

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1976

09.76.06

CNEA-NT 6/76

REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

AREA DE RADIOISOTOPOS Y RADIACIONES

LA ORGANIZACION DEL CENTRO REGIONAL DE REFERENCIA CON PATRONES
SECUNDARIOS DE RADIODOSIMETRIA (CNEA - OMS - IAEA)

FUNDAMENTOS; INSTRUMENTOS; METODOS; SERVICIOS Y MANTENIMIENTO

POR

J.NAKASONE

BUENOS AIRES

1976

RESUMEN

EL CENTRO REGIONAL DE REFERENCIAS CON PATRONES SECUNDARIOS DE RADIODOSIMETRIA - CRR

Se estableció en 1969 por convenio entre la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Organización Mundial de la Salud, con la colaboración del Organismo Internacional de Energía Atómica. Es el primer Centro, entre los varios que operan actualmente en el mundo. Su función es la calibración de los dosímetros provenientes del área latinoamericana proveyendo los certificados correspondientes.

Algunas cuestiones importantes resueltas durante su organización:

- 1) Cámara Kustner-Pychlau - Determinación de la fórmula de corrección para pérdidas eléctricas (drift). Análisis de los drift medidos y su comparación con los datos del P.T.B. (Alemania). Interpretación de las mediciones del drift y la hipótesis sobre el cabezal de detección de la cámara.
- 2) Dosímetro Simplex DUO (PTW) - Pérdidas eléctricas; orígenes, correcciones y mediciones. Control radiactivo y sus variaciones con el tiempo; análisis.
- 3) Dependencia en la intensidad de dosis de los dosímetros de integración digital- Cociente de las lecturas simultáneas de dos dosímetros y sus variaciones con la intensidad de dosis. Serie de Laurent y los factores que definen sus coeficientes; verificación experimental. El generador de rayos X como una fuente compleja de radiación.
- 4) Datos y métodos de calibración - Factorización del factor de calibración y sus aplicaciones. Interpretación del control radiactivo de los dosímetros y sus variaciones. Métodos de calibración por intercambio de dos y tres dosímetros; para casos de varias escalas; y cuando faltan algunos componentes del instrumento. Análisis para el cálculo de los errores de calibración.
- 5) Método de la cámara intermedia - Se necesita para la calibración de dosímetros cuya intensidad de dosis y el campo de radiación difieren de aquéllos correspondientes al patrón. Uso del haz auxiliar y de las láminas equivalentes al aire. Pasos detallados de la operación.

SUMMARY

THE REGIONAL REFERENCE CENTER WITH SECONDARY STANDARDS OF RADIATION DOSIMETRY (R.R.C.)

This R.R.C. was established in 1969 by the Comisión Nacional de Energía Atómica of Argentina in agreement with the World Health Organization and the collaboration of the International Atomic Energy Agency. It is the first of the several Centers established and operating now around the world. Its basic function consists in the calibration of the radiation dosimeters sent by Latin American countries and supplying the respective certificate. The organization and operation of the Center is described and some important technical questions are discussed:

- 1) Kustner-Pychlau Chamber - Determination of the correction formula for electrical losses (drift). Analysis of the measured drifts and its comparisons with those from the Physikalisch - Technische - Bundesanstalt (Germany). Interpretation of the drift measurements and the assumptions on the chamber detection head.
- 2) PTW Simplex DUO dosimeter - Electrical losses; origins, corrections and measurements. Radioactive control and its variations with time.
- 3) Digital integration dosimeters and their dependence on dose rate. Simultaneous reading ratio of two dosimeters and its variations with dose rate. The Laurent series development; factors influencing its coefficients; its verification. The X-ray generator as a complex radiation source.
- 4) Calibration data and methods - Factoring of the calibration factor and its applications. Analysis and interpretation of the dosimeters radioactive control and its variations. Calibration methods by interchanging two and three dosimeters, for multiscale cases and when some instrument components are lacking. Analysis of the calibration error calculation.
- 5) Intermediary chamber method (needed for calibrating dosimeters whose dose-rate and radiation field differ from those of the reference instrument). Use of the auxiliary beam and air - equivalent sheets. Detailed operation steps.

INTRODUCCION

Se publica este informe como complemento bibliográfico para éste y otros Centros de Calibración similares; por lo tanto no se pretende ser exhaustivo. Es una recopilación de los resultados obtenidos en los tres años que requirió la organización del Centro Regional de Referencias (C.R.R.) en los aspectos de fundamentación, metodología, instrumentación, mantenimiento y servicios. Se han completado las condiciones esenciales para la marcha normal del Centro, el cual es el primero en la serie de centros similares establecidos en todo el mundo.

I - ORGANIZACION

I-1. Convenio

El Centro de Calibración, establecido en 1969 en la División Fuentes Intensas de Radiación por convenio suscripto entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) con la colaboración del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) tiene por misión esencial lograr las condiciones indispensables para la calibración normal de los dosímetros de radiación para aplicaciones e investigación, y de dosímetros de radioprotección sanitaria, provenientes del área latinoamericana, proveyéndoles los certificados correspondientes.

La organización comprendió las etapas siguientes:

1º) Provisión de instalaciones y fuentes de radiación; 2º) Provisión de patrones secundarios por la OMS; 3º) Fijación de una metodología general de calibración para los diversos patrones y tipos de dosímetros; 4º) Iniciación de calibraciones certificadas; 5º) Desarrollo de nuevos dosímetros primarios y de transferencia y mantenimiento al día de los existentes.

I-2. Elementos del CRR

- 1) Dosímetros de referencia
- 2) Fuentes y haces de radiación
- 3) Metodología de las diversas actividades
- 4) Instrumentos auxiliares
- 5) Mantenimiento de los items anteriores

I-3. Servicios de calibración

1) Información a los usuarios sobre los servicios del CRR e indicaciones sobre el uso adecuado de los equipos. Los dosímetros se envían al CRR acompañados de diagramas de funcionamiento y datos de anteriores calibraciones.

2) Información para el CRR sobre las energías e intensidades de radiación y la forma de uso de cada cámara, como así sobre los problemas de los instrumentos.

3) Controles previos de los equipos recibidos para su aceptación, observación, devolución o posibles reparaciones, indicando los fundamentos.

4) Controles sistemáticos previos a la calibración (guía N°2 para operadores).

5) Procesos de calibración (guías 6;7;8 y 9)

6) Preparación de Informes.

7) Devolución de los equipos y envío de los correspondientes certificados.

I-4. Instalaciones del CRR

1) Sala climatizada para la calibración en rayos X de energías medianas y bajas.

2) Sala de la unidad de cobaltoterapia y fuentes móviles de Co 60 y Cs 137. Esta sala y la anterior poseen líneas de tensión estabilizada por núcleo saturado.

3) Sala de pequeñas fuentes radiactivas

4) Laboratorio de recepción y controles previos de los dosímetros.

5) Laboratorio de dosimetría general.

6) Oficina de archivos.

I-5. Equipos standards de calibración

1) Cámara patrón secundario de aire libre Kustner-Pychlau (PTW), para energías medias de rayos X. Con dos fuentes radiactivas de control, y un sistema duplicado de medición (fuente de alta tensión; amplificador de pulsos; panel de control a distancia; cronómetro).

2) Tres electrómetros PTW Simplex DUO de válvula electrométrica, especiales para los CRR, con un total de 2 cámaras dedales (standards en Co-60 y Cs 137); 2 cámaras de transmisión (monitoras de haces de rayos X); 2 cámaras de radiación dispersa (referencias para monitores de radioprotección); 1 cámara para radiaciones blandas. Exceptuando las de transmisión, todas las cámaras poseen fuentes selladas de Sr 90, para su control.

3) Sistema de calibración en bajas energías de rayos X, consistente en a) Cámara primaria de aire libre y placas paralelas, sin ventana. b) Cámara de transmisión derivada de la anterior. c) Fuentes de alta tensión variable. d) 2 electrómetros de gran estabilidad y precisión para la medición de cargas eléctricas.

I-6. Instrumentos auxiliares esenciales

- 1) Cronómetros
- 2) Punteros
- 3) Barómetros
- 4) Termómetros
- 5) Higrómetros

I-7. Cotas de errores en el CRR

Se agrupan según las etapas de la standardización:

- A- Error del Standard Primario
- B- Error en la calibración primaria
- C- Error por cambio de condiciones entre los laboratorios primario y secundario (espectros; sistema de colimación del haz; dispersiones en el contorno).
- D- Error en la calibración secundaria, debido tanto al proceso de calibración como a las fluctuaciones del Standard Secundario.
- E- Error por diferencia de condiciones entre el laboratorio secundario y el lugar de uso.

F- Contribución por uso de cámaras intermedias o de transferencia en los métodos indirectos de comparación.

Se estiman actualmente, en cifras redondas:

A= $\pm 1\%$; B=D= $\pm 1\%$; C= $\pm 1\%$; E $\pm 2\%$; F= $\pm 1\%$

Normalmente no se consideran los errores debidos a la contribución del dosímetro calibrado. Si bien se consignan sus fluctuaciones.

El error total más probable es la media cuadrática de los términos mencionados.

II - DESARROLLOS INSTRUMENTALES

II-1. Se han construido y realizado las primeras evaluaciones del sistema de calibración primaria en bajas energías de rayos X. La información técnica se publica por separado. Se basa en una cámara de ionización de aire libre.

II-2. Se encuentran en marcha los trabajos relativos a la construcción de un sistema de calibración primaria en altas energías de radiación, basado en un dosímetro calorimétrico y un detector de transferencia.

III - TEMAS ENCARADOS DURANTE LA ORGANIZACION DEL CRR

III-1. Pérdidas eléctricas en la cámara Kustner- Pychalu

Se trata de interpretar los métodos y resultados de las mediciones de pérdidas. Se logra con ello una comprensión básica del funcionamiento de este standard.

III-2. Controles de estabilidad y pérdidas en el Simplex - DUO N° 1

Los Simplex DUO son electrómetros a válvulas electrométricas, con salida digital. Se explican los resultados de las mediciones mediante los controles externos.

Se disponen de tres de estos equipos, usándose con cámaras de referencia terciarias y para monitoreo de haces. Se corrigen sus variaciones mediante controles radiactivos propios.

III-3. Efecto de la humedad del aire

Una breve deducción de la fórmula de corrección de la dosis en el

aire con presencia de vapor de agua u otros gases.

III- 4. Los datos y los métodos de calibración

Se fundamentan los procedimientos y las fórmulas para los controles de los dosímetros, los diversos métodos de calibración y los cálculos de errores.

III-5. Proceso de calibración con la mediación de una cámara auxiliar

Se enumeran los pasos ordenados para lograr una aplicación correcta del método. Si bien se refiere al Standard Kustner-Pychlau, el proceso es generalizable a cualquier otro dosímetro de referencia.

III-6. Certificados de calibración

Se logró un formulario de referencia sobre la base de los informes expedidos durante todo el primer año después de iniciadas las calibraciones regulares. Se han calibrado numerosos tipos de dosímetros, variando sus electrómetros, sus cámaras, sus sistemas de control y sus estados de funcionamiento.

III-7. Dependencia en la intensidad de dosis de los dosímetros del tipo de integración digital

Se encara el problema de la dependencia en la intensidad de radiación, de los monitores de haces Simplex DUO, facilitando la comprensión del fenómeno.

III-8. Guías para los operadores

Con el fin de facilitar las tareas de los operadores en el mantenimiento de los standards y los trabajos de calibración, se ha redactado un conjunto de guías acerca de los siguientes temas. Entre paréntesis se indican sus números de identificación.

a) Controles previos de los dosímetros ingresados. Son datos que deben conocer los usuarios y los operadores cuando se inicia la revisión de los equipos pues pueden significar la aceptación o no de los mismos (2).

b) Controles de los instrumentos de referencia. El instrumental esencial para las calibraciones es sometido a controles periódicos

para constatar sus estados. (3)

c) Fallas en los dosímetros. Casos habidos o posibles, y modos de solucionarlos. (4).

d) Método de calibración por sustitución con el standard Kustner. Etapas sucesivas en el uso normal del standard secundario (6).

e) Intercomparación de fuentes y cámaras. Una manera rápida de detectar anomalías en las cámaras y en sus fuentes radiactivas de control (1).

f) Calibración con la cámara primaria para la región de bajas energías de radiación X. Pasos sucesivos en el uso de la cámara primaria (7).

g) Mediciones de pérdidas eléctricas. Procedimiento de medición de pérdidas en la cámara Kustner (5).

h) Planillas usadas en el CRR. Explicaciones sobre el uso de las planillas existentes con el fin de lograr eficiencia y seguridad en las operaciones del CRR (8).

i) Puntero mecánico y luminoso. Indicaciones para el manejo de los punteros para la ubicación de las cámaras (9).

j) Disposiciones de algunos dosímetros. Diagramas eléctricos comparativos de los dosímetros más usuales, standards o de campo (10).

IV - CALIBRACIONES REALIZADAS

Las calibraciones certificadas se realizan regularmente desde fines de 1972. En el lapso de dos años, desde entonces, se han efectuado los siguientes servicios:

IV-1. Dosímetros

1) Latinoamericanos

1 Victoreen

1 Siemens

1 Farmer

2) Argentinos (excepto de la CNEA)

3 Philips

4 PTW Simplex Universal (2 repeticiones)

2 Victoreen

3) De la CNEA (excepto del CRR)

2 Philips (1 repetición)

3 Victoreen (1 repetición)

1 PTW Simplex Universal

IV-2. Monitores de Radioprotección (Argentinos, excepto de la CNEA)

2 Philips

3 Nuclear

2 Geiger-Muller

1 Stephen Quartz Fiber

V - INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)

Este Instituto, a través de su laboratorio de metrología, cumple un rol esencial en el desarrollo de patrones absolutos de radiación y en su mantenimiento permanente. Es por ello, que el CRR al formar parte de la Comisión Nacional de Metrología, establece un nexo legal y la necesaria vinculación natural con el INTI.

-----0-----

APENDICE III-1

Pérdidas eléctricas en la cámara Kustner-Pychlau

INTRODUCCION

Se trata de controlar la calidad de la aislación en la cámara de ionización mediante una fuente radiactiva colocada en un adaptador de acuerdo al manual del instrumento.

Se mide el tiempo correspondiente a un paso: t_0 . Luego, en una segunda prueba se extrae la fuente en el instante t_1 .

Después de media hora se reinserta la fuente, al tiempo que se pone en funcionamiento el cronómetro para medir el tiempo t_2 hasta completar el paso. Una buena aislación dará $t_1 + t_2 = t_0$.

El prospecto dice que en caso de aislación insuficiente se tendrá $t_0 < t_1 + t_2$, vale decir habrá una fuga neta de carga positiva.

Mediciones de $t = t_1 + t_2 - t_0$

Por la lentitud del método del adaptador no se pudo obtener más datos como sería de desear dados los grandes errores que implica cada valor de t . En efecto:

1) Los porcentajes de humedad que se dan corresponden al exterior de la cámara, ya que se mantuvo colocado el frasco secador en todo momento. Se ignoraba así el verdadero valor de la humedad y sus variaciones dentro de la cámara.

2) Las temperaturas medidas en el exterior de la cámara oscilaron entre 22° y 25°C . La verdadera temperatura interna era desconocida. Si la suponemos diferente en $0,5^\circ\text{C}$ a la exterior, el error sería de ± 1 seg. para t .

3) El método implica errores de observación de $\pm 0,5$ seg para cada t .

4) Debido a dificultades en la medición de p , se omitieron las correcciones por $\Phi(p,T)$, observando que

a) entre las mediciones de $t_1 + t_2$ y t_0 media a lo sumo 1 hora, por lo que $\Phi(p,T)$ varía solo en algunos milésimos.

b) t vale a lo sumo 4 seg y carece de sentido anotar los centésimos de segundo. Luego, las correcciones que afecten al 2,5% o menos se omiten. $\Phi(p,T)$ osciló entre 1 y 1,025.

En el método del adaptador se obtiene $i_p = i_0 \cdot t/\Delta t$. t depende de t_1 . Llamando τ a t_1/t_0 , tenemos que

$$t = t(\tau) \quad ; \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

Su valor medio es:

$$\bar{t} = \int_0^1 t(\tau) d\tau \quad ; \quad \bar{i}_p = i_0 \bar{t} / \Delta t$$

Se deduce que $\bar{t} = t(0,5)$ para casos de rectas. Lo ideal es diseñar el dosímetro de modo que $\bar{t} = 0$.

El valor $\bar{t}$ se determina de una vez para todos los casos si la for-

ma de la función es fija, variando sólo la escala según el grado de pérdidas, las que normalmente dependen de la humedad absorbida en los aisladores. En tal caso, es suficiente medir un t correspondiente a un τ_0 tal que

$$t(\tau_0) = \bar{t}$$

El factor de corrección es

$$F = \left(1 + \frac{t_{ra}}{t_0} \frac{\bar{t}}{\Delta t} \frac{t_m}{t_{ra}} \right) / \left(1 + \frac{t_{ra}}{t_0} \frac{\bar{t}}{\Delta t} \right)$$

donde t_0 es el tiempo de un paso correspondiente a la corriente i_0 producida por la fuente en el adaptador; idem t_{ra} para la fuente de control radiactivo y t_m para la medición; Δt es el tiempo durante el cual se mantiene alejada la fuente del adaptador.

Resultados

Se utilizó $\Delta t = 15$ min debido a la lentitud del método. Para una dada $i_p(\tau)$, debe ser $t/\Delta t = cte(\tau)$. Por lo tanto se espera que t duplique para $\Delta t = 30$ min. Las mediciones contradicen esta previsión, al menos para las pérdidas (no significativas) observadas.

Se hizo una serie de mediciones para $\tau = 0$ y $\tau = 1$, en función de Δt . Se observa lo siguiente:

1) Hay un corrimiento de t que pudiera atribuirse al sistema de freno y arranque del cronómetro. Es pues una filtración aparente.

2) La linealidad se cumpliría hasta unos pocos minutos de Δt . Luego las curvas tenderían a valores constantes

Se trataría de una pérdida que se amortigua rápidamente no respondiendo a una ley óhmica sencilla.

Mediciones del Drift $\frac{\delta n}{\delta t}$ en el P.TB.

En el método del drift el factor de corrección tiene la forma siguiente:

$$F = \left(1 - \left(\frac{\delta n}{\delta t} \right) t_m \right) / \left(1 - \left(\frac{\delta n}{\delta t} \right) t_{ra} \right)$$

igualando esta expresión con la correspondiente al método del adaptador obtenemos

$$\left(\frac{\delta n}{\delta t}\right) = - t / t_0 \Delta t$$

Luego

$$i_p = - i_0 t_0 \left(\frac{\delta n}{\delta t}\right)$$

Con el fin de interpretar los datos del drift dados en el certificado del P.T.B. se hizo una hipótesis acerca del diseño de la cámara Kustner, basada en diagramas de su manual.

Suponiendo $C_0 \gg C_K, C_2, C_3$ y $R_0 \ll r_1$, (ver figuras), se llega a la expresión

$$i_p = i_{p1} - i_{p2} = - B/r_3 + \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\right) i_K t / (C_2 + C_3 + C_K)$$

donde se ha omitido un término exponencial bajo ciertos supuestos. La condición para $\bar{i}_p = 0$ es

$(1 + r_3 / r_2) / (C_2 + C_3 + C_K) = 2 B / Q$ siendo Q la carga por paso y vale $1,53 \times 10^{-9}$ Coul y por lo tanto es $i_0 = 0,78$ pA.

Obtenemos la siguiente acotación

$$C_2 + C_3 + C_K > 1 \text{ pF}$$

Análisis de los datos

1) A porcentajes moderados de humedad hay compensación entre las cargas perdidas y ganadas.

2) Hay linealidad de la función con pendiente creciente con la humedad. Se justifica por lo tanto medir t en $\tau = 0,5$ para obtener $\bar{t}$.

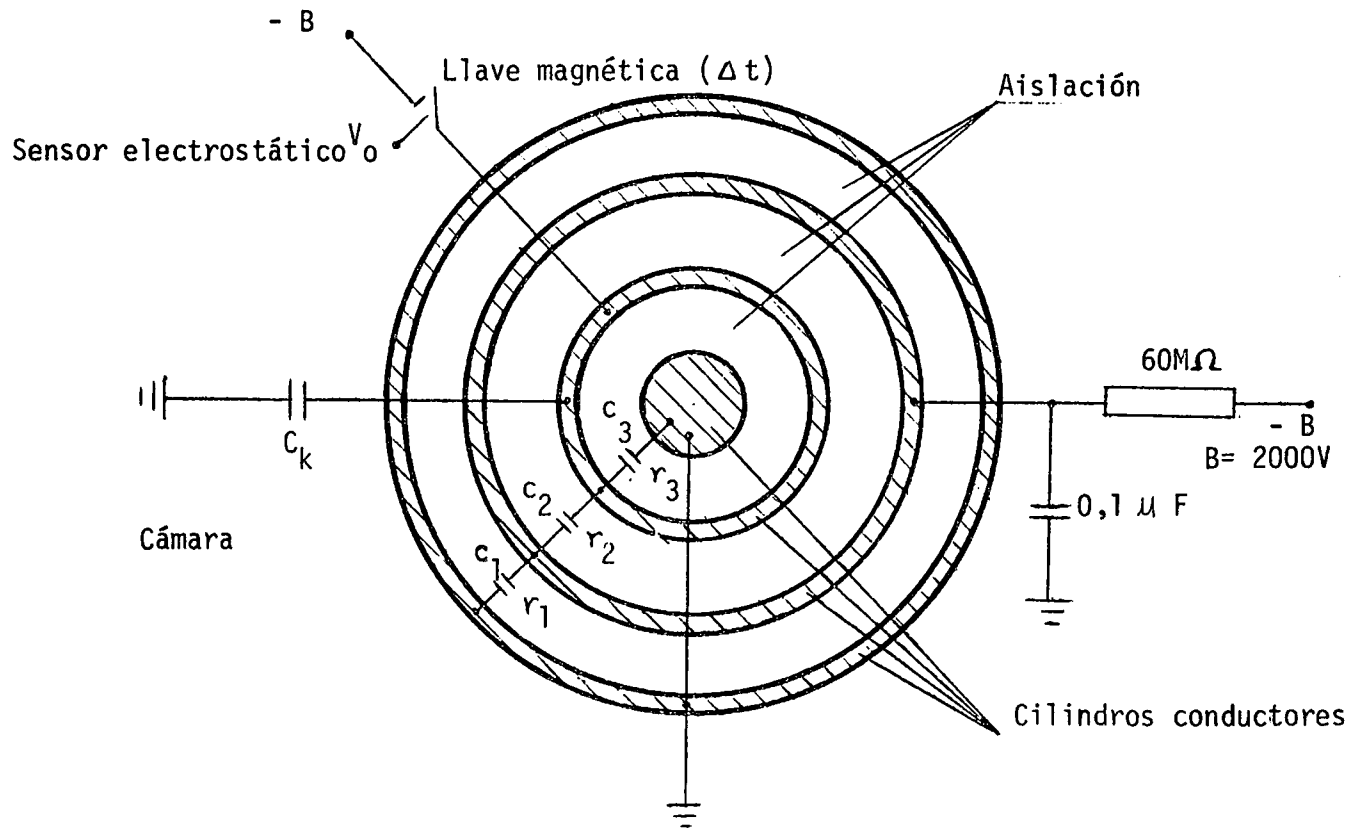
3) r_3 va deteriorándose con la humedad creciente: pero para 88% ya la expresión de $i_p(\tau)$ carece de validez.

Se dice en el Manual de Instrucciones que $t_1 + t_2 > t_0$; o sea que $\bar{t} > 0$. Esto implica

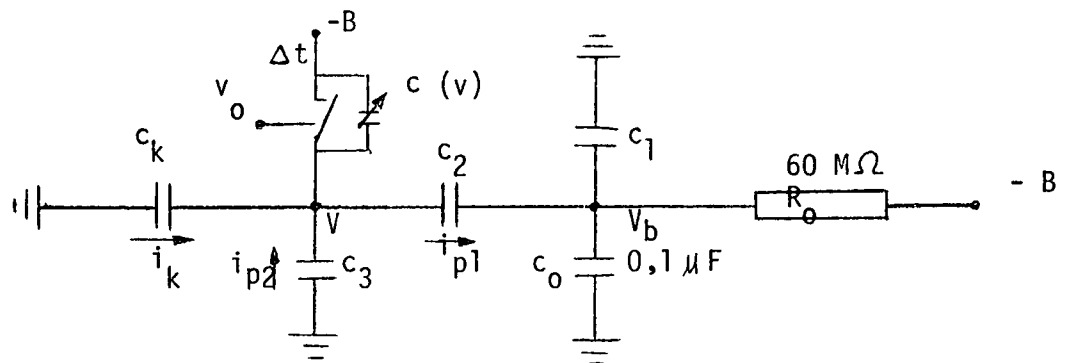
$$1 + r_3 / r_2 \geq 2 B (C_2 + C_3 + C_K) / Q$$

vale decir que r_2 se deteriora más rápido que r_3 con la humedad, lo cual su-

DIAGRAMA DEL CABEZAL DETECTOR



CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE



giere que $C_2 > C_3$.

Si usamos la acotación dada para $C_2 + C_3 + C_k$ para 70% de humedad se obtienen estas otras:

$$r_3 = 1,6 \times 10^{15} \Omega$$

$$r_2 < 10^{15} \Omega$$

ACLARACION - La igualación de los dos factores de corrección no es condición suficiente para la igualdad

$$\frac{\delta n}{\delta t} = - t / t_0 \Delta t$$

Esta relación se obtiene de esta otra:

$$i_p = i_0 t / \Delta t \text{ por analogía entre ambos métodos de corrección.}$$

APENDICE III-2

Controles de estabilidad y pérdidas en el DUO 1

Introducción

Múltiples causas contribuyen a la precisión total del equipo. Algunas se traducen en factores de corrección (pérdidas eléctricas; dependencia en energía; intensidad de exposición); hay otras cuyos efectos se acotan (tamaño de campo; estabilidad; contador parcial; humedad ambiental); y otras que se regulan previamente (tiempos de un paso, tensiones eléctricas; disposición de la cámara)

Por debajo de los 190 V en la tensión de línea, se produce un descenso en el tiempo de control radiactivo. Este se mantiene estable en el intervalo 190 V - 250 V.

Irradiando el preamplificador con un haz de 100 kV y 9 R/min, no se observa variación en el tiempo de control; en cambio con un haz de 200 KV y 27 R/min, se incrementó en 4% por emisión de electrones que son recogidos por el sistema colector.

Las experiencias se centraron en los controles de tiempo, su estabilidad y pérdidas eléctricas para la cámara normal y la de radiación dispersa. La temperatura ambiental osciló entre 15° C y 26° C; y la humedad, entre 30% y el 70%.

Pérdidas eléctricas

Sean i_p la corriente de pérdida, $\bar{i}_p$ su valor medio, i_m la corriente de ionización, t_m el tiempo de un paso durante la medición. Entonces, el factor de corrección de las lecturas del instrumento por efectos de pérdidas es

$$F_p = \frac{i_m - \bar{i}_p}{i_m} = 1 - \frac{\bar{i}_p}{i_m}$$

asignando al signo positivo de i_p el mismo sentido de la corriente de ionización i_m , y realizando el promedio sobre toda la escala del contador parcial.

Definiendo

Q = carga requerida para un paso completo

$$i_m = \frac{dq}{dt_m} = \frac{Q}{t_m}$$

$$i_p = \frac{dq}{dt_p}$$

$$d\tau = dq / Q$$

$$\frac{d\tau}{dt_p} = D = \text{drift, se obtiene}$$

$$F_p = 1 - \bar{D} t_m$$

La corriente i_p posee tres componentes: 1) la debida a la deficiente aislación de la tensión de polarización de la cámara respecto del colector, i_{po} ; 2) Idem del colector respecto de la tierra, i_c ; 3) la corriente de rejilla de la válvula electrométrica, i_g .

Para la cámara normal, la corriente de control radiactivo se estima en alrededor de $I_n = 10^{-11}$ A. i_{po} es independiente de P_3 , el potenciómetro que regula el tiempo de cada paso. En cambio, $i_g + i_c$ depende principalmente de P_3 ; recorriendo entre 0 y 1, sus extremos, se obtienen

P_3	$i_g + i_c$
1,00	- 4,21 I_n
0,90	- 0,70 I_n
0,80	- 0,14 I_n
0,57	- $i_{po} = - I_n / 620$

Estabilidad del tiempo de control radiactivo, tra

Siendo el error del cronometraje manual de $\pm 0,1$ seg, es imposible es-

tudiar las estadísticas de las fluctuaciones entre pulsos sucesivos. Para eludir los efectos de dicha limitación, se midieron tiempos correspondientes a $n=5$ y 10 pasos consecutivos. La cantidad de mediciones sucesivas de n pasos se designa con N , siendo σ_N la desviación standard de los N datos. Se dice que un período es largo si abarca algunas o varias horas, y se denomina Δ , siendo entonces σ_Δ la desviación standard general de todas las mediciones habidas en el intervalo Δ . El tiempo correspondiente a un paso es t_{ra} , que fue de unos 9 segundos.

Se llama corrimiento la variación gradual y regular que experimenta t_{ra} con el transcurso del tiempo; y no se lo considera como parte de fluctuaciones estadísticas. En la aproximación lineal,

$$t_{ra} = t_{ra}^0 + \alpha t$$

$$\sigma^2 = \sigma_{t_{ra}}^2 + \frac{\alpha^2 \Delta^2}{12}$$

En cinco series de mediciones de largo período, con $n = 5$ y $\Delta = 3$ hs se obtuvieron

$$t_{ra}^0 = 9,0237 \text{ seg} ; 9,0995 ; 9,0828; 9,1600; 9,0302$$

$$\alpha = + 0,00008 \frac{\text{Seg}}{\text{min}} ; - 0,00034; - 0,00002; - 0,00030; - 0,00025$$

En dos de las series, con $n=5$, $N=3$ y $\Delta = 3$ hs, las desviaciones standard dieron

$$\sigma_N = 0,071 \text{ seg}; 0,074; 0,073; 0,077; 0,074; 0,060$$

$$\sigma_\Delta = 0,072 \text{ seg}$$

Se deduce, pues, que no hubo corrimiento.

$$\sigma_N = 0,057 \text{ seg}, 0,056; 0,067; 0,057; 0,065; 0,057$$

$$\sigma_\Delta = 0,099 \text{ seg}$$

Aquí si hubo corrimiento de largo período.

Por única vez se mantuvo encendido el instrumento hasta 30 horas consecutivas. Se aprecian fluctuaciones más suaves si en los intervalos entre series de mediciones se mantiene contando el dosímetro.

En general hubo un descenso inicial de t_{ra} ; hubo casos en que el descenso se prolongó por más de siete horas. Entre un encendido y otro, se observaron variaciones iniciales de t_{ra} de hasta 0,4%.

En conclusión, se asigna al instrumento un corrimiento máximo por hora de 0,4%, y los cálculos de errores utilizan dicho dato para los factores de calibración.

Análisis del funcionamiento

La lectura se realiza en dos partes, la parte entera, en el contador digital; la fraccionaria, en el contador parcial. Este se ajusta de modo de dividir en fracciones decimales la unidad de la parte entera. En consecuencia, los ajustes del cero y del final de la escala introducen un error de lectura parcial de $\pm 1,5\%$. Luego, para lograr un error de observación de la lectura total de $\pm 0,15\%$ o menos, habrá que leerse por lo menos diez unidades enteras.

a) Carga remanente (ver el apéndice III-7)- Luego de una medición, la puesta en $v=0$ del sistema acumulador de carga no se realiza llevando la llave principal de II (medición) a I (encendido) sino pulsando el botón "check", lo cual implica la puesta a cero durante un intervalo Δt , estimado en un milisegundo. Puesto que el sistema acumulador consta de capacidades, resistencias e inductancias repartidas, como así de dieléctricos con posibles efectos de absorción de cargas, el tiempo Δt pudiera no ser suficiente para la anulación efectiva de v .

El proceso de descarga podría expresarse por la carga residual

$\Delta Q = v \sum C_i e^{-\gamma_i \Delta t}$, conteniendo la sumatoria términos principales de rápido descenso y algunos exponenciales y oscilatorios. La tensión residual será

$$\Delta v = \Delta Q / \sum_i C_i = v \sum_i C_i e^{-\gamma_i \Delta t} / \sum_i C_i$$

Una segunda pulsación de "check" dará

$$\Delta v = v \left(\sum_i C_i e^{-\gamma_i \Delta t} / \sum_i C_i \right)^2$$

anulando prácticamente la tensión remanente.

En cambio, durante la medición, v alcanza el máximo valor posible, v_0 y por supuesto que no es posible recurrir al botón "check". Puesto que ello ocurre en cada pulso, el único caso no compensado reside en el "reset" inicial; luego, es lo correcto pulsar una sola vez el "check".

Para neutralizar este efecto de la carga residual, se procede, al igual que en el caso del error del contador parcial, contando un cierto número mínimo de pulsos.

Así como un Δt reducido incrementa la carga remanente, un valor elevado

de Δt limita la velocidad de lectura pues se pierde una fracción $\Delta t/t_m$ de carga en cada paso. Si $\Delta t = 1$ msec, la velocidad no puede ser superior a unos pocos pasos por segundo.

b) Expresiones analíticas Basándose en el diagrama eléctrico del Manual del instrumento y sus notaciones, se obtiene la siguiente aproximación lineal.

Sean

V_0 = tensión de disparo

V_0^0 = " " " " " para $P3 = 1$ (max)

R_{10} = resistencia de acoplamiento del trigger

r = " " interna de Ro 2a

R_7 = " " de carga de Ro 2a

R_4' = " " " " " Ro 1

B = tensión de alimentación de las válvulas

G_1 = conductancia mutua en el punto de trabajo de Ro 1

G_2 = " " " " " " Ro 2a

ΔV = tensión de corte de Ro 2b

Entonces se tiene

$$V_0 = \frac{1}{G_1 G_2 R_4'} \left[\frac{B}{R_7 + R_{10} + r} - \frac{\Delta V + BA}{R_{10} + R_7 A} \right]$$

donde A es la relación entre la tensión de rejilla de Ro 2b y la tensión de placa de Ro 2a, y vale

$$A = \frac{2,333 - P3}{42,333 - P3} \quad \begin{array}{l} A(P3 = 0) = 0,05512 \\ A(P3 = 1) = 0,03226 \end{array}$$

Definiendo $x = \frac{V + BA}{R_{10} + R_7 A}$, para $B = 150$ V y $\Delta V = 8$ V, x varía entre 3,626

mA y 3,309 mA para $P3 = 0$ y $P3 = 1$ respectivamente.

c) Mediciones De lo antedicho se obtiene

$$\frac{V_0}{V_0^0} \equiv \gamma_0 = \frac{\frac{B}{R_7 + R_{10} + r} - x(A; \Delta V)}{\frac{B}{R_7 + R_{10} + r} - x(A_{min}; \Delta V)}$$

La expresión τ_0 vs. x es lineal para valores dados de ΔV (variando el parámetro A, o sea, P3). Graficándola para varios probables valores de ΔV (la mejor aproximación lineal) se obtienen $\Delta V = 8 - 10$ V.

Para el caso $\Delta V = 8$ V, se obtiene $r = 12,5 \text{ k}\Omega$.

d) Fluctuaciones El valor de τ_a depende de muchos de los elementos de la plaqueta D 613, al igual que de la válvula electrométrica, sea explícitamente según la fórmula, sea implícitamente a través de las variaciones en las condiciones supuestas al deducir aquella.

Un descenso de B reduce τ_a expresamente y a través del incremento de G_1 . Un súbito incremento (pulso) de B puede atravesar la capacidad de realimentación del trigger y adelantar el paso del contador. Los pulsos en B se originan en la línea y atraviesan el sistema estabilizador de la tensión B, por lo cual todo aparato de gran consumo conectado a la línea común debe poseer filtro de línea para amortiguar en los arranques y las detenciones.

El efecto de la temperatura es menos claro: algunos elementos incrementan τ_a , y otros lo reducen, al aumentarse la temperatura.

La influencia de la plaqueta D 611 se opera a través del intervalo Δt de descarga, cuya variación implica cambios en la carga remanente y en la dependencia de la velocidad de contaje.

La llave de descarga posee una cierta capacidad ΔC , cuya influencia se traduce a través del potencial de contacto. Si éste fuera constante durante una medición, ésta sería afectada escasamente, en caso contrario, provocará fluctuaciones del orden de $\Delta C / \sum C_i$, siendo $\sum C_i \approx 100 \text{ pF}$.

Por último, la tensión de polarización B_k de la cámara (300 V) no debe fluctuar durante la medición, pues de lo contrario inducirá una carga $C_k \Delta B_k$, siendo C_k la capacidad propia de la cámara. Es conveniente, pues, que C_k sea pequeña frente a la capacidad total $\sum C_i$. En el caso opuesto, la variación relativa de la carga será $\Delta B_k / V_0$.

APENDICE III - 3

Efecto de la impureza en el aire de una cámara

Sean: n = número de moléculas del aire y del gas en un cm^3

n_g = " " " gas en un cm^3

n_0 = " " " aire normal en un cm^3

w = potencial medio de ionización del aire

w_g = " " " " " gas

Si se supone que la ionización por exposición es proporcional al número de moléculas por cm^3 , un electrón primario ionizará, antes de perder su energía "T", una cantidad de moléculas proporcional a n/w por cm de recorrido. El factor de proporcionalidad Z dependerá de la naturaleza de las moléculas, y la energía del fotón.

De modo que, dada una mezcla de $n - n_g$ moléculas de aire y n_g del gas, por cm^3 , se ionizará una cantidad igual a $\bar{Z} \cdot (n - n_g) / w + \bar{Z}_g (n_g / w_g)$.

En condiciones ambientales normales, se ionizarán $\bar{Z}(n_0/w)$ moléculas en un cm^3 de aire puro. De las consideraciones anteriores se desprende que el factor de corrección por efecto del gas es:

$$F_g = (\bar{Z} n_0 / w) / [\bar{Z} (n - n_g) / w + \bar{Z}_g n_g / w_g]$$

$$= \frac{n_0}{n + (\frac{w/w_g}{\bar{Z}_g/\bar{Z}} - 1) n_g} = \frac{p_0}{p + (\frac{w/w_g}{\bar{Z}_g/\bar{Z}} - 1) p_g}$$

siendo: p_0 = presión normal

p = presión actual total

p_g = presión actual parcial del gas

Sea el caso de la humedad en el aire. (g significa en este caso agua). Tenemos los datos siguientes:

$$\frac{w_g}{w} = 0,9;$$

$$\alpha = 1 - w \bar{Z}_g / w_g \bar{Z} = 0,238 \text{ según "The Physics of Radiology" (Johns)}$$

Obtenemos en consecuencia: $\bar{Z}_g / \bar{Z} = 0,686$.

Dado que w_g/w tiene una indeterminación importante, limitamos a 2 decimales:

$$\bar{Z}_g / \bar{Z} = 0,69$$

$\bar{Z}_g$ y $\bar{Z}$ son constantes de proporcionalidad que miden la eficiencia de producción de electrones primarios; de modo que se puede utilizar la notación $\bar{Z}$ (Z_i , P_i , E). En conclusión, dada la composición y la presión parcial de la impureza, la corrección depende de la energía del fotón.

Puesto que se trata de impurezas, la proporción de éstas en el aire debe ser pequeña para que valga la fórmula de corrección. La verificación de ésta

como así la determinación del parámetro $\alpha(E)$ como función de la energía se puede realizar mediante mediciones en la cámara con P_g variable, pues las lecturas se expresan, para una dosis fija de radiación, como

$L = L_0 \left(1 + \frac{\alpha}{P} P_g \right)$, siendo L_0 la lectura para $P_g = 0$, obtenida por extrapolación al origen.

Con este dato y P , se obtiene $\alpha(E)$, cuya precisión se requiere por lo menos al 10%.

Una deducción detallada de la fórmula se tiene en Barnard, G.P.; Aston, G.H.; Marsh A.R.S. "Effects of Variation in the Ambient Air on the Calibration and use of Ionization Dosimeters". N.P.L. Her Majesty's Stationary Office, 1960.

APENDICE III - 4

Los datos y los métodos de calibración

I) EL FACTOR DE CALIBRACION

Sea $y = f(x)$, siendo x la señal de entrada e y la respuesta del equipo. Se desarrolla en serie $y = a + Ax + bx^2 + \dots$, y se diseña el instrumento de modo que se aproxime a $y = Ax$, anulando a con ajustes manuales y b y los demás coeficientes se consideran perturbaciones. A es la amplificación; a, b, etc (ajuste del "cero" ; inhomogeneidad de la escala; etc) son también datos de calibración.

Tenemos $A = A_1 A_2 A_3$, con A_1 la amplificación eléctrica, A_2 el factor de adaptación, A_3 el factor de transformación (cámara).

De modo que el factor de calibración es (1) $K_E = A^{-1} = F_1 F_2 F_E$ pues sólo la respuesta de la cámara es función de la energía. F_2 es factor de cambio de escala; F_E puede modificarse mediante piezas complementarias de la cámara propiamente dicha. En patrones primarios F_1, F_2 y F_E se miden y se calculan; en los secundarios, F_E debe ser estable por largos períodos. Este factor F_E es, a grandes rasgos, igual a v^{-1} , siendo v el volumen geométrico de la cámara. Para aproximar al volumen efectivo se hacen las siguientes correcciones:

(2)

$$F_E = v^{-1} f_d f_x f_E$$

$\dot{x}$ = velocidad de la exposición

E = energía media del haz

f_d = corrección por densidad del gas

f_x = corrección por recombinación (distrib. campo eléctrico y densidad de ionización)

f_E = factor constructivo (geometría, espesores, composición química).

El factor f_E supone la necesidad de adoptar una orientación definida de la cámara en el haz, como así la disposición especial del mismo.

El factor F_E (la dependencia en energía) varía según una curva cóncava suave en el rango de 20 keV - Co-60, con un mínimo relativo en la zona media.

Las distintas partes del dosímetro contribuyen con sus variaciones a la descalibración total. El factor de más rápidas fluctuaciones es A_1 (estadísticas, térmicas, cambios de fuentes de tensión, etc). Las variaciones lentas se deben a envejecimiento de elementos y materiales y a daños por el uso; y afectan a los tres factores.

Existen diversos procedimientos para corregir o compensar las fluctuaciones, abarcando mayor o menor parte de los componentes; la medición en un campo conocido es la manera completa, por supuesto, de calibración.

El control radiactivo corrige gran parte de las fluctuaciones pues sólo se omite el factor f_E , vale decir la alteración mecánica y química de la cámara.

El factor $F_1(t, \tau, \dot{\tau})$ se puede suponer factorable como $F_{1t} F_{1\tau} F_{1\dot{\tau}}$; y en el factor F_E participaría también $f(\theta, \varphi)$ (dependencia en la orientación de la cámara en el haz). F_{1t} expresa el corrimiento; $F_{1\tau}$ da la inhomogeneidad de escala; $F_{1\dot{\tau}}$ es la dependencia del medidor en la velocidad de medición.

II) EL CONTROL RADIATIVO DEL DOSIMETRO

Si durante la calibración se obtuviera K_C^0 , L_{ra}^0 y t_{ra}^0 y luego, durante la medición L_{ra} y t_{ra} , se tiene que

(3)

$$\frac{K_C}{f_C} \frac{L_{ra}}{t_{ra}} = K_C^0 \frac{L_{ra}^0}{t_{ra}^0}$$

Siendo K_C el factor en el momento de control y f_C es el factor de decaimiento para casos en que el control es radiactivo. Esta relación es válida en tanto no se alteren las partes del dosímetro no controladas por el control patrón. Este patrón puede ser una fuente de corriente para escalas de integración (L_{ra} y t_{ra} se miden por separado) e intensidad (L_{ra} / t_{ra} se mide directamente) o una fuente de tensión.

III) EL CONTROL DE ESTABILIDAD

1) Tiene por objeto el estudio de las fluctuaciones de K_C en lapsos de horas o unos pocos días, como así sus variaciones rápidas durante una medición. Se basa en el patrón de control; y detecta variaciones debidas solamente a las

componentes que están bajo su control.

Podemos considerar que sólo fluctúa F_1 (la amplificación eléctrica). De (1) y (3) se obtiene

$$A_1 = F_1^{-1} \propto L_{ra}/t_{ra}$$

O sea que se obtienen durante un control en escala de integración:

$$t_{ra} \propto A_1^{-1} \quad \text{o bien } L_{ra} \propto A_1$$

2) FLUCTUACIONES DE SISTEMAS: Se realiza su control con el fin de detectar factores de variación que no inciden en los equipos individualmente. Hay parámetros cuyos efectos sólo se pueden probar en sistemas más o menos complicados.

IV) LOS METODOS DE CALIBRACION

a) El método de sustitución se publica en artículo aparte. (guía N°6)

a') El método de sustitución para campos de radiación y de geometría fija-
ble omite la cámara monitorea y en cambio se mide el tiempo de irradiación; obteniéndose L_r/t_r y L_c/t_c . Otra particularidad es que ambas mediciones pueden realizarse sin exigencias de continuidad inmediata. El resto de los detalles operativos es similar a (a).

Se reemplaza en (11)

$$\left[\frac{L_r}{L_m} \right] \left[\frac{L_c}{L_m} \right]^{-1} \quad \text{por } (L_r/t_r) (L_c/t_c)^{-1}$$

En la expresión del error ϵ_{KE} (16) se sustituye ϵ_{Lm} por $\epsilon_{tr} + \epsilon_{tc}$.

Se puede calibrar varias cámaras en sucesión, con una sola determinación de (L_r/t_r) mientras no se altere la geometría del sistema.

b) Por irradiación simultánea: La condición es un campo suficiente para contener ambas cámaras; y que tenga igual $\dot{x}$ en ambos puntos de medición. La interferencia mutua debe ser eliminada o ser similar en ambas posiciones.

Para obviar la exigencia sobre distancia focal y la homogeneidad del campo, se recurre al método de intercambio de posiciones.

b') Por intercambio de posiciones: Este método da como dato adicional la relación $\dot{x}_1/\dot{x}_2$ entre ambas posiciones. En la etapa 1 se miden L_{11} y L_{22} ,

donde el 1° subíndice significa el N° de la cámara y el 2° índice el N° de la posición en el espacio. Se miden simultáneamente y se leen en las escalas L_{11} y L_{22} , obteniéndose $\frac{L_{22}}{L_{11}}$. Se repite varias veces, con lo cual se obtiene $\overline{(L_{22}/L_{11})}$.

En la etapa 2 se intercambian las cámaras entre sus posiciones, obteniéndose $\overline{(L_{21}/L_{12})}$.

Tendremos luego:

$$(6) \quad \frac{K_{E1}}{K_{E2}} = \left[\overline{\left(\frac{L_{22}}{L_{11}} \right)} \quad \overline{\left(\frac{L_{21}}{L_{12}} \right)} \right]^{1/2}$$

$$(7) \quad \frac{\dot{x}_1}{\dot{x}_2} = \left[\overline{\left(\frac{L_{21}}{L_{12}} \right)} \quad \overline{\left(\frac{L_{22}}{L_{11}} \right)}^{-1} \right]^{1/2}$$

Para neutralizar las interferencias mutuas, se coloca entre ambas cámaras una pantalla blindante, lo más distante posible de cada una. O bien se agrega un dispersor adicional para compensar la asimetría de las dispersiones en cada cámara.

b") Si se desea contrastar 2 cámaras con el patrón simultáneamente, 1°) Se fijan 3 puntos de medición (a), (b) y (c). 2°) Se irradian 3 veces en las combinaciones 1-a, 2-b, 3-c; 1-b, 2-a, 3-c; 1-c, 2-b, 3-a, siendo (1), (2) y (3) las cámaras. Se obtienen:

(6')

$$\left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 = \left(\frac{L_{1a}}{L_{2b}} \right) \left(\frac{L'_{2a}}{L'_{1b}} \right)^{-1} \quad L = 1^\circ \text{ medición}$$

(6'')

$$\left(\frac{K_3}{K_1} \right)^2 = \left(\frac{L_{1a}}{L_{3c}} \right) \left(\frac{L''_{3a}}{L''_{1c}} \right)^{-1} \quad L' = 2^\circ \text{ medición}$$

(6''')

$$\frac{K_2}{K_1} \frac{K_3}{K_1} = \left(\frac{L''_{1c}}{L''_{2b}} \right) \left(\frac{L'_{3c}}{L'_{1b}} \right)^{-1} \quad L'' = 3^\circ \text{ medición}$$

Este proceso reduce a la mitad el tiempo que demanda el método de intercambio usado para pares individuales y mejora la estadística.

c) POR MEDIACION DE CAMARA AUXILIAR (Apéndice IV-5)

Los métodos anteriores se limitan a cámaras cuyos tamaños y velocidades no son demasiado dispares. En caso contrario se necesita una cámara monitora (en haz variable como en el método de sustitución) y una cámara auxiliar pequeña y de rango variable en velocidades, o una cámara semiesférica grande, con diafragma de área variable.

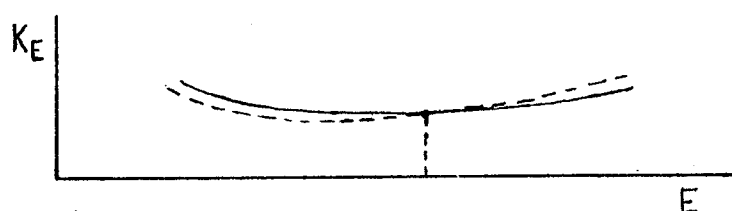
Es una generalización del método de sustitución, en que la cámara patrón y la que se va a calibrar no pueden ocupar la misma posición. La cámara auxiliar, con la colaboración de la cámara monitora, determina la relación $\dot{x}_1/\dot{x}_2$.

d) METODO DE CALIBRACIONES PARCIALES EN ENERGIA

1) Si se calibra una cámara en dos calidades de radiación y se confirma que los K_E han permanecido invariables desde su anterior calibración, es poco probable que se haya variado en otras energías. Esto es:

$$f_{E1,2} = f_{E1,2}^0 \Rightarrow f_{Ei} = f_{Ei}^0$$

El criterio es más justificable si se verifica la constancia en dos haces de energías suficientemente alejadas. Según el párrafo (1), tendremos la gráfica siguiente para dos calibraciones espaciadas (descalibración). Habría pues un solo punto de invariancia.



2) En el caso de una instalación de Rx con geometría estable, los valores K_{1i} (i = energía E_i de calibración) mantendrán sus relaciones constantes. De modo que si por corrimiento del patrón o de la monitora se obtiene por ej: K'_{11} , los restantes valores K'_{1i} se obtendrán por

$$(8) \quad K'_{1i} = (K_{1i} / K_{11}) K'_{11}$$

f) DOSIMETROS CON SECCIONES DE "INTEGRACION" E "INTENSIDAD"

Se calibra en "Intensidad" directamente y luego se las compara en "Integración" y viceversa. Si en "Intensidad" existe suficiente estabilidad, es preferible el primer camino, ya que así se tiene en cuenta la dependencia en la intensidad de dosis.

g) DOSIMETROS CON VARIAS ESCALAS

Sea K_{Eij} donde i numera las diversas escalas y j designa las energías de calibración. Puesto que

(9)

$$K_{Eij} = F_1 F_{2i} F_{Ej} \quad \text{obtenemos}$$

$$\frac{K_{Eij}}{K_{Ejk}} = \frac{F_{2i}}{F_{2k}} \quad \text{cte para todas las energías } j= 1,2,3,\dots,n$$

(10)

$$\frac{K_{Eij}}{K_{Eik}} = \frac{F_{Ej}}{F_{Ek}} \quad \text{cte para todas las escalas } i= 1,2,3,\dots,m$$

Tenemos así que los $n \times m$ factores K_{Eij} se reducen a $n+m-1$; sin embargo en tanto no existan impedimentos se deben determinar todos, para mejorar la estadística de errores.

h) CALIBRACIONES MASIVAS

Tienen por objeto economizar o abreviar los tiempos de calibración aunque ello pudiera incrementar las cotas de los errores.

1) Una misma cámara en varios haces. Se abrevia haciendo una sola

serie de control radiactivo.

- 2) En un mismo haz, varias cámaras. Se abrevia el proceso, porque los controles y mediciones con la cámara de referencia son comunes a todas las cámaras en calibración.

k) CASOS EN QUE SE PERMITEN MAYORES TOLERANCIAS EN LOS VALORES K_E

Si se dispone de las "curvas de respuesta media" (K_E vs Energía efectiva) donde se pueden determinar los errores de K_E respecto de algún valor típico E , bastaría calibrar en esta energía única. Se puede abreviar también si el usuario no utiliza la cámara en todo su rango de energías posibles.

1) CASOS EN QUE NO TODAS LAS COMPONENTES DEL DOSIMETRO FUNCIONAN O ESTAN DISPONIBLES.

Para poder calibrar, se necesitan por lo menos todas las componentes del dosímetro que no están bajo control del patrón de control, en el supuesto de que las restantes componentes serán provistas durante la calibración por el Centro.

Con el mismo criterio, todas las componentes de un dosímetro serán controladas si se dispone en el Centro de un equipo similar.

V) LOS DATOS DE ERRORES

Una magnitud directamente medida vale $\bar{x} \pm \xi$ siendo $\bar{x}$ el valor medio de muchas determinaciones y $\xi = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$ = error del promedio. Una magnitud indirecta $f(x, y, \dots)$ función de otras directas vale $f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \pm \xi_{x, y, \dots}$ donde

$$\xi_{x, y, \dots} = \frac{\sigma_{x, y, \dots}}{\sqrt{n_x n_y \dots}} \quad (\text{precisión} = \frac{\xi}{\bar{x}})$$

$$\sigma_{x, y, \dots}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{x}} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{y}} \right)^2 \sigma_y^2 + \dots \quad (\text{error medio})$$

$$\sigma_{x, y, \dots} = \left| \frac{\partial f}{\partial \bar{x}} \right| \sigma_x + \left| \frac{\partial f}{\partial \bar{y}} \right| \sigma_y + \dots \quad (\text{error máximo})$$

El factor de calibración, suponiendo inexistentes la inhomogeneidad y el corrimiento del cero (errores fijos), se obtiene por:

$$(11) \quad K_E = K \frac{L_{ra}^0 / t_{ra}^0}{L_{ra} / t_{ra}} \left(\frac{L_r}{L_m} \right) \left(\frac{L_c}{L_m} \right)^{-1} \quad (\text{sustitución})$$

El paréntesis significa mediciones simultáneas del numerador y del denominador. K es el factor de calibración primaria.

$$(12) \quad K_E = K \frac{L_{ra}^0/t_{ra}^0}{L_{ra}/t_{ra}} \left(\frac{L_r}{L_c} \right) \quad (\text{comparación directa})$$

$$(13) \quad K_E = K \frac{L_{ra}^0/t_{ra}^0}{L_{ra}/t_{ra}} \left[\left(\frac{L_r}{L_c} \right)_I \left(\frac{L_r}{L_c} \right)_{II} \right]^{1/2} \quad (\text{intercambio})$$

$$(14) \quad K_{E2} = \frac{K_{E2}^0}{K_{E1}^0} K_{E1} \quad \text{con } K_{E1} \text{ dado por (11)} \quad (\text{parciales en energía})$$

(15)(masivas):

Igual que en (11), (12) y (13) pero con valores de L_{ra} obtenidos como promedios de controles más alejados entre sí.

En lo que sigue las lecturas L y $\dot{L}$ incluirán los errores por corrección $\Phi(p, \tau)$, y por pérdidas eléctricas.

Para (11) tenemos, haciendo $L_{ra}/t_{ra} = \dot{L}_{ra}$:

$$\frac{\sigma_{K_E}}{K_E} = \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}^0}}{\dot{L}_{ra}^0} + \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}}}{\dot{L}_{ra}} + \frac{\sigma(L_r/L_m)}{(L_r/L_m)} + \frac{\sigma(L_c/L_m)}{(L_c/L_m)} + \epsilon_K$$

Para (12)

$$\frac{\sigma_{K_E}}{K_E} = \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}^0}}{\dot{L}_{ra}^0} + \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}}}{\dot{L}_{ra}} + \frac{\sigma(L_r/L_c)}{(L_r/L_c)} + \epsilon_K$$

Para (13)

$$\frac{\sigma_{K_E}}{K_E} = \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}^0}}{\dot{L}_{ra}^0} + \frac{\sigma_{\dot{L}_{ra}}}{\dot{L}_{ra}} + \frac{1}{2} \frac{\sigma(L_r/L_c)_I}{(L_r/L_c)_I} + \frac{1}{2} \frac{\sigma(L_r/L_c)_{II}}{(L_r/L_c)_{II}} + \epsilon_K$$

Para (14)

Igual que en (11), más $\epsilon_{K_{E2}}^o + \epsilon_{K_{E1}}^o$

De los valores σ_{K_E/K_E} se obtienen los ξ_{K_E} . Sin embargo, este procedimiento no es completo ni estricto debido a que

- 1) la cantidad de mediciones es reducida; entre 2 y 4 para L_{ra} ; ≤ 10 para los cocientes entre paréntesis.
- 2) Los controles individuales dan fluctuaciones de cortos períodos (estadísticas) y de largos períodos (corrimientos). Puesto que las segundas son más importantes, únicamente se usan sus valores (conocidos por controles periódicos) para el cálculo de errores.
- 3) En las fórmulas figuran sólo los factores explícitos; sin embargo, el error de ubicación (sobre todo la variación de la distancia focal), el de la densidad del aire en cámaras abiertas (temperatura y presión reales dentro de la cámara), el efecto de campos variables, el efecto de borde de los colimadores, la variación de las energías del haz y sus efectos sobre el sistema. A cada uno de estos factores se les adjudica un error máximo de 0,1% por lo que la suma se estima en 0,5%.

La introducción de errores por corrimientos se hace sobre la base del máx % por períodos de tiempo. Las fórmulas del error relativo se expresan para ello como sigue (se hace notar que no se incluyen los corrimientos de los instrumentos en calibración; y el error de $\dot{L}_{ra}^o$ se considera incluido en el de K).

$$\epsilon_{K_E} = \epsilon_{\dot{L}_{ra}} + \epsilon_{L_r} + 2 \epsilon_{L_m} + \epsilon_K + 0,5\%$$

$$\epsilon_{K_E} = \epsilon_{\dot{L}_{ra}} + \epsilon_{L_r} + \epsilon_K + 0,5\%$$

$$\epsilon_{K_E} = \epsilon_{\dot{L}_{ra}} + \epsilon_{L_r} + \epsilon_K + 0,5\%$$

La introducción sistemática de los ϵ a partir de las fórmulas de K_E merece un análisis. Los corrimientos de los L se cuentan hacia atrás o hacia adelante en el tiempo a partir de los controles $\dot{L}_{ra}$. De manera que los $\epsilon_{\dot{L}_{ra}}$ no cuentan; y considerando que entre el control inicial y el final $\dot{L}_{ra}$ transcurren en promedio entre 2 y 3 horas, es correcto tomar

para ϵ_{L_r} el valor de su corrimiento por hora.

En cuanto a L_m , su corrimiento se considera entre las sucesivas determinaciones de los cocientes $(L_r/L_m) - (L_c/L_m) - (L_r/L_m)$. Es pues un intervalo de 1,5 a 2 horas, o sea, menos de ± 1 hora. Luego, se utiliza el corrimiento por hora de L_m .

En definitiva se reducen a:

$$(16) \quad \epsilon_{K_E} = \epsilon_{L_r} + \epsilon_{L_m} + \epsilon_K + 0,5\% \quad (\text{sustitución})$$

$$(17) \quad \epsilon_{K_E} = \epsilon_{L_r} + \epsilon_K + 0,5\% \quad (\text{intercambio y comparación directa})$$

APENDICE III - 5

Proceso de calibración con el Standard Kustner Pychlau, con mediación de una cámara auxiliar

Objeto: Calibración de dosímetros cuyos rangos de intensidad difieren sustancialmente de los de la referencia. Se trata de elegir la cámara auxiliar de respuesta uniforme en el intervalo entre las dos intensidades y los dos campos, usándose el haz auxiliar más adecuado.

- 1) Una vez que los equipos están funcionando y ubicados correctamente, y disponiéndose de la necesaria cantidad de láminas "equivalentes al aire", se alinea la Kustner y se realiza su control radiactivo. Se prepara la planilla N°7 de calibración. En adelante se supone que las K de la Kustner (sus constantes de calibración) están corregidas por el control radiactivo, y las lecturas L_k de la Kustner, L_m de transmisora, L_a de la auxiliar, y L_c de la cámara en calibración están corregidas por Φ (condiciones ambientales), por $f(\dot{x})$ (factor de la intensidad de exposición), y por F_p (corrección por pérdidas eléctricas).
- 2) El promedio de los cocientes L_k/L_m se designa por K_1 . Si hay retardo en el cierre del obturador, y éste es aleatorio, se manifestará en una dispersión standard adicional de K_1 , sin afectar su valor; si el retardo .

es constante, no afectará las mediciones a condición de que la intensidad del haz no varíe significativamente entre una medición y la siguiente.

- 3) Mientras se determina un cierto número de los cocientes L_k/L_m , se inicia el control radiactivo de la cámara a calibrar. Las oscilaciones de L_k/L_m se deberán a las de L_m , en las que se han sumado las variaciones relativas de la Kustner y de la transmisora.
- 4) El punto donde se mide con la Kustner se designa por "1"; el correspondiente a la cámara a calibrar, por "2". La distancia entre ambos puntos es d , mediando una densidad superficial de aire de $0,129 \times d \text{ g/cm}^2$, con d en metros. Se reúnen ahora las láminas "equivalentes al aire" hasta alcanzar aquella densidad superficial. Colocando estas láminas normalmente al haz sobre el segundo colimador, se miden nuevamente los cocientes L_k/L_m , y con ello se determina la atenuación $a_c = e^{-\mu_c d}$, siendo μ_c el coeficiente lineal de atenuación en el aire del haz de calibración (haz "C"). Por otra parte, la cámara auxiliar trabaja con otro haz (haz "A"), cuya atenuación $a_a = e^{-\mu_a d}$ se mide igual que en el haz "C". Los datos de este punto y de (5) y (6) se anotan al dorso de la planilla N°7.
- 5) Se sustituye la Kustner por la cámara auxiliar en su punto de medición "1" y utilizándose el haz "A" se registran los cocientes L_1/L_m (cuyo promedio es K'_1).
- 6) Se coloca la cámara auxiliar en el punto "2" y se determinan los cocientes L_2/L_m (cuyo promedio es K'_2) como en el punto (5).
- 7) Se sustituye la cámara auxiliar por la cámara a calibrar, en el punto "2", con el haz "C" nuevamente, y se determinan las relaciones L_c/L_m (cuyo promedio es K_2). Si el obturador es accionado manualmente, tanto L_c como L_m contribuyen con sus propias variaciones independientes. Para los dosímetros con salida digital, se debe obtener un número mínimo de pulsos para reducir los errores de la lectura del contador parcial. Para los dosímetros con cuadrantes, tanto para las intensidades de dosis como para las dosis integradas, se medirán en la zona media de la escala. Para las intensidades de dosis, se cronometran los tiempos correspondientes a L_m pasos enteros de la transmisora. Finalmente se vuelve a hacer el control radiactivo de la cámara en calibración.
- 8) El tiempo total de la calibración propiamente dicha es de unas 3 horas, ex

cluyendo los ensayos previos, la preparación, la estabilización, y los controles prolongados de la cámara a calibrar.

Si el alcance de esta última es excesivo (escalas de integración), se limitará a un mínimo de mediciones de L_c/L_m .

9) El factor de calibración de la cámara calibrada se expresa como

$$K_c = K \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \left(\frac{K'_2}{K'_1} \right) \left(\frac{a_c}{a_a} \right) \quad \text{donde } \frac{K'_2}{K'_1} \text{ es la relación de las inten-}$$

sidades en los puntos "2" y "1" y $(a_c/a_a) = e [-(\mu_c - \mu_a) d]$ es el factor de corrección por la atenuación de los haces en el espacio d .

10) Genéricamente se asigna un error de $\pm 2\%$ a las constantes K de la Kustner. El proceso de comparación introduce los siguientes errores:

a) Alineación de la Kustner: se supone sin error

b) $\Phi(p, T)$: su error sería despreciable de no mediar las incertidumbres de las verdaderas temperaturas y presiones dentro de las cámaras no selladas, puesto que las p y T externas se determinan con suficiente precisión. Es un problema de inercia de las condiciones internas frente a las variaciones externas. Solamente el control radiactivo de la cámara puede resolver el problema, en cuyo caso no se debe efectuar las correcciones por $\Phi(p, T)$. Es claro que la cámara transmisora siempre requerirá la corrección Φ , y allí, en su interior, se seguirán las variaciones ambientales externas.

En tal caso, se puede asignar un error de $\pm 0,1\%$ a la transmisora; lo mismo se hará con toda cámara abierta desprovista de control radiactivo.

c) Error de la distancia focal: $\pm 0,2\%$

d) Suponiendo que las máximas desviaciones de L_k y L_m son de $\pm 0,4\%$, para K_1 y K_2 se asigna un error de $\pm 0,15\%$ a cada uno.

e) Para a_c y a_a se asignan también un error de $\pm 0,1\%$ a cada factor.

f) Para K'_1 y K'_2 se puede atribuir aproximadamente cotas similares a las de K_1 y K_2 : $\pm 0,15\%$.

No se incluyen los errores debidos a las fluctuaciones de la cámara calibrada. Redondeamos pues el error máximo de la comparación a $\pm 1,5\%$.

Los errores de K_1 , K_2 , K'_1 y K'_2 se basan en el corrimiento de largo período; en cambio, los errores a_a y a_c se fundan en la estadística de la

determinación de K_1 .

APENDICE III-6

INFORME DE CALIBRACION

I)CONDICIONES DE TRABAJO

- a) Dosímetros de Referencia
- b) Campos de calibración
- c) Intensidades de exposición en los campos
- d) Puntos de medición
- e) Disposiciones de las cámaras

II)CONTROLES DE FUNCIONAMIENTO

- a) Pérdidas eléctricas
- b) Corrimiento del cero mecánico
- c) Corrimiento del cero eléctrico
- d) Horas de control
- e) Estabilidad del control radiactivo
- f) Homogeneidad de escala
- g) Dependencia en energía
- h) Intercomparaciones de posiciones y escalas.

III)DATOS DE CALIBRACION

- a) Códigos de energías

Calidad código	tensión (kV)	filtro inher. (mm)	filtro ad. (mm)	C.H.R. (mm)	Energía Ef. (keV)
I					
II					
III					

b) Cámaras calibradas

código cámara	I	II	III	-----	Lra/tra
1		(Factores K_c)			
2					
3					
⋮					

c) Cámaras no calibradas (Explicaciones)

d) Errores de los factores de calibración K_c (valores y explicaciones).

IV) UTILIZACION DEL DOSIMETRO

a) Control radiactivo y la corrección de K_c

b) Control de pérdidas y su corrección

c) Fluctuaciones del dosímetro y medición de errores

d) Estabilidad de línea; conexiones a tierra; posición del medidor

V) Este certificado se extiende en el Centro Regional de Referencias con Patrones Secundarios de Dosimetría (ONS-CNEA) a los días del mes de de 19.....

APENDICE III - 7

Dependencia en intensidad de dosis de los dosímetros de integración digital

I - Expresión analítica

Sea L la lectura medida y L_0 la correspondiente a una referencia tm_0 . Entonces

(1)

$L = L_0 K(tm)$, con $K(tm_0) = 1$, donde tm = tiempo de un intervalo, o sea, el que media entre los finales de descargas sucesivas.

Se supone que $K(tm)$ posee un único punto singular en $tm=0$, por lo que se la desarrolla en torno de dicho punto.

(2)

$$K(t_m) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n t_m^n$$

Para determinar los coeficientes a_n , se consideran los siguientes factores:

- 1) Pérdidas eléctricas, D (drift)
- 2) Intervalo efectivo de descarga, Δt
- 3) Retraso del inicio de la descarga, debido a la inercia eléctrica, $\Delta t'$
- 4) Deficiente saturación en la corriente de ionización, f_s
- 5) Carga remanente, f_q
- 6) Efecto del potencial de contacto, Δq

Todos los coeficientes a_n de (2) son funciones de los parámetros antes enumerados. La serie (1) se utilizará con valores t_m en torno de t_{m0} tales que la contribución total de los efectos sea muy inferior a la unidad, con el fin de poder considerarlos como perturbaciones.

Designándose genéricamente por i e i_0 las corrientes no corregidas y corregidas, respectivamente, para los efectos mencionados se tienen los siguientes factores de corrección ($F = i_0/i$).

(3)

$$F(D) = \frac{i_0}{i_0 + i_p} = \frac{1}{1 + D t_m}$$

(4)

$$i = \frac{n Q_0}{t_n} = \frac{Q_0}{t_m} = \frac{Q_0}{t_m^0 + \Delta t + \Delta t' + \Delta t''}, \text{ con}$$

Q_0 = Carga correspondiente a un paso ideal

t_m^0 = Tiempo " " " " "

$\Delta t''$ = Cambio de t_m^0 debido a $\Delta q = -t_m^0 \Delta q / Q_0$

$$\text{Luego, } F(\Delta t + \Delta t' + \Delta t'') = 1 - \frac{\Delta q}{Q_0} + \frac{\Delta t + \Delta t'}{t_m}$$

(5)

$$F (f_s + f_q) = 1 + (f_{s1} + f_{q1}) / tm + (f_{s2} + f_{q2}) / tm^2$$

Por lo tanto, el factor total F de corrección es el producto de (3), (4) y (5), dando $K(tm) = F^{-1}$

(6)

$K'(tm) \simeq 1 - A + (1 - \Delta q/Q_0) D tm - B/tm - C/tm^2$, donde se ha omitido el término en tm^{-3} .

$$A = D(\Delta t + \Delta t' + f_{s1} + f_{q1}) - \frac{\Delta q}{Q_0}$$

$$B = \Delta t + \Delta t' + (1 - \frac{\Delta q}{Q_0})(f_{s1} + f_{q1}) + D[(\Delta t + \Delta t')(f_{s1} + f_{q1}) + (1 - \frac{\Delta q}{Q_0})(f_{s2} + f_{q2})]$$

$$C = (\Delta t + \Delta t')(f_{s1} + f_{q1}) + (1 - \frac{\Delta q}{Q_0})(f_{s2} + f_{q2}) + D(\Delta t + \Delta t')(f_{s2} + f_{q2})$$

Estas expresiones analíticas de los coeficientes son aproximadas en la medida en que la serie se ha cortado en $n=+1$ y $n=-2$

Para igualar (6) con (1), o sea, para lograr $K(t_{mo})=1$, se debe dividir los términos 1, A, B, C y D por

$$K(t_{mo}) = 1 - A + (1 - \frac{\Delta q}{Q_0}) Dt_{mo} - \frac{B}{t_{mo}} - \frac{C}{t_{mo}^2}$$

Finalmente se obtiene

(7)

$$K(tm) \simeq a_0 + a_1 tm + \frac{a_{-1}}{t_m} + \frac{a_{-2}}{t_m^2}, \text{ con}$$

$$a_0 = \frac{1 - A}{K(t_{mo})} \quad ; \quad a_1 = \frac{(1 - \Delta q/Q_0) D}{K(t_{mo})}$$

$$a_{-1} = \frac{-B}{K(t_{mo})} \quad ; \quad a_{-2} = \frac{-C}{K(t_{mo})}$$

Puesto que los parámetros que provocan la dependencia en la intensidad de dosis varían con el tiempo y con las condiciones externas, así ocurrirá con los coeficientes a_n . Algunos factores son corregibles; otros conducen a fluctuaciones y a corrimientos.

II) Verificación de la dependencia en t_m

En el párrafo anterior se procuró obtener una noción de cómo dependen los coeficientes a_n de los diversos parámetros.

Para determinar los a_n empíricamente con las mediciones, se colocan sucesivamente n fuentes radiactivas de modo que no se interfieran entre sí, tales que cada una dé una lectura próxima a L/n . La exposición simultánea a las n fuentes dará una lectura aproximada a L , correspondiente a la contribución total.

En el siguiente paso, las n fuentes se colocan de manera similar, pero a distancias menores tales que cada fuente dé una lectura de alrededor de L .

Se repite el procedimiento con otros pasos. Se necesita un obturador con cronometraje de precisión, si no se trata de un frecuencímetro de lectura directa.

Para desglosar la contribución del detector (f_s , parte de D , parte de f_q) se utiliza un generador de corrientes de alta precisión.

III) EL GENERADOR DE RAYOS X

Esta fuente de radiación tiene 3 parámetros: 1) la tensión V que define el espectro de energía. 2) La corriente I que da la emisión total. 3) La distribución angular (θ, φ) que puede depender de I y V .

El espectro podría variar con la dirección, por lo que se suponen valores θ pequeños donde exista uniformidad espectral, siendo $\theta = 0$ la dirección del máximo flujo. Un cambio de I ó V puede conducir a un cambio direccional

del haz de radiación si el eje del haz se define con $\theta = 0$ a lo largo del eje de colimación.

En el siguiente párrafo, se supone que el generador varía únicamente en I , manteniendo invariables V y la dirección del haz.

IV) COMPARACION DE DOS DOSIMETROS EN UN MISMO CAMPO

De las expresiones (1) y (7) se obtienen

$$(8) \quad \begin{aligned} K_r(t_1) &= L_1/L_2 = L_{01}/L_{02} = K_1(t_1) / K_2(t_2) \\ &= R_{21} \left[1 + (a_{1,1} - R_{21} a_{2,1}) t_1 + (a_{1,-1} - R_{21}^{-1} d_{2,-1}) t_1^{-1} + \right. \\ &\quad \left. + (a_{1,-2} - R_{21}^{-2} d_{2,-2}) t_1^{-2} \right] \end{aligned}$$

donde

$R_{21} = t_{20}/t_{10} \simeq t_2/t_1$, por exposición simultánea.

$a_{1,1} = (a_1/a_0)_1$; $a_{1,-1} = (a_{-1}/a_0)_1$; $a_{1,-2} = (a_{-2}/a_0)_1$

para el dosímetro número 1 y

$a_{2,1} = (a_1/a_0)_2$; $a_{2,-1} = (a_{-1}/a_0)_2$; $a_{2,-2} = (a_{-2}/a_0)_2$

para el dosímetro número 2.

a) Dado que $t_1 = \frac{I_0 t_{10}}{I}$, se obtiene de (8)

(9)

$$K_r(I) = R_{21} (1 + \alpha I^{-1} + \beta I + \gamma I^2)$$

b) Si hubiera cambios en el espectro energético o en la dirección del haz, el efecto se traducirá a través de una alteración en R_{21} para un t_1 dado.

Sean dos dosímetros idénticos colocados en dos puntos separados angularmente en el haz y tales que $R_{21} = 1$ para una dada I_1 .

Entonces

$$K_r(I_1) = 1, \text{ según (8)}$$

Variando I se verá si existe una alteración direccional del haz.

Si en ausencia de la separación angular se observan valores $K_r(I) \neq 1$, ello significa que ambos dosímetros poseen algunos parámetros diferentes, temporal o permanentemente.

c) En la (8) se puede desglosar $a_{1,n}$ de $a_{2,n}$ utilizando valores extremos de R_{21} , o sean

$$t_1 \ll t_2 ; R_{21} \gg 1$$

(10)

$$K_r(t_1) = R_{21} (1 - R_{21} a_{2,1} t_1 + a_{1,-1} t_1^{-1} + a_{1,-2} t_1^{-2})$$

d) Variando el espectro o la dirección del haz o la disposición relativa de los detectores, se pueden determinar experimentalmente los coeficientes $a_{1,n} - R_{21} a_{2,n}$ con $n=1,-1,-2$. Para cada R_{21} se obtiene un juego de valores de los coeficientes, midiéndose 3 valores de $K_r(t_1)$ correspondientes a otros tantos t_1 . Con sólo un par de valores R_{21} se podrán separar $a_{1,m}$ de $a_{2,n}$.

Disponiéndose de estos seis coeficientes, $K_r(t_1)$ queda determinada, en función del parámetro R_{21} .

e) Puesto que por razones de prácticas (tiempo de mediciones; error del contador parcial) de operación y por reducir los efectos de pérdidas eléctricas, se suelen utilizar valores t_m breves, en la función $K(t_m)$ adquieren relevancia las potencias negativas. Se facilita entonces, el análisis de las mediciones utilizándose la variable $\nu_m = t_m^{-1}$ = frecuencia. Luego las expresiones (7) y (10) se escriben omitiéndose el término en a_1 , como una parábola de fácil interpretación.

(11)

$$K(\nu_m) \simeq a_0 + a_{-1} \nu_m + a_{-2} \nu_m^2$$

(12)

$$K_r(\nu_1) \simeq R_{21} (1 + a_{1,-1} \nu_1 + a_{1,-2} \nu_1^2)$$

donde se impone la condición de que t_2 ($\gg t_1$) tenga valores pequeños.