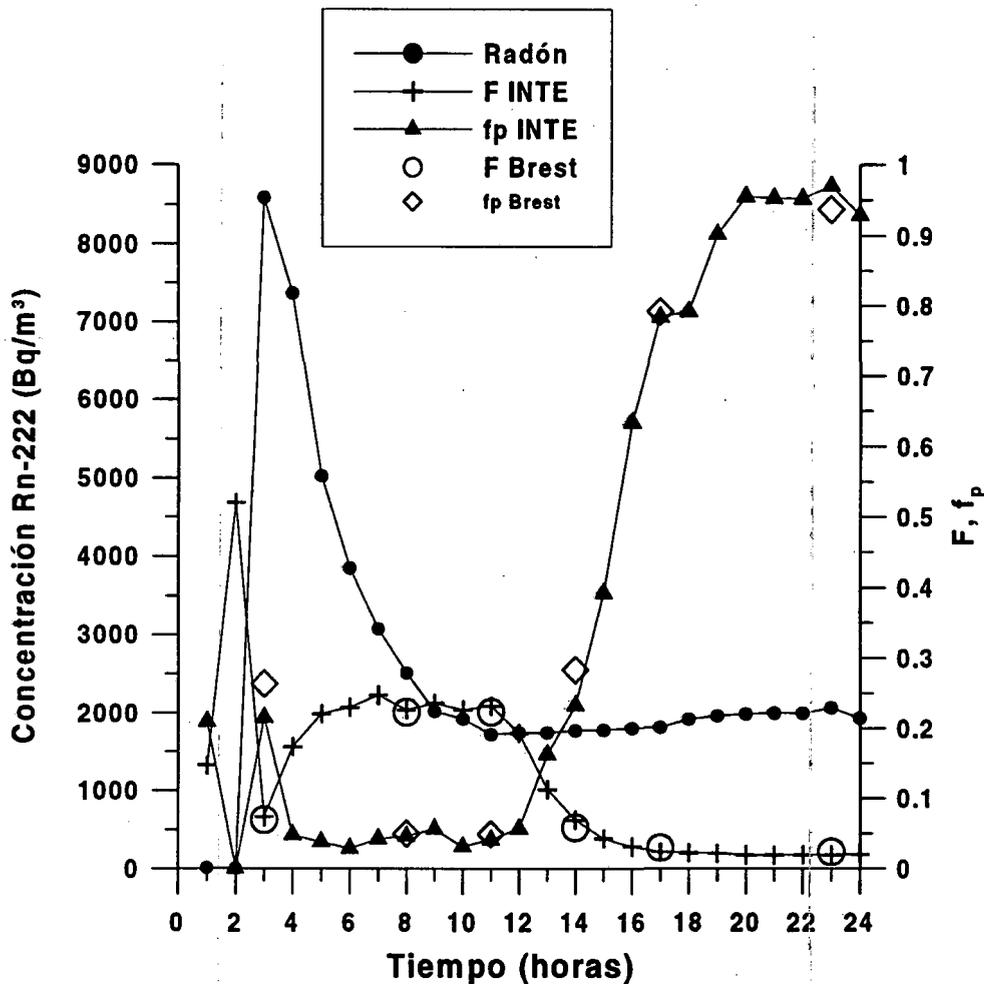


Fig.V.3. Verificación del funcionamiento del equipo de medida del factor de equilibrio y la fracción libre mediante una intercomparación realizada con el equipo de la Universidad de Brest en la cámara de radón del INTE.

V.3 Sistema de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre

El sistema de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre que se ha desarrollado debe cumplir una serie de requisitos que determinan las características de los tamices y de los tubos de difusión, el ciclo de medida escogido y el método de deconvolución de los datos obtenidos.

V.3.1 Funcionamiento del sistema de medida

Antes de proceder a describir el equipo de medida desarrollado se presentan algunos requerimientos que deben tenerse presentes en el diseño del equipo:

- El rango dimensional de los diámetros medianos de las distribuciones log-normales de los descendientes en estado libre del radón está comprendido entre 0.4 nm y 3 nm, con desviaciones geométricas estándar próximas a la unidad (distribuciones monodispersas). Así, las distribuciones de penetraciones de partículas de los distintos módulos de medida deben situarse diseñados en este rango dimensional.
- La utilización de la teoría semi-empírica para estimar la distribución de penetraciones en tamices se puede considerar válida a partir de un tamaño dimensional de la partícula de aproximadamente 1 nm. Este hecho limita la utilización de tamices para el rango dimensional alto del diámetro de partículas en estado libre.
- La entrada y circulación del aire por el tamiz o tubo de difusión hasta el filtro debe ser lo más directa y suave posible para minimizar los cambios que se puedan ocasionar en el perfil de velocidades del aire de entrada y que podrían ocasionar deposiciones de partículas difícilmente controlables.
- La teoría de penetración de partículas en tubos de difusión ha sido validada para tubos de paredes interiores lisas y se ha constatado una gran influencia en la penetración de las partículas como consecuencia de la rugosidad de la pared (apartado IV.4.3.3). Así, el material de los tubos de difusión debe ser liso de manera a ajustarse al modelo numérico desarrollado en el capítulo IV y utilizado en el cálculo de la distribución de penetraciones de partículas en los tubos de difusión diseñados en el capítulo VI.
- Debido a la carga eléctrica que tiene el ^{218}Po al formarse en la desintegración del radón, deben evitarse materiales que se carguen electrostáticamente.
- El sistema de medida debe permitir obtener resultados de forma continua para poder desarrollar estudios de la variación temporal del espectro dimensional y de la influencia de los parámetros ambientales, tales como la humedad relativa y la presencia de gases traza.
- La geometría del sistema debe ser tal que la eficiencia de detección sea máxima.

Para conseguir estos objetivos se ha diseñado un módulo de medida automático tal como se muestra en la figura V.4. En él la selección del tamaño de las partículas se efectúa mediante diversos módulos de medida provistos de tamices o tubos de difusión con distribuciones de penetración adecuados para obtener la máxima información del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre.

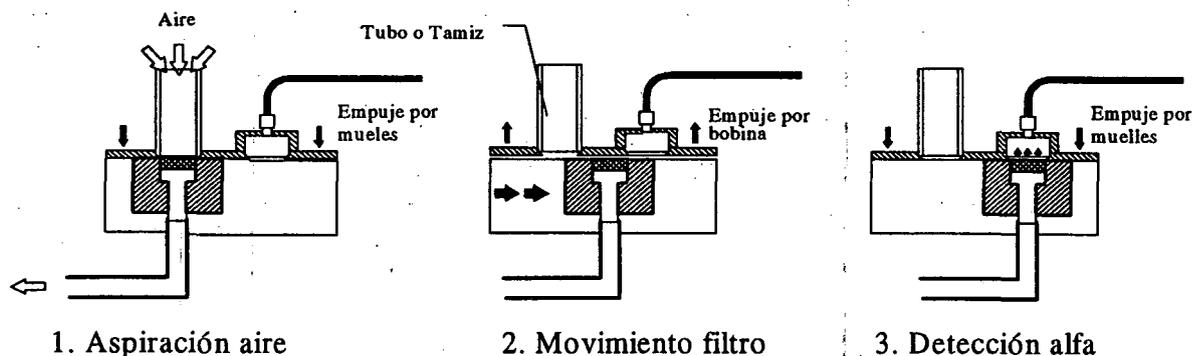


Fig.V.4. Esquema del principio básico de funcionamiento de un módulo de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre provisto de un tubo de difusión.

El sistema permite el desplazamiento del filtro de manera que puede efectuarse la aspiración del aire a través del tamiz o tubo de difusión previamente a su detección. De esta manera el flujo de aire alcanza directamente el filtro sin ningún cambio de sección o dirección del fluido. Durante la fase de aspiración (fase 1), un conjunto de muelles mantiene unidas la plataforma que sujeta el tamiz o tubo de difusión a la parte móvil que ubica el filtro de aspiración. Una junta de goma situada entre las dos piezas impide la entrada de aire por la unión.

Una vez finalizada la fase de aspiración, dos electroimanes empujan la plataforma hacia arriba venciendo la presión de los muelles permitiendo así el desplazamiento de la parte móvil del conjunto que es soportado por un tornillo sinfín y una barra guía (fase 2). El tornillo sinfín gira al ser accionado por un pequeño motor eléctrico de corriente continua acoplado al eje del tornillo sinfín mediante una rótula. En la fase 3, la parte móvil se detiene en la posición de medida de la actividad recolectada en el filtro de forma automática mediante un sensor de posición magnético tipo Hall.

Situado el filtro frente al detector de semiconductor y con el mecanismo del tornillo sinfín detenido, los electroimanes dejan de actuar y los muelles vuelven a presionar la tapa de manera que la distancia filtro detector sea mínima y así conseguir la máxima eficiencia.

Finalizada la fase de detección de partículas alfa, el motor de corriente continua cambia automáticamente su polaridad, los electroimanes levantan la tapa y la parte móvil se dirige hacia la zona de aspiración. La parte móvil se detiene mediante otro sensor tipo Hall y se vuelve a repetir el ciclo.

V.3.2 Ciclo de medida

Las ecuaciones que gobiernan el sistema de detección anterior son las mismas que las del apartado V.2.2, aunque en este caso durante el tiempo de aspiración no se realiza espectrometría alfa sino que ésta se lleva a cabo durante la etapa que se denomina de espera.

En la primera etapa de detección, el número de partículas alfa procedentes del ^{218}Po que son detectadas, ND_{218}^1 , se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$ND_{218}^1 = \varepsilon \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t_1} a_{218}(t) dt \quad (\text{V.8})$$

donde ε es la eficiencia de detección del módulo de medida, t_1 es el tiempo que tarda la parte móvil en desplazarse de la zona de aspiración a la de detección y Δt_1 es el tiempo que corresponde a la primera etapa de medida. Para esta misma etapa, la ecuación del número de partículas alfa de ^{214}Po detectadas es:

$$ND_{214}^1 = \varepsilon \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t_1} a_{214}(t) dt \quad (\text{V.9})$$

En la segunda etapa de espectrometría alfa sólo se detectan partículas alfa de ^{214}Po :

$$ND_{214}^2 = \varepsilon \int_{t_2}^{t_2 + \Delta t_2} a_{214}(t) dt \quad (\text{V.10})$$

El tiempo aplicado a la segunda etapa también se ha fijado en 20 minutos lo que permite la desintegración de prácticamente todos los átomos de ^{218}Po atrapados en el filtro.

El criterio para la determinación del tiempo que corresponde a la tercera etapa es que la actividad de los descendientes del radón al final del ciclo sea despreciable, de manera que no influya en el ciclo siguiente, y así evitar una posible fuente de error. Sin embargo, estos ciclos tampoco pueden ser extremadamente largos ya que limitarían los estudios dinámicos del espectro dimensional de los descendientes en estado libre. Se propone para el tiempo transcurrido en la tercera etapa del ciclo una duración de 2 horas y 40 minutos que permita la desintegración de prácticamente todos los átomos de ^{214}Pb y ^{214}Bi (^{214}Po) y así reducir el error que puede cometerse por este motivo. La duración de un ciclo de medida completo es de tres horas lo que permite una cierta comodidad para el manejo de los datos y los estudios dinámicos.

V.3.3 Diseño de los tamices y tubos de difusión

Un parámetro importante es el establecimiento del caudal de aire circulante por los tamices y tubos de difusión así como el dimensionamiento de los mismos.

V.3.3.1 Caudal de aire circulante por tamices y tubos de difusión

Un primer criterio para la determinación de los caudales de aspiración por los módulos de medida, es que exista un mismo caudal para todos de manera a facilitar las operaciones de calibración del conjunto. En la elección del valor caudal común deben tenerse presentes otros dos criterios contradictorios: por un lado, el caudal debe ser

elevado para que permita detectar el máximo número de partículas alfa y por otro lado, un caudal elevado puede producir perturbaciones en la concentración espacial de la actividad del aire de aspiración que podría llevar a falsear los resultados.

En cuanto al tamaño de los tubos de difusión debe estar comprendido entre 10 cm y unos 50 cm por razones de ubicación e instalación. Así, en la figura V.5 se muestran las distribuciones de penetraciones de partículas para tubos de 10, 30 y 50 cm y caudales de $75 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ y $125 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ obtenidas suponiendo un perfil de velocidades parabólico (ecuación III.18). Las curvas con un caudal de $75 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ se ajustan a los diámetros de corte al 50 % requeridos (zona de tamaño entre 0.4 nm y 1 nm), ya que, como ya se ha indicado, los tamices metálicos no deben utilizarse para estos tamaños de partícula tan pequeños.

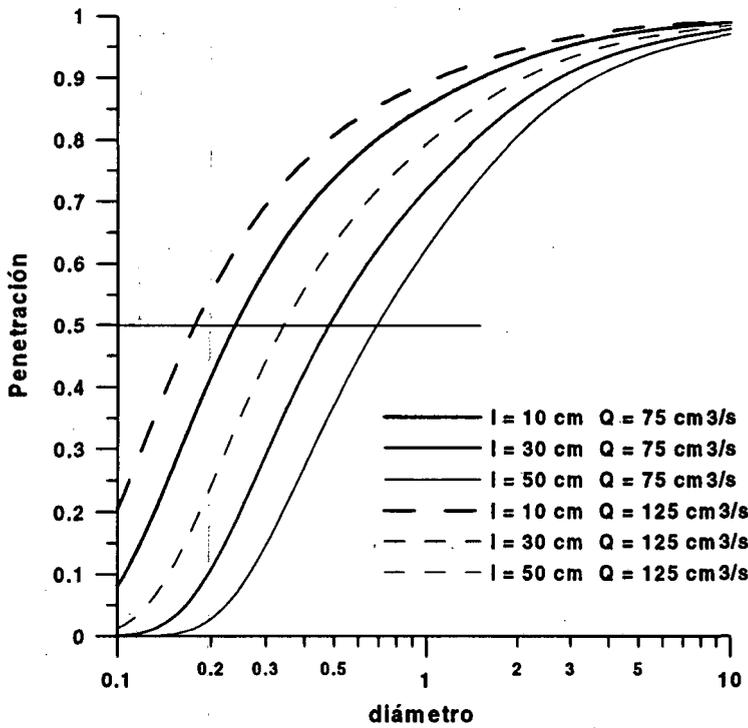


Fig. V.5. Distribuciones de penetraciones de partículas para tubos de 10,30 y 50 cm y caudales de 75 y $125 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ suponiendo un perfil de velocidades de tipo parabólico.

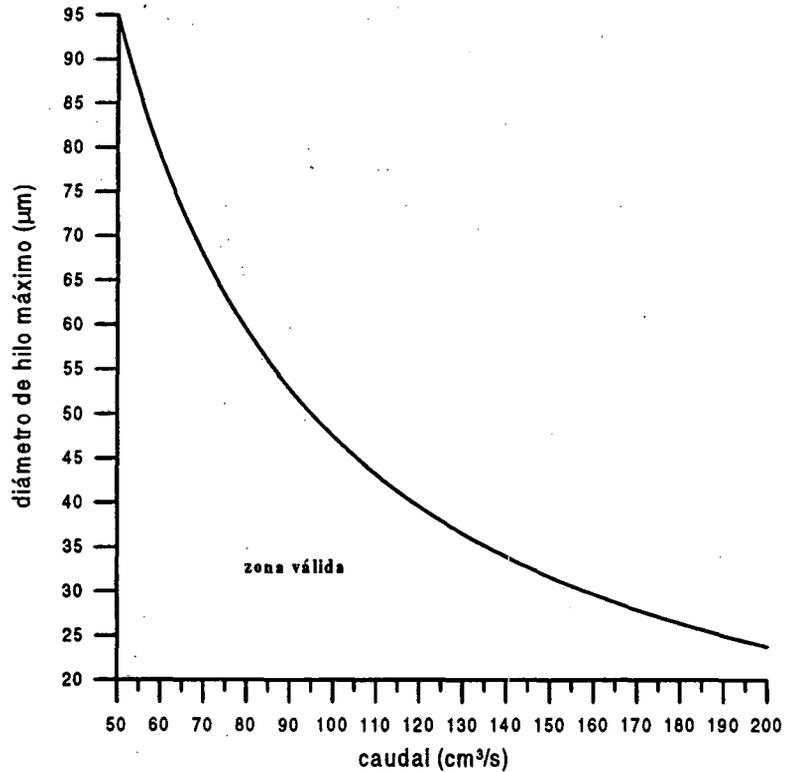


Fig. V.6. Diámetro de hilo máximo del tamiz en función del caudal de circulación.

En la figura V.6 se presenta el caudal óptimo a través de tamices en función del diámetro máximo del hilo de acuerdo con la condición de número de $Re < 1$ (apartado III.2.1). Se observa que a menor caudal, mayor es el rango de diámetros que se pueden utilizar de manera a poder disponer de distintas distribuciones de penetraciones de partículas. Debe señalarse que el tamiz con menor diámetro de hilo que se fabrica es de $20 \mu\text{m}$, su precio se encarece y la luz del mismo es menor. Esta última circunstancia hace que incremente el diámetro de corte al 50 % a pesar de poder utilizar un caudal mayor. Por dichas razones el caudal de paso máximo es de unos $90 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Así, el caudal de paso de aire por los distintos módulos de medida se ha establecido en $74 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

V.3.3.2 Número de módulos de medida y curvas de penetración

El sistema de medida propuesto está compuesto de 6 módulos de medida. La elección de este número se debe al compromiso que se quiera alcanzar entre precisión de la medida, facilidad de utilización y coste económico. Uno de estos módulos se utiliza para la medida de la actividad total por unidad de volumen de los descendientes en el aire de aspiración y es el denominado módulo de referencia. En los cinco módulos restantes se utilizan tamices o tubos de difusión que dan lugar a distintas distribuciones de penetraciones de partículas. Los diámetros de corte al 50 % de los distintos módulos se han ido seleccionando durante la fase de puesta a punto del sistema mediante la realización de una campaña de experiencias llevadas a cabo en la cámara de radón del

INTE de manera a optimizar la información obtenida de cada uno de ellos. De estas exposiciones preliminares, realizadas en la cámara, se determinó que con un tamiz de diámetro de corte al 50 % de 3.35 nm se detectaba una actividad siempre inferior al 5 % de la actividad total y por tanto se dedujo que por encima de este diámetro prácticamente no existían descendientes del radón en estado libre. Se decidió así utilizar para el módulo de medida de mayor diámetro de corte dicho valor. Para los cuatro módulos restantes se decidió seguir un criterio basado los resultados experimentales obtenidos, de tal manera que la actividad de descendientes recogida en los filtros de los distintos tuviera valores que formaran una progresión aritmética. Por otro lado se debía escoger un diámetro de corte muy pequeño para la primera unidad de manera a considerar el tamaño atómico. Con estos criterios los d_p (50 %) óptimos para estos cuatro módulos deberían situarse próximos a los siguientes valores: 0.30 nm, 0.50 nm, 0.75 nm y 1.25 nm.

En los módulos de medida cuyos diámetros d_p (50 %) son superiores a 1 nm se han seleccionado tamices metálicos por el hecho de permitir una mayor flexibilidad de diseño con respecto a los tubos de difusión. En efecto, es fácil disponer de diversos tamices que permiten su ubicación en serie. Así, con un tamiz de diámetro de hilo 63 μm , fracción sólida en volumen α de 0.218, y un caudal de 74 $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ se obtiene un d_p (50 %) de 1,13 nm. Para el d_p (50 %) de mayor tamaño se han utilizado dos tamices en serie de diámetro de hilo de 50 μm , α de 0.3049, de manera que se obtiene un d_p (50 %) de 3.35 nm.

Los diámetros d_p (50 %) situados en la zona de 0.30 nm, 0.50 nm y 0.75 nm se obtienen con tubos de difusión de 10 cm, 30 cm y 50 cm de longitud y 1 cm de radio, por los que circula un caudal de aire de 74 $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ que permiten disponer unos valores de d_p (50 %) de 0.27 nm, 0.52 nm y 0.73 nm. Estos valores han sido obtenidos mediante el modelo numérico desarrollado en el capítulo IV y según el análisis que se expone a continuación.

Para disponer de una expresión analítica de la distribución de penetraciones de los tubos de difusión similar a la obtenida de forma semi-empírica para los tamices metálicos (ecuación III.2) se ha llevado a cabo la resolución numérica de la penetración para 100 diámetros comprendidos entre 0.1 nm y 100 nm en progresión geométrica y realizar un ajuste con una expresión del tipo:

$$P = A \exp(-B \Delta) + C \exp(-D \Delta^E) \quad (\text{V.11})$$

donde $\Delta = (\pi L D) / (4 Q)$ y A, B, C, D, E son coeficientes que se ajustan con los 100 datos obtenidos de la solución numérica.

El ajuste de los distintos coeficientes de la expresión V.11 se ha realizado con el programa comercial GRAPHER 2.0 y los resultados obtenidos para los tubos seleccionados, considerando la perturbación del filtro y sin considerarla, se presentan en las tablas V.4 y V.5 respectivamente.



L (cm)	A	B	C	D	E	R ²
10	0.6958	15.46	0.2952	15.67	0.6189	0.999889
30	0.7625	15.01	0.2267	20.45	0.6299	0.999931
50	0.7795	14.87	0.2025	24.45	0.6423	0.999931

Tabla V.4. Ajuste de los coeficientes de la expresión V.11 con los datos de penetración obtenidos con la solución numérica considerando la perturbación del filtro a la salida de los tubos de 10 cm, 30 cm y 50 cm.

L (cm)	A	B	C	D	E	R ²
10	0.7030	15.17	0.2977	14.77	0.5973	0.999889
30	0.7648	14.96	0.2334	18.81	0.6088	0.999904
50	0.7897	14.84	0.1984	31.72	0.6798	0.999931

Tabla V.5. Ajuste de los coeficientes de la expresión V.11 con los datos de penetración obtenidos con la solución numérica sin considerar la perturbación del filtro a la salida de los tubos de 10 cm, 30 cm y 50 cm.

De las dos tablas anteriores se deduce que las curvas de penetración son prácticamente las mismas, considerando o no la perturbación del filtro y, por tanto, para la continuación de este trabajo se utilizarán las expresiones que incluyen la perturbación del filtro. Con estos ajustes y con la ecuación III.2 para los tamices metálicos los diámetros de corte al 50 % obtenidos se presentan en la tabla V.6. En la figura V.7 se representan las curvas de penetración de los distintos módulos de medida.

Unidad	d _{50%} con filtro
Tubo 10 cm	0.27
Tubo 30 cm	0.52
Tubo 50 cm	0.73
Tamiz x 1	1.13
Tamiz x 2	3.35

Tabla V.6. Diámetros de corte al 50 % de los módulos de medida utilizados en este trabajo.

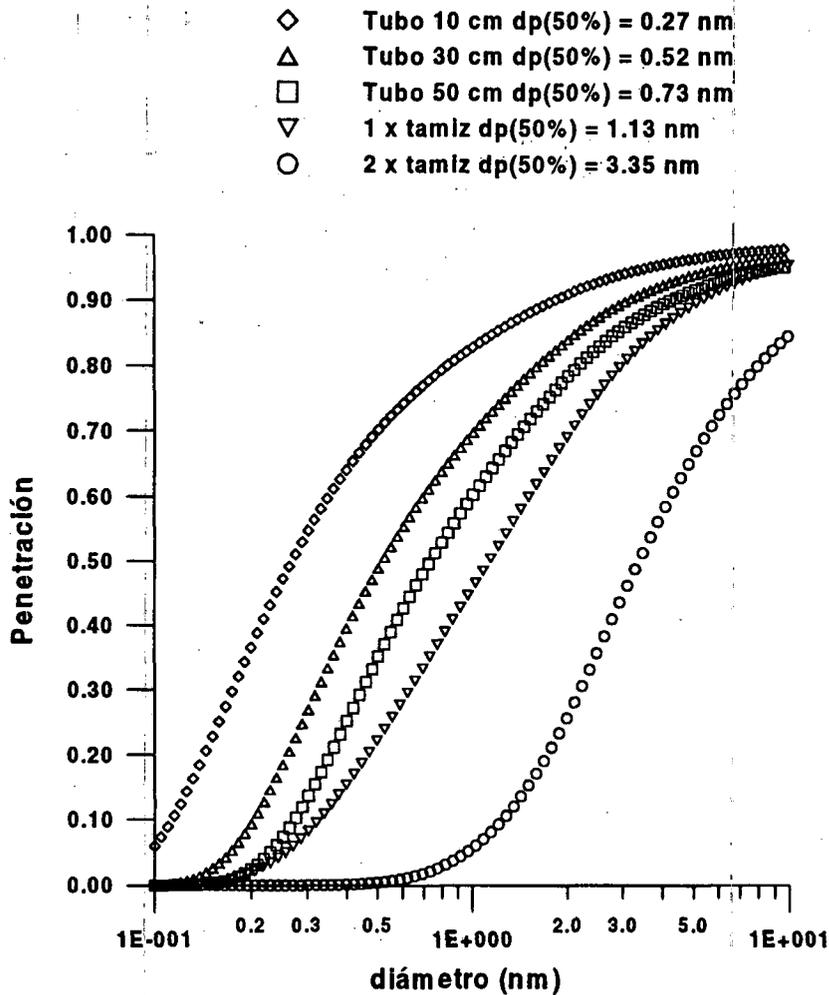


Fig. V.7. Distribuciones de penetraciones de los módulos de medida utilizados para la determinación del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre.

Para disminuir las incertidumbres derivadas de los gradientes verticales de las concentraciones de los descendientes del radón existentes en la cámara, la disposición de los distintos módulos de medida debe ser de tal manera que sus tomas de aire se sitúen a la misma altura. Para ello se han dispuesto los distintos módulos en diversas plataformas que permiten ubicarlos en distintos niveles que cumplan con esta condición. La figura V.8 muestra una fotografía del conjunto del sistema de medida en el interior de la cámara de radón con sus correspondientes conexiones eléctricas, neumáticas y electrónicas.

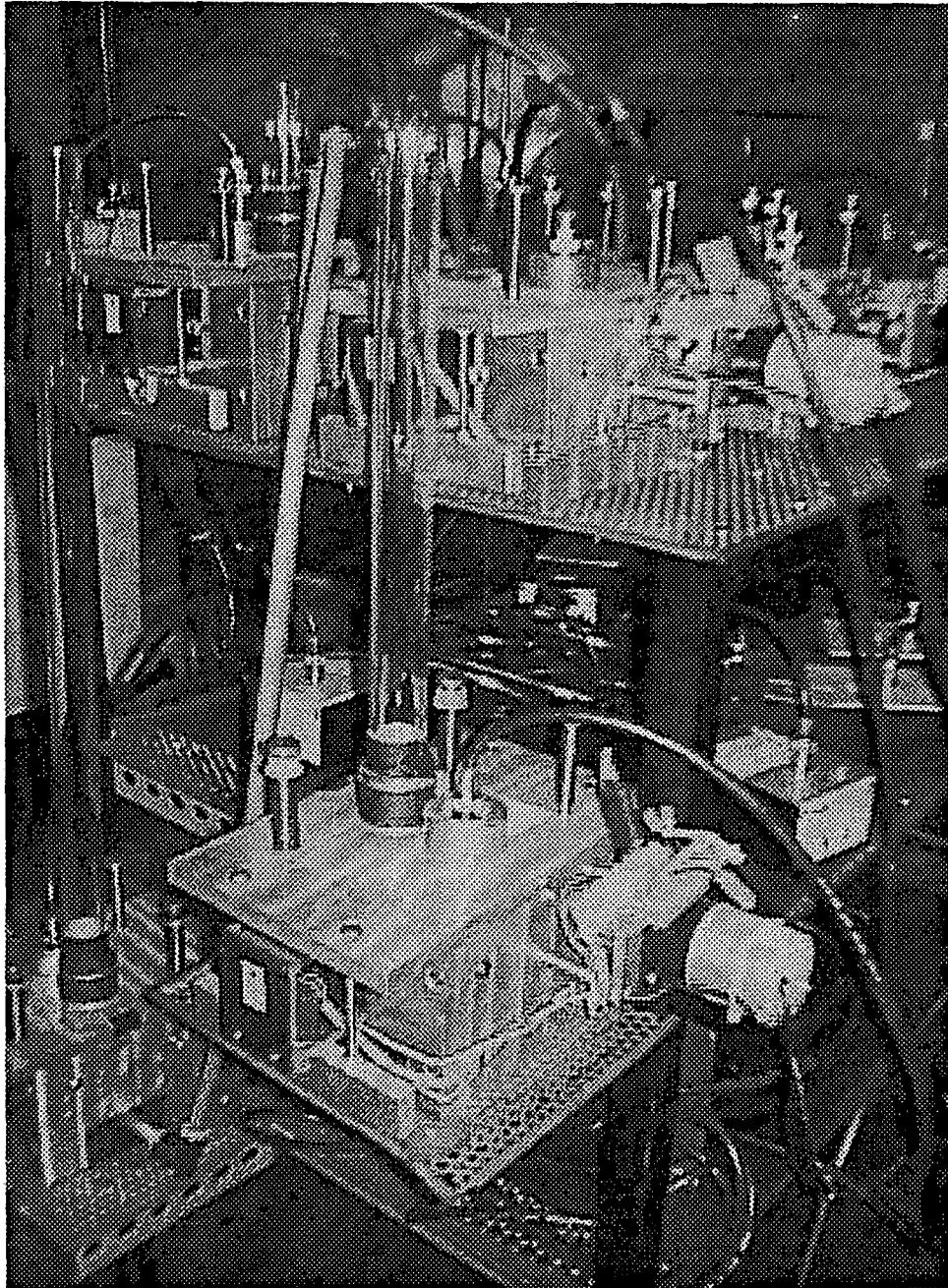


Fig. V.8. Fotografía del sistema de medida del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre en el interior de la cámara de radón del INTE.

V.3.4 Determinación del espectro dimensional de los descendientes en estado libre

En el apartado V.3.2 se han desarrollado las ecuaciones que permiten el cálculo de la concentración de los descendientes del radón en cada módulo de medida. Los datos necesarios para obtener los valores de la actividad en cada uno de ellos son la eficiencia de detección, el número de cuentas detectadas en la primera fase debidas al ^{218}Po (ND^1_{218} , ecuación V.8) y al ^{214}Po (ND^1_{214} , ecuación V.9), y el número de cuentas detectadas en la segunda fase de ^{214}Po (ND^2_{214} , ecuación V.10). Conviene definir la manera de obtener estos datos así como la determinación del espectro dimensional mediante el algoritmo de deconvolución RW anteriormente descrito.

V.3.4.1 Eficiencia de detección de los módulos de medida

Para la determinación de las concentraciones de los descendientes del radón es necesario conocer la eficiencia de detección de cada módulo de medida. En la determinación de la eficiencia se debe tener muy presente la influencia de la deposición heterogénea en el filtro de salida de los tubos de difusión tal como se analizó en el apartado IV.4.4.

El valor de la eficiencia de cada módulo de medida se ha determinado a partir de la eficiencia obtenida con una fuente de ^{241}Am calibrada en actividad total y en distribución de la actividad superficial de manera a simular una deposición homogénea de partículas en el filtro. Posteriormente debe corregirse el efecto causado por la deposición heterogénea, según los valores de la tabla V.7.

Unidad	Sin perturbación	Con perturbación
Tubo 10 cm	15 %	8 %
Tubo 30 cm	17 %	10.5 %
Tubo 50 cm	17.5 %	11.3 %

Tabla V.7 Porcentaje considerado en la corrección de la eficiencia de los tubos de difusión por la deposición heterogénea en el filtro. Se tiene en cuenta así mismo la perturbación que produce en el perfil de velocidades el filtro de salida.

Durante el proceso de aspiración de aire en los distintos módulos de medida se producen diferencias espaciales en la concentración de la actividad de ^{218}Po . Este hecho se ha comprobado realizando medidas en continuo con las unidades de medida sin tamices metálicos ni tubos de difusión y realizando las medidas situando los módulos en posiciones distintas. Con los resultados obtenidos en estas medidas, se ha podido comprobar que manteniendo unas condiciones de ventilación constantes en la cámara la

diferencia en la concentración de ^{218}Po en las distintas posiciones de los módulos de medida también se mantiene constante. Una manera simple de tener en cuenta este hecho consiste en modificar la eficiencia de los módulos de medida para compensar las diferencias de concentración en los diversos puntos de aspiración. Los cambios en la eficiencia debidos a la heterogeneidad espacial de la actividad de ^{218}Po y otras causas no controladas que se pueden sumar a ésta se presentan en la tabla V.8.

Unidad de medida	$\epsilon_{\text{Am-241}}$	$\epsilon_{\text{heterogeneidad aire}}$	$\epsilon_{\text{heterogeneidad filtro}}$	
			Sin perturbación	Con perturbación
Referencia	0.263	0.263	0.263	0.263
Tubo 10 cm	0.261	0.311	0.357	0.336
Tubo 30 cm	0.278	0.278	0.325	0.307
Tubo 50 cm	0.282	0.282	0.331	0.315
Tamiz x 1	0.247	0.294	0.294	0.294
Tamiz x 2	0.277	0.330	0.330	0.330

Tabla V.8. Corrección de la eficiencia de detección de las unidades de medida como consecuencia de la heterogeneidad de la concentración en el aire y de la heterogeneidad de la deposición superficial de partículas en el filtro.

Así los valores de eficiencia para las distintas unidades de medida que se utilizan en las ecuaciones son los que se presentan en las dos últimas columnas de la tabla V.8.

V.3.4.2 Número de cuentas detectadas

El número de cuentas detectadas en los distintos módulos de medida ND_{218}^1 , ND_{214}^1 y ND_{214}^2 obtenidas del recuento de partículas alfa de cada radisótopo debe ser corregido como consecuencia de las partículas de ^{218}Po que alcanzan el filtro de salida y que provienen de la desintegración del radón en el interior del tubo, tal como se analizó en el apartado IV.4.1.2. Como se verá en el capítulo VI, en las exposiciones llevadas a cabo en la cámara de radón, la concentración de radón es un orden de magnitud superior a la del ^{218}Po con lo que las contribuciones en actividad en los tubos de 10 cm, 30 cm y 50 cm son del orden del 1.5 %, 4.5 % y 8% según los valores presentados en la tabla IV.5. Así pues el número de cuentas modificado se obtiene con las siguientes ecuaciones:

$$\text{ND}_{218}^1 \text{ corregida} = \frac{\text{ND}_{218}^1}{1.015} \quad \text{para el tubo de 10cm} \quad (\text{V.12})$$

$$\text{ND}_{218}^1 \text{ corregida} = \frac{\text{ND}_{218}^1}{1.050} \quad \text{para el tubo de 30 cm} \quad (\text{V.13})$$

$$\text{ND}_{218}^1 \text{ corregida} = \frac{\text{ND}_{218}^1}{1.080} \quad \text{para el tubo de 50 cm} \quad (\text{V.14})$$

V.3.4.3 Reconstrucción del espectro dimensional. El algoritmo Randomwalk

La utilización de los algoritmos de deconvolución que utilizan métodos no lineales puede llevar a cometer grandes errores en los resultados, como ya ha sido comentado. Los problemas que se generan en la aplicación de las técnicas no lineales se pueden corregir si se analizan todas las distribuciones posibles. La precisión que requiere el resultado para el sistema de medida desarrollado en este trabajo no permite probar todas las distribuciones ya que consumiría un tiempo de cálculo excesivo, por lo que se ha desarrollado un algoritmo que permite reducir este tiempo de cómputo.

Suponiendo que la solución pueda dar lugar a una o dos distribuciones dimensionales del tipo log-normal, el número de incógnitas se reduce a cinco: dos diámetros medianos, dos desviaciones geométricas y la fracción para cada distribución que debe sumar uno. Estas cinco incógnitas se reducen a cuatro obligando a que las fracciones correspondientes a cada distribución minimicen la diferencia entre los datos de concentración medidos para cada módulo, y los datos estimados de la distribución que se está postulando.

El algoritmo propuesto consta de los siguientes pasos:

1. Selecciona al azar dos distribuciones: dm_1 , σ_1 , dm_2 y σ_2 .
2. Simula las actividades en los filtros de cada módulo de medida utilizando las distribuciones del paso 1 y las curvas de penetración de dichas unidades.
3. Calcula la fracción óptima de cada una de las dos distribuciones de manera que la suma del cuadrado de las diferencias entre las actividades simuladas en el paso 2 y las actividades medidas en los módulos sea mínima.
4. Establece un procedimiento que permite la eliminación progresiva de aquellas distribuciones que puedan considerarse alejadas de la solución correcta.

A continuación se describe cada uno de los pasos anteriores de forma detallada:

1. Elección de distribuciones.

La elección de las dos distribuciones dimensionales del tipo log-normal se realiza al azar. Para proponer los diámetros medianos de las distribuciones se extraen dos números aleatorios comprendidos entre el rango de los diámetros medianos en escala logarítmica. Para la selección de las desviaciones geométricas se extraen números aleatorios según una escala lineal.

En el algoritmo Randomwalk es necesario clasificar en grupos cada conjunto formado por las dos distribuciones seleccionadas de manera a poder establecer una sistemática de eliminación de aquellos grupos de distribuciones que no puedan ser la solución de acuerdo con un criterio predeterminado. Para llevar a cabo esta clasificación se ordena cada conjunto de dos distribuciones en una matriz donde se disponen los diámetros y las desviaciones de cada distribución tal como se muestra en la figura V.9.

Tanto los diámetros como las desviaciones se han clasificado siguiendo una selección de diez valores, de manera que el conjunto forma una matriz de 10000 celdas ordenadas donde se agrupan las distribuciones seleccionadas. La simetría que existe en los

diámetros permite reducir el número de celdas no repetidas a 5500. La elección de 10000 celdas se realiza de acuerdo con el compromiso de obtener una buena precisión del resultado y de reducción del tiempo de cómputo.

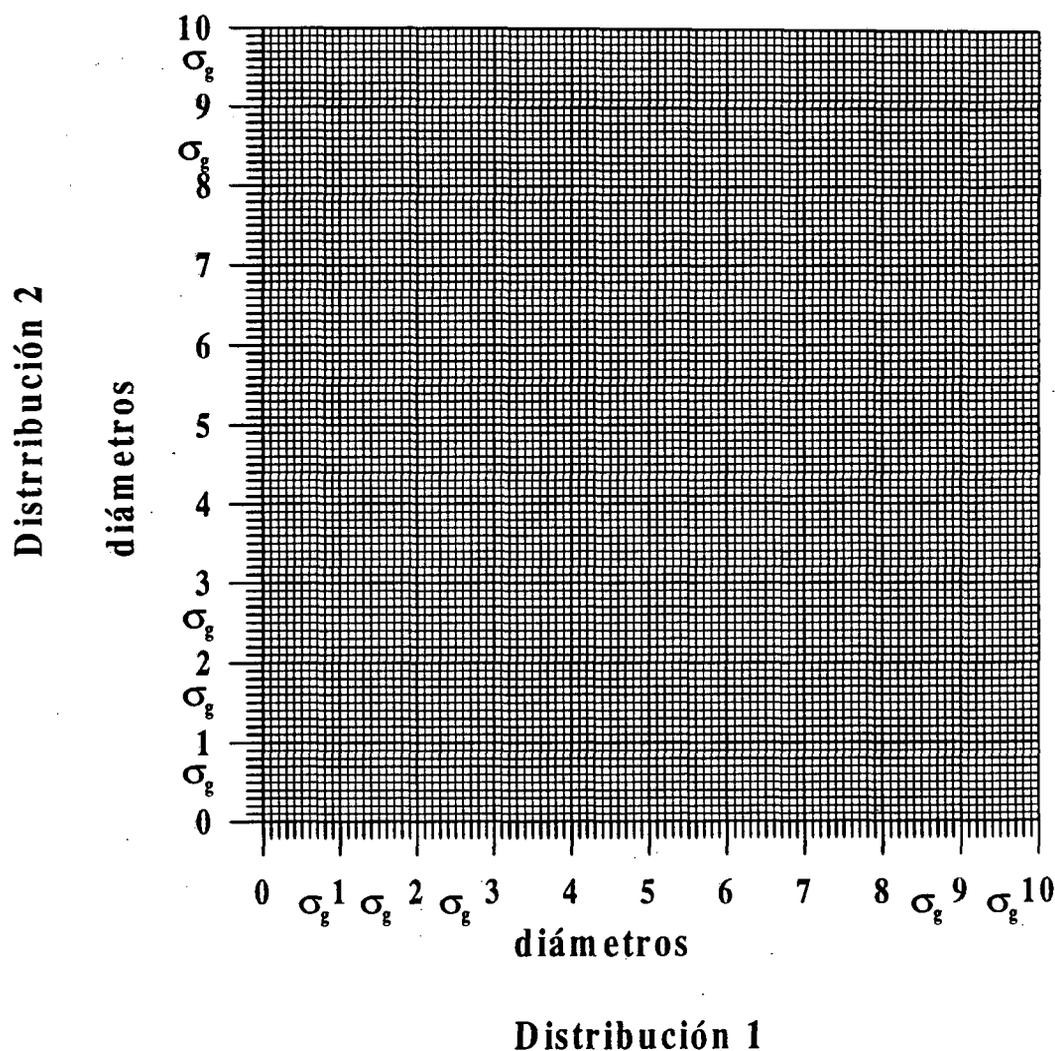


Fig. V.9. Clasificación de las distribuciones seleccionadas según una agrupación de 10000 celdas utilizada en el algoritmo Randomwalk.

2. Simulación de los datos en los módulos de medida.

Una vez seleccionado al azar el conjunto formado por las dos distribuciones y ubicado en su correspondiente celda de la matriz de la figura V.9 y conocidas las distribuciones de penetraciones de partículas $p(i,j)$ para cada tamiz o tubo se pueden estimar, para cada una de las dos distribuciones, el número de partículas por unidad de volumen de aire aspirado que son capaces de atravesar los módulos de medida, $EZ(i,k)$, según la siguiente expresión:

$$EZ(i,k) = Z_0 \sum f(j,k)p(i,j) \quad (V.15)$$

donde Z_0 es la concentración de partículas en el aire aspirado, $f(j,k)$ es el valor de la función de distribución para el tamaño j y la distribución k (k puede ser 1 o 2) y $p(i,j)$ es el valor de penetración para el tamiz o tubo i para el tamaño j .

Es necesario indicar que para verificar el correcto funcionamiento de un algoritmo de cálculo en donde las distribuciones dimensionales pueden ser monodispersas se requiere un número de tamaños j suficientemente elevado para evitar que se produzcan errores considerables. En este sentido y para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto, se han simulado diferentes distribuciones monodispersas elegidas al azar con tamaño situado en el rango dimensional de la fracción libre. Para cada una de estas distribuciones se ha aplicado el algoritmo de deconvolución con distintos número de tamaños j . Se determinó como valor apropiado una discretización en 1000 tamaños de j , para el rango de partículas seleccionado de la fracción libre que estaba comprendido entre diámetros de 0.1 nm y 10 nm.

3. Cálculo de las fracciones óptimas para las distribuciones seleccionadas.

De las dos distribuciones del tipo log-normal seleccionadas existe una fracción f para una de ellas y $1-f$ para la otra que minimiza la diferencia cuadrática entre los valores medidos y los datos estimados. La diferencia cuadrática, DF , se calcula con la siguiente expresión:

$$DF = (f \cdot EZ(+,1) + (1-f) \cdot EZ(+,2) - RT)^2 \quad (V.16)$$

donde:

f es la fracción para la primera distribución,

$EZ(+,1)$ es la suma de los datos estimados con la primera distribución para todos los módulos de medida,

$EZ(+,2)$ es la suma de los datos estimados con la segunda distribución para todos los módulos de medida, y

RT es la suma de los datos obtenidos con todos los módulos de medida.

Derivando la expresión anterior respecto de f , igualando a 0, se obtiene el mínimo de f ; f_{op} , con la siguiente expresión:

$$f_{op} = \frac{RT - EZ(+,2)}{EZ(+,1) - EZ(+,2)} \quad (V.17)$$

4. Criterio de eliminación de distribuciones.

Para la eliminación de aquellas distribuciones que no se acercan a la solución buscada se sigue una metodología basada en la eliminación de las celdas de la matriz de distribuciones. La eliminación de una celda se produce si ésta no cumple con un parámetro estadístico calculado con los datos de todas las distribuciones según el siguiente procedimiento:

- en primer lugar se calcula la suma del cuadrado de la diferencia entre los valores reales, $Z(i)$, y los valores estimados $EZ(i)$:

$$\Delta_j = \sum_i (E(i) - EZ(i))^2 \quad (V.18)$$

• donde j representa el número de la distribución seleccionada para la realización de los cálculos.

- se calcula a continuación la media de la desviación anterior:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta_j \quad (V.19)$$

donde J es el número total de distribuciones de la matriz de diámetros medianos y desviaciones geométricas que han sido seleccionados y que no han sido eliminados.

- se calcula la media de la desviación para cada una de las celdas de la matriz de la figura V.9 que no han sido eliminadas:

$$\bar{\Delta}_c = \frac{1}{J_c} \sum_{j=1}^{J_c} \Delta_{c,j} \quad (V.20)$$

donde $\Delta_{c,j}$ son las desviaciones calculadas con la ecuación V.17 para todas aquellas distribuciones de la matriz que pertenecen a la celda c , y J_c es el número de distribuciones que han sido seleccionados en la celda c .

- a continuación se determina la dispersión media de la diferencia cuadrada de la desviación media de cada una de las celdas con la desviación media total:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{10000} \sum_{c=1}^{10000} (\bar{\Delta}_c - \bar{\Delta})^2 \quad (V.21)$$

- se calcula el parámetro de desviación límite según la siguiente expresión;

$$\Delta_{lim} = \bar{\Delta} + 3\bar{\Delta} \quad (V.22)$$

- finalmente se ha establecido como criterio para que una celda permanezca abierta que su desviación sea menor que la siguiente expresión:

$$\Delta_{criterio} = \Delta_{min} + \left(\frac{\Delta_{lim}}{J_c} \right)^{0.5} \quad (V.23)$$

donde Δ_{min} es la desviación mínima de todos los puntos de la matriz que han sido seleccionados.

Con el objeto de disponer suficientes puntos de la matriz para la realización de los cálculos estadísticos es aconsejable, según se ha analizado en los estudios experimentales realizados en la puesta a punto de este método y que se describe en el apartado siguiente, aplicar este último paso con un mínimo de 10000 distribuciones. Así en el algoritmo desarrollado se seleccionan grupos de 10000 posibles distribuciones y se procede al análisis de eliminación.

El proceso de eliminación de celdas se va sucediendo hasta que ocurre uno de los siguientes casos:

- Queda una única celda por eliminar. La solución es el mejor punto de esta celda.
- Quedan sin cerrar numerosos celdas a pesar de que ya se han probado muchas distribuciones. La solución es una distribución monomodal de manera que todos los puntos de la matriz representan la misma distribución.
- Quedan menos de 10 celdas por eliminar y el proceso de eliminación es muy lento. En esta situación es conveniente estudiar la similitud entre las celdas y decidir la mejor solución en base al error máximo que se pueda cometer. Como criterio es aconsejable seguir aquella celda que dispone de más mínimos consecutivos en las iteraciones.

El algoritmo propuesto se ha implementado en un programa de cálculo escrito en lenguaje FORTRAN y que ha sido utilizado en la intercomparación con otros algoritmos tal como se describe en el apartado siguiente.

V.3.4.4 Puesta a punto del algoritmo Randomwalk. Intercomparación de algoritmos de deconvolución en el marco del Proyecto Europeo RARAD

La intercomparación de diferentes algoritmos de deconvolución llevada a cabo en el marco del proyecto RARAD del IV Programa Marco de la Unión Europea fue dirigida desde el Paul Scherrer Institut (PSI) de Suiza entre los años 1997 y 1998, y tenía como objetivo principal evaluar la capacidad de los diferentes programas de cálculo para la reconstrucción del espectro dimensional bimodal de los descendientes del radón en estado libre. Los distintos programas de cálculo que participaron en la intercomparación y el método utilizado se muestra en la tabla V.9.

Algoritmo	Identificación
Simplex	SPLX (1)
Simplex	SPLX (2)
Emax	EM (1)
Emax	EM(2)
Emax	EM(3)
Estimación valor extremo	EVE
Twomey	TMY (1)
Twomey	TMY (2)
Randomwalk	RW(1)
Randomwalk	RW(2)

Tabla V.9. Identificación de los distintos códigos de cálculo para la reconstrucción del espectro dimensional participantes en la intercomparación en el marco del Proyecto Europeo RARAD.

La intercomparación se llevó a cabo mediante el análisis de cinco ejercicios. El objetivo de los tres primeros era la puesta a punto de los distintos algoritmos. Los dos últimos se subdividieron, cada uno de ellos, en cuatro series de datos a los que se había introducido un error aleatorio según una distribución gaussiana del 5 % de dispersión alrededor del valor exacto obtenido con las distribuciones originales. De manera particular en la quinta serie se trataba de comparar los distintos algoritmos para el rango dimensional propio de los descendientes en estado libre.

Las funciones de penetración necesarias para la realización de los cálculos se obtuvieron a partir de la ecuación de Cheng y Yeah 1980 para la determinación de la penetración de partículas en tamices metálicos (ecuación III.2). Las características del tamiz metálico que se utilizó para los cálculos fueron los siguientes:

radio del hilo = 0.00147 cm
 grosor del tamiz = 0.00597 cm
 densidad del material = 7800 kg m⁻³
 masa por unidad de superficie = 0.1314 kg m⁻²
 fracción sólida en volumen = 0.282

El número de módulos de medida fue de seis y además se conocía la concentración de la actividad total en el aire aspirado. En los seis módulos el caudal de paso fue de 1.5 m³ h⁻¹. Para las cuatro primeras series se utilizó un número de tamices y diámetros de tal manera que el sistema de medida se caracterizó por los parámetros que se muestran en la tabla V.10.

Unidad de medida	Número de tamices	Diámetro tamiz (cm)	Diámetro de corte 50 % (nm)
1	1	2	0.8386
2	1	4.4	2.2197
3	2	4.4	3.7856
4	2	9	7.8005
5	4	9	13.2559
6	8	9	22.7030

Tabla V.10. Características de la unidades de medida calculadas teóricamente para los ejercicios de intercomparación del 1 al 4. El caudal es de 1.5 m³ h⁻¹.

Para la quinta y última serie se utilizó una configuración de manera que el sistema de medida estaba formado por los parámetros que se muestran en la tabla V.11.

Módulo de medida	Número de tamices	Diámetro tamiz (cm)	Diámetro de corte 50 % (nm)
1	1	1.1	0.3656
2	1	1.8	0.7212
3	1	2.7	1.2627
4	1	4.4	2.2197
5	2	4.4	3.7856
6	2	9	7.8005

Tabla V.11. Características de los módulos de medida calculadas teóricamente en el quinto ejercicio de intercomparación. El caudal es de 1.5 m³/h.

Los detalles de los resultados obtenidos en los cinco ejercicios de intercomparación se presentan en el informe de Butterweck y col. 2000. A continuación se recogen los distintos criterios utilizados en la evaluación de los diversos métodos. La calidad de los algoritmos puede determinarse basándose tanto en criterios de reproducción de los datos analizados como en criterios de reproducción de la distribución dimensional.

Con la finalidad de obtener un amplio margen de comparación se seleccionaron cuatro criterios:

Un primer criterio, basado en la reproducción de los datos medidos, era que la desviación entre las fracciones de penetración medidas y estimadas se distribuía según una distribución Chi² (Knutson 1995):

$$Chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - S_i)^2}{\sigma_i^2} \tag{V.24}$$

donde:

N : es el número de módulos de medida,

M_i : es la fracción de penetración medida en el módulo i ,

S_i : es la fracción de penetración para la unidad i simulada con el mejor ajuste del programa de aproximación, y

σ_i : es el error o estimación de la desviación standard de la fracción de penetración medida en la unidad i , establecido en un 5 % de M_i para todos los ejercicios de intercomparación.

Un segundo criterio, basado en la reproducción de los datos medidos, era el de mínimos cuadrados WLS (Ramamurthi y Hopke, 1990):

$$WLS = \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - S_i)^2}{M_i} \quad (V.25)$$

Los dos criterios restantes estaban orientados a la reproducción del espectro dimensional y se basan en la diferencia de área, A , entre la distribución de los datos de entrada $D_M(r)$ y la distribución de la estimación $D_S(r)$ (similar a Maher y Laird, 1985; Ramamurthi y Hopke, 1990):

$$A = \int_0^{\infty} |D_M(r) - D_S(r)| dr \quad (V.26)$$

y el error RMSE (Lloyd y col. 1997):

$$RMSE = \sqrt{\int_0^{\infty} (D_M(r) - D_S(r))^2 dr} \quad (V.27)$$

Las figuras V.10 a V.13 muestran los valores obtenidos al aplicar los criterios de las ecuaciones V.23-V.26. Las conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos en los ejercicios de intercomparación son:

1. Los resultados obtenidos con el sistema RW son los más precisos cuando no hay error en los datos de entrada. Cuando se incorpora error en los datos de entrada el algoritmo RW está mal evaluado con el criterio basado en la comparación de distribuciones posiblemente debido a que este algoritmo debe interpretar todas las distribuciones como log-normales puras y la entrada de errores en los datos medidos producen una distorsión en este tipo de distribuciones cuya distribución puede verse modificada sustancialmente.
2. La estimación de los datos cuando se trata de distribuciones bimodales tiene un elevado error asociado, indicando la falta de resolución de los algoritmos cuando se aplican este tipo de datos.
3. El usuario pueden influir en la manera de utilizar los algoritmos que puede afectar a la calidad de los resultados.
4. Los diferentes algoritmos pierden precisión cuando la calidad de las fracciones de penetración de entrada son pobres.

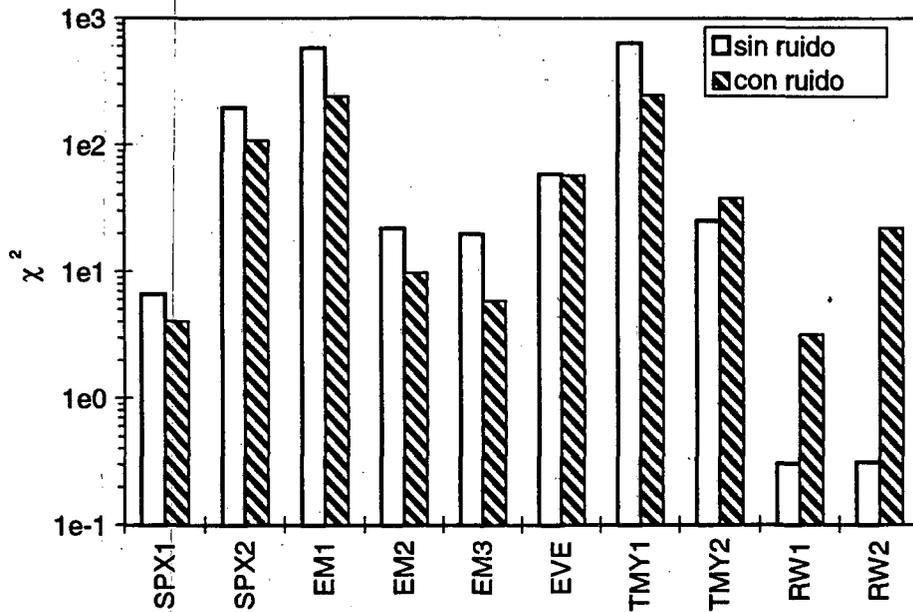


Fig. V.10. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en χ^2 con y sin introducción de ruido.

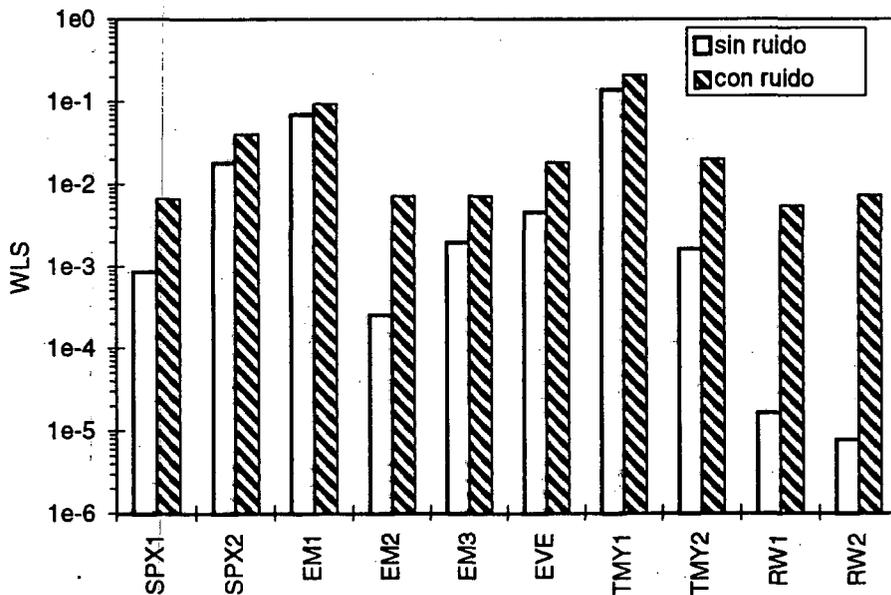


Fig. V.11. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en WLS con y sin introducción de ruido.

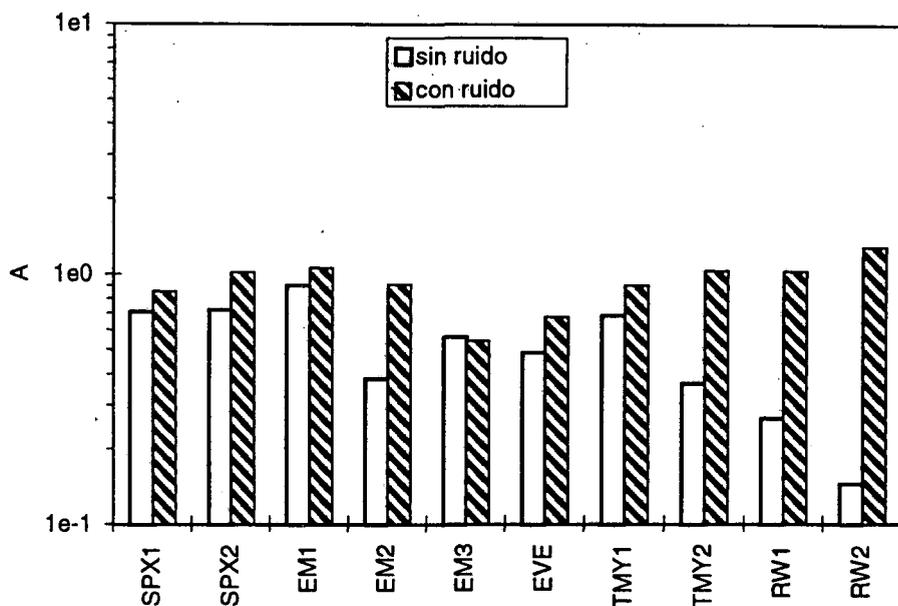


Fig. V.12. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en la diferencia de área con y sin introducción de ruido.

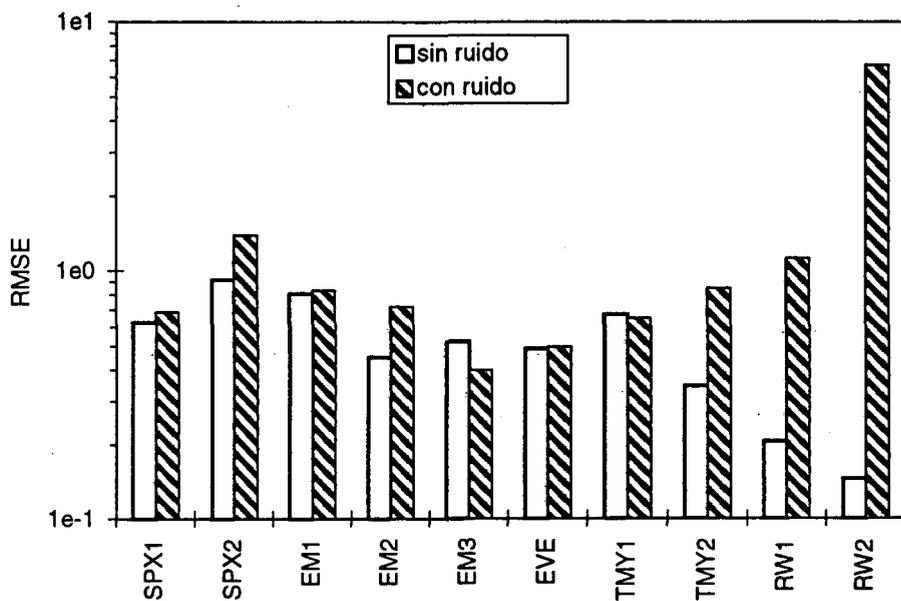


Fig. V.13. Criterio de comparación de los distintos métodos de deconvolución basado en RMSE con y sin introducción de ruido.

Así, para resolver distribuciones bimodales en la zona de los descendientes en estado libre las medidas deben ser muy precisas. Como ya se ha mencionado en este capítulo las medidas deben llevarse a cabo en ambientes donde existan niveles elevados de la concentración de descendientes libres de radón de manera a reducir al máximo posible el error estadístico.

V.3.4.5 Aplicación al sistema de medida desarrollado

El sistema de ecuaciones para resolver con el algoritmo Randomwalk está formado por cinco ecuaciones del siguiente tipo:

$$Z(i) = Z_0 \sum_j f(j)p(i,j) \quad i=1..5 \quad (V.28)$$

donde Z_0 es la actividad por unidad de volumen del aire y $Z(i)$ es la actividad del descendiente del radón que atraviesa el tamiz o tubo i por unidad de volumen aspirado. Así, la expresión de la variación temporal de actividad en el filtro del descendiente k , $A_k(t)$, puede escribirse como sigue:

$$\frac{\partial A_k(t)}{\partial t} = Q \lambda_k Z_k(i) + \lambda_k A_{k+1}(t) - \lambda_k A_k(t) \quad (V.29)$$

donde Q es el caudal de aspiración y λ_k es el periodo de semidesintegración del descendiente k . Esta ecuación es análoga a la ecuación V.1 en donde $Z_k(i)$ representa la actividad por unidad de volumen del descendiente k en un aire que ha sido filtrado por el correspondiente tamiz o tubo de difusión i . Así, los valores $Z_k(i)$ se obtienen en la resolución de cada uno de los cinco sistemas de tres ecuaciones tal como se describió en el apartado V.3.2.

V.4 Descripción de los equipos de los sistemas de medida y criterios de selección

Los distintos equipos que componen un módulo de medida, esquematizado en la figura V.2, se utilizan tanto para el equipo de medida de la concentración de descendientes de radón como para la medida del espectro dimensional de la fracción libre, y están formados por los siguientes elementos.

V.4.1 Detectores de radiactividad

Para la detección de las partículas alfa ocasionadas por las desintegraciones de los descendientes de vida corta del radón se han escogido detectores de silicio de semiconductor tipo PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon). La característica principal de estos detectores es que el grosor de material que debe atravesar la partícula alfa antes de ser detectada es mucho más delgada que en los detectores convencionales (SSB detectores de barrera de superficie de silicio y DJ detectores de unión por difusión), de manera que permite obtener mejor resolución de los espectros.

Otra característica que debe gozar estos detectores es su insensibilidad a los fotones de luz, ya que el sistema trabaja en condiciones normales del ambiente y podría verse afectada por ella. Esto se consigue recubriendo la superficie frontal del detector con una capa de Aluminio de 0.5 μm de grosor y otra de barniz de 1.0 μm de protección el aluminio. A este tipo de detectores se les denomina CAM PIPS. Dichos detectores trabajan con tensiones de polarización de +15 V a +24 V que por tanto no requieren fuentes específicas para su alimentación y consiguientemente facilita el proceso de montaje.

La superficie activa del detector CAM PIPS seleccionado ha sido de 300 mm^2 , por distintos motivos que se destacan a continuación. El primero es que este tamaño permite la construcción de un módulo de medida cómodo de manejar y de transportar, y así mismo se adecua a las dimensiones prácticas de los otros componentes de la unidad como son los tamices y tubos de difusión, el tornillo sinfín de arrastre, el motor eléctrico, etc. Otro motivo por el que no se ha seleccionado un detector de tamaño superior se debe al incremento de precio exponencial de estos detectores en función de su tamaño, de manera que la adquisición de los seis detectores que forman el sistema de medida encarece el equipo sin aportar una mejora sustancial. Por estas razones se ha adquirido el detector de la marca CANBERRA modelo CAM-300.

V.4.2 Amplificadores de señal del detector

Como consecuencia de la débil señal que se origina en el detector de semiconductor tipo CAM se requiere un amplificador de carga con elevada impedancia de entrada (preamplificador o previo) situado lo más próximo a aquél, para que la señal no se vea perturbada por la impedancia del cable. Además, debe considerarse el hecho de que los módulos de medida se encuentran situados en el interior de la cámara de radón, mientras que el equipo de análisis de la señal está ubicado en una estructura modular para instrumentación nuclear (NIM) que se sitúa en su exterior de forma que la señal debe ser transportada unos pocos metros antes de ser analizada por el sistema de espectrometría. Así los preamplificadores se colocan en el interior de la cámara.

El preamplificador/amplificador de CANBERRA modelo 7404 contiene un amplificador y un preamplificador en una unidad compacta y están preparados para ser utilizados sin necesidad de estar conectados a la estructura modular NIM. Esta unidad dispone de un preamplificador de carga con entrada FET y un amplificador de ganancia lineal que conforma la señal en forma gaussiana de manera a evitar el apilamiento y a disponer de una señal de fácil lectura por el correspondiente sistema de espectrometría.

El preamplificador fue diseñado para generar niveles de ruido electrónico muy bajos. Convierte la carga generada en el detector en un impulso de tensión cuya amplitud es proporcional a la carga total recogida. La ganancia nominal del preamplificador es de 200 mV/pC y el impulso generado decrece con una constante de tiempo nominal de 470 μs . Por su parte, el amplificador genera impulsos gaussianos de unos 2 μs y amplitud comprendidos entre 0 y 10 Voltios.

V.4.3 Filtros para la toma de muestras

Las características de los filtros utilizados para la retención de los descendientes del radón y su posterior análisis espectrométrico deben presentar dos características fundamentales: tener una retención de partículas prácticamente total y, que dicha retención se efectúe en su superficie, de manera a que las desintegraciones alfa no sean autoabsorbidas por el propio filtro.

Los filtros utilizados para este fin son de membrana microporosa de estructura polimérica continua (mezclas de nitrato y acetato de celulosa) con un tamaño de poro definido. El reducido tamaño de las partículas en el aire que deben ser filtradas tiene un elevado coeficiente de difusión, mayor cuanto menor es el tamaño de la partícula. Así para el rango dimensional de los descendientes del radón no adheridos a partículas de aerosol (del orden de unos pocos nm) es suficiente para un filtrado total y superficial un tamaño de poro de 1.2 μm .

El diámetro del filtro seleccionado es de 25 mm en concordancia con el tamaño del detector y del conjunto de la unidad de medida. Así se ha seleccionado un filtro de tipo membrana de nitrato de celulosa de 25 mm de diámetro y 1.2 μm de tamaño de poro de la empresa Sartorius modelo 1130325N.

V.4.4 Sistema de espectrometría alfa

Para la adquisición de la señal proveniente del amplificador se ha utilizado un analizador multicanal que permite realizar 16 espectros al mismo tiempo. El sistema está formado por un multicanal con arquitectura tipo NIM de la marca EG&G ORTEC modelo 920-16. El multicanal se conecta al ordenador mediante cable paralelo de manera que puede accederse a los datos en tiempo real. Se dispone de un programa para el análisis de los espectros que además permite desarrollar programas propios que se ajusten a las necesidades de automatización del proceso de medida. El programa es de EG&G ORTEC y el modelo es el MAESTROTM II MCA.

V.4.5 Caudalímetros

La medida precisa del caudal de aire que circula por los filtros de aspiración es fundamental ya que influye de forma directa en el cálculo de la concentración de los descendientes de vida corta de radón como se describe en el apartado IV.5. El caudal también influye en la evaluación de las curvas de penetración de partículas en los tamices y tubos de difusión.

Los caudalímetros que se han utilizado son de tipo másico de forma que la señal de salida que se obtiene es directamente proporcional al caudal másico. El caudalímetro másico está basado en el principio de transferencia de calor que se produce entre el aire en circulación y un elemento sensible capaz de suministrar una tensión variable en función de la temperatura a la entrada y salida de dicho elemento. Por tanto, la señal de salida depende del tipo de fluido que se esté midiendo y de su densidad ya que estas variables influyen en la capacidad de absorción de la transferencia de calor. El

caudalímetro seleccionado es de la marca Honeywell modelo Micro Switch AWM5101VN que permite la medida de un caudal de aire de hasta 5 SLPM (litros por minuto en condiciones standard) calibrado con N₂ (útil para las medidas con aire).

Para la verificación del correcto funcionamiento de los caudalímetros en las condiciones de trabajo y comprobar las posibles derivas, éstos se calibran periódicamente con un sistema calibrador de caudal de gas primario. La técnica utilizada en este caudalímetro es conocida como el "test de la burbuja de jabón". Se forma una lámina de solución jabonosa suspendida perpendicularmente a la dirección del fluido en el interior de un tubo con paredes completamente lisas de manera que no existe prácticamente fricción y que no deja pasar el aire. En esta situación, la lámina de jabón se mueve en el sentido del flujo de aire y exactamente a su misma velocidad. Conociendo una distancia del tubo y su diámetro se puede conocer su volumen. Así, el caudal de aire, se determina por el movimiento de la lámina de solución jabonosa que cruza un volumen fijo por unidad de tiempo. Esta técnica está clasificada como Estándar Primario (Lippman 1973).

El calibrador que se ha utilizado para realizar estas pruebas es de la empresa A.P. Buck, Inc, y el modelo es el mini-Buck calibrator M-30, que es capaz de medir en un rango comprendido entre 0.1 LPM y 30 LPM. Este calibrador se controla con un microprocesador, la burbuja es detectada en el interior del tubo por un sistema de rayos infrarrojos, asegurando así la máxima precisión. Al realizarse la medida de la velocidad del flujo de manera electrónica los errores en las medidas del caudal son del $\pm 0.5 \%$.

V.5 Descripción de la cámara de radón

El laboratorio de radón que se ha instalado en el INTE lo componen una cámara de atmósfera controlada con sus equipos de medida y dispositivos automáticos de control, y los sistemas de seguridad derivados de su condición de instalación radiactiva. Las características funcionales de la cámara se recogen en la tabla V.12 y un esquema de la misma se presenta en la figura V.14. El diseño de la cámara se ha publicado en Ortega y Vargas 1995 y su puesta en marcha en Vargas y col. 1996.

Dimensiones	2.91 x 2.91 x 2.30 m (20 m ³)
Material de construcción	Láminas de acero soldadas (e=1.5 mm)
Fuente generadora de radón	Fuente de ²²⁶ Ra de 2101 kBq Pylon 2000 RN
Exhalación de radón máxima en continuo	256 Bq min ⁻¹
Tasa de ventilación	0 - 6 h ⁻¹
Rango concentración radón	0 - 100000 Bq m ⁻³
Temperatura	5 - 50 °C
Humedad relativa	5 % - 100 %
Concentración partículas	0 - 10 ⁷ part. cm ⁻³
Tamaño de partículas	10 nm - 700 nm

Tabla V.12. Características principales de la cámara de radón del INTE.

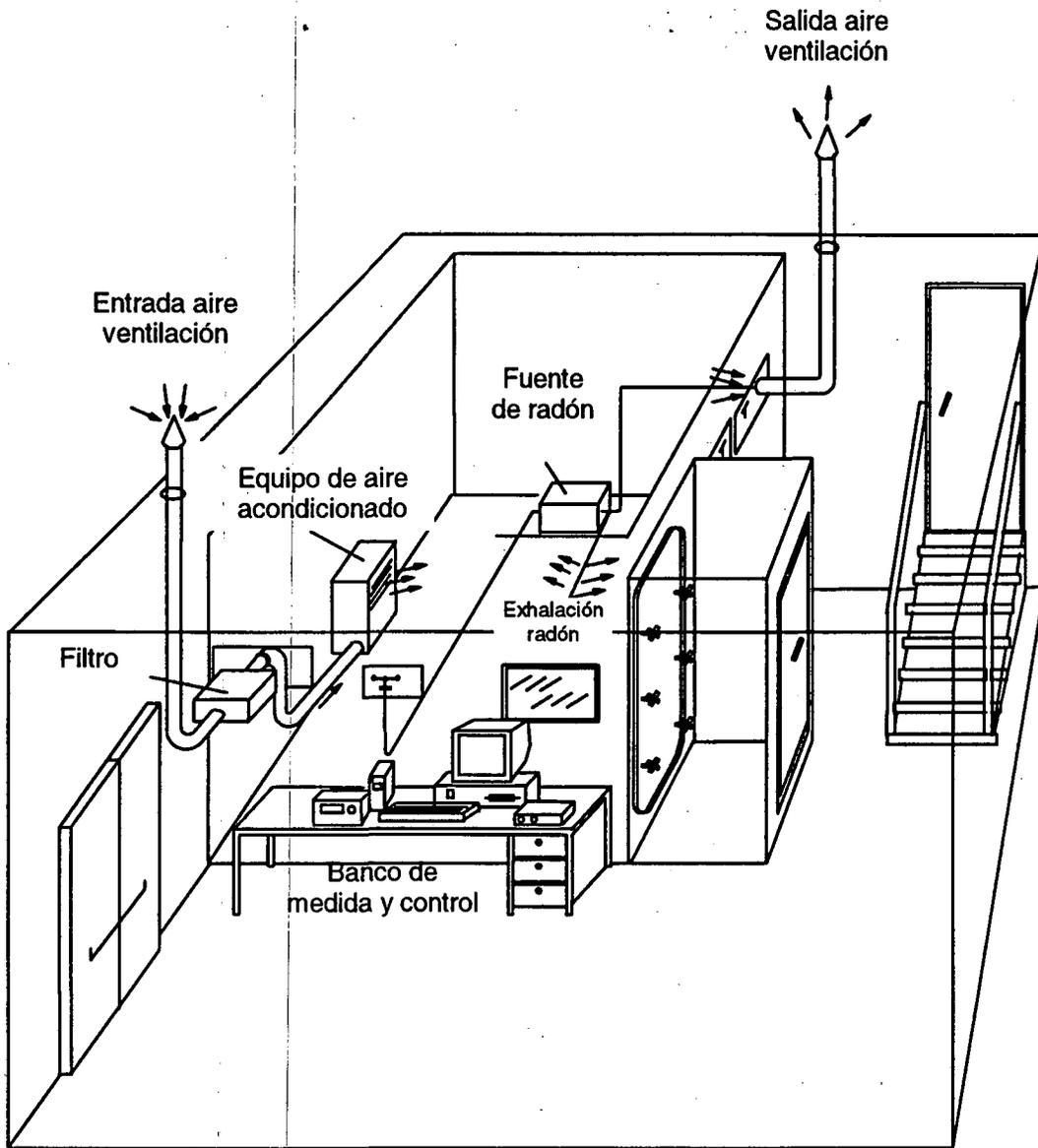


Fig. V.14. Esquema de la cámara de radón del INTE.

Para asegurar el funcionamiento de la cámara se ha instalado un sistema de control automático que reúne las siguientes condiciones:

1. El mantenimiento de atmósferas controladas con diversas concentraciones de radón y descendientes mediante el control de la cantidad de radón introducida en la cámara (exhalación) y de la tasa de ventilación. El control de la exhalación se consigue derivando de forma controlada el caudal de aire que se hace pasar por la fuente generadora de radón de manera que una parte del mismo se introduce en la cámara y la otra se libera al exterior. Para obtener concentraciones de radón muy elevadas se inyecta en la cámara sin ventilación

el radón acumulado en la fuente de radón durante un periodo de tiempo que puede variar desde un día a unos 30 días que es el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio de la actividad de radón. En la figura V.15 se muestra la concentración teórica alcanzada en la cámara en función del tiempo de acumulación.

Para la medida de la concentración de radón se utiliza un sistema de recuento de las desintegraciones alfa del ^{218}Po depositado en un detector de semiconductor como consecuencia de la aplicación de un potencial eléctrico en una esfera de 5 litros (Porstendörfer y col. 1980), que ha sido descrito en el apartado V.2.1 y su correcto funcionamiento se verificó mediante la intercomparación de detectores de carbón activado puesto a punto en el INTE y calibrados en la cámara de radón de la NRPB de Inglaterra (Mails 1999).

2. El mantenimiento de atmósferas controladas de la concentración y del espectro dimensional de las partículas de aerosol. Para la medida del espectro dimensional se dispone de un sistema de la marca TSI modelo SMPS 3934 (Scanning Mobility Particle Sizer) que clasifica las partículas, según su movilidad sometidas a un campo eléctrico. Una vez clasificadas se contabilizan una a una mediante un sistema laser (TSI modelo 3025 A). El control de estos dos equipos se realiza mediante un programa informático que permite efectuar medidas en continuo. Este sistema es capaz de medir partículas comprendidas entre 5 nm y 1000 nm.
3. Para el mantenimiento de las condiciones de temperatura y humedad relativa se dispone de un sistema de aire acondicionado en el interior de la cámara con las correspondientes sondas de temperatura y humedad relativa.
4. Todas estas variables son controladas de forma automática desde un ordenador donde se pueden seleccionar las distintas consignas mediante un programa de control realizado en el entorno de Lab-View (National Instruments). Este sistema permite que la cámara funcione en continuo durante largos periodos de tiempo con todas las variables controladas.

Una de las condiciones experimentales que se requiere de la cámara de radón para la realización de este trabajo es la obtención de una gran homogeneidad en su interior de la concentración de los descendientes de radón no adheridos a partículas de aerosol. Durante las primeras experiencias de puesta en marcha del sistema de medida se observaron grandes diferencias de estas concentraciones que podían superar fácilmente el 20 % en los puntos de aspiración de los módulos de medida cercanos. Esta circunstancia se debía principalmente a las corrientes de aire que circulaban en el interior de la cámara, ya sea de tipo natural o forzadas. Después de numerosas pruebas se llegó a la conclusión de que la manera de obtener la menor heterogeneidad en la distribución de concentraciones era mediante la colocación de dos ventiladores auxiliares en las esquinas de la cámara que funcionaban a una velocidad reducida y que actuaban independientemente del sistema de movimiento del aire propio del sistema el aire acondicionado y del sistema de ventilación de la cámara. De esta manera no se superaron diferencias del 15 % entre los distintos módulos de medida. Estas diferencias en la concentración se mantienen constantes durante toda la experiencia

independientemente del tiempo de duración, de tal manera que puede realizarse una corrección a posteriori tal como se explicó en el apartado V.3.4.2.

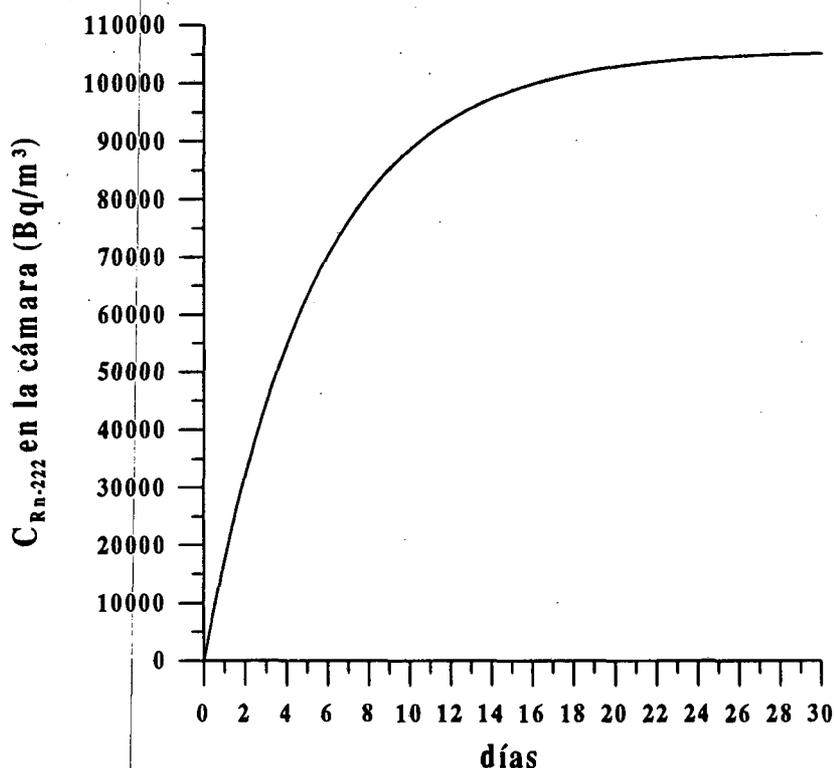


Fig. V.15. Concentración de radón teórica que se alcanza en la cámara de radón sin ventilación en función del tiempo de acumulación de radón en la fuente generadora.

V.6 Conclusiones

Se ha diseñado un sistema de medida de campo en continuo del factor de equilibrio y la fracción libre y un sistema para la medida en continuo del espectro dimensional de los descendientes en estado libre para ser utilizado en atmósferas controladas. Para el primer sistema se ha construido un equipo de medida de la concentración de radón portátil basado en la deposición electrostática de los iones de ^{218}Po en la superficie de un detector de partículas α que constituye de un equipo de gran precisión y con cualidades superiores a los equipos comerciales, tal como se puso de manifiesto en la intercomparación llevada a cabo en la cámara de radón del INTE. Este sistema se complementa con un equipo de medida de la concentración de cada uno de los descendientes del radón y otro de la concentración de los descendientes adheridos a partículas de aerosol, ambos basados en la espectrometría alfa de las partículas depositadas en filtros por los que se ha hecho pasar aire. Para la medida de los

descendientes adheridos se ha utilizado un tamiz metálico de $d_p(50\%) = 4 \text{ nm}$. La optimización de funcionamiento de estos equipos de medidas se ha realizado mediante diversas simulaciones que han permitido determinar un caudal de circulación óptimo de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ y ciclos de medida de 1 hora.

El segundo sistema de medida que se ha puesto en marcha para la realización de determinaciones del espectro dimensional de los descendientes del radón en estado libre en atmósferas controladas. Está constituido por seis módulos de medida que permiten la selección de partículas de forma óptima para la determinación de dicho espectro dimensional. Cada módulo dispone de un conjunto formado por un filtro y un detector de semiconductor tipo PIPS similar al utilizado en la determinación de la concentración de los descendientes de radón. Previo al filtro de deposición de las partículas radiactivas se han dispuesto de forma optimizada tamices metálicos con diámetros de corte $d_p(50\%) > 1 \text{ nm}$ y tubos de difusión para diámetros menores. Uno de los módulos, que es el de referencia, mide la concentración de descendientes total, tres de ellos disponen de tubos de difusión de 10 cm de longitud ($d_p(50\%) = 0.27 \text{ nm}$), 30 cm ($d_p(50\%) = 0.52 \text{ nm}$), y 50 cm ($d_p(50\%) = 0.73 \text{ nm}$), y el resto están formados por tamices metálicos ($d_p(50\%) = 1.13 \text{ nm}$) y ($d_p(50\%) = 3.35 \text{ nm}$). La determinación de los distintos diámetros de corte se ha realizado a partir de experiencias preliminares en la cámara de radón de manera que la actividad detectada en cada módulo se encuentra en progresión. El sistema se complementa con la verificación del correcto funcionamiento de la técnica de deconvolución Randomwalk que se ha contrastado en una campaña de intercomparación de 10 algoritmos utilizados por diversos grupos experimentados de Europa y de los Estados Unidos. Se ha determinado la superioridad del método RW frente al resto de sistemas cuando las condiciones de medida son de elevada precisión.

Para la puesta en marcha de estos equipos ha sido necesario el diseño y la construcción de una cámara de radón de atmósfera controlada de 20 m^3 de volumen donde se puede controlar de forma automática la concentración de radón, de los descendientes de radón, de la concentración y tamaño de las partículas de aerosol, y de la temperatura y humedad relativa.