

9 *zapata*

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS



**DISEÑO DE UN MONITOR CONTINUO
DE URANIO EN AIRE.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A:

ARMANDO A. BRAVO ORTEGA

MEXICO, D. F.

DICIEMBRE DE 1981



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO PRIMERO	3
INTERACCION DE LA RADIACION ALFA CON LA MATERIA	3
A. Desintegración Alfa.	4
A.1. Ionización Especifica.	7
A.2. Poder de Frenamiento.	7
A.3. Alcance.	9
B. Efectos de la Radiación Alfa.	10
C. Peligro de la Radiación Alfa.	11
CAPITULO SEGUNDO	
DETECCION DE LA RADIACION ALFA.	12
A. Condiciones de Detección de la Radiación Alfa.	12
B. Detectores de Radiación Alfa.	14
B.1. Detectores Químicos.	14
B.2. Detectores de Centelleo.	15
B.3. Detectores de Ionización.	16
C. Elección del Detector.	20

	PAGINA
CAPITULO TERCERO	
DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MONITOR CONTINUO DE URANIO.	21
A. Descripción del Sistema de Detección.	21
A.1. Detector de Sulfuro de Zinc.	23
A.2. Gufa de Luz y Reflectores.	25
A.3. Tubo Fotomultiplicador.	26
A.4. Sistema Electrónico Asociado.	27
B. Descripción del Sistema Colector de Aire.	30
B.1. Castillo de Plomo.	30
B.2. Papel Filtro.	31
B.3. Bomba de Vacío.	32
CAPITULO CUARTO	
PRUEBAS AL MONITOR CONTINUO DE URANIO.	44
A. Pruebas.	44
A.1. Pruebas al Sistema de Detección.	44
A.2. Pruebas al Sistema Colector de Aire.	46
A.3. Pruebas al Monitor Continuo de Uranio.	46
B. Resultados.	47
B.1. Sistema de Detección.	48
B.2. Sistema Colector de Aire.	48
B.3. Monitor Continuo de Uranio.	49
CONCLUSIONES.	57
BIBLIOGRAFIA.	59

I N T R O D U C C I O N

El empleo de material radiactivo en cualquier tipo de actividad, implica un riesgo que varía en función inversa al control que se ejerza sobre el desarrollo de los procesos de la actividad.

Entre las formas de control la instrumental es muy importante, no porque las demás no lo sean, sino porque ésta requiere de un alto grado de precisión y confiabilidad.

La finalidad principal al recurrir a este medio de control es la de detectar la presencia de radiación, por medio de su identificación como primer etapa y en seguida, su cuantificación, lo cual significa que el instrumento debe ser de tipo cualitativo y cuantitativo.

Para que los instrumentos de detección cumplan satisfactoriamente su función, es necesario considerar el tipo de radiación que desea detectarse y de acuerdo a las propiedades de ésta, elegir un detector adecuado de respuesta confiable, así como el equipo electrónico que explote dichas propiedades.

La finalidad del presente trabajo consiste en desa--

rollar un monitor continuo de aire, con el que se pueda registrar la presencia de uranio suspendido en el ambiente de los recintos en donde se utiliza este elemento.

Para cumplir con este propósito y exponer el trabajo en forma lógica en el primer capítulo se muestran las propiedades y parámetros de la radiación alfa y su interacción con la materia; en el segundo capítulo se selecciona un detector-particular que presente las mejores cualidades; en el tercer capítulo, se procede al diseño y construcción de todo el sistema, considerado desde el punto de vista mecánico y electrónico.

Por último, en el capítulo cuarto, se reportan las pruebas y resultados del monitor continuo de aire diseñado y construido, para corroborar su buen funcionamiento.

Por medio de este trabajo, se espera llamar la atención sobre la necesidad de depurar las técnicas de detección, así como a la construcción de los instrumentos y sistemas asociados.

CAPITULO PRIMERO

INTERACCION DE LA RADIACION ALFA CON LA MATERIA

El descubrimiento de la radiactividad ha extendido los alcances del conocimiento humano con respecto a la física atómica y nuclear, pues muchos esfuerzos se han dirigido al estudio de este fenómeno. Más no todo ha sido de interés científico y académico, sino que se han buscado diversificaciones en el empleo de la radiactividad. Entre tales opciones surge en forma relevante el empleo del uranio como combustible en los reactores nucleares, lo que permitirá sustituir en forma parcial a los combustibles orgánicos en la generación de energía.

Para convertir el uranio en combustible nuclear, es necesario que éste sufra ciertas transformaciones hasta lograr su estado final y útil; por esta razón se han diseñado métodos y técnicas de tratamiento, las cuales es preciso controlar debido al alto riesgo que presentan.

Por la naturaleza del trabajo por desarrollar, en este primer capítulo se aborda exclusivamente lo referente a la radiación alfa y sus propiedades, ya que el uranio se caracteriza por ser un emisor alfa y el monitoreo de este tipo-

de radiación es la base para la determinación de las concentraciones de uranio en el ambiente y en las atmósferas de trabajo.

A. Desintegración Alfa.

Se entiende por radiactividad a la propiedad de ciertos núcleos de emitir radiación, esto es, por la emisión y propagación de energía a través del espacio o de algún medio material, ya sea en forma de ondas o de emisión corpuscular.¹

Siempre que un átomo emite radiación queda en estado estable o desexcitado; si la radiación que ha emitido es de tipo corpuscular sufre una transmutación, pues el nuevo elemento formado presenta propiedades distintas al original.

Por medio de los experimentos realizados con emulsiones fotográficas y con la cámara de niebla expuestas a radiación alfa, se ha mostrado lo siguiente:²

- La mayoría de las partículas alfa emitidas por un mismo radionúclido tienen el mismo alcance.
- Las trayectorias son rectilíneas.
- La mayoría de las partículas alfa son dispersadas hasta el final de su trayectoria.

- Las trazas producidas por la radiación alfa muestra líneas gruesas y bien definidas.

La explicación a cada una de estas observaciones es que:³

- Todas las partículas alfa emitidas por un mismo radionúclido tienen la misma energía cinética discreta y por tanto el mismo alcance; el intervalo de variación de la energía cinética es por lo general de 4 a 9 Mev.
- Las trayectorias rectilíneas se explican porque las partículas alfa tienen una masa relativamente elevada, este aspecto desde el punto de vista de la mecánica influye en el movimiento de la partícula pesada. La masa asociada a la partícula alfa es aproximadamente de 4 veces la masa del átomo de hidrógeno.
- La dispersión al final de la trayectoria significa que las partículas alfa han perdido la mayor parte de su energía cinética, lo que permite que interactúen un tiempo mayor con los átomos vecinos del material que atraviesan; en esta etapa es cuando se produce mayor ionización.
- Las trayectorias perfectamente definidas y gruesas se deben a que las partículas alfa tienen un gran poder de ionización, lo que se explica solamente si éstas poseen carga

eléctrica. Por medio de otros tipos de experimentos se ha -
mostrado que las partículas alfa portan doble carga positi-
va y que son átomos de helio doblemente ionizado (${}^4_2\text{He}^{++}$).

La energía cinética de una partícula alfa se pierde -
por los mecanismos de ionización y excitación de los átomos -
de la sustancia que atraviesa.

La ionización ocurre por dos procesos:

- Colisión directa con un electrón orbital.
- Interacción de los campos electrostáticos de la partícula -
alfa y los electrones orbitales del medio absorbente.

La excitación ocurre cuando la energía cinética -
transferida al electrón no es suficiente para removerlo del -
átomo; en este caso, la pérdida de energía cinética no produ-
ce un par de iones; consecuentemente, la energía cinética pro-
medio perdida por una partícula alfa al crear un par de iones
en una sustancia dada, es usualmente mayor que el potencial -
de ionización del medio (W) que está relacionado con un solo-
evento de ionización.⁴

A continuación se describen los parámetros de la ra-
diación alfa que es necesario conocer para el desarrollo del-
detector presentado en este trabajo.

A.1 Ionización Específica.

Se define como ionización específica al número de pares de iones formados por la radiación, por unidad de longitud de trayectoria de la misma al interaccionar con la materia.:⁵

El valor de la ionización específica depende de la velocidad de la partícula alfa, así como del número atómico y el potencial medio de ionización W del material absorbedor; este valor es diferente para distintos gases, variando de 24.4 eV en Kr hasta 41.3 eV en He, por cada par de iones creados en el gas. El valor de W en el aire es de 34.2 eV.⁶

La ionización específica promedio se puede calcular de la expresión:⁷

$$\bar{i} = \frac{\text{pares de iones formados}}{\text{Unidad de longitud}} = \frac{E}{W \cdot R} \quad \dots (1)$$

aquí E es la energía cinética de la partícula alfa en MeV y R es su alcance dentro del material absorbedor en centímetros.

A.2 Poder de Frenamiento

Se define como poder de frenamiento a la cantidad de energía cinética perdida por la partícula alfa por unidad de-

longitud en un material absorbedor determinado; y está representado por la expresión obtenida por Hans Bethe, de la cual sólo se toma el primer término que predomina para bajas energías según el presente caso, y que está dado por⁸:

$$S(E) = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z \ln(2mv^2/T)}{mv^2} \dots (2)$$

o también por:

$$S(E) = W\bar{I}$$

donde N es el número de átomos/cm³ del medio absorbedor con el que interactúa la partícula alfa, Z su número atómico, ze la carga eléctrica de la partícula alfa, m su masa y v la velocidad a la que viaja.

En la Física de radiaciones, la razón de dos poderes de frenamiento, llamada de frenamiento relativo, es una cantidad importante. Con frecuencia se toma el aire como sustancia de referencia y los otros medios se comparan con éste. -- Por tanto el poder de frenamiento relativo (PFR), de un medio m con respecto al aire es:⁹

$$PFR = \frac{S(E)_m}{S(E)_a} = \frac{(Z \ln(2mv^2/T))_m}{(Z \ln(2mv^2/T))_a} \dots (4)$$

A.3. Alcance

Debido a que las partículas alfa tienen una ionización específica muy grande, éstas pierden toda su energía cinética en distancias cortas. Por ejemplo, el alcance que tienen en aire será de unos cuantos centímetros. La mayoría de las partículas alfa emitidas por una misma fuente pierde su energía cinética en aproximadamente la misma distancia en el mismo material.

El alcance R de las partículas alfa en el aire a 15° C. y 760 mm. Hg, se puede calcular con ayuda de las siguientes ecuaciones empíricas:¹⁰

$$R(\text{cm}) = 0.318 E^{1.5} (4\text{MeV} < E < 7 \text{ MeV}) \quad \dots(5)$$

$$R(\text{cm}) = 0.56 E \quad (E < 4 \text{ MeV})$$

donde E es la energía cinética de la radiación alfa.

El alcance R_A en mg/cm^2 de las partículas alfa, en medios diferentes al aire se puede calcular aproximadamente mediante la siguiente relación:¹¹

$$R_A = 0.56 R A^{1/2} \quad \dots(6)$$

o también de acuerdo a la relación obtenida por Bragg¹², el -

alcance R_A en cms. es:

$$R_A = 3.2 \times 10^{-4} A^{1/2} R/\rho \quad \dots(7)$$

la cual es generalmente buena dentro de $\pm 15\%$. En esta última expresión, A es el número atómico efectivo del medio absorbedor y ρ su densidad.

B. Efectos de la Radiación Alfa en la Materia.

Las partículas alfa al interaccionar con la materia son absorbidas o dispersadas y en consecuencia provocan varios tipos de efectos, que se pueden agrupar en las tres siguientes clases:¹³

- Químicos: En esta clasificación se contempla la disociación química, formación de radicales libres de mayor actividad química; conversión de oxígeno en ozono; conversión de agua común en oxigenada y reducción de sales férricas y mercúricas en ferrosas y mercuriosas.
- Luminosos: Al absorber algunas sustancias la energía cinética cedida por la radiación alfa, tales materiales fluorescen o centellean.
- Atómicos: En este aspecto se consideran los fenómenos de ionización y excitación, ya sea por absorción o

por interacción de los campos electrostáticos. .

C. Peligro de la Radiación Alfa.¹⁴

El hecho de que las partículas alfa tengan alcances muy cortos en materiales densos, significa que no representan un gran riesgo como radiación externa, pues aún las partículas alfa con mayor energía cinética apenas atraviesan la capa muerta de la piel humana.

No obstante, una vez que se incorpora un radionúclido emisor de radiación alfa al interior del cuerpo y debido al corto alcance de la misma, el daño fisiológico está altamente localizado cerca del punto en donde se encuentre depositado el emisor radiactivo. En esta forma, se puede producir un daño considerable a órganos esencialmente pequeños, ya que, toda la energía absorbida se deposita en ese órgano y no se distribuye sobre un volumen mayor de tejido.

Por esta razón, las partículas alfa son las que representan el mayor riesgo interno por radiación.

CAPITULO SEGUNDO
DETECCION DE LA RADIACION ALFA

Una de las preocupaciones existentes al manejar uranio en instalaciones nucleares, es proteger a los trabajadores de los efectos adversos de la radiación alfa.

Para garantizar una protección eficaz se requiere de la cuantificación del campo de radiación alfa presente en los recintos de trabajo y ser comparado con el estándar o guía de protección contra la radiación (GPR). ¹⁵

Para cuantificar el campo de radiación alfa y compararlo, se debe poseer un instrumento de medición calibrado -- en términos de unidades específicas; por tal razón, en este capítulo se describen diferentes métodos para la detección de radiación alfa, sus ventajas y limitaciones, de acuerdo a las cuales se elige un detector en particular para el desarrollo del presente trabajo.

A. Condiciones de Detección de la Radiación Alfa.

La primera condición para la detección de la radiación alfa es que ésta interactúe con los átomos del detec

tor y les transfiera suficiente energía para inducir en ellos respuestas apreciables, lo que depende de las propiedades del detector mismo. ¹⁶ Para lograr esta condición es necesario -- elegir un medio de interacción adecuado, que ofrezca alta pro babilidad de que acontezcan procesos registrables y relativamente simples de identificar.

La segunda condición es la necesidad de registrar - en alguna forma los efectos de la interacción y determinar la relación que existe entre la respuesta observada y la intensi dad de radiación alfa que las provoca. Para cubrir esta neces sidad se requiere el empleo de sistemas electrónicos de alta- eficiencia. ¹⁷

Un sistema de detección para monitoreo continuo de aire debe cumplir con los siguientes requerimientos: ¹⁸

- a. Alta eficiencia para convertir la energía cinética de la radiación alfa a energía luminosa en el caso de los detec tores de centelleo y a un gran número de pares de iones - en detectores basados en el proceso de ionización.
- b. Producción de señales procesables como consecuencia inme diata de la conversión de energía o de la formación de pa res de iones.

- c. Amplificar y formar adecuadamente la señal obtenida, considerando el proceso desarrollado en el inciso anterior.
- d. Registrar el número de eventos ocurridos en el detector y relacionarlos con la señal obtenida.
- e. Calibrar el equipo en unidades adecuadas.

A continuación se presenta una breve descripción de las características relevantes de algunos detectores de radiación alfa.

B. Detectores de Radiación Alfa.

B.1 Detectores Químicos.

Esta clase de detectores funcionan en base a reacciones químicas provocadas al interaccionar la radiación alfa en ellos.

La cuantificación del campo de radiación alfa existente se logra midiendo el cambio sufrido por la sustancia química que compone el detector; sin embargo, para que esto ocurra es necesaria la existencia de un campo de radiación alfa muy intenso y no se aplica al caso particular de las instalaciones uraníferas, por lo que no serán tratados en el pre

sente trabajo.

B. 2 Detectores de Centelleo.

En el caso de los detectores de centelleo, se emplea como recurso para registrar la presencia de radiación alfa, la luminiscencia que ésta provoca en algunos materiales al disipar su energía cinética en ellos; posteriormente, los fotones formados son registrados en un tubo fotomultiplicador en el que se genera una avalancha electrónica detectable y que produce un pulso eléctrico registrable. ¹⁹

Los materiales que se pueden emplear como detectores de centelleo pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos, aunque para radiación alfa se prefiere sólido, por ejemplo el sulfuro de zinc.

En general las características de un detector de centelleo son: ²⁰

- a. Tiempos de resolución muy cortos del orden de 10^{-9} s., lo que permite razones de conteo muy altas, en comparación con los instrumentos de ionización en gases.
- b. Alta resolución energética, siendo posible realizar espectrometría.

- c. Muy sensible a la radiación alfa y por tanto altamente -- eficiente en su detección (100%), debido a la alta conver-- sión de la energía cinética cedida por las partículas al-- fa a energía luminosa.
- d. Es posible su empleo en campos de radiación muy intensos-- sin que se saturen.
- e. El número de eventos registrados puede ser relacionado -- proporcionalmente con la intensidad del campo de radia--- ción alfa, lo que permite efectuar dosimetría.
- f. Mayor facilidad en su manejo en comparación con los detec-- tores proporcionales y semiconductores, que requieren de-- equipos complejos.

B.3 Detectores de ionización.

Cuando la radiación alfa produce ionización en el-- medio detector, que puede ser gaseoso (siendo el más general-- zado), sólido (semiconductores) o excepcionalmente líquido, -- los pares de iones formados son colectados en presencia de -- un campo eléctrico; de este modo se obtiene una corriente --- eléctrica que puede ser evaluada en los sistemas electrónicos asociados.

Dentro de este grupo de detectores se distinguen de acuerdo a su funcionamiento, las siguientes clases:

- Ionización en gases: Cámara de Ionización.
 Detector Proporcional.
 Detector Geiger-Muller.
- Ionización en sólidos:
 Detector Semiconductor.

Las características principales correspondientes a cada clase son:

Cámara de Ionización.- Las cámaras de este tipo -- pueden ser: Integradora y de pulsos; presentan las siguientes características: ²¹

- a) Problemas de tipo eléctrico tales como el ruido y la descarga.
- b) Debido a que su construcción debe ser rígida y resistente, esta restricción se antepone a la necesidad de ventanas muy delgadas que permitan el paso de la radiación alfa.
- c) Debido a que el pulso formado es proporcional a la intensidad de radiación recibida, entonces es posible realizar dosimetría.

- d. Muy versátil en su construcción, tanto en su forma como en su tamaño.
- e. Según Bearden²² existe el inconveniente de que no pueden ser empleadas en la medición de bajas intensidades de radiación alfa, ya que el fondo natural propiciado por los materiales de construcción es del orden de magnitud de -- aquel que se desea medir.

Detector Proporcional.- Las cualidades de este tipo de detector son:²³

- a. Es posible efectuar espectrometría, ya que se obtienen -- pulsos más grandes y proporcionales al tipo e intensidad de la radiación recibida.
- b. Mayor sensibilidad que las cámaras de ionización.
- c. Tiempo de resolución corto y mayor eficiencia de conteo, respecto a los otros detectores de ionización en gases.
- d. Versátiles en su construcción, de acuerdo a las necesidades específicas.
- e. Es posible el conteo de bajas intensidades de radiación, - debido a su bajo fondo y ruido electrónico.

- f. Alta eficiencia de conteo al ser posible colocar la fuente radiactiva en contacto con el medio detector.

Detector Geiger-Muller.- Sus características de mayor relevancia son:²⁴

- a. Versátiles en su manejo y construcción.
- b. Costos razonables y accesibles.
- c. Tiempo de resolución, tiempo muerto y tiempo de recuperación muy grandes, lo que impide sean capaces de registrar altas intensidades de radiación.
- d. No es posible realizar dosimetría ni espectrometría.

Detector de semiconducción:²⁵ Este tipo de detector es útil porque posee las características deseadas, lo mismo que el detector de centelleo, sin embargo presenta los siguientes inconvenientes:

- a. Delicado en su manejo.
- b. Proceso de manufactura complejo.
- c. Electrónica complicada comparada con la requerida por un detector de centelleo.

C. Elección del Detector.

Considerando que el detector elegido debe mostrar -
cualidades como alta eficiencia de detección, resolución y el
poder efectuar razones altas de conteo, se concluye que el de-
tector de centelleo, proporcional y semiconductor serían los-
adecuados para el fin perseguido. No obstante, el primero --
presenta la ventaja de ser más fácil en su manejo y construc-
ción.

Por las razones expuestas anteriormente, se elige -
en forma definitiva un detector de centelleo que se describe-
detalladamente en el siguiente capítulo.

CAPITULO TERCERO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MONITOR CONTINUO DE URANIO

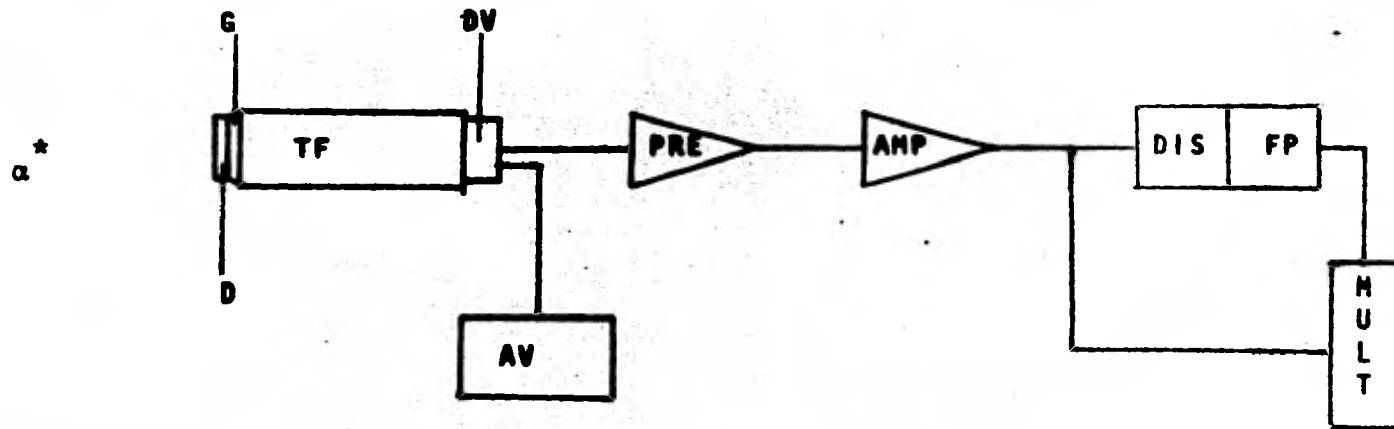
En el presente capítulo se trata en detalle lo concerniente al monitor continuo de uranio. Se describe en forma general en que consiste, las partes de que se compone y las características de cada una de ellas.

A. Descripción del Sistema de Detección. ²⁶

Un sistema de detección por centelleo está formado de un centelleador, que en el presente trabajo es de $ZnS (Ag)$, protegido del medio ambiente por un montaje adecuado; una guía de luz que acopla el centelleador con el tubo fotomultiplicador y una fuente de alto voltaje para alimentarlo; en seguida un preamplificador con el que se logra una mejor relación señal-ruido y que permite acoplar la electrónica subsecuente, que consiste en: amplificador, discriminador, formador de pulsos y escalador, tal como se muestra en el diagrama de bloques (Figura 3.1).

El modo de operación del sistema consiste en:

- Incidencia y absorción de la radiación alfa en el centelleo



α : Fuente radiactiva.
 D : Detector de ZnS (Ag).
 G : Guía de luz.
 TF : Tubo fotomultiplicador 50AVP.
 DV : Divisor de voltaje.
 PRE : Preamplificador.

DIS : Discriminador de altura de pulsos.
 FP : Formador de pulsos.
 AMP : Amplificador.
 AV : Fuente de alto voltaje.
 MULT : Multicanal.

Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema de detección.

- dor, resultando una excitación luminosa en él.
- Transmisión de los fotones producidos, por medio de la gufa de luz y los reflectores hacia el fotocátodo del tubo fotomultiplicador.
 - Absorción de los fotones en el fotocátodo y emisión de fotoelectrones, que a su vez producen una corriente de electrones en los dínodos sucesivos del tubo fotomultiplicador.
 - Del paso anterior se obtiene un pulso de corriente en el ánodo del tubo fotomultiplicador, que se aplica a la entrada del preamplificador.
 - Posteriormente la señal pasa al discriminador y al formador de pulsos.
 - Finalmente al tener un pulso adecuado en forma y tamaño, éste es contado por el escalador.

A.1. Detector de Sulfuro de Zinc 27,28

El sulfuro de zinc activado con plata es empleado en la detección de partículas cargadas pesadas, que tengan ionización específica grande y consecuentemente alcance corto.

Sin embargo, el ZnS presenta serias limitaciones en la transmisión de su propia emisión y sólo puede disponerse de él en forma de polvo cristalino y no como cristales transparentes de mayores dimensiones; por tal motivo para reducir la autoabsorción de la luz emitida y evitar la dificultad del

crecimiento de los cristales, se opta por aplicar el ZnS en - capas muy delgadas, lo que explica su empleo en la detección- de partículas de corto alcance.

Para determinar la cantidad mínima de ZnS necesaria- que garantice la detección de las partículas alfa con un 100% de eficiencia se emplean las fórmulas 5 y 7 citadas en el ca- pítulo primero:

$$R \text{ (cm)} = 0.318 E^{1.5} \quad \dots(5)$$

$$R_A \text{ (cm)} = 3.2 \times 10^{-4} A^{1/2} R/\rho \quad \dots(7)$$

con los siguientes datos:

$$A = 6.984 \text{ (número de masa efectivo del ZnS).}$$

$$\rho = 4.1 \text{ g/cm}^3$$

$$E = 4.19 \text{ MeV (Energía cinética de las partículas alfa del uranio).}$$

teniendo así un alcance en aire de 2.727 cm. y en el cente- - llador de 1.486×10^{-3} cm. o sea 14.86 micras; que de acuer- do con la fórmula 6 del capítulo primero:

$$R_A \text{ (mg/cm}^2\text{)} = 0.56 R A^{1/3} \quad \dots (6)$$

corresponde a una capa de polvo de un espesor de 5.579 mg/cm^2 .

De acuerdo a las evidencias experimentales obtenidas por Birks, la aplicación del polvo de ZnS se realiza en capas de 10 a 25 mg/cm^2 para tener una eficiencia del 100%, ya que cualquier variación afecta la cantidad de energía luminosa -- obtenida; por consiguiente, para tener una eficiencia de ese orden es necesario aplicar de 2 a 4 capas monogranulares de polvo centelleador.

La geometría adoptada para el centelleador es en forma de disco, pues ofrece una superficie óptima de acoplamiento con el papel filtro circular; para el montaje del polvo -- cristalino se puede optar entre aplicarlo directamente en la ventana del tubo fotomultiplicador o sobre una base transparente de vidrio de borosilicato, que es la elección del presente trabajo; para este propósito se usa un cemento óptico -- con una transmisión del $98\%^{29}$ en espesores de aproximadamente 1 mm , logrando así que la eficiencia del sistema no se vea -- afectada.

A.2. Gufa de Luz y Reflectores.^{30,31}

En un sistema de detección por centelleo es importante la colección eficiente de los fotones formados en el centelleador y su distribución uniforme en la superficie comple-

ta del fotocátodo; para satisfacer esta necesidad es posible aplicar en forma directa el polvo centelleador sobre el fotocátodo o bien acoplarlos por medio de una guía de luz.

La posibilidad de emplear un detector de centelleo con dimensiones diferentes a las del fotocátodo, es una de las ventajas que ofrece el uso de la guía de luz, si a ésta se le da la forma adecuada como lo es un cono truncado; sin embargo, con su uso se sacrifica parte de la recepción luminosa debido a la atenuación en su intensidad que sufre en presencia del material de la guía de luz. Para salvar este inconveniente se emplea material de alta transparencia, como lo es el plexiglas o el metacrilato de polimetilo; además, con el mismo fin se aplica MgO en polvo alrededor de la guía de luz, pues tiene una eficiencia de reflexión de 0.89 para la emisión del ZnS , evitando así pérdida lateral de fotones.

A.3. Tubo Fotomultiplicador.³²

La función del tubo fotomultiplicador es crear un pulso eléctrico de varios volts, que pueda ser registrado por los sistemas electrónicos de amplificación.

Un tubo fotomultiplicador está constituido por un fotocátodo, una serie de díodos y un electrodo colector, y su funcionamiento es básicamente el siguiente:

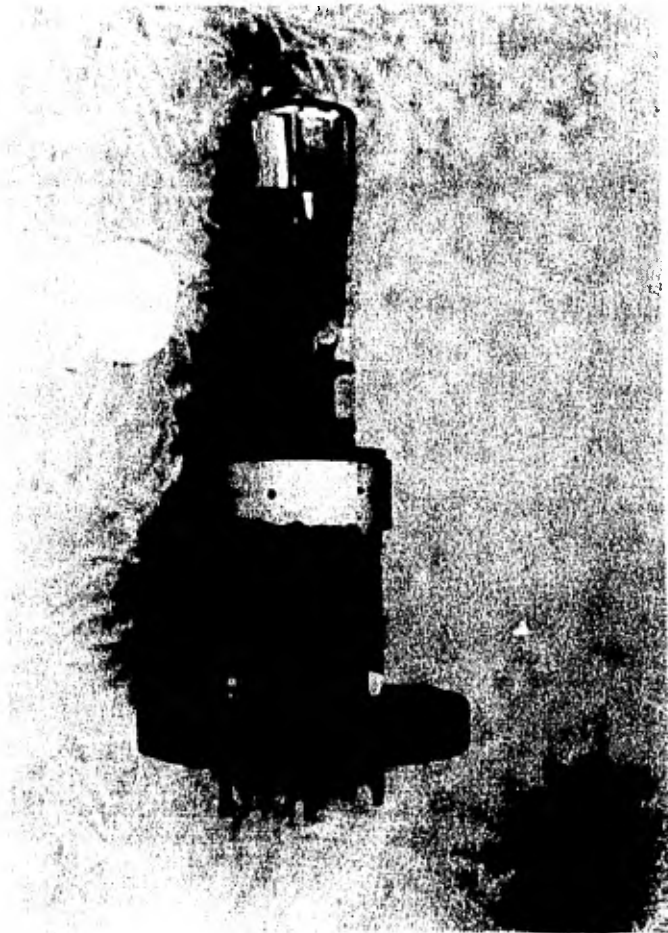


Figura 3.2. Tubo fotomultiplicador Philips 50 AVP.
divisor de voltaje, preamplificador y
detector de ZnS (Ag).

La función del preamplificador es la de magnificar - en forma conveniente la señal obtenida del tubo fotomultiplicador, lo suficiente para aplicarse al discriminador. Para - su diseño se consideran los parámetros siguientes:

- Ganancia.
- Estabilidad.
- Linealidad.
- Respuesta adecuada a la señal de entrada.
- Bajo ruido electrónico.

La función del amplificador es semejante a la del - preamplificador y los parámetros de diseño son los mismos.

La función del discriminador es la de responder sólo a pulsos de entrada superiores en magnitud a una amplitud específica seleccionada con anterioridad. Los siguientes parámetros son importantes en su diseño:

- Estabilidad.
- Tiempo de respuesta corto.
- Constancia en su respuesta.

El formador de pulsos tiene como función dar una forma adecuada al pulso de salida del discriminador, lo que se - logra por la formación de una señal lógica convencional que -

puede ser registrada por el escalador.

El escalador es el instrumento final del sistema - - electrónico asociado y su función es la de presentar la información requerida en forma digital. Las características que presenta son:

- Mayor resolución en el conteo.
- Alta capacidad de conteo.
- Lectura fácil.
- Facilidad de maniobra.

B. Descripción del Sistema Colector de Aire.

El sistema colector de aire está compuesto de una toma del mismo acoplada a la entrada del castillo de plomo, que es el montaje que protege al tubo fotomultiplicador y sostiene al papel filtro en su posición, además presenta una salida de aire que se conecta a la aspiradora.

B.1. Castillo de Plomo.

El diseño del castillo de plomo considera las necesidades propias de los sistemas de detección y colector de aire, como son: montaje del detector y tubo fotomultiplicador, salidas para conexiones, entrada y salida de aire, soporte - -

del papel filtro, protección del detector contra la contaminación y facilidad de ensamble. En la figura 3.3 se muestra un corte transversal del castillo de plomo.

B.2 Papel Filtro.^{34,35}

Un estudio comparativo de K.V. Sukumaran entre 6 tipos de papel filtro, muestra el siguiente orden de preferencia de los mismos: CWS-6, HV-70, AGF/F, AGF/A, Whatman 41 y -- Whatman 42. Las pruebas que realizó con estos papeles filtro fueron:

- a. Eficiencia de filtrado para nitrato de uranio,
- b. Cambios de presión a varios flujos de aire.
- c. Absorción de partículas alfa.
- d. Propiedades físicas tales como: grosor, densidad y contenido de cenizas.

En el presente trabajo se emplea filtro Whatman 42 - debido a la dificultad en obtener otros tipos. La eficiencia de filtrado que presenta es del 99.6% para compuestos de uranio (con dimensiones del orden de 0.01 a 100 micras) y de -- 65% para radiactividad natural.

La distancia a la que se obtiene tal eficiencia, según el autor, es de 2 mm. aproximadamente entre papel filtro-

y detector, no obstante debido a la compuerta de protección del detector en el castillo de plomo diseñado, la distancia es de 3 mm. aproximadamente.

La disposición del papel filtro se realiza por medio de dos anillos que lo sujetan, lo que permite mantenerlo alejado del detector durante la filtración y acercarlo a éste durante la detección; se ha elegido este sistema de filtrado fijo ya que proporciona información acerca de la actividad integral colectada en un intervalo de tiempo predeterminado, además de su sencillez y costo relativamente bajo.

El propósito de la movilidad del papel filtro es permitir el libre deslizamiento de la compuerta de protección del detector y evitar al máximo la contaminación del mismo durante la succión del aire, por deposición de las partículas de uranio en él.

8.3. Bomba de Vacío (Aspiradora).

Se ha seleccionado este tipo de dispositivo pues así se fuerza a pasar el aire a través del papel filtro y depositar en su cara más cercana al detector, las partículas alfa-succionadas del medio ambiente en el recinto en que se emplee el uranio. Además, se emplean mangueras transparentes y de -

interiores lisos para disminuir la posible pérdida de partículas de uranio por adherencia en las paredes interiores de las mismas.

1120


9	3	TORNILLO ALLEN 3/16" x 1/2"	ACERO 303	CARERA	
8	5	TORNILLO ALLEN 3/16" x 1/2"	ACERO 303	CARERA	
7	3	TORNILLO ALLEN 3/16" x 1/2"	ACERO 303	CARERA	
6	1	ANILLO	PLOMO		
5	1	TAPA INFERIOR	PLOMO		
4	1	CILINDRO HUECO	PLOMO		
3	1	1a TAPA SUPERIOR	PLOMO		
2	1	2a TAPA SUPERIOR	PLOMO		
PEZ. NR	CANT.	NOMBRE	MATERIAL	OBSERVACIONES	
REV. 2		M. LONARDI	1-11-81	 ININ GENECIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR	
DISE.				PROYECTO ECO2A DETECTORES Y CONTADORES CASTILLO DE PLOMO INSTRUMENTACION	
DISE. R		JIMENEZ	8-12-81	ESC. 1:1 ACN.	
TITULO		CONJUNTO		OT. 72/81 PLANO DE COEF. REV. 5 0016	

Figura 3.3.a

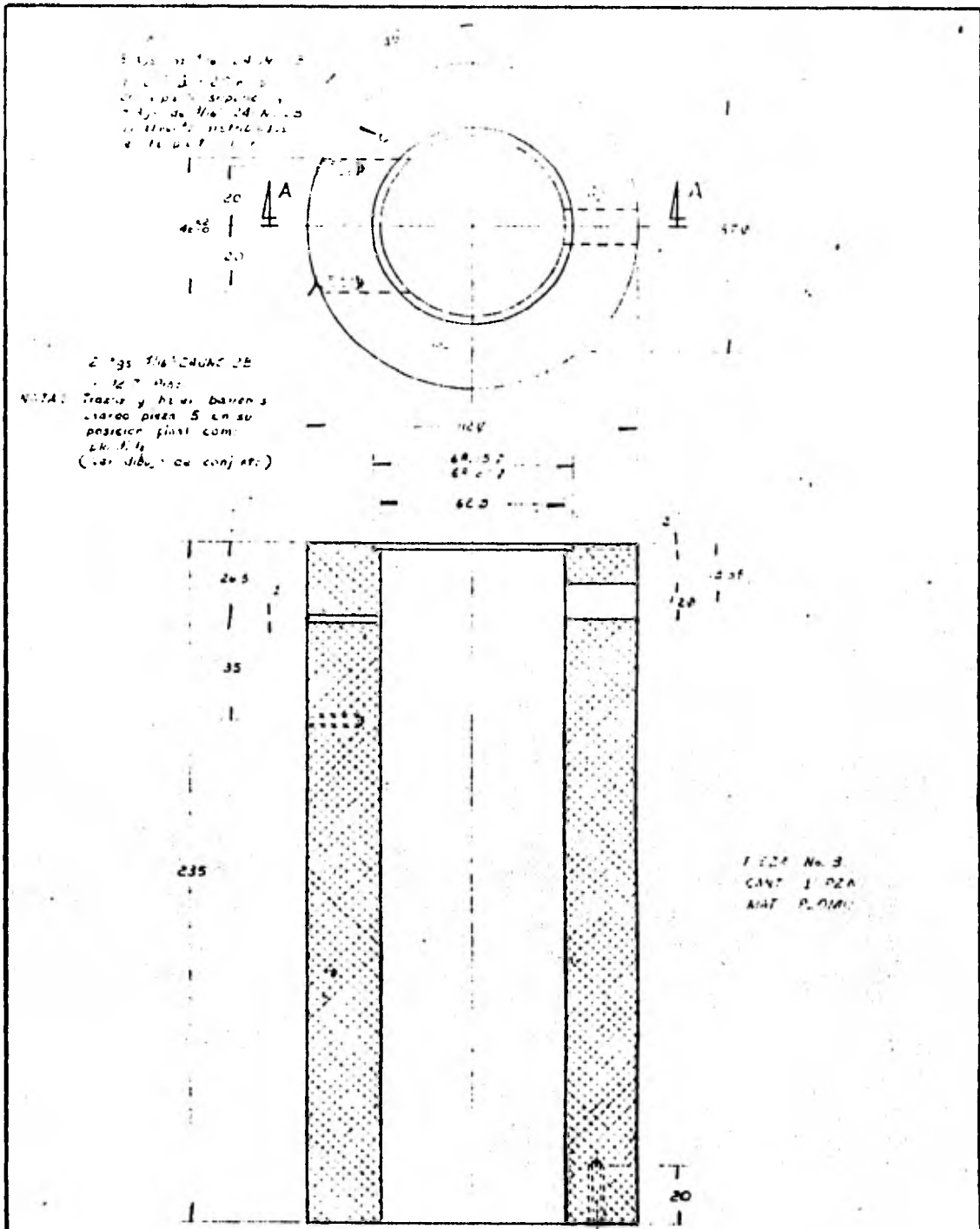
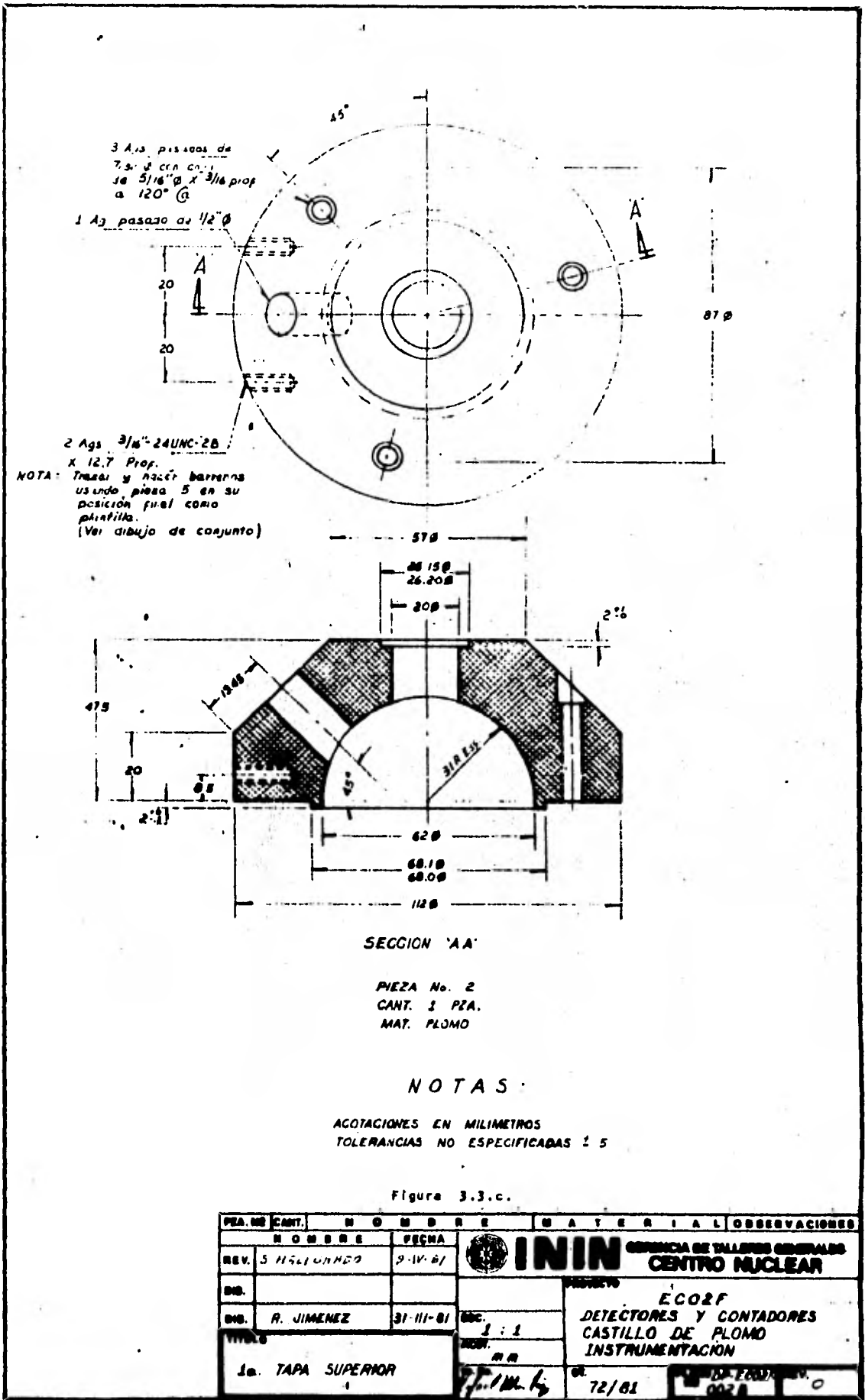
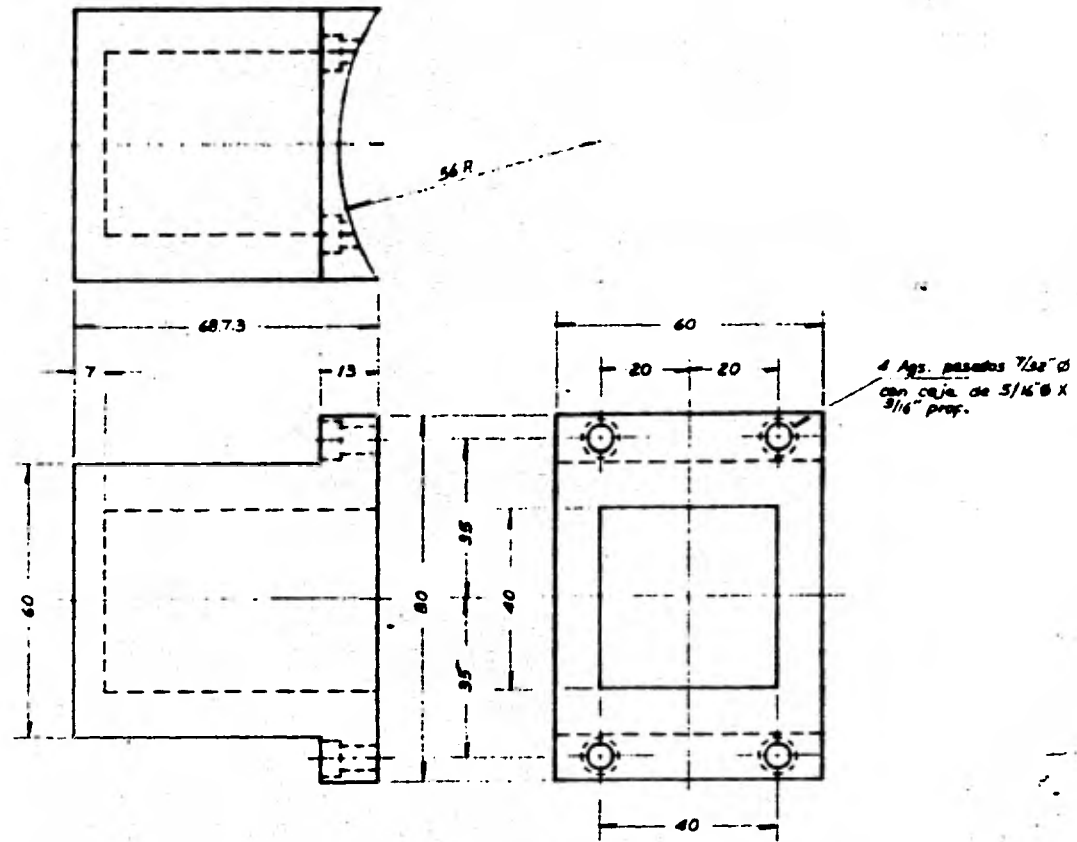


Figura 3.3.b

FEA. NO. (CANT.)	NOMBRE	MATERIAL	OBSERVACIONES
REV. 2	116124040	2.135	
DIB.			
DIB. R. JAIENEZ	2-IV-81	ESC. SIN	PROYECTO ECO2F DETECTORES Y CONTADORES CASTILLO DE PLOMO INSTRUMENTACION
TITULO CILINDRO HUECO		ACAB. m.m.	OT. 72/81
			PLANO DE DISEÑO REV. 003B

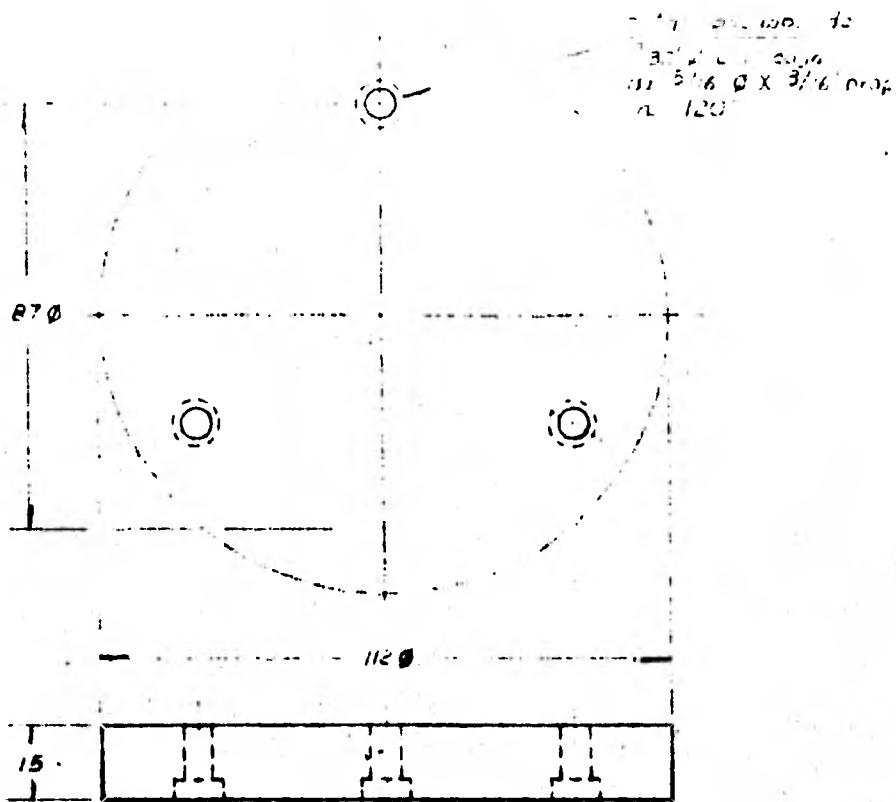




PIEZA No 5
 CANT: 1 PZA.
 MAT. PLOMO

Figura 3.3.d

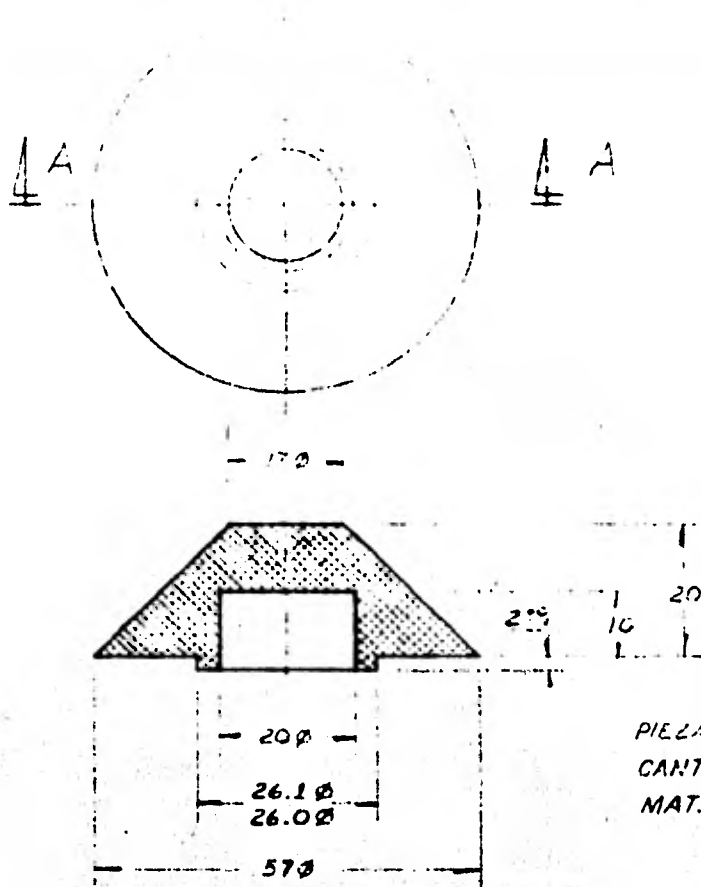
REV.	CANT.	NOMBRE	FECHA	MATERIA	OBSERVACIONES
REV. 5		MALDONADO	7-IV-81		
REV. 6		R. JIMENEZ	6-IX-81		
TITULO				ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR PROYECTO EGOZF DETECTORES Y CONTADORES CASTILLO DE PLOMO INSTRUMENTACION	
SOPORTE -				ESCALA: 1:1 DIB. EN: [Signature] FECHA: 7/81	REV. 0 EGOZF COD.



PIEZA No. 4
 CANT. 1 PZA.
 MAT. PLOMO

Figura 3.3.e

PIZA. NO	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES
REV.	S. MALDONADO	N O M B R E		M A T E R I A L		
		FECHA		PROYECTO		
DIB.		9-IV-81		ECO2F		
DIB.	R. JIMENEZ	3-IV-81		DETECTORES Y CONTADORES		
TITULO		EDC.		CASTILLO DE PLOMO		
TAPA INFERIOR		SIN		INSTRUMENTACION		
		ACOT.		mm		
		V. B.		OT.		
		[Signature]		72/81		
		PLANS		DP-ECO2F.		REV. 0
		NO		004A		




PIEZA No 1
 CANT. 1 PZA.
 MAT. PLOMO

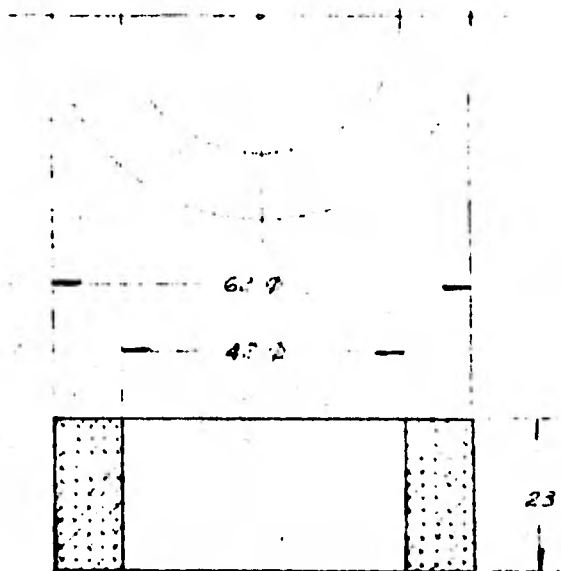
SECCION 'AA'

NOTA :

TOLERANCIAS NO ESPECIFICADAS ± 0.5


Figura 3.3.F

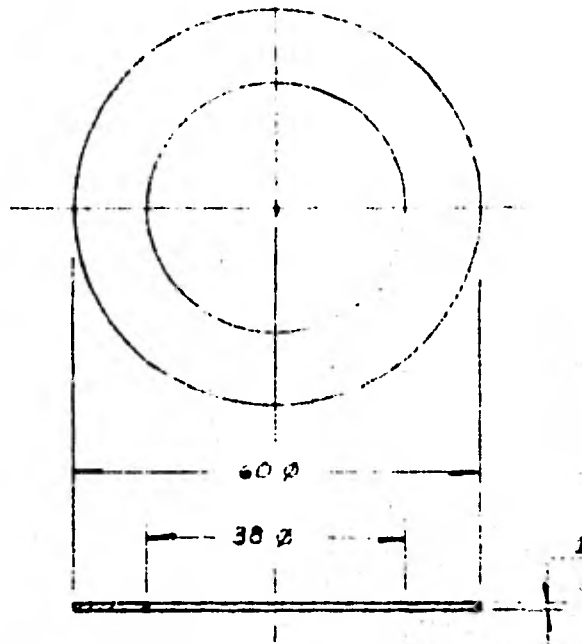
PZA. N2	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES
		N O M B R E	FECHA	 ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR		
REV.	S. HERRERA	9-IV-81				
DIB.				PROYECTO ECO2F DETECTORES Y CONTADORES. CASTILLO DE PLOMO INSTRUMENTACION		
DIB.	R JIMENEZ	2-IV-81	ESC.			
TITULO				ACOT.		
21 TAPA SUPERIOR				Vo. Co.	OT.	PLANO DP-ECO2F. REV. 001A
					72/81	



CANT. 2 PZAS.
MAT. ALUMINIO


Figura 3.3.g

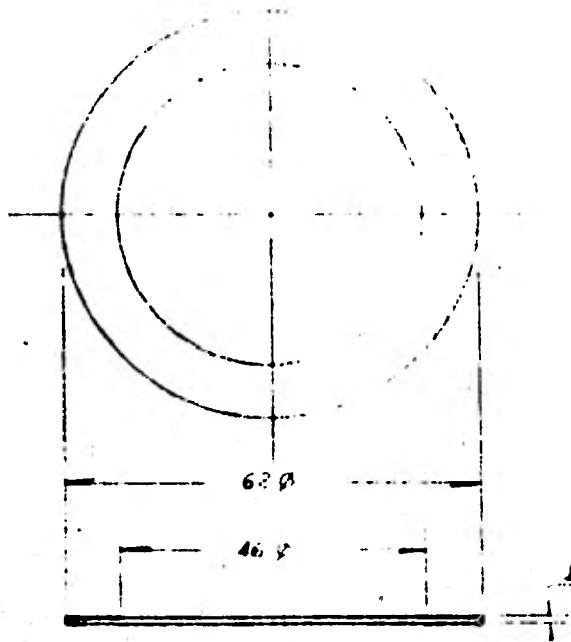
PZA. N°	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES	
REV.		N O M B R E	FECHA	 ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR			
DIS.							
DIS.	R. JIMENEZ	27/10/91	ESC.	PROYECTO E0029 DETECTORES CONTROL DE INSTRUMENTAL N			
TITULO		ACOT.					
CILINDRO		Vo. No.		OT.	70181	PLANO N° 2000	REV.



CANT. 4 PZAS.
MAT. ALUMINIO


Figura 3.3.h

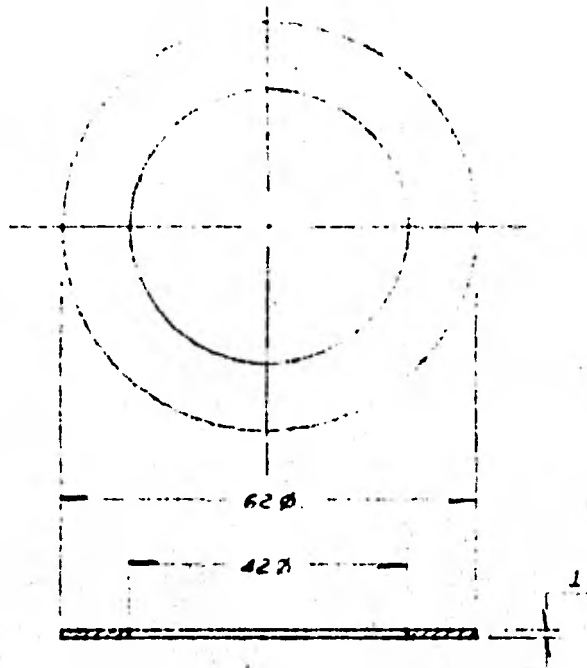
PZA. Nº	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES
REV.		N O M B R E		FECHA		 ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR
S. VALDONADO		R. JIMENEZ		27-III-81		
DIS.		TITULO		PROYECTO		
DIB.		ANILLO		EG02F DETECTORES Y CONTADORES		
ESC.		ACOT.		INSTRUMENTACION		
1 : 1		m m		OT.		
Vo. Bo.		72/81		PLANO Nº		REV.
E. J. M.		007A		007A		0



CANT. 2 PZAS
 MAT. ALUMINIO


Figura 3.3.1

PZA. NO	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES
		N O M B R E	FECHA	 ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR		
REV.	S. MHLONGADO	9-IV-81				
DIB.				PROYECTO EC 02F DETECTORES Y CONTADORES INSTRUMENTACION		
DIB.	R. JIMENEZ	30-III 81	EBC. 1:1			
TITULO			ACOT. mm	No. de OT. 72/81		
ANILLO						
				PLANO DP EC02F ME 00RA	REV. 5	



PIEZA No
 CANT. 2 PZAS.
 MAT. ALUMINIO

Figura 3;3.J

PZA. N°	CANT.	N O M B R E		M A T E R I A L		OBSERVACIONES
		N O M B R E	FECHA	 ININ GERENCIA DE TALLERES GENERALES CENTRO NUCLEAR		
REV.				PROYECTO		
DIS.				ECO 2 F		
DIB.	R. JIMENEZ	30 III-81	EBC.	DETECTORES Y CONTADORES		
TITULO			ACOT.	INSTRUMENTACION		
ANILLO			1 : 1			
			mm			
			Ve. De.	OT	PLANO DP-ECO 2 F	REV.
				12 31	009A	

CAPITULO CUARTO
PRUEBAS AL MONITOR CONTINUO DE URANIO

En este último capítulo se presentan las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento adecuado del monitor continuo de uranio y se reportan los resultados así obtenidos.

A. Pruebas.

Las pruebas fueron consideradas en tres grupos que son:

1. Sistema de detección.
2. Sistema colector de aire.
3. Monitor continuo de uranio.

Estas pruebas fueron realizadas en la Planta Piloto de Pastillas de UO_2 en el Centro Nuclear de Salazar, empleando una prensadora de pastillas en la que se produjeron atmósferas de trabajo con partículas de uranio suspendidas.

A.1 Pruebas al Sistema de Detección.

Las pruebas efectuadas a este sistema fueron realizada

das respetando el arreglo y la electrónica mostrada en el diagrama de bloques en la figura 3.1 del capítulo anterior y que consistieron en:

- a. Determinación de los valores reales de las resistencias - empleadas en el divisor de voltaje mediante medición directa. Asimismo, se probó aplicando un voltaje de 1000 - volts entre fotocátodo y ánodo y midiendo la corriente - eléctrica de consumo en el divisor de voltaje mencionado.
- b. Prueba dinámica al preamplificador que está integrado dentro del castillo de plomo junto con el tubo fotomultiplicador, el divisor de voltaje y el detector de ZnS(Ag), la cual se realizó aplicando una señal a la entrada del mismo.
- c. Determinación del valor de la relación señal-ruido (S/R) - para garantizar que los eventos originados en el detector de ZnS(Ag) por la radiación alfa, produzcan pulsos fácilmente distinguibles del ruido electrónico del sistema.

Para lograr este fin se empleó una fuente calibrada de Am, Pu y Cm que se colocó en el detector de ZnS(Ag) y mediante un analizador multicanal se obtuvo un espectro característico en el que se observa el pico correspondiente al - ruido electrónico y el correspondiente a la fuente calibrada según se muestra en la figura 4.1 al final del capítulo.

A.2 Pruebas al Sistema Colector de Aire.

Las pruebas realizadas a este sistema consistieron en:

- a. Revisión visual del ensamblado en el castillo de plomo.
- b. Revisión visual de las conexiones entre el castillo de plomo, las mangueras y la aspiradora.
- c. Absorción por medio de la aspiradora de aire con partículas de uranio suspendidas, para comprobar las dos etapas anteriores y que el papel filtro Whatman 42 retuvo partículas de uranio.

En la figura 4.2 se muestra el castillo de plomo y las conexiones.

A.3 Pruebas al Monitor Continuo de Uranio.

Todo el conjunto del monitor continuo de uranio formado por el sistema de detección y el colector de aire fué sometido a las pruebas siguientes:

- a. Determinación del fondo de radiación alfa durante 5 minutos sin papel filtro.

- b. Determinación del fondo de radiación alfa durante 5 minutos con el papel filtro en posición elevada o de succión, pero sin funcionar la aspiradora.
- c. Succión de la atmósfera producida por la prensadora de -- pastillas durante 10 minutos con el papel filtro colocado en posición elevada y conteo con el analizador multicanal en el mismo tiempo para determinar la acumulación de partículas de uranio sobre el detector y/o en otros puntos del castillo de plomo.
- d. Conteo durante 10 minutos del papel filtro empleado en la etapa anterior, pero colocado en la posición baja o de de_{tección} que es aproximadamente a 3 mm. del detector.

En la figura 4.3 se muestra el monitor continuo de uranio en conjunto y en la figura 4.4 se presenta la prensadora de pastillas de UO_2 , en donde se crearon las condiciones de prueba y fué colocada la toma de aire.

B. Resultados.

De acuerdo a las pruebas realizadas según se muestra en la sección anterior, se reportan los resultados siguientes:

B.1 Sistema de Detección.

- a. Los valores reales de las resistencias empleadas en el divisor de voltaje no difieren más del 10% del valor nominal de cada una de ellas de acuerdo con su tolerancia lo que asegura que la multiplicación electrónica es suficiente para obtener un pulso registrable.
- b. Con esta prueba dinámica se determinó una linealidad del preamplificador mejor del 1%, aún a temperatura de 40°C.
- c. La relación señal-ruido (S/R) de acuerdo a los canales ocupados en el analizador multicanal, por la fuente calibrada y el ruido electrónico es de 4.6, lo que indica que usando un discriminador de altura de pulsos es sencillo obtener sólo la señal de la fuente calibrada, la que se muestra en la figura 4.5.

B.2 Sistema Colector de Aire.

Las pruebas realizadas al respecto aportaron los siguientes resultados:

- a. Se aprecian en el castillo de plomo pequeñas fisuras por donde existen filtraciones de aire y luz, las cuales se intentaron reducir por medio de alisamiento de superficies y sellamiento de ranuras y orificios.

- b. En estas conexiones no se apreciaron fugas de aire con partículas de uranio en suspensión ya que fueron selladas usando pintura y abrazaderas.
- c. El funcionamiento de la aspiradora no es el óptimo pues presenta variaciones en la cantidad de aire succionado. Además, el papel filtro empleado sí retuvo partículas de uranio según se verá en la siguiente sección donde se reporta el conteo del mismo.

B.3 Monitor Continuo de Uranio.

En la tabla 4.1. se reportan sólo algunos de los resultados típicos obtenidos y que se consideran representativos de los demás; la razón por la que no se anotan todos los resultados es que los tiempos tanto de absorción como de medición son más cortos, lo cual no corresponde a la situación real de trabajo.

En la figura 4.6 es posible observar el espectro característico correspondiente a una pastilla de UO_2 fabricada en el Centro Nuclear de Salazar.

N U M E R O D E C U E N T A S				
Pruebas Número de Prueba.	en 5 minutos		en 10 minutos	
	Fondo de radiación alfa sin papel fil- tro.	Fondo de radia- ción alfa con - papel filtro.	Acumulación en - el monitor conti- nuo de uranio.	Conteo del pa- pel filtro em- pleado en posi- ción de detec- ción
1	4	4	8	689
2	4	3	5	704
3	2	4	8	690
4	6	7	13	697

Tabla 4.1

Resultados obtenidos durante las pruebas a que
fué sometido el monitor continuo de uranio en-
presencia de atmósferas con partículas de ura-
nio en suspensión.

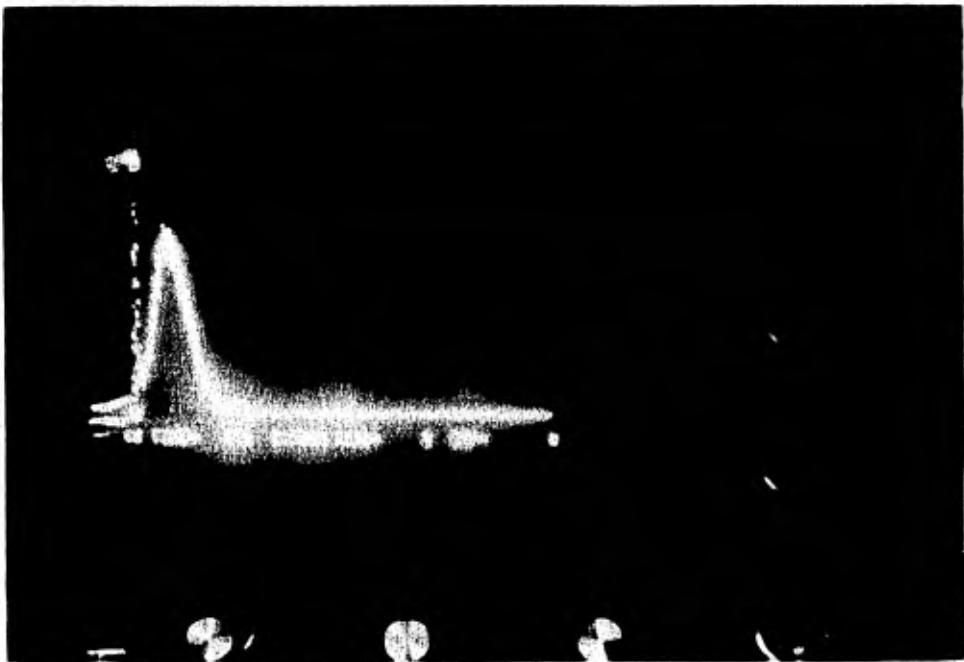


Figura 4.1. Espectro característico correspondiente al ruido electrónico y a una fuente calibrada de Am, Pu y Cm.



Figura 4.2. Castillo de plomo y conexiones.
Al fondo aparece la prensadora
de pastillas de UO_2 .



Figura 4.3. Monitor continuo de uranio en aire, compuesto por detector de $ZnS(Ag)$, tubo fotomultiplicador, preamplificador, divisor de voltaje, amplificador, fuente de alto voltaje, multi-canal y aspiradora.



Figura 4.4. Máquina prensadora de pastillas de UO_2

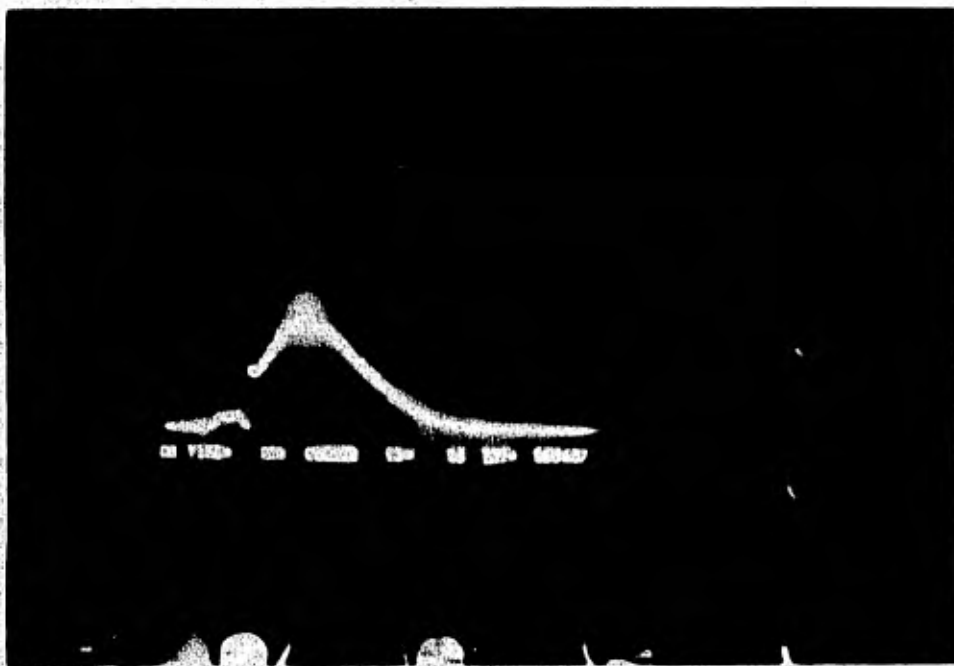


Figura 4.5. Espectro característico correspondiente a una fuente calibrada de Am, Pu y Cm.



Figura 4.6. Espectro característico correspondiente a una pastilla de UO_2 .

C O N C L U S I O N E S

En esta última parte del trabajo se anotan ciertas - consideraciones que podrían conducir a una optimización en el funcionamiento del monitor continuo de uranio y que son:

1. Lograr un mejor acabado en la manufactura del castillo de plomo para eliminar las filtraciones de aire y de luz, -- pues la primera no permite determinar el flujo succionado y la segunda ocasiona alteraciones en el funcionamiento - del tubo fotomultiplicador.
2. Sustituir el uso de la aspiradora por un sistema de suc-- ción adecuado que permita controlar bajo condiciones esta-- bles el flujo de aire admitido, así como la magnitud del-- mismo.
3. Utilizar papel filtro CWS-6 y HV-70 para aumentar la efi-- ciencia de filtrado.
4. Automatizar la compuerta de protección del detector, pues ésta es una de las formas de eliminar el paso de luz ha-- cia el tubo fotomultiplicador.

5. Automatizar mediante algún dispositivo el ascenso y descenso del papel filtro, ya que así se evita el tener que apagar el equipo electrónico cada vez que se desea moverlo, pues es necesario abrir el castillo de plomo.
6. Comparar con otros sistemas de monitoreo ya probados para determinar la confiabilidad del monitor continuo de uranio diseñado.
7. Realizar un mayor número de pruebas y así optimizar la estadística del monitor continuo de uranio. (Esto es consecuencia de la dificultad para lograr las condiciones atmosféricas mencionadas con anterioridad).

Es conveniente aclarar en esta parte que de acuerdo a la fórmula³⁶:

$$\left(\frac{t_f}{t_c}\right)^2 = \frac{N_f}{N_c}, \quad \text{donde}$$

t_f = tiempo de conteo del fondo de radiación.

t_c = tiempo de conteo de un muestreo.

N_c = número de cuentas del muestreo.

N_f = número de cuentas del fondo de radiación.

y considerando los valores promedio de la tabla 4.1 se tiene que hubiera bastado con determinar el fondo de radiación durante 45 segundos solamente.

B I B L I O G R A F I A

1. Division of Radiological Health, U.S. Department of Health, Education and Welfare, Radiological Health Hand book. U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 1970, -- Sec. 5.
2. Moe, H.J., Lasuk, S.R., Schumacher, M.C. y Hunt, H.M. - - Radiation Safety Technician Training Course. Argonne National Laboratory. Mayo 1972. Sec. 3
3. Idem 2.
4. Idem 2.
5. Price, W.J. Nuclear Radiation Detection. New York 1964. McGraw Hill. cap. 1.
6. Fenyves E. y Halman O. The Physical Principles of Nuclear Radiation Measurements. Academic Press. 1969. cap. 2.
7. Idem. 5.
8. Arya, A.P. Fundamentals on Nuclear Physics. Allyson and - Bacon. 1976. cap. 7.

9. Idem 8.
10. Idem 2.
11. Idem 6, cap. 2.
12. Idem 2
13. National Center for Radiological Health U.S. Department of Health, Education and Welfare. Basic Radiological -- Health Training Manual. Public Health Service U.S. Government Printing Office, Washington D.C., Agosto 1966.- Sec. 7.
14. Idem 13.
15. Staff Report of the Federal Radiation Council. Back --- ground Material for de Development of Radiation Stan --- dards. U.S. Government Printing Office Washington, D.C. Mayo 1961. Reporte No. 1.
16. Idem 5, cap. 2
17. Idem 6, cap. 3
18. Staub, H.H. Experimental Nuclear Physics. Ed. E. Segré. New York 1953, cap. 3.

19. Birks, J.B. The theory and practice of scintillation - counting. Pergamon Press. New York, 1964. cap. 13.
20. Idem 5, cap. 7
21. Idem 6, cap. 3
22. Bearden, J.A. Review of Scientific Instrumentation. 8:271., 1963:
23. Idem 5, cap. 2
24. Idem 5, cap. 2
25. Dearnaley, G.H.A. and Northrop, W. Semiconductor Coun--ters for Nuclear Radiation; E. & F.N. Spon Limited, 1963, London. cap. 3.
26. Idem 5, cap. 7.
27. Idem 19
28. Graves, J.D., Webb, L.A. y Davls. R.H. Nucleonics. 10 (12), Julio 1952.

29. Dato experimental proporcionado por el Dr. Rafael Martínez Lugo.
30. Mott, W.E. y Sutton, R.B., Handbuch der Physik. Vol. 45/2 Ed. S. Flugge., Berlín 1958. cap. 2
31. Timmerhaus, K.D., Giller, E.B., Duffield, R.G. y Drickamer, H.G. Nucleonics. 6(37), Junio 1950.
32. Nicholson, P.W. Nuclear Electronics. John Wiley and Sons. Londres, 1974. cap. 1.
33. United Kingdom Atomic Energy Authority Research Group. Electronics for Nuclear Particle Analysis. Harwell Postgraduate Series. Oxford University Press, 1970. cap. 1.
34. Sukumaran, K.V. Study of filter media for air-sampling purposes. OIEA y OMS. Viena 1969. p. 243.
35. Billard, F y Madeleine, G. Penetration of aerosols in filters. OIEA. Viena 1967 p. 311.
36. Idem 5, cap. 3.