

04.76.05

CNEA-NT 5/76

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
AREA DE RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

CAMARA DE IONIZACION DE AIRE LIBRE Y PLACAS
PARALELAS PARA LA CALIBRACION DE DOSIMETROS
EN LA REGION DE LOS RAYOS X DE BAJAS ENERGIAS

POR

J. NAKASONE

BUENOS AIRES

1976

RESUMEN

Se ha construido una cámara de ionización de aire libre y placas paralelas para la medición de dosis de exposición en la región de los rayos X de bajas energías ($< 50 \text{ keV}$) incluyéndose una cámara transmisora para el control de haces y un electrómetro de precisión para corrientes medias mínimas del orden de 1 pA .

Posee dos placas colectoras planas de 9 mm (la 1ª) y 27 mm de longitud y diafragmas de 6 y 20 mm de diámetro. La corrección por la atenuación en el aire se realiza mediante un colimador móvil. La placa de guarda (aislable de la caja) y los electrodos fueron contruídos en grafito de calidad nuclear. Se prevé su uso en el orden de 50 R/min , con campo de 250 V/cm y con la corrección por saturación mediante la fórmula de Engel-Steenbeck. Posee 24 hilos de acero inoxidable y 3 franjas para la corrección del campo eléctrico.

Ensayos sobre el campo eléctrico y el volumen de colección.

- Pruebas en la cámara transmisora sugieren un efecto de desnivel de la colector, respecto de la guarda, en $0,3\%$ cada $10 \mu\text{m}$
- Conectando la placa de guarda a la caja a través de baterías y resistencias, se comprueba una deformación de $1,6\%$ por cada 1 V .
- Desviaciones superiores al 10% con las 3 franjas correctoras puestas a la tierra (caja) o a la alta tensión A.T. de la cámara.
- Desviaciones superiores al 100% al conectarse los hilos correctores a tierra o a la A.T.
- Cortocircuitando los hilos correctores contiguos de a pares las lecturas varían en un 3% .

CONCLUSIONES:

Las franjas correctoras son imprescindibles, a menos que se dispongan de hilos más gruesos o en mayor densidad. Signos y magnitudes de las variaciones concuerdan con lo previsto.

Algunas de las futuras realizaciones: Efecto del anillo de epoxy en la entrada del haz; efectos de borde en los diafragmas; cálculo y observación de las líneas críticas del campo eléctrico; intercomparaciones con otras cámaras similares.

SUMMARY

A parallel-plate free air ionization chamber for the low energy region (up to 50 keV) has been constructed, with a beam control transmission chamber and a precision electrometer included. It has two collectors of 9 mm (the first) and 27 mm length and two diaphragms of 6 and 20 mm diameter. The air attenuation correction is made by means of a movable diaphragm. The guard plates (isolable from the box), the high potential plate, and the collectors are made of nuclear quality graphite. An electric field of 250 V/cm and radiation intensities of about 50 R/min will be used. Ion recombination correction will be done by means of the Engel-Steenbeck formula.

Electric field corrections are realized by 24 stainless steel guard wires and 3 guard strips outer to the wires.

The following electric field and the first collecting volume distortions were observed:

- Experiments on the transmission chamber suggest a 0,3% reading deviation per 10 μ m collector misalignment.
- By connecting the guard plates to the grounded box through batteries and resistances, 1,6% deviation per volt is observed.
- Over 10% distortions are obtained with the 3 guard strips connected to the ground or the high potential.
- There are over 100% distortions by connecting the guard wires to the ground or the high potential.

In short, the guard strips are necessary unless thicker wires are used.

INTRODUCCION

Se trata del estudio, construcción y evaluación de una cámara de ionización de aire libre y placas paralelas en la región de 5-50 keV (bajas energías). Es una cámara primaria, vale decir que mide las dosis de exposición en términos de su definición física.

El principio de una cámara de ionización es el siguiente (ver fig 1 y 2): se irradia en condiciones de "equilibrio electrónico" con una fuente, sean generadores de rayos X, fuentes radiactivas, u otras fuentes, un volumen (volumen activo v), perfectamente definido de aire, en condiciones normales. Se recogen los iones mediante un campo eléctrico adecuado E , antes de que actúe el proceso de recombinación (saturación de corriente), se miden las cargas colectadas en el capacitor del electrómetro.

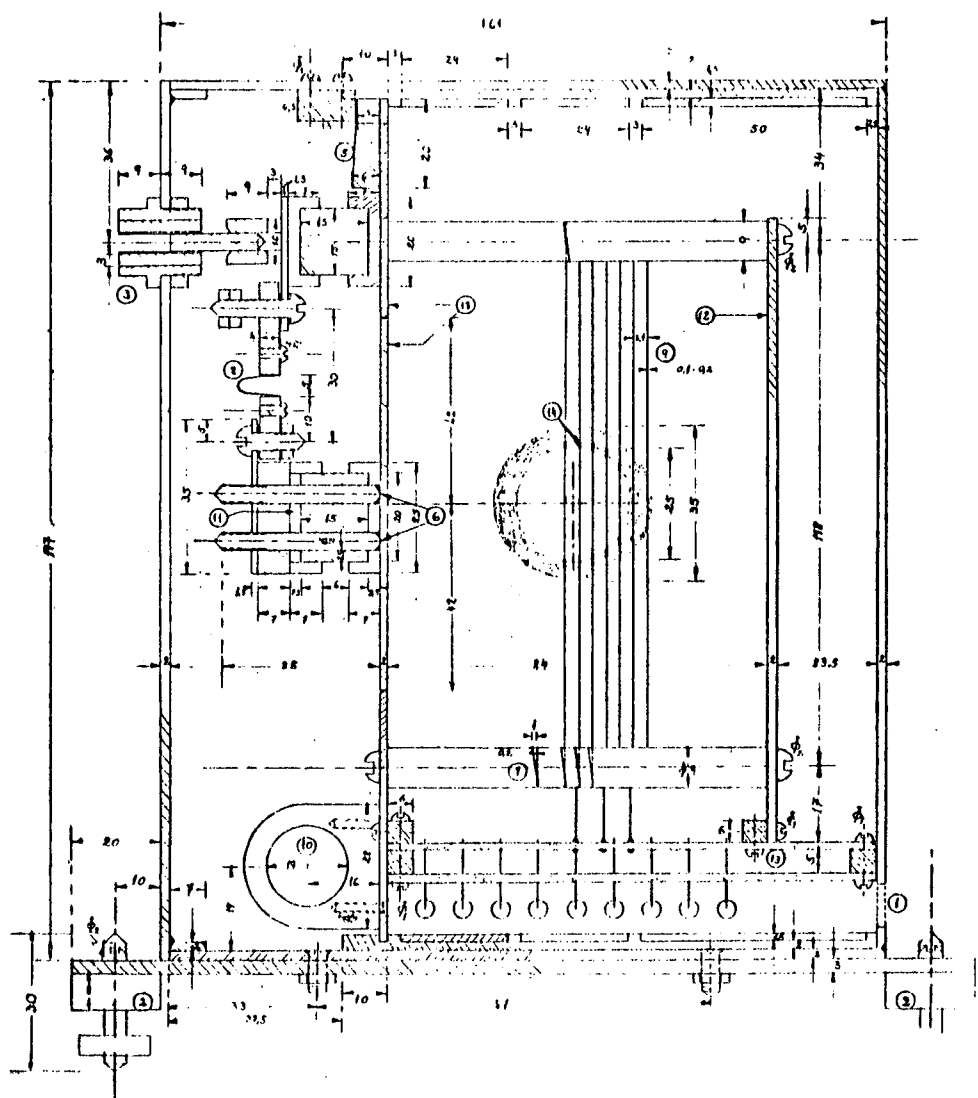
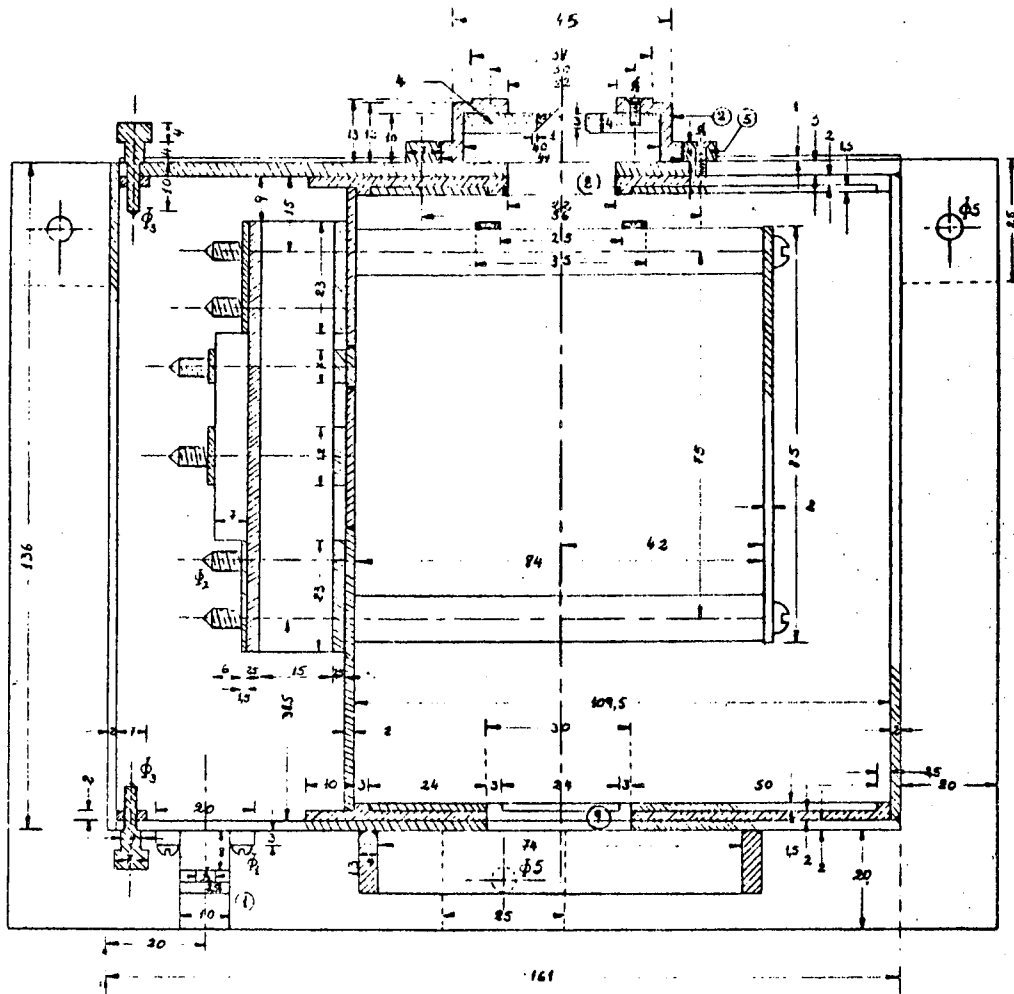
Son cargas del orden de 1 u.e.s. (q) de magnitud que deben medirse al 0,1% de precisión, con problemas de pérdida diversos durante el período de acumulación.

La radiación electromagnética (fotones) produce ionización mediante los electrones primarios que se producen por interacción con los átomos del aire (efectos fotoeléctricos, Compton, formación de pares). En el rango de energías previsto para el funcionamiento de la cámara que se describe, solamente se tienen en cuenta fundamentalmente el efecto fotoeléctrico y además el Compton. Estos electrones primarios que poseen a lo sumo la energía del fotón, tienen un alcance máximo R definido en el aire, el cual determina las condiciones de "equilibrio electrónico" y separación D entre las placas.

Además, los fotones dispersados producen nuevos electrones primarios, cuya contribución a la ionización en el volumen de colección debe eliminarse.

Entre el diafragma de entrada del haz (plano de medición) y el volumen activo media una distancia de atenuación por aire (d); ésta y la longitud del colector son funciones de la energía del haz.

Teniendo en cuenta toda la situación anterior, se define la unidad Roentgen R de dosis de exposición por radiación electromagnética como la unidad de carga en u.e.s. (q) que se produce en 1 cm^3 de aire en condiciones normales, o bien, se define la velocidad de exposición en unidades de mR/h ; R/h ; R/min ; R/seg ; etc ya que es muy extenso el rango total en las aplicaciones.



Dimensiones importantes de la cámara

Separación entre placas D.....	78 mm
Longitud de los colectores L.....1°)	9,16 mm
2°)	27,3 mm
Altura de los colectores.....	89,6 mm
Capacidad de los colectores.....1°)	0,09 pF
2°)	0,30 pF
Espacio de aire para colectores g	0,2 mm
Coplanaridad y paralelismo de placas.....	10 μ m
Anchos de placas de guarda.....Frente.....	24,5 mm
Atrás.....	24,5 mm
Arriba.....	19 mm
Abajo	19 mm
Hilos de campo.....Separación S.....	3,11 mm
Cantidad.....	24
Diámetro s.....	0,17 mm
Long. vertical	127 mm
Long. horizontal	84 mm
Espacio entre el diafragma y la línea central de las placas colectoras d	1°) 50 mm
2°)	67 mm
Espacio entre los hilos anteriores y el borde an- terior del 1° colector.....	25 mm
Espacio entre los hilos posteriores y el borde posterior del 2° colector.....	25 mm
Espacio entre los hilos y la caja externa	
Delante.....	7 mm
Detrás.....	31 mm
Arriba.....	33 mm
Abajo.....	26 mm

Diámetro de diafragmas 2a:

1°) 6 mm	{	Volumen activo con el 1er colector	0,2590	cm ³
		" " " 2do " "	0,7720	cm ³
2°) 20 mm	{	Volumen activo con el 1er colector	2,878	cm ³
		" " " " " " 2do " "	8,577	cm ³
Longitud de diafragmas t.....				3 mm
Relación de volúmenes de ambos colectores.....				2,98 mm
Diámetro de entrada del haz.....				22 mm
Diámetro de salida del haz.....				30 mm
Volumen útil o de colección.....1°) 0,92 x 8,96 x 7,8 =				64,3 cm ³
2°) 2,73 x 8,96 x 7,8 =				190,8 cm ³
Distancia mínima desde el borde del haz hasta las placas.....				29 mm
Distancia diafragma - 1°colector (borde anterior).....				44,3 mm

La cámara de bajas energías

1. Características generales

- a) Energía máxima: 50 keV
- b) Intensidades de radiación: 0,1 R/min - 100 R/min.
- c) Dimensiones generales: adaptación de los lineamientos de una cámara similar del P.T.B. (R.F. de Alemania), con dos placas colectoras de 9 y 27 mm. Los detalles en las medidas, disposiciones y materiales y los fundamentos del diseño se basaron en las informaciones bibliográficas y en los recursos disponibles.
- d) Colimadores: de fabricación austríaca, en "Densimet 18" (95% W, 5% Fe y Ni). Según el fabricante, la corrección por efecto de borde por debajo de 50 KeV es inferior al 0,1% para ambos diafragmas de 6 y 20 mm de diámetro. Su espesor es de 3 mm, con zona cónica posterior de 45° y 1 mm de espesor. Los diámetros dados por el fabricante concuerdan con los controles del I.N.T.I. Las gestiones para su fabricación se hicieron a través de la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- e) Mediciones en el I.N.T.I (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Para medir la dosis de radiación (en Roentgen) con la cámara se necesita conocer las siguientes magnitudes y sus errores: el área de los diafragmas; la longitud de los colectores; la capacidad de los capacitores de integración del electrómetro; la tensión sobre las armaduras de los mencionados capacitores. Los 4 parámetros fueron controlados en el INTI. Las longitudes de las colectoras fueron medidas mediante comparadores ópticos, a lo largo de las líneas medias de los intervalos de aire. Por otra parte, las mediciones de presión, temperatura y humedad ambientales, se realizan con instrumentos revisados y calibrados por el Servicio Meteorológico Nacional.
- f) Comparaciones con la cámara Kustner-Pychlau.
El C.R.R. carece aún de un generador de rayos X de bajas energías. De modo que se realizó una intercomparación con el patrón secundario Kustner-Pychlau del C.R.R. para energías intermedias, en 70 kV, con una intensidad de 0,4 R/min, energía efectiva de 46 keV, campo de radiación de Φ 6 cm, distancia focal de 1 m. Se usó el diafragma de Φ 2 cm y el colector mayor. Para la humedad ambiental de 65% se efectuó una corrección de

0,3%. Pérdidas eléctricas nulas. Corrección por saturación: insignificante. Atenuación en el aire: la medida coincide con la calculada para 46 keV.

Resultados: en 3 compraciones independientes, la máxima diferencia fue de 0,3%, sobre una probable tolerancia de $\pm 3\%$ (Kustner: $\pm 2\%$). A pesar de la buena coincidencia, se debe notar que la cámara no debe operarse con energías superiores a 50 kV, aún cuando otra cámara (que pertenece a un laboratorio extranjero) con dimensiones fundamentales similares fue destinada para el intervalo 20-100 kV, con las debidas correcciones por pérdidas electrónicas y contribución de fotones secundarios.

I-2. Características particulares

- a) Sistema de alineación similar al de la cámara Kustner, con campos de radiación iguales y menores. Se utiliza el mismo adaptador de salida de la Kustner, con la precisión de ± 1 mm sobre unos 15 cm de separación entre el diafragma de entrada y la pantalla fluorescente.
La pieza "V" frontal se monta sobre el diafragma. La precisión de la alineación depende críticamente de la posición de la fuente respecto del eje. Para que el error por desalineación sea menor que 0,1%, la precisión sobre la pantalla fluorescente debe ser inferior a $\pm 1,5$ mm o bien, la precisión de la colocación del diafragma debe hacerse con la mínima tolerancia de que es posible el maquinado de las piezas.
- b) Distancia focal mínima de operación: 30 cm
- c) Colimador móvil para la medición de la atenuación en el aire. Los espacios de atenuación son 50 y 67 cm según que se utilice el colector corto o el largo, respectivamente. Puesto que se monta el diafragma menor sobre el mecanismo de traslación longitudinal, la rigidez de éste debe satisfacer el requerimiento considerado en el punto a). Para las energías más bajas, la corrección por atenuación es la más importante de todas.
- d) Placas biseladas de grafito de pureza nuclear y granos finos como electrodos y placas de guarda, pegadas a sus bases de bronce cromado con "mastic" (disuelto, fundido) mezclado con polvo de grafito (capa delgada y de satisfactoria conductividad eléctrica). Se optó por esta disposición debido a las dificultades e inconvenientes encontrados para grafitar los electrodos y las placas de guarda con una capa homogénea de 0,1 mm de espesor para anular la contribución de los fotones secundarios que llegan a las placas. El biselado

de 45° en los bordes reduce la posibilidad de que el polvo haga puente en el intervalo de aislación de aire. La zona paralela tiene un espesor de 1,5 mm. Importa la pureza y la estabilidad química del grafito a fin de evitar la formación de campos eléctricos localizados sobre los intervalos de aire. Antes de su envío al I.N.T.I., las placas de grafito fueron lavadas en un tanque ultrasónico lleno de un solvente.

- e) Placas de guarda aislables de la caja, y los divisores de tensión de las placas e hilos correctores de campo, desconectables individualmente en ambos extremos (placas de guarda y de alta tensión) para la verificación de sus estados. Por otra parte, tales disposiciones permiten evaluar los efectos de las sobretensiones de los colectores y la eficacia de los correctores del campo eléctrico.

3. Intensidades del campo eléctrico E

- a) E varía entre 60 y 435 V/cm. Su valor normal será de 250 V/cm, para operar con algunas decenas de R/min. La fuente de alta tensión provee 50 μ A, es de polaridad fija positiva y su estabilidad para cortos períodos a 2.000 V es de ± 1 V.
- b) Las pérdidas por recombinaciones serán corregidas mediante la fórmula de Engel- Steenbeck, cuya representación en ábaco está disponible, donde la distancia interelectródica D se sustituye por el diámetro 2a del diafragma. La expresión general de las recombinaciones posee la forma

$$p = \sum a_n E^{-n} = f(I_s, E) + g(E), \text{ con } n > 0, \text{ siendo } I_s = \text{corriente de saturación.}$$

El término $f(I_s, E)$ corresponde a la recombinación de volumen, y el término $g(E)$, a la recombinación columnar. De un modelo simple se puede deducir que $f(I_s, E) \propto (I_s/E)^2$, o sea, $n=2$.

- c) El método alternativo para el problema anterior consiste en determinar experimentalmente las curvas (casi rectas) I^{-1} vs E^{-1} siendo I la corriente medida para un campo E.

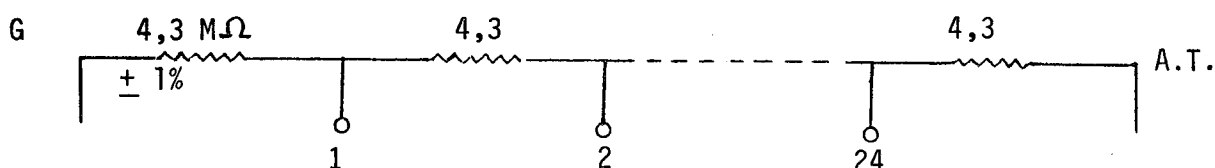
Se extrapola hacia $E^{-1} \rightarrow 0$ y se lee la intersección con la ordenada I^{-1} . El valor I_0^{-1} resultante corresponde a la corriente de saturación.

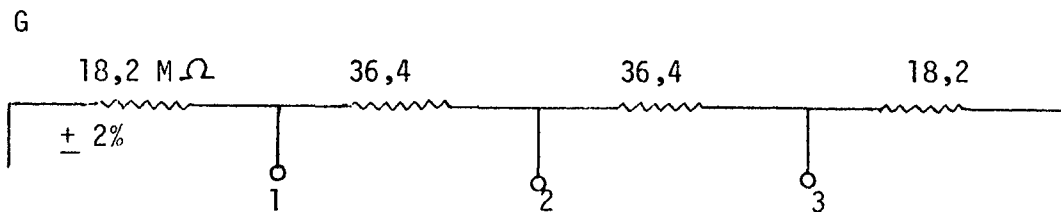
4. Deformación de las líneas críticas de E

- a) En la figura 1 las líneas críticas son los segmentos A-A, B-B, y C-C, que idealmente son líneas rectas y paralelas entre sí. En realidad, según el grado de eficiencia de los correctores de campo, son líneas más o menos curvadas.

La línea A-A es más crítica por estar cerca de los hilos correctores y el anillo de epoxy, y por definir el volumen colector más pequeño. La distancia de los hilos de la línea A-A es sólo el 30% de la separación entre los electrodos, D. De ahí, que las evaluaciones se hicieran sobre el primer volumen colector.

- b) Los 24 hilos correctores de acero de 0,17 mm de diámetro están separados entre sí en 3 mm, por 4 barras ranuradas de Perpex de $\Phi 8$ mm, con gradiente uniforme de tensión; y se interrumpen sólo en la ventana de entrada del haz. Con un gradiente E de 250 V/cm, entre dos hilos contiguos existe una diferencia de tensión de 75V. El disco de epoxy ($\Phi 25$ interno y 35 externo) que interrumpe los hilos a la entrada es una ventana a través de la cual el volumen colector "ve" la caja y el diafragma; además, el mismo disco constituye un aislador visible y cercano al volumen colector. Los hilos de acero podrían sustituirse por otros de hilo de nylon grafitado de igual espesor, en cuyo caso se puede evitar el uso del anillo de epoxy, corrigiendo la atenuación del haz mediante un fantoma construido con el mismo anillo aislante, Sin embargo, el nylon presenta el problema del grafitado y de la conexión eléctrica.
- c) La etapa previa de corrección gruesa del campo se logra con 3 placas de bronce cromado aisladas entre sí y de la caja por placas de Teflón de 2 mm de espesor. Tanto las placas de bronce como la de Teflón están perforadas en las zonas de entrada y salida del haz de radiación ($\Phi 22$ y 30 mm, respectivamente). En la última se restablece la continuidad eléctrica con una delgada lámina de Mylar aluminizado.
- Las placas correctoras cubren iguales espacios de la caja frente al espacio interelectrónico, con la distribución de tensiones tal como se indica en el punto siguiente. Estas placas, ubicadas inmediatamente por fuera de los hilos correctores, a una distancia mínima de 7 mm, poseen menor eficacia que los hilos debido a su escaso número. Más aún, en el piso de la cámara está obstruida su acción debido a la interposición de la placa aisladora sobre la cual están montados los divisores de tensión.
- d) Las tensiones eléctricas de los hilos y las placas de corrección se obtienen de sendos divisores de potencial conectados entre la placa de alta tensión (A.T.) y la de guarda (G).





Normalmente (A.T.= 2000 V) la disipación es de 200 mW (en los ensayos pueden llegar a 800 mW). Puesto que su ubicación exterior a la caja ofrecía dificultades prácticas, los divisores quedaron montados sobre una placa de epoxy de pared doble (aislación térmica del volumen de medición respecto de los divisores) en la base de la cámara, solidariamente a los electrodos. Por lo tanto las conexiones a las placas correctoras se realizan mediante contactos elásticos deslizantes, ya que el sistema electródico se puede extraer de la caja.

Los divisores, una vez armados, fueron rigurosamente controlados fuera de la caja.

- e) Con el fin de evitar la alteración en la cámara de bajas energías, se hicieron mediciones de los efectos de desniveles de las colectoras respecto de la guarda en la cámara transmisora. Esta, construída en aluminio, posee una sola placa colectora igual a la más pequeña de la de medición, y con intervalos de aire similares. El efecto será porcentualmente menor en la colectora más grande.
- f) Una leve falta de paralelismo entre las colectoras y la placa de A.T., o entre ésta y el conjunto colectoras + guarda desviará las líneas críticas de igual manera, manteniendo su paralelismo; por lo tanto no afectaría las mediciones.
- g) Una sobretensión remanente de la compensación de la entrada del amplificador operacional, inevitable, pero controlable, de igual signo que la tensión de polarización de la cámara, tenderá a reducir el volumen colector. Se espera que la sobretensión no supere los 10 mV. Para observar este efecto y otros, se ha dispuesto en la cámara la posibilidad de dar sobretensiones controladas, consistente en aislar la placa de guarda y conectarla a la masa a través de baterías y resistencias. Cualquier sobretensión de la guarda equivale a elevar la colectora a una sobretensión adicional de signo opuesto e igual magnitud.
- h) Un potencial de contacto entre la colectora y la guarda originará un desplazamiento de las líneas críticas en las cercanías de los intervalos de aire. No basta utilizar los mismos materiales para ambas; se necesita un estado su-

perforación también homogénea. Se utilizó un grafito compacto de pureza nuclear, lavado con alcohol metílico en bandejas de ultrasonido, antes de su envío para las mediciones dimensionales definitivas. Promediando las lecturas con la A.T. de signos opuestos, se lograría compensar sus efectos.

- i) La carga espacial, sobre todo a bajas eficiencias de colección o a elevadas ionizaciones, reduce el campo eléctrico (su magnitud) en la zona central del espacio de colección; y a la vez deforma sus líneas radialmente al haz. La consecuencia es que el campo eléctrico debe ser siempre algo superior al valor calculado, como así la altura de los colectores.
- I-5. Se utilizaron pequeñas fuentes radiactivas de control, de Radium (Kustner-Pychlau) y Sr 90 (Simplex DUO) pertenecientes al Centro Regional de Referencias (C.R.R.).
- a) Midiendo con el electrómetro de "lengüeta vibrante" (amplificación de tensión $A = 10^3$) y con el de "puente de varactores" ($A = 10^5$) se obtuvieron iguales resultados dentro de los errores previsibles. Ello demuestra que $A = 10^3$ es suficiente para la compensación de la entrada del electrómetro.
 - b) Prueba en la cámara transmisora: Con un desnivel de colectora estimado en + 0,3 mm (hacia el interior de la cámara) se obtuvo un incremento de la lectura del 11% (o sea + 0,3% / 10 μ m, suponiendo una deformación lineal). Ello implica una desviación de las líneas críticas de alrededor de 0,5 mm sobre un ancho de colectora de unos 9 mm. Esta experiencia se realizó con un haz colimado de rayos X. La nivelación de las colectoras es un aspecto crítico del diseño. La cámara standard de energías medianas del N.B.S. (E.E.U.U.), de mayores dimensiones, presenta resultados similares.
 - c) Por la construcción de la cámara, conectar las placas correctoras de campo a la A.T. o a la guarda G equivale a hacer lo mismo con la caja. A pesar de la simetría de la cámara, el efecto de conectar las placas o los hilos de campo a la A.T. o a la G no produce necesariamente efectos simétricos (salvo para pequeñas distorsiones) ya que las colectoras están siempre sobre la G. Las desviaciones de las lecturas por la puesta a A.T. o a G de las placas correctoras superan el 10%, indicio de la importancia de las placas correctoras y de la permeabilidad por delgadez de los hilos correctores.
 - d) Conectando los hilos de campo a la A.T. y a G se producen variaciones de hasta 100%. Ello prueba que, a pesar de la delgadez de los hilos, su eficacia es importante.

- e) Un termómetro en la rejilla de ventilación revela algunas décimas de grado sobre la temperatura ambiental. Utilizando termocuplas adecuadas, se podrá explorar la distribución interna sin inconvenientes.
- f) Utilizando pilas y resistencias para conectar la guarda a masa, se llevó la sobretensión de la colectora (la menor) a $- 2,5 \text{ V}$ y $+ 0,6 \text{ V}$. Se observaron distorsiones proporcionales a la sobretensión (y congruentes con el signo) de 1,6% por volt. De mantenerse la proporcionalidad a 10 mV, la distorsión sería de alrededor de 0,02% solamente.
- g) Cortocircuitando hilos de campo contiguos de a pares, se observaron incrementos de lecturas de unos 3% (el signo es difícil preverlo pues cerca de los hilos el campo es muy ondulante, y se van suavizando las ondulaciones al ir alejándose de ellos). Es una variación importante, por lo tanto no es necesario probar cortocircuitos de a 3 ó 4 hilos.
- h) Midiendo con un microamperímetro (hasta $50 \text{ } \mu\text{A}$) las corrientes a la entrada de la A.T. (corriente total), a la salida de la guarda, o en las conexiones individuales de los divisores a la guarda, se controlan posibles pérdidas eléctricas a través de las aislaciones, circuitos abiertos o cortocircuitos. No se detectaron fugas de corrientes ni valores anormales.

-6. Contribución por la radiación secundaria

Aparte de los fotones originales del haz, los fotones dispersados o degradados, en sucesivas interacciones, generan ionizaciones adicionales cuya contribución no está comprendida en la definición de la dosis de exposición. La radiación secundaria se origina en los efectos Compton y de dispersión coherente; y son absorbidas en el aire y sobre todo en las paredes de bronce. De allí surgió la necesidad de utilizar las placas de grafito. También los hilos correctores de campo a la salida del haz contribuyen con fotones secundarios. Ello se mide mediante fantasmas. En cuanto a la contribución del aire en el volumen colector, se la minimiza reduciendo las dimensiones de la cámara a los valores mínimos compatibles con el diseño y el uso. Para un haz de diámetro cero y una separación de 10 cm entre los electrodos, con 60 kV y sin filtro adicional, la contribución es de alrededor de 0,1%, incrementándose lentamente para menores kilovoltajes.

-7. Pérdidas electrónicas y equilibrio electrónico

Ambos fenómenos se derivan del alcance máximo (lineal) de los electrones generados en la interacción de los fotones con el aire. Las trayectorias son

zigzagueantes y curvadas, de modo que sólo una fracción reducida alcanza la distancia radial máxima R . Esta se considera de 25 mm para la energía de 50 keV. Por lo tanto se ha tomado dicho valor como distancia de equilibrio electrónico (espacio entre hilos anteriores y el borde anterior de la 1a colectora). Los electrones primarios producidos por los fotones que alcanzan las superficies de los electrodos, pierden parte de sus energías, lo cual significa una pérdida de la corriente de ionización. Luego, la distancia R también debe mediar entre el borde del haz (con el diafragma de máximo diámetro) y el electrodo más cercano. Puesto que tal requisito se cumple, la pérdida electrónica es nula desde este punto de vista. Puesto que según el punto anterior (I-6) la contribución por fotones secundarios es mayor para dimensiones mayores de la cámara, para energías superiores a 50 keV se la dimensionan de modo que existan pérdidas electrónicas que compensen la creciente contribución de los fotones secundarios.

I-8. Controles y operaciones con la cámara

Ante todo, verificar la conexión a masa de la placa de guarda, y asegurar el buen contacto eléctrico de los extremos de los divisores y de la entrada al electrómetro.

La elección de la colectora se basa en la energía del haz, en su intensidad, la precisión requerida para su medición. En principio, la 1a colectora se utiliza con energías bajas, intensidades elevadas y menores precisiones; y la 2a, para los casos contrarios. Sin embargo, el objetivo más importante de la existencia de ambas placas es el chequeo interno de la cámara (controles periódicos): longitudes relativas de las placas; deformación relativa de los volúmenes colectores (eficiencia de las correcciones de campo); pérdidas eléctricas relativas; etc).

Si se observan pérdidas eléctricas importantes es probable que algún grano de polvo haga de puente entre la colectora y su contorno a través de los intervalos de aire. Se soluciona mediante un pincel con soplador. En caso de que persista la pérdida, habrá que secar y/o limpiar las superficies aisladoras.

Si existen sospechas de los divisores de tensión, se efectuará el control de la plaqueta colocándola sobre superficies metálicas puestas a tierra y midiendo con un megóhmetro.

Al realizarse la comprobación de la dependencia de la corriente en función de la tensión de polarización (saturación) cuidarse de las interferencias secundarias originadas por la alta tensión variable.

La atenuación de la radiación en el aire se produce sobre 50 y 67 mm para las colectoras N° 1 y 2 respectivamente.

Para la corrección por la densidad del aire Φ , se mide la presión en el barómetro al $\pm 0,1$ mm Hg y la temperatura al $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Por lo tanto ambos instrumentos deben estar perfectamente calibrados. Utilizando fuentes radiactivas de control, no sólo la cámara puede ser controlada periódicamente en su estabilidad, sino que además se podría sustituir la corrección Φ por lecturas del control radiactivo.

La corrección por la humedad del aire a 35°C y 70% se eleva a $+ 0,9\%$. A 20°C y 50% aún vale $+ 0,3\%$. Luego, es importante mantener la cámara completamente seca.

Finalmente, las operaciones de calibración con la cámara están indicadas en la guía N°7 del C.R.R. "Calibraciones con la cámara primaria".

I-9. Factores de la cámara y sus errores

Según la definición del "Roentgen" dada en la introducción, la dosis medida sobre el plano de medición se expresa según la relación

$$X = \frac{10^{-9}}{3\pi} \frac{C}{a^2} \frac{V}{L} f_a f_p \Phi f(\dot{X}) \quad (\text{Roentgen})$$

C= capacidad de integración (faradios)

V= Tensión entre las armaduras del condensador (voltios)

a= Radio del diafragma (cm)

L= Longitud de la colectora (cm)

f_a = Factor de corrección por atenuación del haz en el aire.

f_p = Corrección por el plano frontal (el cual se encuentra 6 mm por delante del plano de medición) y vale $(1 + \frac{1,2}{Z_0})$ siendo Z_0 la distancia focal en cm.

Φ = Corrección por la densidad del aire

$$= \frac{760}{p-0,24 p_1} \times \frac{T}{273}, \text{ donde}$$

p= Presión atmosférica (mm Hg)

p_1 = Presión de vapor de agua en el aire (mm Hg)

T= Temperatura ambiental absoluta ($^\circ\text{K}$)

$f(\dot{X})$ = corrección por la falta de saturación.

Por debajo de los 50 keV no se consideran las correcciones por pérdidas electrónicas, aunque sí eventualmente la contribución por la radiación dispersada.

Para el cálculo de errores se tienen en cuenta los siguientes factores:

$$\frac{C (\pm 0,2\% \text{ a } 20 \pm 2^\circ \text{ C})}{[a (\pm 0,1\%)]^2 \times L (\pm 0,4\%)} \longrightarrow \pm 0,8\%$$

$$V (\pm 0,2\%)$$

$$f_a (\pm 0,2\%) \times \Phi (\pm 0,1\%) \longrightarrow \pm 0,3\%$$

Se supone que f_p y $f(\dot{X})$ poseen errores inferiores al 0,1%. Luego, el error máximo para la dosis medida y corregida asciende a $\pm 1,3\%$.

El efecto de borde en el diafragma se supone inferior al 0,1%.

La pérdida eléctrica es insignificante normalmente, excepto si existe una radiación de fondo importante.

La relación foco-diafragma conduce a los siguientes factores: 1) La conicidad del volumen activo exige una corrección cuyo valor es máximo para la distancia focal mínima de 30 cm y el diafragma de 2 cm de diámetro, y vale + 0,05%; 2) El foco (supuesto puntual) fuera de la prolongación del diafragma produce el "efecto túnel". Si t (3 mm) es la longitud de la sección cilíndrica del diafragma y Z_0 la distancia focal, entonces $t/Z_0 \leq 0,01$ para nuestra cámara, siendo la igualdad el caso más desfavorable. Para este caso, y con el diafragma menor de 6 mm de diámetro, se tienen los errores de 0,1% y 1% respectivamente, para las desviaciones de 4 mm y 9 mm del foco respecto del eje del diafragma y que corresponden a los ángulos $0,75^\circ$ y $1,65^\circ$. La tolerancia de las medidas en la construcción de la cámara implica pues un error inferior al 0,1% en la alineación. Suponiendo en ± 1 mm el error del alineador en la pantalla fluorescente a la salida de la cámara, ello equivale a una desviación de 2 mm del foco respecto del eje, o sea, un error menor que 0,1%.

En conclusión, si a los factores no explícitos en los cálculos se les adjudica un error máximo global de $\pm 1\%$, el error máximo total de la dosis medida resulta de $\pm 2,3\%$.

Es preciso destacar que en las consideraciones anteriores se ha omitido la corrección del campo eléctrico. Las desviaciones de sus líneas críticas, evaluadas en (I-4), pueden incrementar significativamente la acotación anterior.

Por otra parte, nunca los errores se suman todos en el mismo sentido. Existiendo tantas fuentes de errores, el error máximo debe ser sustituido por el error medio dado por la ley de propagación; este dato exige el conocimiento explícito de todas las fuentes del error. Si solamente se consideran los factores explícitos, obtenemos la acotación $\pm 0,6\%$.

II-La cámara transmisora

Ante la necesidad de una monitora de haces para bajas energías, se optó por un diseño basado en la cámara de aire libre y sin ventana, excepto una delgada lámina de Mylar con depósito conductor de aluminio para corrección del campo eléctrico. Se obvian así los problemas de pérdidas eléctricas, inestabilidad del volumen colector, y una excesiva dependencia en energía.

Para definir las dimensiones, materiales y disposiciones, se consideraron la calibración de dosímetros a 30 cm de distancia focal con campos de $\Phi 6$ cm e intensidades de radiación en toda la gama que admite la cámara de bajas energías.

Características: a) Integralmente hecha en aluminio, con soportes aisladores de Teflón y Perspex.

- b) La única colectora es similar a la placa más corta de la cámara primaria. Debido a la ausencia de la jaula de hilos correctores, la zona de la placa es accesible desde el exterior, con fines experimentales, para ensayos de interés para la cámara standard (efectos superficiales, de desniveles, de las placas correctoras de campo, de las recombinaciones, etc).
- c) Distancia entre la placa de guarda y la de alta tensión (A.T.): 6 cm. Tensión de polarización: 2000V. El conjunto placas de guarda - A.T. se puede extraer de la caja. La guarda es aislable de la caja.
- d) 3 placas correctoras de campo similares a las de la cámara primaria; pero con el divisor de potencial fijo a un compartimiento separado en la caja. En la ventana de salida las placas se continúan con láminas de Mylar aluminizado, con el fin de evitar interferencias sobre el campo eléctrico durante las calibraciones.
- e) No existen colimadores propios pues el haz debe ser colimado antes de su entrada a la transmisora, con un diámetro inferior al de la ventana de entrada. Tampoco se necesita del sistema alineador.
- f) El espesor (largo) de la cámara transmisora se ha reducido a su valor mínimo

compatible con la corrección del campo eléctrico, o sea, con el ancho de la placa de guarda.

- g) En cuanto al respectivo electrómetro, no sólo debe poseer varias escalas y elevada estabilidad y linealidad, sino cumplir con la condición de la compensación electrométrica (entrada a tierra virtual).

III. Realizaciones en el Departamento de Instrumentación (CNEA)

En razón de las dificultades para adquirir los electrómetros adecuados para ambas cámaras, tratadas anteriormente, se hicieron adaptaciones y controles en un electrómetro de "lengüeta vibrante", y se construyó otro basado en un conversor de "puente de varactores". Aparte de estos instrumentos, en el Departamento de Instrumentación se terminaron y se evaluaron todas las partes eléctricas de ambas cámaras, como así los controles de las respectivas fuentes de alta tensión.

Debido a las fluctuaciones del generador de Rayos X, a la pequeñez de las corrientes a medir, y a que los dosímetros poseen escalas de integración, los electrómetros deben ser de carga. Por otra parte si las placas de guarda de las cámaras están a tierra, las colectoras deben estar a tierra virtual, o sea, con sobretensiones ínfimas. Según las características de ambas cámaras, una ganancia de potencial de $A = 10^3$ es suficiente para que la anterior condición pueda ser satisfecha.

III-1. Electrómetro de lengüeta

- a) Marca "Cary 32 serie 177" de la "Applied Physics Corp." de California.
- b) Capacidad variable (senoidal) de 25 pF con frecuencia de 435 c.p.s. Ganancia total de tensión de 10^3 . Resistencia en serie de entrada: $200\text{ M}\Omega$, reemplazada provisoriamente por $100\text{ M}\Omega$. Tal vez convenga utilizar un valor superior. Tensión máxima de salida de $\pm 10\text{ V}$ (realimentación negativa)
- c) El eje de entrada al conversor, blindado, de baja capacidad, recibe el contacto de la aguja de la llave manual de descarga, diseñada para reducir al mínimo los "ruidos" durante su operación.

Sobre el cilindro blindante del eje de entrada se montó otro cilindro para contener los capacitores calibrados (en $20^\circ \pm 2^\circ$). Este recipiente adquiere mayor temperatura que la ambiental debido a la transmisión del calor desde el chasis, que se calienta a considerable temperatura.

La selección de estos capacitores requirió un extenso ensayo (pérdidas, es-

tabilidad en función de la temperatura y el tiempo; absorción de cargas), decidiéndose por los "Mallory" con dieléctrico de polistireno.

- d) El "cero" del electrómetro es estable. La corriente de pérdida es suficientemente baja. El voltímetro de salida es impreciso, por lo cual se acopló un voltímetro calibrado de lectura digital con fondo de 100 mV.
- e) La medida de la carga integrada es el producto $CV=Q_m$ con C = capacidad de integración y V = tensión sobre las armaduras del capacitor. Su factor de corrección para obtener la carga verdadera Q_v vale

$$\frac{Q_v}{Q_m} = 1 + \frac{1}{A} + \frac{\sum C_i}{AC} - \frac{\sum C_j \Delta V_j}{CV}$$

donde

A = ganancia de tensión

C_i = capacidades parásitas respecto de la tierra

C_j = capacidades parásitas cuyas armaduras externas sufren una variación de su tensión ΔV_j durante la medición.

III-2. Electrómetro de varactores

Sobre este instrumento existe un manual completo donde se fundamenta, se describe y se dan las instrucciones de su operación y control:

- a) Fue construido en la Sección de Armado con la denominación de "Electrómetro de carga con puente de varactores Modelo 3"
- b) El amplificador electrométrico es el "Analog Devices" AD 310.
- c) La llave de descarga, la de entrada y la de las escalas se basan en las llaves de lengüeta magnética "Hamlin".
- d) Sobre los capacitores de integración vale lo dicho para el caso del electrómetro de lengüeta vibrante.
- e) Como en el caso del electrómetro anterior, el voltímetro de salida debe ser provisto por separado. Ya han sido licitados a través de la CNEA.
- f) Dada la elevada amplificación del AD310 ($A= 10^5$) el factor de corrección se reduce (ver III-1-e) a:

$$1 - \frac{\sum C_j \Delta V_j}{CV} \quad ; \text{ a esta expresión hay que sumar otro térmi-}$$

$\frac{\sum C_{Lh}}{C}$, debido a la presencia de las llaves de escalas C_{Lk} .

- g) Este instrumento requiere un sistema de desecación.
- h) El error medio para corrientes superiores a 10^{-12} A es de $\pm 0,3\%$.
- i) Existe un recinto accesible desde el exterior, destinado para realizar ensayos de componentes, circuitos y dispositivos eléctricos.

IV.- Futuras realizaciones

- a) Intercomparación con otras cámaras patrones.
- b) Supresión del disco de epoxy y el uso de fantomas.
- c) Uso de hilos correctores de mayor espesor de varillas.
- d) Efectos de borde en los diafragmas.
- e) Fuente de alta tensión de ambas polaridades.
- f) Cálculo y observación de líneas críticas del campo eléctrico.
- g) Sacar fuera de la caja los divisores de tensión.
- h) Efectos de humedad y otros gases (determinaciones)

RECONOCIMIENTOS

Se agradecen las colaboraciones prestadas por Carmen Cecilia Fidalgo (composición dactilográfica) e Ignacio B.Mayans (armado del electrómetro), y al Ingeniero Hugo A.Mugliaroli por la revisión crítica efectuada en el manuscrito.

REFERENCIAS

- 1.- Oosterkamp, W.J.; Proper, J. Free -air and Thimble Ionization Chambers for Grenz-Ray Dosimetry. Acta Radiologica, Vol 37; 1952.
- 2.- Attix, F.H.; De La Vergne, L. Plate Separation Requirements for Standard Free Air Ionization Chambers. Radiology 63; 1954.
- 3.- Wyckoff, H.O.; Attix, F.H. (1957) Design of Free-Air Ionization Chambers N. B.S. Handbook 64.
- 4.- Ritz, V.H. Design of Free-Air Ionization Chambers for the Soft X-Ray Region (20-100 KV) Radiology 73; 1959.
- 5.- Ritz, V.H. (1959) Standard Free-Air Chamber for the Measurement of Low Energy X-rays (20 to 100 KVp). Journal of Research of N.B.S. Vol 64 C, N° 1, Jan-March - 1960.
- 6.- Lamperti, P.J.; Wyckoff, H.O. (1964) N.B.S. Free- Air Chamber for Measurement of 10 to 60 KV X Rays. Jour of Research of the N.B.S- Vol 69 C, N° 1, Jan-March 1965.
- 7.- Kaye, G.W.C.; Binks, W (1933) An Intercomparisons of the Roentgen- The Unit of Quantity of X Rays. Brit. J. Radiol. Vol 6 - 1933.
- 8.- Aston, G.H.; Attix, F.H. An Intercomparison of the Roentgen Standards of Great Brittain and U.S.A. Acta Radiologica Vol 46-1956.
- 9.- Aitken, J.H.; De La Vergne, L; Henry, W.H.; Loftus, T.P. (1961). Comparison of United States and Canadian free-air ionization chambers. Brit. J. Radiol. Vol 35 N° 409- Jan. 1962.
- 10.- Boutillon, M; Henry, W.H.; Lamperti, P.J. (1968); Comparison of Exposure Standards in the 10-50 KV X-Ray Region Off print of "Metrología", International Joun. of Scientific Metrology.
- 11.- Fowler, J.F.; Farmer, F.T. Insulators for Radiological Instruments Brit.J. Radiol. 1956; Vol XXIX; N° 338.
- 12.- Hubner, W. Un diagrama para la corrección de las recombinaciones en las cámaras de aire libre y placas paralelas.
- 13.- Scott, P.B.; Greening, J.R. (1962). The Determination of Saturation Currents in Free-air Ionization Chambers by Extrapolation Methods. Phys. Med. Biol., 1963, Vol 8, N° 1, 51-57.
- 14.- Boag, J.W. (1963) Space Charge Distortion of the Electric Field in a Plane-Parallel Ionization Chamber. Phys. Med. Biol. 1963, Vol 8, N° 4, 461-467.

- 15.- Aitken, J.H. An Analysis of the Free-Air Ionization Chamber for Extended Sources of Radiation.
- 16.- Palewski, H; Swank, R.K.; Grenchik, R. Design of Dynamic Condenser Electro meters. The Review of Scientific Instruments Vol 18, N° 5, Mayo 1947.
- 17.- Schertskoy, S.A.; Gilmartin, Th.H; Swift, G. The Capacitative commutator. The Review of Sci. Instr. Vol 18, N° 6, Junio 1947.