

00576

6 ~~7~~
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
ANALISIS DE ENRIQUECIMIENTO DE
BARRAS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS
NUCLEARES

P R E S E N T A

FIS. EVA LETICIA ROJAS CALDERON

MEXICO, D. F.

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

262071



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA
DIRECCIÓN

ING. LEOPOLDO SILVA GUTIÉRREZ
Director General de la Administración Escolar
Presente.

AT'N: Lic. Antonio Díaz García
Jefe de la Unidad de Registro e Información

Me es grato informarle que la alumna FIS. LETICIA ROJAS CALDERON presentará próximamente su examen para obtener el grado de Maestría en Ciencias Nucleares ante el siguiente jurado:

Presidente:	Dr. Manuel Navarrete Tejero
Primer Vocal	Dr. Miguel Balcázar García (ININ)
Secretario:	M. en C. Luis Cabrera Mosqueda
Primer Suplente:	M. en C. Ruperto Mazón Ramírez (ININ)
Segundo Suplente:	M. en C. Trinidad Martínez Castillo

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., 18 de febrero de 1998.

El Director


Dr. Enrique R. Bazúa Rueda

C.c.p. Integrantes del Jurado
C.c.p. Coordinador de Área
C.c.p. Departamento de Control Escolar
C.c.p. Interesado
CAPMDCQ*ggm.

Deseo agradecer a:

La Universidad Nacional Autónoma de México por los conocimientos adquiridos a lo largo de mi vida universitaria.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por permitirme participar en el importante proyecto de desarrollo tecnológico "Fabricación de Ensamblajes Combustibles Prototipo" del cual surgió el presente trabajo y por todo el apoyo brindado.

Al Dr. Rafael Martínez Lugo por dirigir este trabajo.

A MIS PADRES :

Porque a ellos les debo lo que soy,
lo que tengo y me han apoyado e
impulsado para lograr mis metas.

A MIS HERMANOS :

Por sus consejos, confianza , ayuda
desinteresada y los momentos com-
partidos.

A JUAN JOSE:

Por su admiración, apoyo y sentimientos
hacia mí que nos unirán toda la vida y
me hacen feliz.

A MIS AMIGOS:

Por brindarme su amistad y manifestarla
en los momentos difíciles.

AL PERSONAL DE LA PPFCN:

Que actuó con honestidad y puso
todo su empeño y conocimientos
para lograr que el país avanzara en
la industria nuclear.

RESUMEN

La industria nuclear está regulada de manera muy estricta en todo el mundo y el aseguramiento de la calidad es importante en todas las instalaciones o procesos relacionados con ella. La manufactura de combustible nuclear no es la excepción.

El ININ adquirió el compromiso de fabricar cuatro ensambles de combustible para la planta nucleoelectrica de la CFE en Laguna Verde, Veracruz bajo las especificaciones de General Electric y sujetándose todas las regulaciones de la industria nuclear.

Uno de los requisitos de calidad de la manufactura de combustible tiene que ver con el enriquecimiento de las pastillas de U-235 dentro de las barras del ensamble combustible. El sistema que se describe en este trabajo se desarrolló para asegurar la calidad del producto final en este aspecto.

Con este sistema, desarrollado en el ININ, es posible detectar irregularidades puntuales de enriquecimiento de U-235 a partir de 0.4 % en una columna de pastillas con un intervalo de confianza de 95 % y también es posible discriminar diferencias de enriquecimiento mayores a 0.2% entre segmentos homogéneos de pastillas con un intervalo de confianza del 95%.

El ININ entregó los cuatro ensambles de combustible a la CFE y estos fueron introducidos al núcleo del reactor nuclear de la Unidad 1 en el quinto ciclo de combustible. Actualmente están produciendo energía y han mostrado un comportamiento mecánico y neutrónico adecuado.

ABSTRACT

Nuclear industry is strongly regulated all over the world and quality assurance is important in every nuclear installation or process related with it. Nuclear fuel manufacture is not the exception.

ININ was committed to manufacture four nuclear fuel bundles for the CFE nucleoelectric station at Laguna Verde, Veracruz, under General Electric specifications and fulfilling all the requirements of this industry.

One of the quality control requisites in nuclear fuel manufacture deals with the enrichment of the pellets inside the fuel bundle rods. To achieve the quality demanded in this aspect, the system described in this work was developed.

With this system, developed at ININ it is possible to detect enrichment spikes since 0.4 % in a column of pellets with a 95 % confidence interval and to identify enrichment differences greater than 0.2 % e between homogeneous segments, also with a 95 % confidence interval.

ININ delivered the four nuclear fuel bundles to CFE and these were introduced in the core of the nuclear reactor of Unit 1 in the fifth cycle. Nowadays they are producing energy and have shown a correct mechanic performance and neutronic behaviour.

Contenido

1.- INTRODUCCION	1
2.- CONCEPTOS GENERALES	3
2.1. Interacción de la radiación gamma con la materia.	3
2.1.1. Efecto Fotoeléctrico.	3
2.1.2. Efecto Compton.	3
2.2.- Interacción de la radiación gamma en detectores.	7
2.3.- Espectros de energía de radiación gamma.	10
2.4. Isótopo ^{235}U.	14
3.-DESARROLLO	19
3.1.Instrumentación.	19
3.1.1.Sistema de Detección.	19
3.1.1.1.El detector	19
3.1.1.2.El tubo fotomultiplicador	22
3.1.1.3. La fuente de alto voltaje	22
3.1.1.4.Divisor de voltaje y preamplificador	23
3.1.1.5. El amplificador de pulsos	23
3.1.1.6 Discriminador / analizador monocanal	24
3.1.2.Sistema de control y conteo.	24
3.2.Materiales.	27
3.3. Procedimiento de Trabajo.	29
3.3.1.Obtención del voltaje de operación del detector	29
3.3.2.Selección de la ganancia del amplificador.	31

3.3.3. Definición de condiciones de operación en el monocanal.	32
3.3.4. Elección del material de blindaje.	32
3.3.5 Establecimiento de parámetros.	35
3.3.5.1. Disposición geométrica.	35
3.3.5.2. Desplazamiento de la barra por el sistema.	40
3.3.5.3. Tiempo de Conteo	40
3.3.6. Reconocimiento de pastillas de enriquecimiento diferente al de las circundantes en una columna homogénea de pastillas dentro de una barra de combustible nuclear.	41
3.3.7. Evaluación de enriquecimiento de columnas homogéneas de pastillas dentro de barras de combustible nuclear.	48
3.3.8. Proceso de verificación del sistema para el análisis de barras de producción.	51
4.- RESULTADOS Y DISCUSION.	52
4.1 Resultados del reconocimiento de pastillas de enriquecimiento diferente al de las circundantes en una columna homogénea de pastillas dentro de barras de combustible.	54
4.1.1. Resultados del análisis de los extremos de las barras y zonas de cambio de enriquecimiento.	54
4.1.2. Resultados del análisis de los segmentos centrales de las barras que contienen pastillas de distinto enriquecimiento insertadas a diferentes distancias.	57
4.2. Resultados de la determinación del enriquecimiento de columnas homogéneas de pastillas en barras de combustible nuclear.	77
4.3. Resultados de las verificaciones.	79
5.- CONCLUSIONES Y PROPUESTAS.	80
6.- REFERENCIAS	82
7.- Lista de tablas y figuras	84
8.- Anexos	87
Anexo I. Resultados de barras de producción	88
Anexo II : Promedios generales de cuentas acumuladas en 35 s por segmento de barra	119

1.- INTRODUCCION

La industria nuclear es de las más estrictas en cuanto a regulaciones y requerimientos de calidad por el riesgo que conlleva un incidente de este género y además, por la satanización de que ha sido objeto a través de la historia así que, cuando México firmó convenios de fabricación y suministro de combustible nuclear con Laguna Verde y de intercambio de tecnología y uso de patente de General Electric en 1987 se comprometió a fabricar el producto cubriendo rigurosos requisitos de calidad y bajo regulaciones muy estrictas.

En 1990 entró en operación comercial la central nucleoelectrica de Laguna Verde; el reconocimiento a nivel mundial de la correcta y eficiente operación de la central confirió al ININ una responsabilidad adicional para fabricar los ensambles combustibles con excelencia en calidad. Bajo ese panorama se fabricaron cuatro ensambles en la Planta Piloto de Fabricación de Combustible Nuclear del ININ y que están dentro del reactor de la Unidad 2 de la CNLV.

La realización del presente trabajo surgió de la necesidad de cubrir un requisito de calidad específico que es el de la correcta distribución de columnas de pastillas de diferentes enriquecimientos dentro de barras de combustible de acuerdo con el diseño del fabricante.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema para el análisis de la distribución de diferentes enriquecimientos dentro de una barra de combustible terminada. Con este sistema se pueden determinar cambios de enriquecimiento de segmentos en la barra ,así como la presencia de pastillas que tienen un

enriquecimiento diferente al de las circundantes en una columna homogénea de éstas.

El sistema de análisis se compone de dos subsistemas: el de control y el de detección de radiación gamma.

La función del sistema de detección es el de seleccionar y contabilizar los eventos de radiación gamma de 185.7 keV producidos en el decaimiento natural del ^{235}U de las pastillas de UO_2 que se encuentran en el interior de las barras de combustible nuclear, utilizando el hecho de que hay una proporcionalidad entre el enriquecimiento de ^{235}U y las razones de conteo de la radiación característica del isótopo generadas por su decaimiento.

El sistema de control comanda y cuantifica el desplazamiento en pasos de una barra de 4 metros de longitud por el interior de un detector de yoduro de sodio. También concentra la información que proviene de los dos subsistemas.

La caracterización del sistema de detección se efectuó analizando barras de referencia fabricadas con los mismos materiales que las barras de producción y con diversas configuraciones semejantes a las de aquellas.

La calibración del sistema de control se efectuó para comandar el movimiento de la barra haciéndola moverse en pasos tan cercanos a 5 mm como lo permitió la resolución de los codificadores de cuadratura.

Con el sistema mencionado anteriormente y bajo las condiciones de realización de este trabajo pueden detectarse diferencias de enriquecimiento mayores o iguales a 0.4 % de una pastilla dentro de una columna homogénea con un nivel de confianza del 95%.

También bajo las condiciones de este sistema pueden distinguirse columnas homogéneas de pastillas con un 0.2 % de diferencia de enriquecimiento entre sí dentro de barras de Zircaloy con un nivel de confianza del 95 %.

Las razones de conteo de radiación que se obtienen permiten asegurar que se tiene un error menor al 1 %.

2.- CONCEPTOS GENERALES

Para la mejor comprensión de la metodología empleada para desarrollar este sistema. Se considera conveniente mencionar algunos de los procesos de interacción gamma con la materia, su detección, el análisis de los espectros resultantes, así como las características principales del radioisótopo que emite esta radiación

2.1. Interacción de la radiación gamma con la materia.

Tipos de Interacción.

Existen varios tipos de interacción que pueden ocurrir cuando incide radiación gamma en la materia, los importantes para este trabajo son el efecto fotoeléctrico y la dispersión Compton.

Cual de las interacciones se presente depende principalmente de la energía del rayo gamma incidente y del número atómico del material en el que incide.

En los incisos 2.1.1. y 2.1.2. se describen brevemente las interacciones mencionadas.

2.1.1. Efecto Fotoeléctrico.

En esta interacción incide un fotón con una energía $h\nu$ en un átomo, le entrega toda su energía a un electrón de las capas más fuertemente ligadas al átomo y desaparece completamente ; el electrón al que ahora se le llama fotoelectrón es expulsado con una energía E_{e^-} que se calcula según 2.1.

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

E_b es la energía de amarre del electrón en su capa original.

Al salir el fotoelectrón, el átomo queda ionizado y la vacancia remanente se llena rápidamente capturando un electrón libre del medio o con un rearrreglo de electrones de otras capas.

Cuando sucede el reacomodamiento de las capas, se generan rayos X característicos que pueden ser reabsorbidos en capas exteriores del átomo, o se emite un electrón Auger que lleva la energía de excitación del átomo.

Cuando se tienen rayos gamma de baja energía E_γ (hasta varios cientos de keV) y el material con que interacciona tiene un número atómico grande, predomina el efecto fotoeléctrico sobre cualquier tipo de interacción ya que a mayor número atómico, mayor probabilidad de ocurrencia.

Una expresión analítica aproximada de la probabilidad de absorción fotoeléctrica por átomo es la 2.2 (Ref. 1):

$$\tau_e \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^3} \quad (2.2)$$

donde n está entre 4 y 5.

En este trabajo es la ocurrencia de este proceso de interacción el que se utiliza para cuantificar el contenido de ^{235}U en las pastillas de la barra bajo estudio.

2.1.2. Efecto Compton.

En este caso el fotón con una energía E_γ interacciona con un electrón del material absorbedor cediéndole parte de su energía y es dispersado a un ángulo θ respecto de su dirección original. Con la expresión 2.3.(Ref. 2) se calcula de manera aproximada la probabilidad de ocurrencia τ_c del efecto Compton.

$$\tau_c \propto \frac{Z}{E_\gamma} \quad (2.3)$$

Cualquier ángulo de dispersión es posible y la energía transferida al electrón va de cero hasta un valor máximo que equivale a una fracción grande de la energía del rayo gamma.

La expresión 2.4 relaciona la transferencia de energía $h\nu'$ con el ángulo de dispersión para cualquier interacción.

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.4)$$

donde m_0c^2 es la energía equivalente de la masa en reposo del electrón (0.511 Mev). La energía cinética del electrón E_{e-} está dada por 2.5.

$$E_{e-} = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{h\nu(1 - \cos\theta)}{\frac{m_0c^2}{1 + \frac{h\nu(1 - \cos\theta)}{m_0c^2}}} \quad (2.5)$$

que cuando $\theta=\pi$ se simplifica (ec.2.6.)

$$E_{e-} = h\nu \frac{2h\nu}{m_0c^2} \frac{2h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \quad (2.6)$$

Como se dijo anteriormente, la dispersión Compton puede ocurrir a cualquier ángulo y la energía que se puede transferir al electrón, va desde cero hasta un valor máximo que ocurre cuando $\theta=\pi$. A ángulos cercanos a cero grados, el electrón dispersado adquiere muy poca energía y el fotón continúa casi con la

misma energía con la que incidió. A 180 grados, el fotón incidente es retrodispersado y el electrón toma la trayectoria de aquél con el máximo de energía que se le puede transmitir.

La función de distribución de energías que pueden adquirir los electrones después de una interacción Compton se presenta en la fig. 2.1.(Ref. 2).

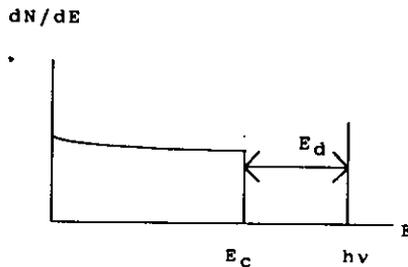


Fig. 2.1 Distribución de energías de los electrones después de una interacción por Compton.

La energía máxima que puede adquirir el electrón después del efecto Compton (E_C) está dada por la ecuación 2.7 y se conoce como orilla Compton.

$$E_c = \frac{E_\gamma^2}{E_\gamma + 0.25} \text{ Mev} \quad (2.7)$$

Sustituyendo $E_\gamma = 0.1857$ Mev que es la energía γ del ^{235}U que es la que nos interesa, obtenemos que $E_C = 0.0791$ Mev.

La diferencia E_d entre el pico de energía por interacción fotoeléctrica y la energía máxima que puede tener el electrón por efecto Compton está dada en 2.8.

$$E_d = hv - E_e \quad \theta = \pi$$

(2.8)

$$E_d = \frac{hv}{1 + \frac{2hv}{m_0c^2}} = \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{2E_\gamma}{0.511}\right)} = \frac{E_\gamma}{1 + 4E_\gamma}$$

Sustituyendo en la ecuación 2.8 el valor de la gamma principal del ^{235}U se obtiene que $E_d = 0.1065 \text{ Mev}$ que es un valor que permite establecer el límite de discriminación fácilmente.

2.2.- Interacción de la radiación gamma en detectores.

Como en el caso de cualquier material, al incidir radiación gamma en un detector ocurren los tipos de interacción mencionados en el apartado anterior.

Dependiendo de la composición, forma y tamaño del detector así como de la geometría del sistema y de la energía del rayo gamma incidente, tendrá lugar preferencialmente alguna de las 2 interacciones.

Particularmente, cuando incide radiación gamma de baja energía en yoduro de sodio es mayor la probabilidad de que ocurra el efecto fotoeléctrico, esto podemos afirmarlo observando que en la expresión 2.2 el denominador crecerá mucho más lentamente que el numerador dando como resultado un valor de probabilidad más grande. Además, como el yodo tiene un número atómico grande ($Z= 53$) es aún más probable que haya interacción fotoeléctrica puesto que, la probabilidad es proporcional al número atómico del material elevado a la quinta potencia.

A energías más grandes, hay mayor competencia de ocurrencia entre Compton y fotoeléctrico. La figura 2.2 (Ref.1) muestra la importancia relativa de los tres tipos de interacción en función de la energía y del número atómico del absorbedor. En

este trabajo no nos interesa la producción de pares porque ocurre a valores de energía muy grandes, distantes del valor de 186 keV en que se basa este trabajo.

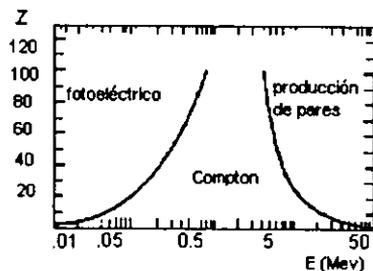


Fig 2.2 Regiones preferenciales de ocurrencia de las interacciones de fotones según la energía y el número atómico del absorbedor.

La respuesta de un detector depende de manera importante de su tamaño y se puede hacer su clasificación en términos de las trayectorias libres medias de las radiaciones interactuantes.

Un detector se dice que es pequeño, cuando la trayectoria libre media de las radiaciones gamma secundarias producidas por las interacciones de los rayos gamma originales es mayor que el detector. En un detector pequeño tienen lugar preferentemente interacciones simples.

Se dice que un detector es grande cuando su tamaño es suficiente para que la mayoría de las radiaciones secundarias producidas también interactúen dentro del volumen activo del detector y muy pocos escapen por la superficie.

Si la interacción que ocurre primero entre la radiación gamma y un detector grande es Compton, el rayo gamma dispersado interactuará subsecuentemente en otro lugar del detector. Esta segunda interacción puede ser otra dispersión Compton en cuyo caso la energía del fotón disminuirá nuevamente por haber entregado parte de su energía a otro electrón; esto puede ocurrir sucesivamente hasta que se dé una absorción fotoeléctrica donde el fotón entrega toda su energía al electrón. Todo esto sucede en un lapso de tiempo muy corto; tan corto

que es mucho menor que el tiempo de respuesta de cualquier detector. Por tanto, el efecto neto es como si todas las interacciones Compton en cada punto y el efecto fotoeléctrico hubiesen sucedido al mismo tiempo y el pulso producido es uno sólo de magnitud igual a la energía del rayo gamma que incidió inicialmente. Si la respuesta del detector es lineal a la energía, el pulso que se produce es proporcional a la suma de las energías cinéticas adquiridas por los electrones con proporcional a la suma de las energías cinéticas adquiridas por los electrones con los que hubo interacción.

Es decir, cuando el detector es grande, prácticamente no hay escapes después de cada interacción y la energía total final entregada es la del rayo gamma incidente y la respuesta es como si el rayo gamma original hubiera interactuado por efecto fotoeléctrico desde el principio.

Es práctica común emplear detectores de tamaño intermedio, en ese caso hay un número importante de escapes que hay que tomar en consideración al momento de analizar la respuesta del detector ante la fuente.

Cuando la energía del rayo gamma incidente es baja, aunque el detector sea mediano habrá tan pocos escapes como en un grande ya que la energía del fotón dispersado será pequeña y su distancia de migración también.

Así como el tamaño del detector es importante, la forma de éste también lo es dado que, entre mayor sea la relación superficie/volumen hay mayor número de escapes. Cuando es posible elegir o diseñar el detector debe procurarse que su forma sea la que hace lo más pequeño posible ese cociente de superficie/volumen.

Actualmente se fabrican detectores de formas muy variadas para satisfacer los requerimientos de aplicaciones muy diversas.

En este trabajo se utilizó un detector de forma cilíndrica de 4 " de diámetro por 4 " de altura con una perforación transversal de 22 mm de diámetro y que en relación al tamaño de las muestras objeto de análisis se puede decir que es grande.

Aún cuando se tenga una misma fuente de radiación y el mismo detector, la geometría del sistema completo puede hacer que la eficiencia de detección sea mejor para una u otra aplicación. Por ejemplo, al variar la distancia fuente-detector la intensidad de la radiación ya no es la misma; al variar angularmente la posición de la fuente, el detector ya no presentará la misma superficie de incidencia o, el tener un blindaje dispuesto de diferentes formas produce mayor o menor número de rayos dispersados y con diferentes ángulos.

Tomando en consideración que la geometría impone la eficiencia de detección, el detector se seleccionó con una perforación transversal para que rodeara completamente al elemento bajo análisis y mejorara la eficiencia.

Y también, dada la importancia de la geometría del sistema, es conveniente tener una disposición de elementos tal que para cada muestra, la geometría permanezca exactamente igual.

2.3.- Espectros de Energía de Radiación Gamma.

La forma de evaluar la respuesta de un detector es aplicándole una fuente de radiación y obtener después del procesamiento de la señal en la instrumentación electrónica la gráfica de E vs dN/dE . A esa gráfica se le conoce como espectro, función de distribución de energía o función de respuesta del detector. La mejor forma de hacer un análisis inicial es utilizando una fuente de radiación monoenergética.

Suponiendo que se tuviera una fuente de radiación monoenergética y que no escapara del detector ninguna de las radiaciones producidas por la interacción inicial y por los eventos sucesivos provocados por ella, la función de distribución de energía cinética sería una función delta con un pico apareciendo en el valor de la energía original del rayo gamma.

La función de respuesta del detector se ve afectada por eventos que provocan ensanchamiento del pico o producen otros picos; algunos de esos eventos son: la retrodispersión de rayos gamma, el escape de rayos x característicos, efectos de

radiaciones secundarias creadas cerca de la fuente, efectos de suma, escape de electrones secundarios, escape Bremsstrahlung, así como también el proceso de generación de fotones en el detector y emisión de electrones en el fotocátodo del tubo fotomultiplicador que conlleva una fluctuación estadística inevitable (Ref. 2)

El factor principal del ensanchamiento del fotopico es la fluctuación estadística de los procesos involucrados con el detector y el fotomultiplicador.

En los casos de energías bajas, como es la que nos ocupa en este trabajo, los eventos que pueden afectar de manera importante la función de respuesta del detector son el escape de rayos x característicos y los rayos gamma retrodispersados y por tal motivo se explicarán con un poco de detalle.

Cuando ocurre la absorción fotoeléctrica y hay escape de rayos x característicos porque el suceso tuvo lugar cerca de la superficie, entonces la energía depositada en el detector será menor en una cantidad igual a la energía del fotón del rayo x ; en ese caso habrá dos fotopicos el que aparece en E_γ y otro que se presentará en $E_\gamma - E_x$ (figura 2.3).

La interacción del rayo gamma incidente en el blindaje que rodea al sistema mediante efecto Compton , puede dispersar la radiación hacia el detector, pero con una energía diferente de la de la fuente, lo que provocará la presentación de otro pico en un valor diferente, como se presenta en la figura 2.4.

Cuando el fotopico aparece muy ensanchado significa que el detector no tiene buena resolución en energía, este es un factor impuesto por el material del que está fabricado pero hay otros factores que pueden empeorarla.

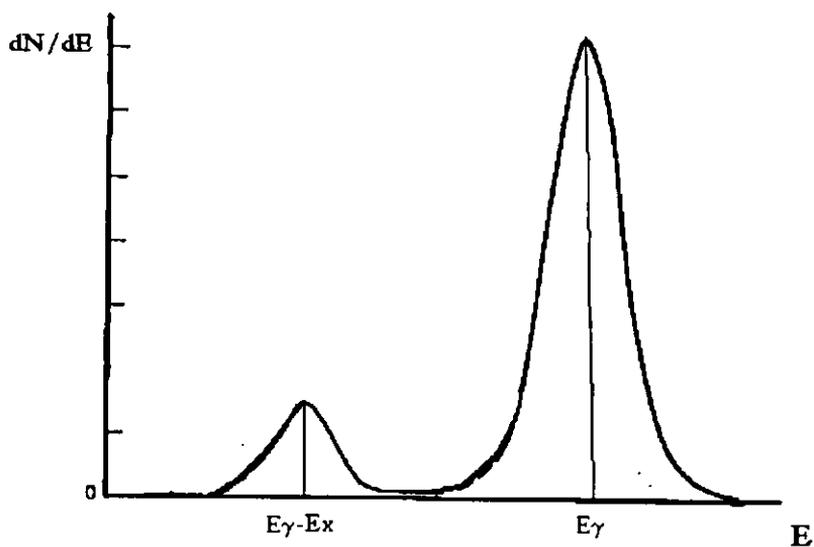


Fig. 2.3. Fotopico y pico de escape de rayos x característicos.

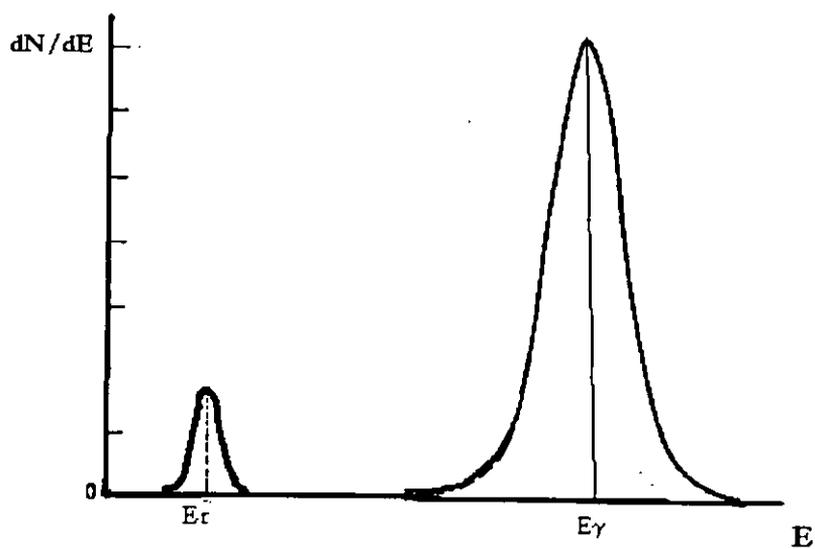


Fig. 2.4. Fotopico y pico adicional por interacción con el blindaje.

Los detectores hechos de materiales centelladores en general no tienen buena resolución en energía y los de yoduro de sodio no son la excepción.

La resolución en energía se define de manera simplificada en términos de dos características de la función de distribución de energía: el FWHM (anchura a la mitad de lo alto del pico) y E_0 (centro del pico) que se ilustran en la figura 2.5.

La expresión 2.9. se utiliza para calcular la resolución en energía de manera simple.

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \quad (2.9)$$

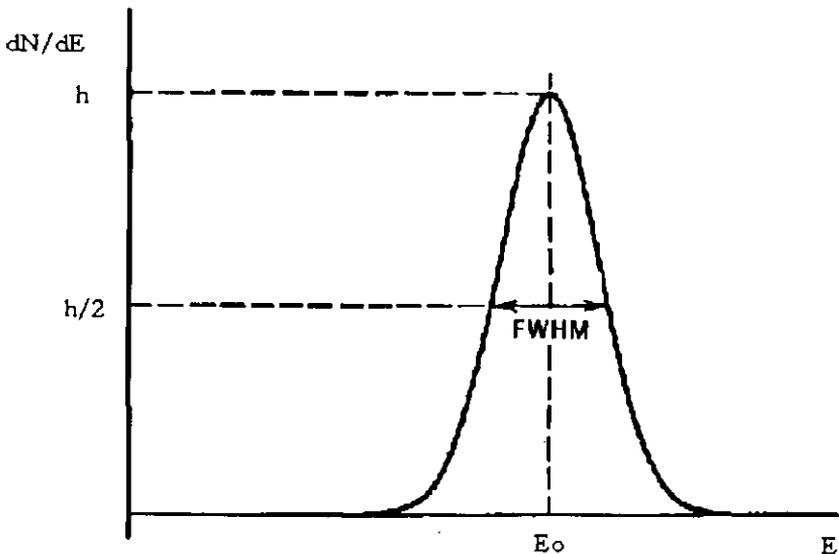


Fig. 2.5 Representación del FWHM y E_0 en una curva de distribución de energía para un pico de energía.

Después de lo considerado anteriormente, se tiene que una función de respuesta real ante una fuente monoenergética presenta el fotopico ensanchado, picos adicionales y además un área bajo la curva representando un continuo de energía hasta un valor máximo llamado orilla Compton que se calculó en 2.1.2.

Con la finalidad de eliminar todas las contribuciones de efectos colaterales e interferencias de rayos gamma no importantes para el desarrollo de este trabajo se utilizó un analizador monocanal. De esta forma, nos enfocamos exclusivamente a la energía de 185.7 keV del ^{235}U .

2.4. Isótopo ^{235}U .

En este trabajo se tienen como fuentes radiactivas pastillas sinterizadas de dióxido de Uranio dentro de tubos de Zircaloy. Los enriquecimientos de los polvos de UO_2 empleados en la fabricación de las pastillas tienen desde 0.71 % hasta 3.95 % de ^{235}U .

El ^{235}U decae por emisión de partículas alfa a niveles excitados de su núcleo hijo ^{231}Th , que emite rayos gamma de varias energías. Las energías y el rendimiento de emisión de la radiación gamma que sigue al decaimiento del ^{235}U son bien conocidos y pueden usarse para determinar cualitativa o cuantitativamente su contenido en muestras. La línea gamma más importante que se observa en el espectro de su decaimiento tiene 185.7 keV de energía y su probabilidad de emisión es 0.575 ± 0.009 (fotones de 185.7 keV por decaimiento de ^{235}U) (Ref. 3).

La vida media del ^{235}U es de $7.038 \pm 0.007 \times 10^8$ años o bien, equivalentemente en segundos es $2.229 \pm 0.002 \times 10^{16}$ s.

Una cantidad que es útil para calcular la razón de conteo esperada para una muestra es el número de radiaciones de 185.7 keV por segundo por átomo de

^{235}U y se obtiene multiplicando la probabilidad de emisión del rayo gamma por la constante de decaimiento del isótopo (expresión 2.10).

$$n = p \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (2.10)$$

y sustituyendo los valores para el ^{235}U se obtiene :

$$n = 0.575 \times \frac{\ln 2}{2.229 \times 10^{16}} = 1.8 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$$

y para obtener el número de radiaciones de 185.7 keV por segundo, por gramo de ^{235}U se utiliza la expresión 2.11.

$$n_M = n \frac{A}{M_{235}} \quad (2.11)$$

donde A es el número de Avogadro y M_{235} es la masa atómica del ^{235}U (Ref.3); sustituyendo valores se encuentra que $n_M = 4.6 \times 10^4$ fotones por segundo por gramo de ^{235}U .

La proporcionalidad entre la emisión de rayos gamma de 185.7 keV y la cantidad de ^{235}U en la muestra permite la determinación directa del contenido de éste pero hay que aplicar diversas correcciones como son la autoabsorción de la radiación en la misma muestra, atenuaciones en el contenedor, pérdidas de conteo debido a la electrónica e interferencia gamma de otros componentes de la muestra. Para reducir el número de correcciones se debe tener siempre la misma geometría, la misma densidad y composición química de la muestra.

El enriquecimiento de ^{235}U en una muestra de Uranio puede determinarse del número de rayos gamma característicos de 185.7 keV emitidos de la superficie de una muestra por unidad de tiempo y unidad de área.

Si la muestra es gruesa, la radiación gamma que se origina de los átomos internos se absorbe casi completamente en el paso por el material y no intervendrá con la radiación que proviene de la superficie de la muestra. Incrementando el grosor de la muestra, el flujo en la superficie llega a un valor de equilibrio que es casi independiente del grosor de la muestra.

Para la determinación del enriquecimiento de una muestra es necesario que haya uniformidad de enriquecimiento.

Aún teniendo cubiertos los requerimientos anteriores es difícil obtener buena exactitud en las determinaciones debido a las dificultades para determinar la eficiencia absoluta del sistema de conteo y por las interferencias de las radiaciones provenientes de otros isótopos presentes en las muestras.

Es importante conocer las posibles interferencias de otros isótopos presentes en una muestra de Uranio ; la importancia que tengan esas interferencias depende de la resolución en energía del detector ; por ejemplo, si la resolución del detector es del 10 % para 185.7 keV (que es un valor muy aproximado al que se tiene en este caso) serán importantes los rayos entre 169 y 206 keV. En la tabla 2.1 se presentan los rayos gamma característicos entre 120 y 300 keV del decaimiento del ^{235}U , ^{238}U , ^{234}U , ^{236}U , ^{232}U , ^{233}U y ^{237}U ; algunos se presentan sólo como información porque no todos están presentes en las muestras.

Otro factor importante que debe tenerse en cuenta al considerar la interferencia de los rayos gamma de otros isótopos del Uranio distintos del ^{235}U es la abundancia isotópica. En números redondos se tiene 99.275 % de ^{238}U , 0.720 % de ^{235}U , 0.005 % de ^{234}U y menos de 0.002 % de los demás isótopos.

Asimismo es importante la probabilidad de emisión (es decir, de cada 100 decaimientos, cuántos de esa energía se emiten) ; el dato se presenta en la última columna de la tabla 2.1.

Entonces, para decidir cuales interferencias son importantes se debe considerar la cantidad de isótopo que esté presente en la muestra así como la probabilidad de emisión de los rayos gamma de energías cercanas al pico de interés.

Aunado a lo anterior, también debe tomarse en consideración que al decaer los isótopos del Uranio generan hijos que a su vez pueden emitir rayos gamma de energías cercanas a la de interés. Pero también como éstos se generan en la misma proporción del contenido del isótopo padre, contribuyen al conteo de forma proporcional también.

Para la realización de este trabajo se pudieron salvar esas dificultades debido a que las muestras son todas iguales, la geometría del sistema es la misma y los parámetros en la instrumentación siempre fueron los mismos. De esa forma, las variaciones en la respuesta del sistema se debieron a la diferencia de enriquecimiento de las pastillas dentro de los tubos de Zircaloy.

Isótopo	Vida Media	Energía Gamma (keV)	Fotones/s por g inicial del isótopo	Rendimiento (%)
235U	7.038X10 ⁸ a	185.7	4.6X10 ⁴	54
		143.8	8.7X10 ³	11
		205.3	4.0X10 ³	5
		163.4	4.0X10 ³	4.7
		202.1	8.5X10 ²	1.0
		194.9	5.0X10 ²	0.59
		182.1	3.4X10 ²	0.4
U238	4.468X10 ⁹ a	257.9	7.01	∠∠ 1.0
		137.7	3.25	∠∠ 1.0
		152.7	1.1	∠∠ 1.0
U234	2.446X10 ⁵ a	120.9	9.4X10 ⁴	48
U236	2.342X10 ⁷ a	112.8	4.5X10 ²	∠∠ 1.0
U232	70 a	129.1	5.4X10 ⁸	∠∠ 1.0
		270.2	4.5X10 ²	∠∠ 1.0
		191.0	2.4X10 ⁵	∠∠ 1.0
		209.5	8.4X10 ⁴	∠∠ 1.0
		141.0	2.6X10 ⁴	∠∠ 1.0
		146.3	2.2x10 ⁴	∠∠ 1.0
U233	1.6X10 ⁵ a	164.5	2.2x10 ⁴	∠∠ 1.0
		120.8	9.2x10 ³	∠∠ 1.0
		135.3	7.9x10 ³	∠∠ 1.0
		184.5	5.0X10 ²	0.2
		188.0	7.1X10 ³	∠∠ 1.0
		208	6.9X10 ¹⁴	23
U237	6.75 d	164.6	5.9X10 ¹²	2
		267.6	2.3X10 ¹³	0.7
		221.8	6.6X10 ¹¹	∠∠ 1.0
		234.4	6.3X10 ¹¹	∠∠ 1.0
		292.7	8.5X10 ¹⁰	∠∠ 1.0

Tabla 2.1 Rayos gamma característicos entre 120 y 300 keV del 235U, 238U, 234U, 236U, 232U, 233U y 237U (algunos sólo se presentan como información, ya que no todos están presentes en las muestras) (Ref. 3).

3.-DESARROLLO

3.1.Instrumentación.

El sistema de análisis se compone de dos subsistemas : uno de control y otro de detección de radiación gamma. En las siguientes secciones se describen sus funciones y sus componentes.

3.1.1.Sistema de Detección.

El sistema de detección selecciona las señales provenientes de los eventos de radiación gamma de 185.7 keV , les da la forma adecuada para su análisis, las amplifica y las entrega en forma digital para que el sistema de control las contabilice.

Los equipos que integran esta parte del sistema son:

- Detector de NaI activado con TI con una perforación transversal y con fotomultiplicador y preamplificador integrado.
- Fuente de alto voltaje
- Amplificador de pulsos
- Discriminador / analizador monocanal
- Colimador de Pb con cubierta interna de acero inoxidable
- Blindaje de Pb

3.1.1.1.El detector

La elección de un detector debe hacerse considerando la radiación que se va a detectar, las condiciones generales bajo las cuales se realizará el trabajo y el objetivo del mismo.

Las condicionantes más importantes para seleccionar un detector son :el tipo de radiación que va a detectarse, su energía y la geometría del sistema de medición.

Otros factores a considerar, también importantes son las tasas de conteo esperadas así como los requerimientos de resolución en energía.

El detector empleado en este trabajo es un cristal de yoduro de Sodio activado con Talio de 4" de diámetro por 4" de alto con una perforación transversal de 22 mm de diámetro, resolución de 8 % para 662 keV, con tubo fotomultiplicador acoplado directamente al cristal dentro de un empaque hermético. La figura 3.1. es un esquema del detector.

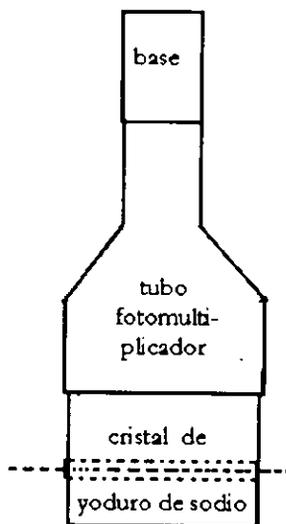


Fig. 3.1. Detector de yoduro de sodio con perforación transversal y fotomultiplicador integrado.

El cristal de yoduro de sodio es un material centellador que convierte la energía de la radiación entregada en él en luz detectable. Se le hacen adiciones de Talio para mejorar la probabilidad de emisión de fotones visibles.

Entre los detectores de centelleo, el de yoduro de sodio es de los más utilizados aún cuando han pasado muchos años del inicio de su desarrollo y éste se debe a que su producción de luz al recibir la radiación es una de las más altas de los materiales centelladores conocidos (Ref 2). Esta característica, además de su facilidad de ser maquinado en muchas formas y tamaños hace que sea utilizado rutinariamente para espectrometría gamma.

Algunas restricciones para su utilización son su fragilidad mecánica y térmica así como su higroscopía. En la actualidad se han incorporado encapsulados herméticos diseñados para soportar mejor los esfuerzos mecánicos y evitar la presencia de humedad.

Otra de las causas de utilización amplia de los detectores de yoduro de sodio es su respuesta casi lineal a los rayos gamma en un amplio intervalo de energía.

En la selección del tamaño del cristal se debe considerar el porcentaje de absorción del NaI(Tl). Por ejemplo, un cristal de 1" de grueso absorbe el 97 % de la radiación incidente cuya energía es de 200 KeV (fig. 3.2) (Ref. 4).

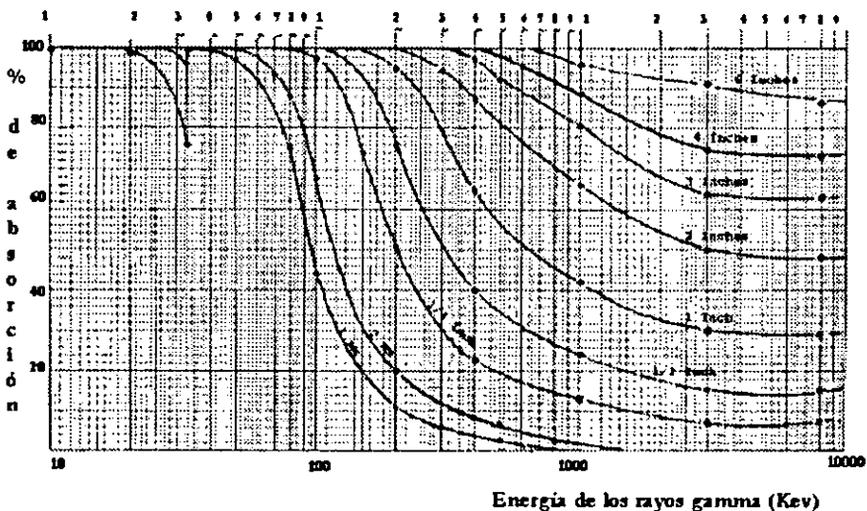


Fig 3.2 Eficiencia de absorción del NaI(Tl). (Ref. 4). Cada curva representa el porcentaje de absorción de un rayo paralelo de rayos gamma incidiendo normalmente en un cristal del grosor indicado.

3.1.1.2. El tubo fotomultiplicador

La función del tubo fotomultiplicador es convertir la luz que sale del centellador en una señal eléctrica.

De manera simplificada un tubo fotomultiplicador se compone de una capa (conocida como fotocátodo) sensible a luz de cierta longitud de onda, que genera, a partir de los fotones incidentes electrones de baja energía.

Los electrones generados por los fotones incidentes en una interacción son muy pocos, pero el fotocátodo se acopla a una estructura multiplicadora de electrones formada por una serie de dínodos y así se incrementa su número. Así, después de esa estructura se obtienen del orden de 10^7 a 10^{10} electrones por cada uno que incidió.

Esta ya es una señal de corriente detectable que se colecta en el ánodo para posteriormente ser amplificada y cuantificada.

Los fotomultiplicadores realizan la multiplicación de forma lineal y así el pulso de salida permanece proporcional al número original de fotoelectrones.

Como se mencionó en el inciso anterior, en nuestro caso el tubo fotomultiplicador está directamente acoplado al cristal dentro de un empaque hermético.

3.1.1.3. La fuente de alto voltaje

Se requiere una fuente de alto voltaje que alimente directamente al fotomultiplicador. Es deseable que ese voltaje sea de bajo ruido, regulado y estable para la operación correcta del fotomultiplicador.

La fuente utilizada en el presente trabajo proporciona una salida en el intervalo de ± 10 V a ± 3000 V DC y puede proporcionar una corriente de salida hasta de 10 mA. Su inestabilidad térmica es menor o igual a ± 50 ppm por grado

centígrado después de 30 minutos de calentamiento operando en un intervalo de 0 a 50°C y el ruido a la salida es menor de 10 mV pico a pico.

3.1.1.4. Divisor de voltaje y preamplificador

Al tubo fotomultiplicador se conecta un divisor de voltaje que aplica el voltaje necesario a cada dínodo y la señal colectada en el ánodo se aplica a un preamplificador el cual invierte la polaridad de la señal y la magnifica un poco sin alterarle la forma.

En este caso, el divisor y el preamplificador están contenidos dentro de un mismo aditamento que sirve de base al fotomultiplicador.

3.1.1.5. El amplificador de pulsos

El amplificador es una parte muy importante de cualquier sistema de detección de radiación. Su función es amplificar la señal proveniente del preamplificador que es del orden de los milivoltios, a un valor entre 0.1 y 10 V.

Es conveniente utilizar un amplificador que introduzca el menor ruido posible y que tenga posibilidades de variar la ganancia en intervalos amplios. También es deseable que tenga restaurador de línea base automático que permita el mejor procesamiento de la señal a tasas de conteo altas.

Otras de las funciones del amplificador es darle forma semigausiana al pulso con tiempos de respuesta cortos y recuperación rápida de una sobrecarga así como estabilidad para un amplio intervalo de temperatura (0 a 50°C). Mediante una formación adecuada se puede mejorar la resolución en energía y reducir el traslape entre pulsos sucesivos.

Los controles usuales en un amplificador son para seleccionar los valores de ganancia fina, de ganancia gruesa, la polaridad de entrada y selección de tiempo de formación del pulso. El control de ganancia gruesa permite elegir factores de

amplificación de 20,50,100,200, 500 y 1 K; el control de ganancia fina proporciona factores de multiplicación de 0.5 a 1.5 del valor de la ganancia gruesa; la elección del tiempo de formación de pulso puede ir desde 0.5 μ s hasta 10 μ s. Y además, es esencial que tenga una salida para la alimentación del preamplificador.

3.1.1.6 Discriminador / analizador monocanal

La función de este instrumento es seleccionar señales de los eventos nucleares que están siendo procesados cuyas amplitudes correspondan a un intervalo de energía especificado.

Sus formas principales de operación son en modo de discriminación y en modo de analizador monocanal.

En el modo de discriminación, se produce un pulso lógico de salida cuando el tamaño de la señal de entrada es mayor que un valor umbral preestablecido.

En el modo de analizador monocanal, se produce un pulso lógico de salida sólo si el tamaño del pulso de entrada está entre dos valores preestablecidos.

3.1.2.Sistema de control y conteo.

Las funciones de este sistema son: contabilizar las señales provenientes del sistema de detección, comandar el desplazamiento de la barra de 4m de longitud en pasos por el interior del detector de yoduro de sodio, cuantificar dicho desplazamiento y concentrar la información proveniente de ambos subsistemas en una PC con ayuda de un programa.

El sistema de control está formado por los siguientes equipos:

- Computadora PC, con una tarjeta de conteo de 5 canales de 16 bits y una tarjeta de control de motores de pasos de dos ejes.

- Circuito de potencia para el manejo de motores de pasos.
- Dos mecanismos de tracción a base de motor de paso con sensor de posición a base de codificador de cuadratura (fig.3.3).

De los cinco canales de la tarjeta de conteo uno se emplea como referencia en tiempo, otro para recibir el conteo de la instrumentación nuclear, quedando tres para aplicaciones futuras.

La tarjeta de control de motor de paso tiene la capacidad de controlar dos motores y recibir la señal de dos codificadores de cuadratura ; para ésto cuenta con dos series de contadores de 24 bits cada uno.

Para el control del desplazamiento se emplean dos estaciones de tracción colocadas tanto a la entrada como a la salida del detector de centelleo.

Cada estación de tracción está compuesta por un motor de paso impulsor, un codificador para medir los desplazamientos, dos rodillos y una estructura mecánica que da rigidez al conjunto.

Las resoluciones alcanzadas corresponden a 15 pasos del motor y 34 cuentas del codificador por cada milímetro de desplazamiento de la barra.

El programa de control que se desarrolló fué con ventanas en modo texto para ir definiendo las diferentes etapas durante la operación del sistema.

El producto de salida del barrido completo de una vaina combustible, es un archivo en modo texto y uno en modo binario que contienen la información necesaria para reconstruir el perfil completo de la barra.

Esta información se puede exportar a alguna hoja de cálculo o a algún paquete estadístico para ser procesada.

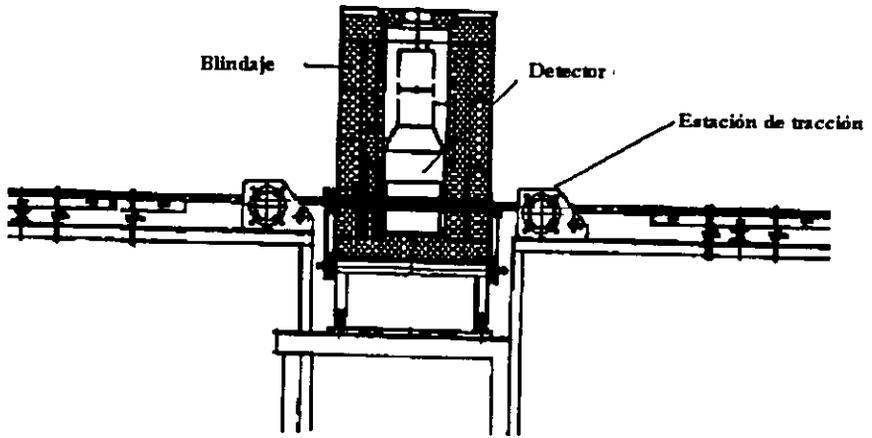


Fig. 3.3a. Vista lateral del detector con las estaciones de tracción y el blindaje.

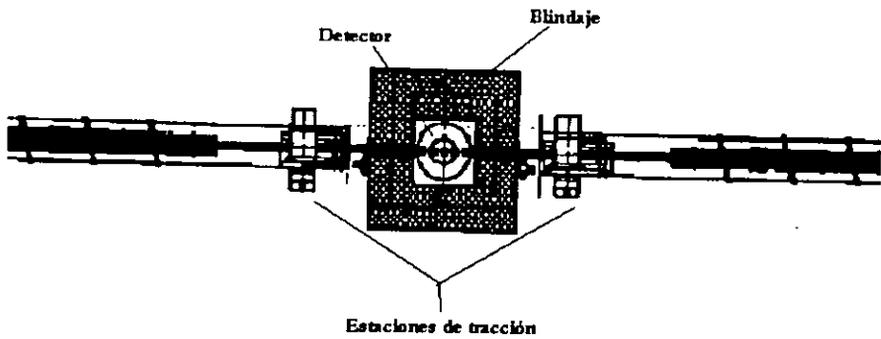


Fig. 3.3b. Vista superior del detector con las estaciones de tracción y el blindaje.

3.2. Materiales.

Los materiales utilizados fueron : 10 barras de referencia o de prueba elaboradas con los mismos componentes que las barras de producción que se fabricaron para la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde pero de menor tamaño y con distribuciones de enriquecimiento convenientes para los fines de validación del sistema y, 159 barras de producción armadas conforme al diseño requerido por el usuario y que se entregaron para ser introducidas en el segundo ciclo de la Unidad 2 de la Nucleoeléctrica y que de aquí en adelante llamaremos de producción.

Las barras estan formadas fundamentalmente por : tubos de Zircaloy de 0.03" de espesor y 0.419 " de diámetro exterior con pastillas de UO_2 dentro de ellos y un tapón en cada extremo soldado mediante un proceso especial.

Las pastillas son de polvo de UO_2 sinterizado y sus dimensiones aproximadas son 10.439 mm de diámetro y entre 10.4 mm y 10.6 mm de altura. Los diferentes polvos de UO_2 utilizados en su fabricación fueron de enriquecimientos que iban desde 0.71 % de ^{235}U hasta 3.95 % de este isótopo.

Específicamente, los enriquecimientos que se emplearon fueron : 0.71 %, 1.80 %, 2.00 %, 2.20 %, 2.40 %, 2.60 %, 3.00 %, 3.20 %, 3.40 %, 3.60 % y 3.95 % .

La tolerancia de desviación de contenido isotópico de los polvos era de +/- 0.054 % para enriquecimientos entre 0.71 % y 2.00 % , así como de +/- 0.088 % para aquellos con más de 2 % de ^{235}U . Todo el polvo utilizado , tenía su certificado de análisis.

Se fabricaron dos tipos de barras de prueba, unas con pastillas de desperdicio y otras con pastillas de producción con polvo perfectamente caracterizado y bajo las especificaciones establecidas por el proveedor autorizado.

En la tabla 3.1 se presenta la configuración de las barras de prueba especificando su identificación, los segmentos que contiene, las inserciones de pastillas con

enriquecimiento diferente al de la columna y algunas observaciones que se consideró pertinente anotar.

Las barras de producción que se verificaron tenían 10 configuraciones diferentes. Su descripción se incluye en las tablas 3.2 y 3.3., en ellas se anota el tipo de barra, el número de segmentos y el enriquecimiento de cada uno.

Barra	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	Inserción de pastillas con enriquecimiento diferente a la columna	OBSERVACIONES
8h59332k	0.71	2.6	3.0	2.6	0.71			Ninguna	pastillas de desecho
g102009e	0.71	2.0	2.4	2.0	0.71	1.8	0.71	Ninguna	pastillas de desecho
ww01516j	.71*	2.0	2.4*	2.0	.71*			2.40,2.00 y 3.00 respectivamente	*segmento con inserto pastillas de desecho
ww01517j	0.71	2.6*	0.71					cada 15 cm una :2.4,2.2,2 1.8,3,3.2 y 3.4	*segmento con los insertos
ww01503j	0.71	3.95	0.71					cada 17 cm una :3.6,3.4, 3.2 y 3.0	*segmento con los insertos
ww01520j	0.71	1.8*	0.71					cada 18 cm una :2.4,2.2,2 y 0.71	*segmento con los insertos
ww01515j	0.71	2.0	2.2	2.6	2.0	0.71		2.4,2.6,1.8,0.71 y 2.6	cada inserto se colocó en cada cambio de e
8h59398e	2.6*							cada 35 cm una :3.95, 3.6,3.4,3.2,3.0,2.4,2.2, 2.0,1.8 y 0.71	*segmento con los insertos
g201211k	0.71	3.0	3.4	3.0	0.71			ninguna	
ck03711k	0.71	2.6	3.0	2.6	0.71			ninguna	

Tabla 3.1. Configuración de barras de prueba

TIPO DE BARRA	SEG 1	SEG 2	SEG 3
8H	0.71 %	3.95 %	0.71 %
9B	0.71 %	3.40 %	0.71 %
8G y G10	0.71 %	3.60 %	0.71 %
D2	0.71 %	1.80 %	0.71 %
D3	0.71 %	3.20 %	0.71 %

Tabla 3.2. Configuración de barras de producción de tres segmentos de enriquecimiento.

TIPO DE BARRA	SEG 1	SEG 2	SEG 3	SEG 4	SEG 5
DN	0.71 %	3.20 %	3.60 %	3.20 %	0.71 %
G2 y 7G	0.71 %	2.60 %	3.00 %	2.60 %	0.71 %
8D	0.71 %	2.00 %	2.40 %	2.00 %	0.71 %
CK	0.71 %	3.00 %	3.40 %	3.00 %	0.71 %
CL	0.71 %	2.20 %	2.60 %	2.20 %	0.71 %

Tabla 3.3. Configuración de barras de producción de cinco segmentos de enriquecimiento.

3.3. Procedimiento de Trabajo.

3.3.1. Obtención del Voltaje de Operación del Detector

Se conectó el sistema como se muestra en el diagrama a bloques de la fig 3.4 y se colocó una fuente de ^{235}U . Se varió el suministro de voltaje al detector desde 200 V hasta 1000 V con pasos de 100 V realizando conteos de 1 minuto en cada valor.

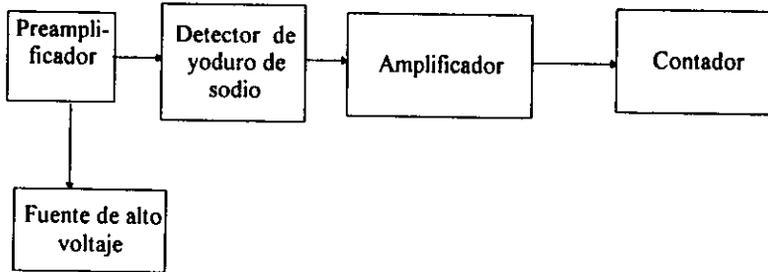


Fig. 3.4. Diagrama a bloques del sistema para determinar voltaje de operación.

Con esos valores se trazó una gráfica (fig 3.5) con el número de cuentas registradas en función del voltaje.

Se evaluó, con ayuda de la gráfica, en que intervalo de voltaje fueron menores las variaciones de las tasas de conteo para elegir el voltaje de operación. Con ésto se asegura que las fluctuaciones de voltaje influyan poco en los conteos. Se eligió el voltaje de operación de 700 V que es un valor intermedio de la meseta.

La tabla 3.4. incluye los valores obtenidos en el conteo de fondo y los resultados para un tiempo de formación del pulso de 0.5 microsegundos.

Voltaje Aplicado	Fondo en 1m	cpm
200	243	219
300	1162	5032
400	5840	189656
500	12025	552669
600	12985	581000
700	12862	589717
800	13669	591903
900	17252	681765
1000	25992	1282907

Tabla 3.4. Tasa de conteo en función del voltaje aplicado al detector.

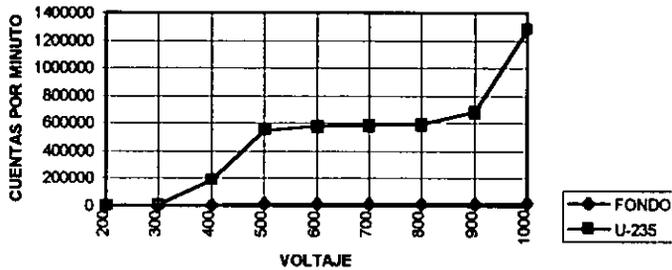


Fig.3.5. Conteo de fondo y respuesta del detector de yoduro de sodio ante una fuente de ^{235}U .

3.3.2. Selección de la ganancia del amplificador.

Con los equipos dispuestos como se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.4, pero sustituyendo el contador por un osciloscopio, se colocó una fuente de ^{137}Cs en el detector y se llevó la señal de salida después del amplificador a un osciloscopio. Observando la señal en el osciloscopio, se fueron variando los selectores del amplificador hasta que la salida de la señal de 661.7 KeV de la gamma del Cesio en el osciloscopio llegó a tener un tamaño de 7 Voltios. Los valores de amplificación quedaron en 20 (ganancia gruesa) y 1.5 (ganancia fina).

Para observar si el tamaño de la señal correspondiente a la radiación de 185 KeV con esos valores de amplificación era adecuado, se colocó en el detector una pastilla de UO_2 con un enriquecimiento de 3.95 % de U^{235} . La señal correspondiente resultó de un tamaño cercano a los 2 Voltios.

3.3.3. Definición de Condiciones de Operación en el Monocanal.

Colocando un conjunto de 5 pastillas de Uranio enriquecido en el detector, con el selector de ganancia gruesa en 20 y el de ganancia fina en 1.5, se buscó el valor adecuado del umbral del monocanal para sólo contar las gammas de 185 KeV de energía con diferentes aberturas de ventana (desde 0.2 hasta 1.0) esperando obtener una razón de conteo suficiente para definir el fotopico, pero no tan grande para evitar la saturación en lo posible.

Con lo anterior se definió colocar el valor umbral en 2.5 (que son unidades relativas) y la abertura de ventana en 7 (que corresponde a 0.7 V) para el análisis de las barras.

3.3.4. Elección del Material de Blindaje.

Se blindó el sistema de forma exterior e interior. La exterior para evitar señales de radiación de material nuclear ajeno al de interés y bajar la radiación de fondo al mínimo y la interior para aislar una sección de la barra de combustible bajo análisis dentro del pozo transversal del detector.

El blindaje exterior se diseñó de forma tal que rodeara completamente al detector y que no se obstruyera el desplazamiento de la barra (fig. 3.6).

El material utilizado para el blindaje fue plomo y no se consideró necesario utilizar un blindaje graduado ya que la energía de interés (185.7 KeV) no es tan baja como para requerirlo.

El blindaje interior o colimador se construyó con dos tubos cuyos extremos se podían juntar completamente en el centro y con un mecanismo podían separarse entre sí desde 0 hasta 2 cm (fig 3.7)

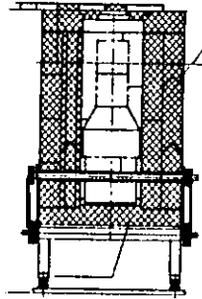


Fig.3.6 Blindaje exterior del detector

El grosor del blindaje interior quedó limitado por el diámetro de 22 mm del orificio del detector.

El material adecuado para blindar el interior se seleccionó entre todos los que están en la tabla 3.5. Se utilizó plomo por la facilidad para conseguirlo y por sus características físicas; el inconveniente de esta selección es que bajo ninguna circunstancia el plomo debe entrar en contacto con las barras de combustible. Para evitar ésto, se modificó el diseño del colimador colocándole una camisa interna de acero inoxidable.

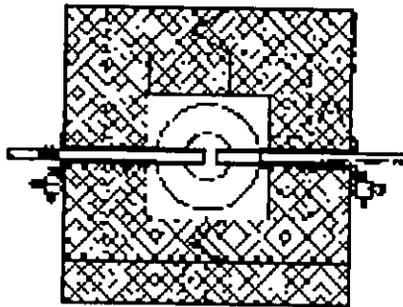


Fig. 3.7. Blindaje interior o colimador.

La razón por la que se prohíbe el contacto del plomo y algunos otros materiales con la barra de Zircaloy es porque si quedaran residuos de ellos en el combustible terminado, estos podrían modificar la velocidad de corrosión de la

materia prima y dar lugar a la formación de grietas o fisuras de los tubos de las barras provocando problemas de fuga, gradientes de temperatura indeseables y consecuentemente comportamiento no previsto y no deseable del combustible.

Por el diseño del tubo de blindaje y de los soportes mecánicos del sistema de arrastre era poco probable el contacto de la barra con el plomo, pero para tener la certeza de que esto nunca sucedería, se colocó la camisa interior mencionada anteriormente. El acero inoxidable es de los materiales permitidos en contacto con las barras.

Específicamente los materiales que no pueden estar en contacto con la barra combustible son todos aquellos que después de ser sometidos a un proceso de autoclaveado presenten una velocidad de corrosión mayor que la que establecen los límites de la norma G-2 de ASTM (Ref. 18). De forma resumida, el autoclaveado consiste en frotar el Zircaloy contra el material que se desea probar y someterlo a condiciones que aceleran el proceso de corrosión normal

Tampoco pueden entrar en contacto con la barra aquellos materiales cuya sección eficaz macroscópica de captura neutrónica rebase el límite de 1250 ppm de contenido equivalente de boro. El contenido equivalente de Boro se calcula con la expresión 3.1(Ref. 5).

$$EBC = \sum_i C_i * \sigma_i * A_B / \sigma_B A_i \quad (3.1)$$

donde :

C_i = Fracción en peso en ppm de cada elemento de la muestra.

σ_i = Sección eficaz del elemento (obtenida de tablas del BNL).

A_i = Peso atómico del elemento.

B = Símbolo del Boro

Nombre	No.Atómico	Densidad	Peso Atómico	Coef.At.Lineal (p/185 KeV)	C.At.Másico (p/185 KeV)
		g/cm ³		cm ⁻¹	cm ² /g
Fierro	26	7.89	55.84	1.13	0.144
Platino	78	21.45	195.23		
Plomo	82	11.33	207.21	12.8	1.13
Tungsteno	74	19.3	183.92	17.1	0.882
Zirconio	40	6.4	91.22	1.47	0.231
Titanio	22	4.5	47.9	0.58	0.129
Mercurio	80	13.6	200.59		
Níquel	28	8.9	58.69	1.39	0.157
Cromo	24	7.1	52.01	0.958	0.135
Polietileno		0.95		0.14	0.147
Cadmio	48	8.64	112.4	2.78	0.321
Dióxido de U		0.98		14.44	1.313

Tabla 3.5. Características de los materiales considerados para blindaje

3.3.5 Establecimiento de Parámetros.

Una vez fijadas las condiciones de operación de la electrónica del sistema, se procedió a establecer otros parámetros importantes como son: la disposición geométrica, el tiempo de conteo y la magnitud del desplazamiento de la barra en el sistema.

3.3.5.1. Disposición Geométrica.

La dificultad de determinar la eficiencia absoluta de un conjunto, se soluciona si se utiliza exactamente la misma geometría para los materiales de referencia que para las muestras a inspeccionar. En este trabajo se construyeron barras de referencia iguales a las de producción y así se resolvió esta dificultad.

La disposición geométrica final del sistema de detección quedó determinada por las dimensiones de las barras de combustible y del detector.

El detector tiene un orificio transversal de 22 mm de diámetro por el cual puede pasar libremente una barra de combustible nuclear de 12.2 mm de diámetro. El espacio sobrante, se utilizó para introducir un blindaje interior que se utilizó como colimador. Con este colimador, solo se permitía interactuar directamente con el detector la radiación proveniente de la pastilla central y, atenuar lo suficiente la proveniente del resto de pastillas dentro del pozo.

Las dimensiones del detector y de la barra limitaron el espacio del blindaje o colimador a tener solo 4 mm de espesor y de esos, 3 mm fueron de plomo y 1 mm de acero inoxidable. Fue necesario colocar el acero inoxidable para impedir el contacto del Pb con el Zircaloy bajo cualquier circunstancia.

La figura 3.8 presenta esquemáticamente un corte lateral del detector donde se muestra el blindaje interior que deja al descubierto unos cuantos milímetros de la barra.

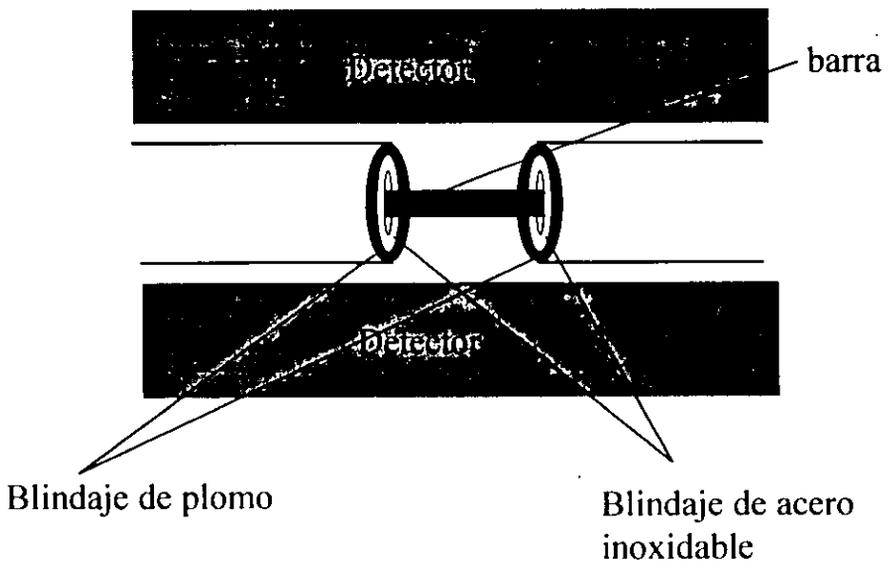


Fig. 3.8 Corte lateral del detector y blindaje interior o colimador

Se dejó una apertura de colimador de 7 mm para que el detector recibiera directamente la radiación proveniente de una superficie de aproximadamente la longitud de una pastilla. En el siguiente párrafo y con ayuda de la figura 3.9 se explican las consideraciones que se tomaron en cuenta para abrir el blindaje a esa longitud.

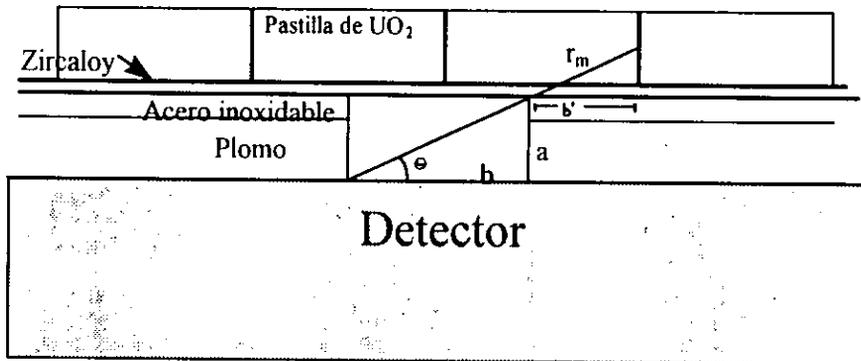


Fig. 3.9 Ángulo máximo del cual proviene radiación directa de las pastillas de UO_2

El ángulo θ corresponde al mínimo ángulo del cual puede provenir la radiación directa que llega al detector.

$$\tan \theta = \frac{a}{b} ; \theta = \arctan \frac{a}{b}$$

Se requiere además que : $b + b' = 10.6 \text{ mm}$

La distancia r_m es aquella a la cual se detiene el 99.9 % de la radiación gamma proveniente del interior de una pastilla y la podemos calcular para el UO_2 a partir de la ecuación :

$$N = N_0 e^{-\mu \rho x}$$

donde μ es el coeficiente de atenuación másico y ρ es la densidad del material.

Así que, para calcular el valor de r_m calculamos el valor para el cual $N/N_0=0.001$.

$$\frac{N}{N_0} = 0.001 = e^{-\mu\rho r_m}$$

$$\ln 0.001 = -\mu\rho r_m$$

$$r_m = \frac{\ln 0.001}{-\mu\rho}$$

para UO_2 se tiene que $\mu = 1.313 \text{ cm}^2/\text{g}$ y que $\rho = 10.96 \text{ g/cm}^3$. Sustituyendo ;

$$r_m = \frac{6.9}{1.313 \text{ cm}^2/\text{g} * 10.96 \text{ g/cm}^3} = 0.48 \text{ cm} = 4.8 \text{ mm}$$

Con la r_m calculada, el valor de a que tenemos conocido y fijo, y la condición de que $b+b' = 10.6 \text{ mm}$ se puede obtener el valor de b y de θ .

$$\text{Si } a = 5.89 \text{ mm} \quad , \quad \tan \theta = \frac{5.89}{b} \quad \text{y} \quad b = \frac{5.89}{\tan \theta}$$

de la figura 3.9 tenemos que :

$$\cos \theta = b'/r_m = b'/4.8 \text{ mm}$$

$$\therefore b' = 4.8 \cos \theta$$

Ahora bien, necesitamos que :

$$b + b' = 10.6 \text{ mm}$$

$$\text{entonces} \quad 5.89/\tan \theta + 4.8 \cos \theta = 10.6$$

resolviendo se obtiene que :

$$\theta = 40^\circ$$

y con eso el valor de b , que es la apertura del colimador debe ser de 7 mm .

Con esa apertura de colimador, el cambio de enriquecimiento de una pastilla es apreciable aún cuando en el detector haya otras 12 pastillas que no están

blindadas 100 % porque, la cantidad de radiación que pasa por el blindaje es poca.

Si N_0 es la radiación que se recibe si no hay blindaje, la cantidad que atraviesa el blindaje está dada por :

$$N_b = N_0 \exp - (\mu_{ss} x + \mu_{pb} x')$$

donde μ son los coeficientes de atenuación lineal y x los espesores de los blindajes.

Sustituyendo los valores de los coeficientes de atenuación lineal del acero inoxidable ($\mu_{ss} = 2.0 \text{ cm}^{-1}$) y del plomo ($\mu_{pb} = 13.81 \text{ cm}^{-1}$) para 185 KeV de energía, así como los espesores de ambos blindajes (1 mm y 3 mm respectivamente) se obtiene que :

$$N_b = N_0 (0.0129)$$

Es decir, sólo el 1.29 % de la radiación proveniente de las pastillas blindadas llega al detector.

El detector tiene un diámetro de 5 " (127 mm) en los cuales caben 18 segmentos de 7 mm. De esos 18 segmentos, 17 están blindados y 1 no. Si sólo el 1.29 % de la radiación proveniente de cada segmento blindado se transmite, el conteo total para cada pastilla expuesta directamente al detector tiene dos componentes : 21.9 % (0.0129×17) de las pastillas blindadas y 78.07 % de la central o de interés.

El cambio de enriquecimiento de la pastilla central respecto a las del resto de la columna se puede evaluar sin dificultad ya que la contribución de cada una de las pastillas blindadas es mínima. Esto se explica en el siguiente párrafo.

La pastilla en estudio, expuesta directamente al detector, tiene asociado un conteo c , otra pastilla de la columna con enriquecimiento $x \pm \Delta x$ tiene un conteo asociado de $c \pm \Delta c$, pero su diferencia en enriquecimiento aportará un cambio en el conteo de la pastilla central igual al producto de : el porcentaje que atraviesa

el blindaje, por el número de segmentos de 7 mm que ocupa una pastilla por Δc . Es decir :

$$\Delta c' = 0.0129 \times 1.5 \times \Delta c$$

$$\Delta c' = 0.019 \Delta c$$

Se puede comprobar que, aún cuando una pastilla tenga la máxima diferencia de enriquecimiento posible de los utilizados en este trabajo, blindada producirá una variación muy pequeña en el conteo. Tomando los valores extremos de los resultados de la tabla 3.8 e introduciéndolos en la ecuación anterior se obtiene que la $\Delta c'$ máxima es de 256 cuentas.

3.3.5.2. Desplazamiento de la barra por el sistema.

El desplazamiento de la barra controlado por los motores y codificadores, tenía la posibilidad de realizarse en desplazamientos de 1 mm hasta 100 mm. Para analizar las barras se eligieron desplazamientos de 5 mm para procurar que cada pastilla estuviera directamente frente al detector dos veces para tener una buena estadística.

3.3.5.3. Tiempo de Conteo

El tiempo de conteo en cada paso se eligió de manera que se definieran claramente los perfiles de enriquecimiento, que se tuviera un error menor al 0.5 % y que la inspección de cada barra tardara cuando más 8 horas. Esto dió como resultado que se contaran durante 35 s cada segmento.

3.3.6. Reconocimiento de Pastillas de Enriquecimiento Diferente al de las Circundantes en una Columna Homogénea de Pastillas dentro de una Barra de Combustible Nuclear.

En este apartado se describen los análisis efectuados a las barras de prueba descritas en el inciso 3.2 a partir de los cuales se establecieron los criterios de reconocimiento de pastillas de enriquecimiento ajeno al de una columna homogénea en una posición intermedia en una barra combustible. A esas pastillas de enriquecimiento distinto de aquí en adelante las llamaremos insertos.

Las barras de prueba se diseñaron para evaluar la respuesta del sistema en el caso de que se colocaran pastillas de enriquecimiento equivocado en las barras de producción durante el proceso de encamisado. Se incluyeron casos probables de ocurrencia por la conformación de las barras según las especificaciones de distribución de enriquecimiento.

Las actividades previas al análisis y el análisis en sí, que en los siguientes párrafos de esta sección se describen con detalle consistieron en: manejar los datos de salida de cada barra en una hoja de cálculo para obtener un perfil gráfico (fig. 3.11), calcular parámetros estadísticos, obtener intervalos para aplicar criterios estadísticos de rechazo de observaciones (Chauvenet, intervalos t-student y $\pm 3\sigma$) y comparar las observaciones rechazadas por los tres criterios, entre sí y con el informe de conformación de la barra (fig. 3.12) para establecer el procedimiento rutinario de identificación de insertos para cualquier barra de combustible.

La secuencia desarrollada para el reconocimiento de los insertos se presenta a continuación.

- La datos generados en el barrido de cada barra por el sistema, se almacenó en un archivo de salida tipo texto, se manejó en una hoja de cálculo para

obtener un perfil gráfico de la vaina en el que se definieran las zonas de enriquecimiento (fig 3.10).

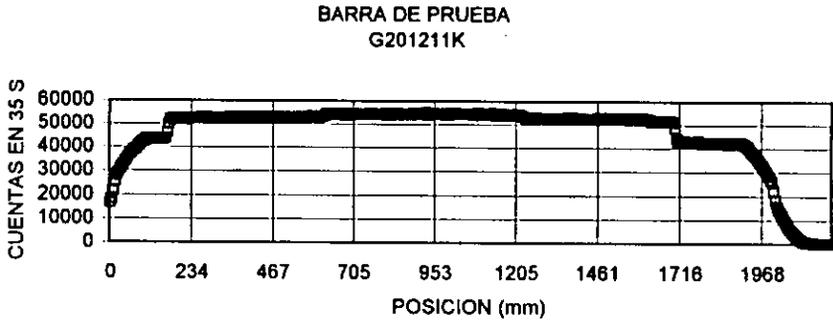


Fig.3.10 Perfil gráfico de enriquecimiento de una barra de combustible

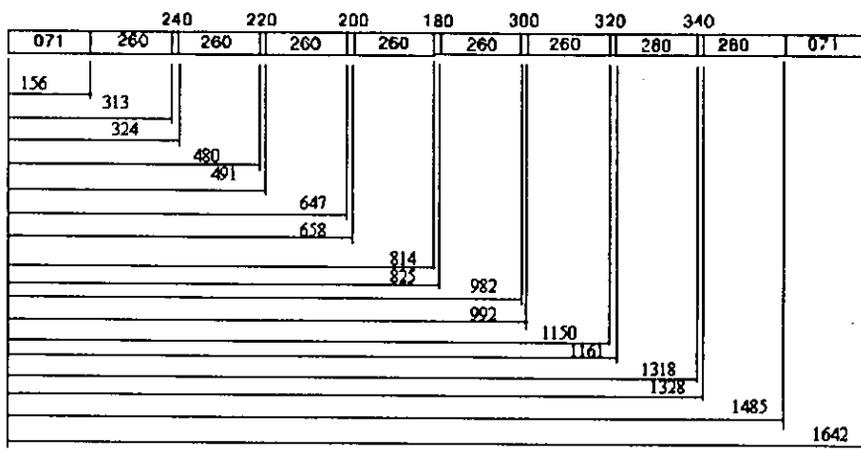
- Una vez diferenciadas las zonas, se calcularon la media y la desviación estándar del conjunto de datos por segmento.
- Se separaron puntos de cada segmento de la barra seleccionándolos utilizando el criterio de Chauvenet para el rechazo de observaciones en un experimento, suponiendo que las observaciones vienen de una población normal con media m y desviación estándar σ . Con este criterio se establece que una observación no pertenece a la población si la probabilidad de obtener un valor de esa magnitud es menor que $1/2n$ donde n es el número total de observaciones (Ref 6).
- Se aplicó un segundo criterio de rechazo de observaciones, el de los rangos basados en la t de student. Con este criterio se elige una α que es la probabilidad de rechazar una observación cuando realmente si pertenece a la población en estudio. Con ese factor de riesgo se obtiene un intervalo (a,b) y cualquier observación fuera de él se considera que no pertenece al conjunto (Ref 6).

- Se aplicó un tercer criterio para separar puntos sospechosos de pertenecer a insertos, este fué el de seleccionar aquellos puntos que tuvieran un valor fuera del intervalo $\bar{x} \pm 3\sigma$ (Ref. 7).
- Se compararon las observaciones rechazadas mediante los tres criterios contra el esquema descriptivo de la barra (fig. 3.11) realizado en base al informe de encamisado (fig. 3.12) para ver cuales correspondían con los insertos.
- Se definió el procedimiento rutinario de identificación de insertos utilizando el criterio de $\pm 3\sigma$, complementado con el criterio de $\pm 2\sigma$ aplicado a los puntos adyacentes y la tendencia de los puntos de la vecindad.
- Se automatizó la selección de presuntos insertos utilizando un programa que separó los puntos fuera de $\bar{x} \pm 2\sigma$ y de $\bar{x} \pm 3\sigma$ y otro que señalaba los "picos" formados por más de cuatro puntos del conjunto de datos de cada segmento de barra cubriendo el estudio de la tendencia de los puntos en la vecindad de los puntos sospechosos.
- Los segmentos de los extremos se analizaron gráficamente ya que no se les podían aplicar los criterios estadísticos anteriores.

Podemos resumir la secuencia anterior concluyendo que se considera inserto a, aquella observación que cae fuera del intervalo $\bar{x} \pm 3\sigma$, cumpla adicionalmente que al menos uno de sus puntos contiguos esté fuera del intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$ y además que la indicación sea parte de un "pico" formado por más de 4 puntos y más o menos simétrico alrededor del valor más disparado, esto asegura que la tendencia de los puntos de la vecindad es en la misma dirección.

Los puntos cercanos a las interfases no se pueden analizar de la misma forma que los centrales, así que lo único que se hace es, observar los perfiles gráficos y sospechar que hay un inserto si se observa alguna alteración brusca en un segmento donde se espera un comportamiento uniforme.

Barra WW01517J



Acotaciones en mm.

Fig 3.11 Plano de distribución de la barra de prueba WW01517J

Para complementar este inciso, cabe hacer la observación de que, con algunas consideraciones particulares se pueden analizar los resultados desde el punto de vista de L.A. Currie (Ref. 19 y 20).

Currie establece que un proceso de medición requiere la introducción de 3 niveles o límites específicos: de decisión, de detección y de determinación. El límite de decisión L_c es un nivel con el cual uno puede decidir si el evento está presente o no, con el límite de detección L_d se tiene una detectabilidad "a priori" con la cual se puede confiar de que el proceso analítico nos llevará a detección (nos da

una estimación de la mínima señal verdadera a partir de la cual se puede esperar que se tendrá una señal suficientemente grande para ser detectada) y el límite de determinación L_q a partir del cual se sabe que el proceso es suficientemente preciso para obtener estimaciones cuantitativas satisfactorias

El autor (Ref 19) establece expresiones de trabajo para L_c , L_d y L_q bajo ciertas suposiciones y ciertas condiciones que se resumen en la tabla 3.6.

Límite Específico	L_c	L_d	L_q
Observaciones apareadas	2.33σ	4.65σ	14.1σ
Blanco(*)bien conocido	1.64σ	3.29σ	10σ

$\alpha=\beta= 0.05$

Tabla 3.6 Expresiones de trabajo propuestas por L.A. Currie

*Blanco es la señal resultante de una muestra que es idéntica a la de interés excepto que la sustancia bajo estudio está ausente.

Para evaluar nuestro sistema de medición desde el punto de vista de Currie, en este trabajo se deben considerar como blanco los segmentos homogéneos y como muestras, aquellos segmentos que tienen insertos y además, considerar que el blanco es bien conocido porque se tiene una gran cantidad de datos.

Podemos ver que, el análisis de nuestros resultados con el criterio de los rangos calculados en base a la t de student (tabla 4.2), en donde se estableció un valor de rechazo de observaciones de 3.3σ corresponde al nivel L_d de Currie lo que indica que se pudo establecer bien un límite de detección a priori.

ININ	FABRICACIÓN DE COMBUSTIBLES				
	INFORME DE ENCAMISADO	SOLICITUD DE ACTIVIDAD: S-M.BA- 030		INFORME No. : IF/PR-M.EN-GS-3	
		TARJETA DE CONTROL		LOTE No. : N/A	HOJA : 1 DE : 1
INICIO DE OPERACIÓN		FECHA : 11 ENERO		PROC.: P-M.EN-01	
TIPO DE BARRA : Prueba para Scanner		No. DE TAPÓN : WW01517J		PLENUM : ACEPTADO	
SEGMENTO	ENRIQUECIMIENTO	No. DE PASTILLAS	LONGITUD (cm) ACUMULADA	PESO (g)	LOTE
1	0.71	15	15.6	141	071004
2	2.60	15	31.3	281	260001
3	2.40	1	32.4	290	240001
4	2.60	15	48.0	431	260001
5	2.20	1	49.1	440	220004
6	2.60	15	64.7	581	260005
7	2.00	1	65.8	590	200001
8	2.60	15	81.4	731	260005
9	1.80	1	82.5	741	180002
10	2.60	15	98.2	881	260006
11	3.00	1	99.2	891	300002
12	2.60	15	115.0	1033	260006
13	3.20	1	116.1	1042	320011
14	2.60	15	131.8	1183	260006
15	3.40	1	132.8	1192	340002
16	2.60	15	148.5	1334	260006
17	0.71	15	164.2	1475	071005
OBSERVACIONES					
FIN DE LA OPERACIÓN			FECHA : 11 DE ENERO		
OPERADOR NOMBRE Y FIRMA : Pedro López G.			SUPERVISOR NOMBRE Y FIRMA : Juan Andrés Rodríguez		

Fig.3.12 Informe de encamisado de la barra de prueba WW01517J

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL MUESTREADOR GAMMA PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: 9B06015E
LOTE: LT-M.BA-021E

Media de la Posición: 5.01mm Media de Conteo: 53232
 Desviación estándar cuentas: 246.8
 Valor umbral alto: 53725.6 Valor umbral bajo: 52738.3

Picos fuera del intervalo de 2.00σ .

Línea	Posic.	Valor Pico
87	593.51	53747
187	1100.61	52619
197	1151.88	53871
305	1699.11	52675
333	1842.46	53821
335	1853.31	52706
397	2166.21	52627
400	2181.48	53867
439	2383.15	52680
478	2582.96	53827
486	2625.26	53848
517	2779.68	53756
584	3120.87	54020
631	3361.10	53755

Cantidad total de picos : 14

Picos para análisis detallado:

397	2166.21	52627
400	2181.48	53867
439	2383.15	52680

Existe(n) 3 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS : -----

ACEPTADA
 ELABORO:

RECHAZADA

CLAVE:

Fig. 3.13 Reporte de salida del programa de cómputo empleado para automatizar la selección de puntos que cumplen con los criterios establecidos.

3.3.7. Evaluación de Enriquecimiento de Columnas Homogéneas de Pastillas dentro de Barras de Combustible Nuclear.

Para determinar el enriquecimiento de columnas homogéneas de pastillas de UO_2 se realizaron las actividades y pruebas estadísticas descritas a continuación.

- Se efectuaron en el sistema varios barridos de las barras de prueba descritas en el inciso 3.2, obteniéndose series de datos para cada segmento de enriquecimiento.
- Se obtuvo el promedio de los datos de cada una de las columnas homogéneas de las barras de prueba (tabla 3.7).
- Se calculó el promedio de todos los barridos para cada valor de enriquecimiento (tabla 3.8).
- Se relacionaron por regresión lineal los promedios de cuentas obtenidas en los 35 s con el enriquecimiento de ^{235}U . La ecuación resultante fue : $Y = 39714.9 + 4149.66X$ y el coeficiente de correlación 0.998705. Esta ecuación y los datos asociados se presentan en la fig. 3.13.
- Con la ecuación del inciso anterior se calculan las tasas de conteo esperadas para los 11 enriquecimientos utilizados en las barras de producción (tabla 3.9).
- Para determinar si los promedios de enriquecimientos subsecuentes eran diferentes se realizó una prueba estadística de significancia t-student a 0.05%.
- Se efectuó el barrido de una barra incógnita y se estableció el valor de enriquecimiento de sus columnas según el resultado de los conteos conforme a la tabla 3.8. Se comprobó que la determinación fué correcta comparando el resultado con el plano de distribución correspondiente elaborado conforme al informe de encamisado.

Las mediciones de cada sección de una barra, corregidas por fondo se realizaron con un nivel de confianza del 95 % y se establecieron los tiempos de conteo para lograr errores relativos menores que el 1 %.

Barra	% de enriquecimiento del segmento	Número de corrida de calificación	Promedio de los datos de la columna	Desviación estándar
WW01503J	3.95	PRIMERA	55573	277
		SEGUNDA	55606	293
		TERCERA	55635	320
		CUARTA	55637	308
		QUINTA	55682	273
		SEXTA	56739	269
WW01520J	1.80	PRIMERA	46859	319
		SEGUNDA	46897	282
		TERCERA	46893	297
		CUARTA	46902	281
		QUINTA	46883	282
		SEXTA	47165	240
WW01517J	2.60	PRIMERA	50137	314
		SEGUNDA	50147	294
		TERCERA	50124	270
		CUARTA	50750	310
		QUINTA	50111	250
		SEXTA	50725	256
CK03711K	2.60	UNICA	50525	279
	3.00		52269	284
	2.60		50556	239
G201211K	3.00	UNICA	52456	298
	3.40		54166	252
	3.00		52444	246
8H59398E	2.60	UNICA	50465	251

Tabla 3.7. Promedios de los datos de las columnas homogéneas obtenidos de los análisis de las barras de prueba.

% de U-235	Cuentas en 35 s	Intervalo 2σ
0.71	42750	413
1.8	46933	433
2.6	50393	450
3.0	52389	458
3.4	54166	465
3.95	55812	472

Tabla 3.8 .Promedios por enriquecimiento de las columnas homogéneas de las barras de prueba.

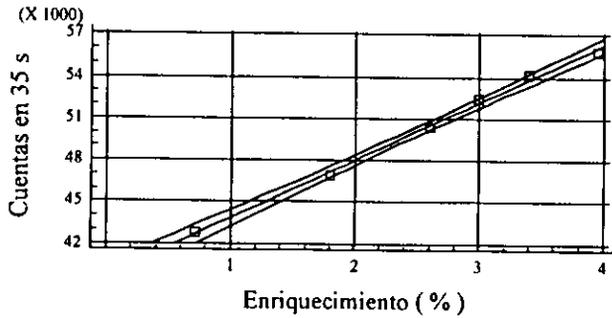


Fig. 3.14 Relación lineal obtenida con los resultados de las barras de prueba.

% de ^{235}U	Cuentas en 35 s	Intervalo 2σ
0.71	42661	413
1.80	47080	434
2.00	47925	438
2.20	48769	442
2.40	49615	445
2.60	50460	449
3.00	52150	457
3.20	52995	460
3.40	53840	464
3.60	54685	468
3.95	56163	474

Tabla 3.9. Valores calculados para las barras de producción según la regresión lineal.

3.3.8. Proceso de Verificación del Sistema para el análisis de barras de producción.

Para comprobar que el equipo permanecía funcionando bajo las condiciones con las que se establecieron los criterios de definición descritos en 3.3.6. y 3.3.7., se efectuó un barrido de la barra de prueba WW01503J cada vez que se terminó de analizar un lote de producción. Se comparaban las tasas de conteo obtenidas en la validación con las obtenidas en la verificación.

En el caso de que se hubiera encontrado diferencia, se hubieran tenido que revisar los componentes del sistema para encontrar el origen de la diferencia y en algún caso ajustar los parámetros electrónicos para tener siempre las mismas tasas de conteo.

4.- RESULTADOS Y DISCUSION.

Como se mencionó en el inciso 3.1.2., cada barra estudiada en el sistema de análisis de enriquecimiento genera datos que se concentran en un archivo tipo texto y otro binario. Generalmente estos archivos contienen además de la información de identificación de barra y otros datos acerca del análisis, cerca de 800 datos de posiciones y conteos. La fig. 4.1 presenta un fragmento del archivo tipo texto generado para una barra.

La primera columna del archivo, es el número consecutivo de desplazamiento que ha efectuado el sistema, la segunda indica el tamaño del desplazamiento y la tercera el tiempo en milisegundos que contó el sistema con la barra en esa posición. La columna etiquetada Conteo 1 contiene la información de la radiación gamma y la etiquetada como Conteo 2 se dejó libre para aplicaciones posteriores.

Cada archivo generado por el barrido de una barra, se exportó a una hoja de cálculo para hacer un análisis estadístico que ya se describió en el capítulo anterior.

Se efectuaron varios análisis de las barras de prueba para establecer los criterios y metodología (ver secciones 3.3.6 y 3.3.7) que posteriormente se aplicó a las barras de producción. Las barras WW01503J, WW01517J y WW01520J se analizaron seis veces cada una, las CK03711, G201211K y 8H59398E una vez cada una. Se seleccionó al azar un análisis de cada barra de prueba para presentarse en este capítulo y en el Anexo I se presentan los resultados del análisis completo de 5 barras de producción seleccionadas también al azar.

REPORTE DEL SISTEMA DE ANALISIS DE BARRAS POR RADIACION GAMMA

DEPARTAMENTO DE AUTOMATIZACION

DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES

DIVISION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO

DATOS GENERALES

Fecha (dd/mm/aa): 26/3/1996

Hora: (hh:mm:ss:cs): 14:45:01:36

Nombre del Operador: LETICIA ROJAS C

Identificacion de la Barra: 7G02602E

Tiempo de Conteo (seg): 35.000000

Paso del motor (mm): 5

Avance Total (mm): 4000

Nombre del Archivo: 7G02602E

Paso	Posición(mm)	Tiempo (mseg)	Conteo 1	Conteo 2
0	0.00	34941	16230	0
1	4.91	34948	17858	0
2	9.87	34936	20734	0
3	14.87	34928	24459	0
4	19.78	34945	27781	0
5	24.69	34942	29400	0
6	29.65	34946	30788	0
7	34.56	34982	32089	0
8	39.44	34938	32782	0
9	44.43	34938	34105	0
10	49.02	34934	35115	0
11	53.96	34941	36236	0
12	58.92	34979	37505	0
13	64.33	34937	37841	0
14	68.86	34939	38785	0
15	73.79	34936	39412	0

Fig. 4.1 Fragmento del archivo generado por el sistema de análisis de enriquecimiento para la barra 7G02602e.

4.1 Resultados del reconocimiento de pastillas de enriquecimiento diferente al de las circundantes en una columna homogénea de pastillas dentro de barras de combustible.

4.1.1. Resultados del análisis de los extremos de las barras y zonas de cambio de enriquecimiento.

Los extremos de las barras contienen sólo pastillas de dióxido de Uranio de enriquecimiento natural y, todos esos segmentos son iguales en tamaño. No podían someterse al mismo análisis estadístico que el resto de la barra por las limitaciones del blindaje interior y solamente se les realizó un análisis gráfico cualitativo.

El análisis se efectuó comparando entre sí los segmentos extremos de una barra que tenían la misma longitud y el mismo enriquecimiento. En uno de esos extremos se insertó una pastilla de enriquecimiento diferente al de toda la columna. En el perfil gráfico (fig.4.2.) es notoria la alteración de la zona del inserto. Se presenta una ampliificación de cada región donde se aprecia con mayor claridad la diferencia (figs. 4.3 y 4.4).

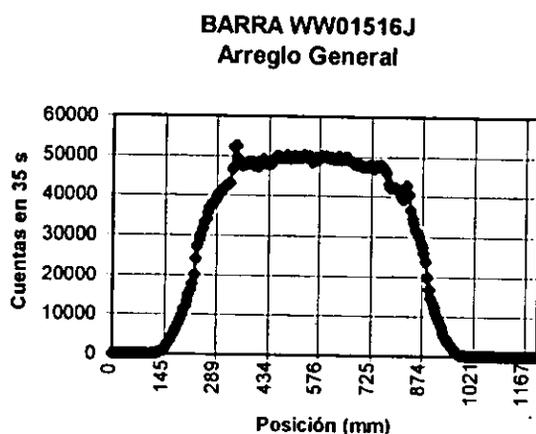


Fig. 4.2. Perfil gráfico general de la barra WW01516j.

BARRA WW01516J
Primer Segmento de Enriquecimiento
Natural

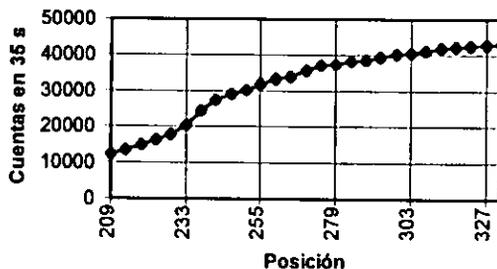


Fig.4.3 Ampliación del primer segmento de la barra WW01516J (no tiene inserto alguno).

BARRA WW01516J
Extremo Final de Enriquecimiento Natural

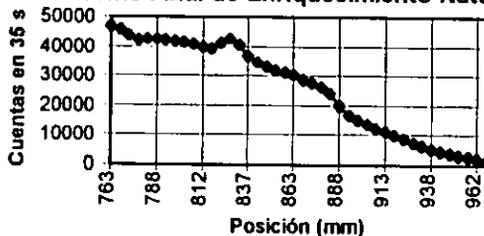


Fig 4.4. Ampliación del quinto segmento de la barra WW01516J con enriquecimiento natural y pastilla de 2.40 % en la posición 825 mm.

Al igual que los extremos, el análisis de pastillas equivocadas en las zonas de cambio de enriquecimiento no puede manejarse estadísticamente por lo que se hizo un análisis cualitativo similar al de los extremos. La barra WW01516J contenía pastillas de enriquecimiento ajeno al segmento en las zonas de cambio y fué la que se utilizó para visualizar las alteraciones gráficas.

Se marcaron en el perfil de enriquecimiento (figs. 4.5 y 4.6) los picos sobresalientes y se compararon con el plano de distribución (fig 4.7) con ello se determinó que los insertos coincidían con los picos obtenidos. Podría haber ambigüedad en el reconocimiento de diferencias de 0.2 % de enriquecimiento así que sólo se deben considerar los puntos que sobresalgan tanto o más que el que difiere 0.4 % en esta figura.

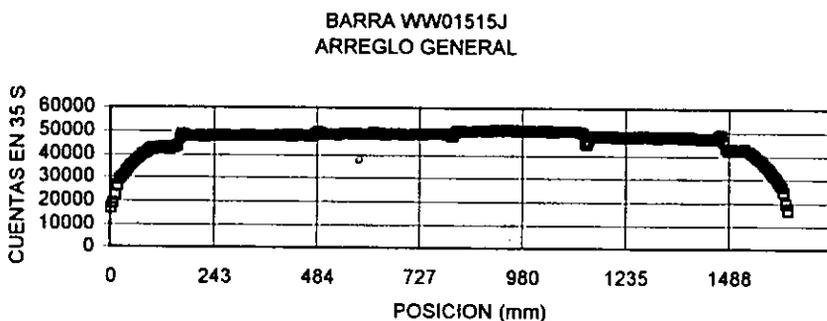


Fig. 4.5 Perfil gráfico general de barra con insertos en las zonas de cambio de enriquecimiento.

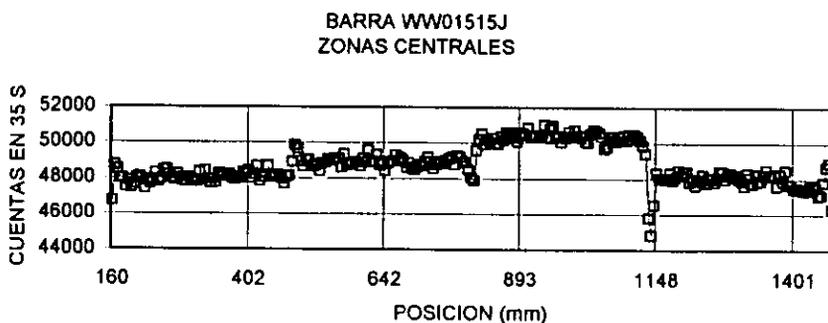
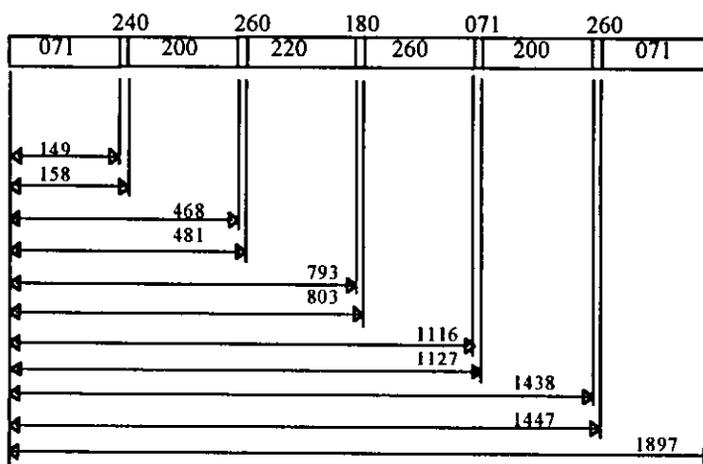


Fig.4.6 Perfil gráfico de las zonas centrales de la barra .Se pueden distinguir las pastillas insertadas en las zonas de cambio de enriquecimiento.

Barra WW01515j



Acotaciones en mm

Fig. 4.7. Plano de distribución de la barra WW01515J

4.1.2. Resultados del análisis de los segmentos centrales de las barras que contienen pastillas de distinto enriquecimiento insertadas a diferentes distancias.

El análisis de las barras excluyendo los extremos se realizó según la secuencia descrita en 3.3.6.

Como resultado de la aplicación de los criterios estadísticos se obtuvieron los intervalos dentro de los cuales debían caer los conteos de pastillas de igual enriquecimiento, estos se presentan en las tablas 4.1 a 4.4. Los puntos fuera de dichos intervalos se consideran como sospechosos de pertenecer a pastillas de enriquecimiento diferente al requerido.

Barra	Número de datos	Promedio	Desv. Std	Z_p	Límite inferior del intervalo	Límite superior del intervalo
	n	\bar{x}	σ		$\bar{x} + Z_p \sigma$	$\bar{x} - Z_p \sigma$
WW01503J	142	55573	236	2.7	56210.2	54935.8
	146	55606	236	2.71	56245.56	54966.44
	138	55635	236	2.69	56269.84	55000.16
	143	55637	236	2.71	56276.56	54997.44
	138	55682	236	2.69	56316.84	55047.16
	132	56739	238	2.68	57376.84	56101.16
WW01520J	152	46859	216	2.73	47448.68	46269.32
	162	46897	217	2.75	47493.75	46300.25
	165	46893	217	2.75	47489.75	46296.25
	164	46902	217	2.75	47498.75	46305.25
	160	46883	217	2.74	47477.58	46288.42
	152	47165	217	2.73	47757.41	46572.59
WW01517J	254	50137	224	2.89	50784.36	49489.64
	254	50147	224	2.89	50794.36	49499.64
	252	50124	224	2.89	50771.36	49476.64
	254	50750	225	2.89	51400.25	50099.75
	252	50111	224	2.88	50756.12	49465.88
	245	50725	225	2.89	51375.25	50074.75
8H59398E	732	50465	225	3.18	51180.5	49749.5
CK037seg2	87	50525	225	2.53	51094.25	49955.75
CK037seg3	124	52269	229	2.65	52875.85	51662.15
CK037seg4	77	50556	225	2.49	51116.25	49995.75
G201seg2	79	52456	229	2.495	53027.355	51884.645
G201seg3	122	54166	233	2.65	54783.45	53548.55
G201seg4	76	52444	229	2.49	53014.21	51873.79

Tabla 4.1 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de Chauvenet

Barra	Número de datos	Promedio	Desv. Std	Z _p	Límite inferior del intervalo	Límite superior del intervalo
WW01503J	n	\bar{x}	σ		$\bar{x} + Z_p \sigma$	$\bar{x} - Z_p \sigma$
	146	55606	236	3.5	56432	54780
	138	55635	236	3.5	56461	54809
	143	55637	236	3.5	56463	54811
	138	55682	236	3.5	56508	54856
	132	56739	238	3.5	57572	55906
WW01520J	152	46859	216	3.5	47615	46103
	162	46897	217	3.5	47656.5	46137.5
	165	46893	217	3.5	47652.5	46133.5
	164	46902	217	3.5	47661.5	46142.5
	160	46883	217	3.5	47642.5	46123.5
	152	47165	217	3.5	47924.5	46405.5
WW01517J	254	50137	224	3.5	50921	49353
	254	50147	224	3.5	50931	49363
	252	50124	224	3.5	50908	49340
	254	50750	225	3.5	51537.5	49962.5
	252	50111	224	3.5	50895	49327
	245	50725	225	3.5	51512.5	49937.5
8H59398E	732	50465	225	3.5	51252.5	49677.5
CK037seg2	87	50525	225	3.5	51312.5	49737.5
CK037seg3	124	52269	229	3.5	53070.5	51467.5
CK037seg4	77	50556	225	3.5	51343.5	49768.5
G201seg2	79	52456	229	3.5	53257.5	51654.5
G201seg3	122	54166	233	3.5	54981.5	53350.5
G201seg4	76	52444	229	3.5	53245.5	51642.5

Tabla 4.2. Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de los rangos basados en la t de student

Barra	Número de datos	Promedio	Desv .Std	Z _p	Límite inferior del intervalo	Límite superior del intervalo
	n	prom	sigma			
WW01503j	142	55573	236	2	56045	55101
	146	55606	236	2	56078	55134
	138	55635	236	2	56107	55163
	143	55637	236	2	56109	55165
	138	55682	236	2	56154	55210
	132	56739	238	2	57215	56263
WW01520J	152	46859	216	2	47291	46427
	162	46897	217	2	47331	46463
	165	46893	217	2	47327	46459
	164	46902	217	2	47336	46468
	160	46883	217	2	47317	46449
	152	47165	217	2	47599	46731
WW01517J	254	50137	224	2	50585	49689
	254	50147	224	2	50595	49699
	252	50124	224	2	50572	49676
	254	50750	225	2	51200	50300
	252	50111	224	2	50559	49663
	245	50725	225	2	51175	50275
8H59398E	732	50465	225	2	50915	50015
CK037seg2	87	50525	225	2	50975	50075
CK037seg3	124	52269	229	2	52727	51811
CK037seg4	77	50556	225	2	51006	50106
G201seg2	79	52456	229	2	52914	51998
G201seg3	122	54166	233	2	54632	53700
G201seg4	76	52444	229	2	52902	51986

Tabla 4.3 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de ± 2 sigma.

Barra	Número de datos	Promedio	Desv .Std	Z _p	Límite inferior del intervalo	Límite superior del intervalo
	n		σ			
					$\bar{x} + Z_p \sigma$	$\bar{x} - Z_p \sigma$
WW01503j	142	55573	236	3	56281	54865
	148	55606	236	3	56314	54898
	138	55635	236	3	56343	54927
	143	55637	236	3	56345	54929
	138	55682	236	3	56390	54974
	132	56739	238	3	57453	56025
WW01520j	152	46859	216	3	47507	46211
	162	46897	217	3	47548	46246
	165	46893	217	3	47544	46242
	164	46902	217	3	47553	46251
	160	46883	217	3	47534	46232
	152	47165	217	3	47816	46514
WW01517j	254	50137	224	3	50809	49465
	254	50147	224	3	50819	49475
	252	50124	224	3	50796	49452
	254	50750	225	3	51425	50075
	252	50111	224	3	50783	49439
	245	50725	225	3	51400	50050
8H59398E	732	50465	225	3	51140	49790
CK037seg2	87	50525	225	3	51200	49850
CK037seg3	124	52269	229	3	52956	51582
CK037seg4	77	50556	225	3	51231	49881
G201seg2	79	52456	229	3	53143	51769
G201seg3	122	54166	233	3	54865	53467
G201seg4	76	52444	229	3	53131	51757

Tabla 4.4 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de ± 3 sigma.

Una vez establecidos los intervalos de referencia de acuerdo a los criterios estadísticos (tablas 4.1 a 4.4) se separaron los puntos fuera de los límites resultantes con ayuda de un programa.

Una vez separados los puntos sospechosos se les aplicaron los criterios definidos en 3.3.6. para establecer o desechar la presencia de pastillas de enriquecimiento diferente al de la columna en general.

Las tablas 4.5 a 4.8 son las relaciones de los puntos fuera de los intervalos establecidos por cada criterio. La última columna es la conclusión de la aplicación de la secuencia descrita en 3.3.6. y las figs 4.8 a 4.11 son los perfiles gráficos.

En dicha columna se agregó entre paréntesis el enriquecimiento de la pastilla según el informe de encamisado.

Barra WW01503J

Posición	2σ	3σ	Chauvenet	Rangos t-student	Resultado
313	54377	54377	54377	54377	inserto(3.60 %)
320	54908	54908	54908	54908	inserto(3.60 %)
357	56290				no inserto
390	56317		56317	56317	no inserto
480	54878	54878	54878	54878	inserto(3.40 %)
485	54432	54432	54432	54432	inserto(3.40 %)
490	54178	54178	54178	54178	inserto(3.40 %)
533	56201				no inserto
591	56187				no inserto
649	54768	54768	54768	54768	inserto(3.20 %)
653	54037	54037	54037	54037	inserto(3.20 %)
658	53527	53527	53527	53527	inserto(3.20 %)
819	54232	54232	54232	54232	inserto(3.00 %)
824	52669	52669	52669	52669	inserto(3.00 %)
832	54137	54137	54137	54137	inserto(3.00 %)
906	55151				interfase
911	55181				interfase

Tabla 4.5. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento es de 3.95 %

BARRA WW01503J
QUINTO BARRIDO

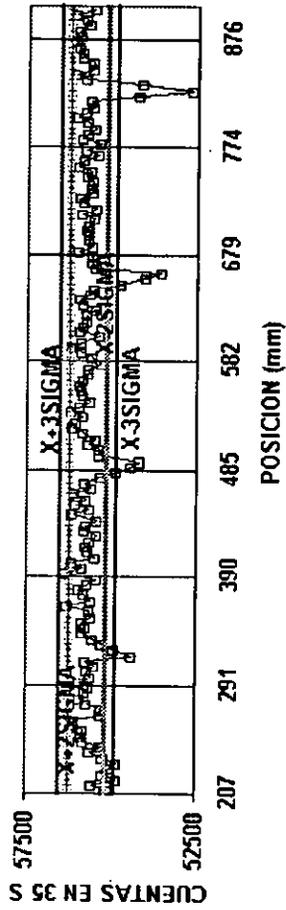


Fig. 4.8 Perfil gráfico de la barra WW01503J donde se distinguen perfectamente cuatro insertos

WW01517J

Posición	2 σ	3 σ	Chauvenet	Rangos t-student	Anotaciones
209	49658				Interfase
244	49594				No inserto
336	49384	49384	49384		2.40 %
341	49216	49216	49216	49216	2.40 %
503	48792	48792	48792	48792	2.20 %
508	49163	49163	49163	49163	2.20 %
555	50631				no inserto
601	50582				no inserto
662	49110	49110	49110	49110	2.00 %
667	48805	48805	48805	48805	2.00 %
672	49496				2.00 %
700	50644				no inserto
823	49516				1.80 %
828	48139	48139	48139	48139	1.80 %
833	48156	48156	48156	48156	1.80 %
838	49357	49357	49357		1.80 %
895	50612				no inserto
905	50646				no inserto
993	50991	50991	50991	50991	3.0 %
998	51457	51457	51457	51457	3.0 %
1003	50883	50883	50883		3.0 %
1064	50597				no inserto
1100	50585				no inserto
1155	49642				no inserto
1166	50984	50984	50984	50984	3.20 %
1171	51652	51652	51652	51652	3.20 %
1176	51772	51772	51772	51772	3.20 %
1230	50813	50813	50813		*ver obser-
1235	49543				vacación
1321	50762				no inserto
1330	51220	51220	51220	51220	3.40 %

WW01517J

(continuación)

Posición	2 σ	3 σ	Chauvenet	Rangos t-student	Anotaciones
1336	51988	51988	51988	51988	3.40 %
1344	52418	52418	52418	52418	3.40 %
1346	50843	50843	50843		3.40 %
1378	50701				no inserto
1434	49254				interfase
1442	49426				interfase

TABLA 4.6. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento era de 2.60 %.

* Observación. Esta elección de puntos podría llevarnos a creer que hay una pastilla equivocada puesto que se tiene un punto fuera de 3σ y uno contiguo fuera de 2σ pero hay que tomar en cuenta que uno se desvía hacia un valor superior de la media y el otro hacia un valor inferior, lo que lo descarta totalmente.

**BARRA WW01517J
TERCER BARRIDO**

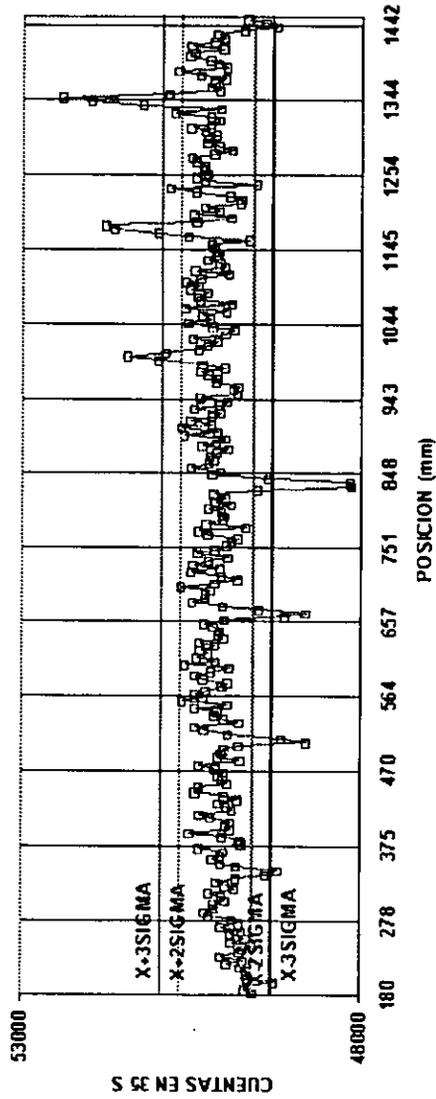


Fig. 4.9 Perfil gráfico de la barra WW01517J donde se distinguen perfectamente siete insertos.

Barra WW01520J

Posición	2 σ	3 σ	Chauvenet	Rangos t-student	Anotaciones
198	46330				no inserto
299	46077		46077	46077	inserto(0.71 %)
304	44378	44378	44378	44378	inserto(0.71 %)
308	43624	43624	43624	43624	inserto(0.71 %)
313	45504	45504	45504	45504	inserto(0.71 %)
318	46107	46107	46107	46107	inserto(0.71 %)
365	46420				no inserto
442	47472		47472		no inserto
462	47875	47875	47875	47875	inserto(2.0 %)
467	47294				inserto(2.0 %)
523	46366				no inserto
608	47313				no inserto
623	47541	47541	47541	47541	inserto(2.2 %)
625	47992	47992	47992	47992	inserto(2.2 %)
630	48028	48028	48028	48028	inserto(2.2 %)
688	47353				no inserto
702	47360				no inserto
789	47793	47793	47793	47793	inserto(2.40 %)
793	48460	48460	48460	48460	inserto(2.40 %)
797	48175	48175	48175	48175	inserto(2.40 %)
869	47444				no inserto
893	46154	46154	46154	46154	no inserto
903	46391				no inserto
909	46137	46137	46137	46137	interfase
920	46310				

TABLA 4.7. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento es de 1.80 %

BARRA WW01520J
PRIMER BARRIDO

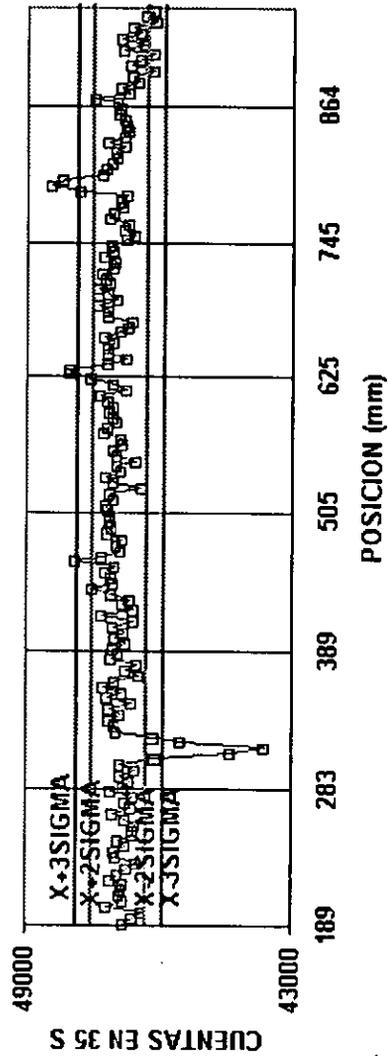


Fig. 4.10 Perfil gráfico de la barra WW01520J donde se distinguen cuatro insertos

Barra 8H59398E

Posición	2 σ	3 σ	Chauvenet	Rangos t-student	Anotaciones
347	50946				inserto(3.95 %)
352	53100	53100	53100	53100	inserto(3.95 %)
356	53858	53858	53858	53858	inserto(3.95 %)
361	52472	52472	52472	52472	inserto(3.95 %)
437	51167	51167			no inserto
595	50940				no inserto
605	50916				no inserto
625	51059				Contiguos pero ninguno fuera de
630	50930				x +/- 3 sigma
696	51488	51488	51488	51488	inserto(3.60 %)
701	53046	53046	53046	53046	inserto(3.60 %)
707	52857	52857	52857	52857	inserto(3.60 %)
711	51502	51502	51502	51502	inserto(3.60 %)
716	51178	51178			inserto(3.60 %)
737	50936				
772	51159	51159			
815	51146	51146			
931	49998				
942	49964				
1065	51810	51810	51810	51810	inserto(3.40 %)
1070	52621	52621	52621	52621	inserto(3.40 %)
1075	52011	52011	52011	52011	inserto(3.40 %)
1080	50996				inserto(3.40 %)
1100	50957				
1383	49985				
1428	51368	51368	51368	51368	inserto(3.2 %)
1434	52053	52053	52053	52053	inserto(3.2 %)
1469	49972				
1578	51009				
1710	51188	51188	51188		
1790	51843	51843		51843	inserto (3.0 %)
1795	51008				inserto (3.0 %)
1820	50923				
1855	50998				
1912	49955				
1928	49912				
1939	49991				

Posición	2 σ	3 σ	Chauvenet	Rangos t-student	Anotaciones
1949	51039				
1996	50001				
2153	49998				Contiguos pero nin-
2158	49851				guno fuera de
2259	51013				x +/- 3 sigma
2510	49903				inserto(2.20%)
2516	49472	49472	49472	49472	inserto(2.20%)
2521	49897				inserto(2.20%)
2576	51000				
2628	49930				
2830	51001				
2850	51044				
2860	49563	49563	49563	49563	inserto(2.0 %)
2866	48622	48622	48622	48622	inserto(2.0 %)
2871	48907	48907	48907	48907	inserto(2.0 %)
2880	49994				inserto(2.0 %)
2977	51075				inserto**
2982	51939	51939	51939	51939	inserto**
2987	51876	51876	51876	51876	inserto**
3083	49927				
3130	49971				
3228	48821	48821	48821	48821	inserto(1.8 %)
3233	48114	48114	48114	48114	inserto(1.8 %)
3237	49305	49305	49305	49305	inserto(1.8 %)
3304	49954				
3399	50948				
3499	50012				
3514	49942				
3586	49149	49149	49149	49149	inserto(0.71 %)
3590	45516	45516	45516	45516	inserto(0.71 %)
3596	45372	45372	45372	45372	inserto(0.71 %)
3601	48696	48696	48696	48696	inserto(0.71 %)
3647	50930				
3678	49967				
3688	51043				
3718	49830				
3775	49996				

TABLA 4.8. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento es de 2.60 %. ** puntos de un inserto no planeado en el diseño.

BARRA 8H59398E

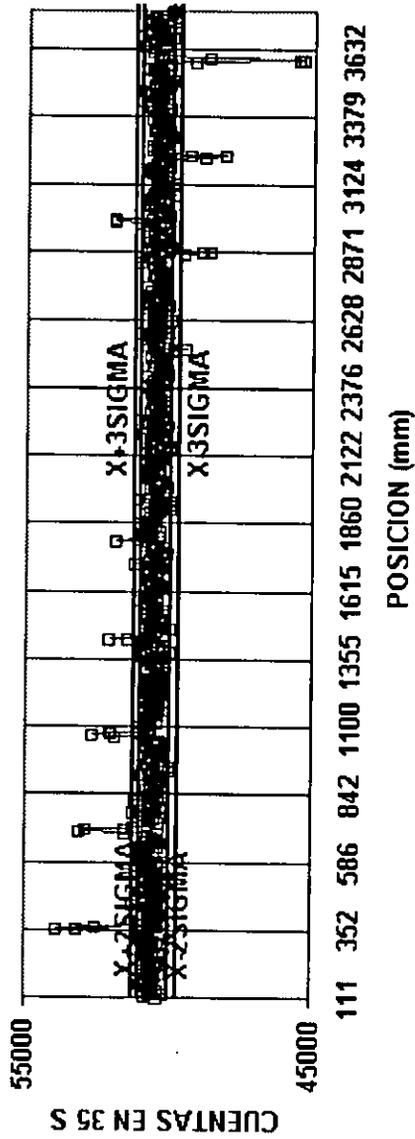


Fig. 4.11 Perfil gráfico de la barra 8H59398E donde se distinguen a simple vista diez insertos.

Los puntos marcados con asterisco en la tabla 4.8 pertenecen a una pastilla cuya presencia no se esperaba ya que no se planeó en el diseño. Se comprobó que era una pastilla de diferente enriquecimiento cortando la barra y verificando con la marca que se les hacía al prensarlas con una matriz grabada.

En el perfil gráfico de esta barra sobresalen los puntos pertenecientes a esa pastilla que en lugar de tener 2.60 % de ^{235}U que era lo requerido para la columna, tenía 3.4%. su presencia se explica porque la barra fue hecha con material de desecho donde no era tan estricta la clasificación de las pastillas.

El haber encontrado esta pastilla sirvió para comprobar el correcto funcionamiento del equipo.

Las dos barras cuyo análisis se presenta a continuación, no tenían insertos y sus segmentos se hicieron conforme a la configuración de barras de producción pero con menor longitud.

Se mencionó en el capítulo anterior que la secuencia de análisis para las barras de producción se simplificó ya que eran innecesarios algunos pasos intermedios.

La secuencia de análisis para las barras de producción es la siguiente :se obtiene el perfil gráfico general y por zonas de la barra, se separan con un programa los puntos fuera de los intervalos establecidos, se ve si hay puntos contiguos fuera de los intervalos marados, con otro programa se seleccionan los puntos que tengan además la característica de pertenecer a picos formados por más de cuatro puntos; los que coincidan en ambas selecciones, se consideran sospechosos y se procede a amplificar la zona en cuestión. Y, en caso de persistir las sospechas, se efectúa un barrido local de la zona de interés y si se repiten los resultados, se considera rechazada la barra. En la última página se muestra un ejemplo de informe final igual a los que se emitieron para las barras.

En el anexo I se presentan como ejemplo los resultados de cinco barras de producción.

Barra G201211K

POSICION	2 σ	3 σ	CHAUVENET	T DE STUDENT	ANOTACIONES
179	51967				
184	51685	51685	51685		
211	51939				
220	51690	51690	51690		
238	51912				
261	52941				
401	52986				
448	53062		53062		
521	52935				
526	52927				
TERCER	SEGMENTO				
690	53489		53489		
819	54689				
890	54632				
894	54639				
923	54827		54827		
1008	54678				
1133	54632				
1144	53587				
1170	53670				
1184	53689				
1227	53616				
CUARTO	SEGMENTO				
1368	51940				
1481	51979				
1592	51972				

TABLA 4.9. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis. El enriquecimiento de cada uno de los tres segmentos centrales es : 3.0 %, 3.4 % y 3.0 %.

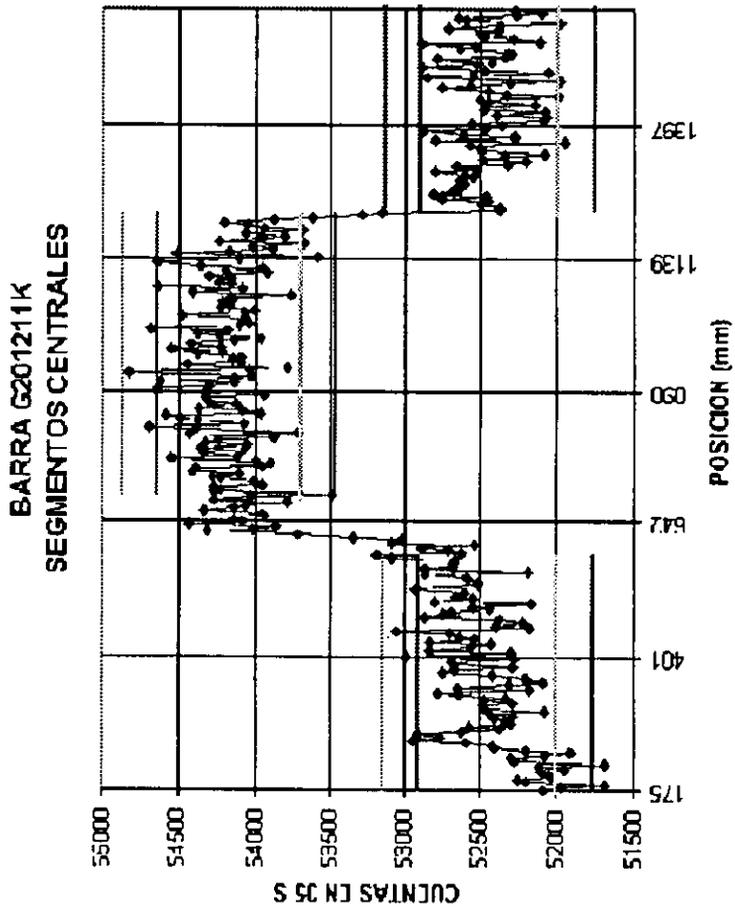


Fig.4.12 Perfil gráfico de los segmentos centrales de la barra G201211K. Se representan los límites del promedio en los intervalos $\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$. Segmentos de 3.00%, 3.40% y 3.00%.

Barra CK03711K

POSICION	2 σ	3 σ	CHAUVENET	T DE STUDENT	ANOTACIONES
554	49785	49785	49785		
559	50073				
572	49933		49933		
582	49594	49594	49594	49594	
595	49959				
737	51128		51128		
937	51086				
961	51170		51170		
966	51211	51211	51211		
TERCER	SEGMENTO				
1045	52842				
1118	52833				
1159	52779				
1236	52891		52891		
1272	52875		52875		
1413	52936		52936		
1544	51696				
1559	51725				
1564	51793				
1579	51566	51566	51566		
1615	51228	51228	51228	51228	
CUARTO	SEGMENTO				
1646	51035				
1726	51043				
1752	49887		49887		
1992	50095				

Tabla 4.10. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis. Los enriquecimientos base de cada uno de los segmentos son : 2.60 %, 3.00 % y 2.60 %.

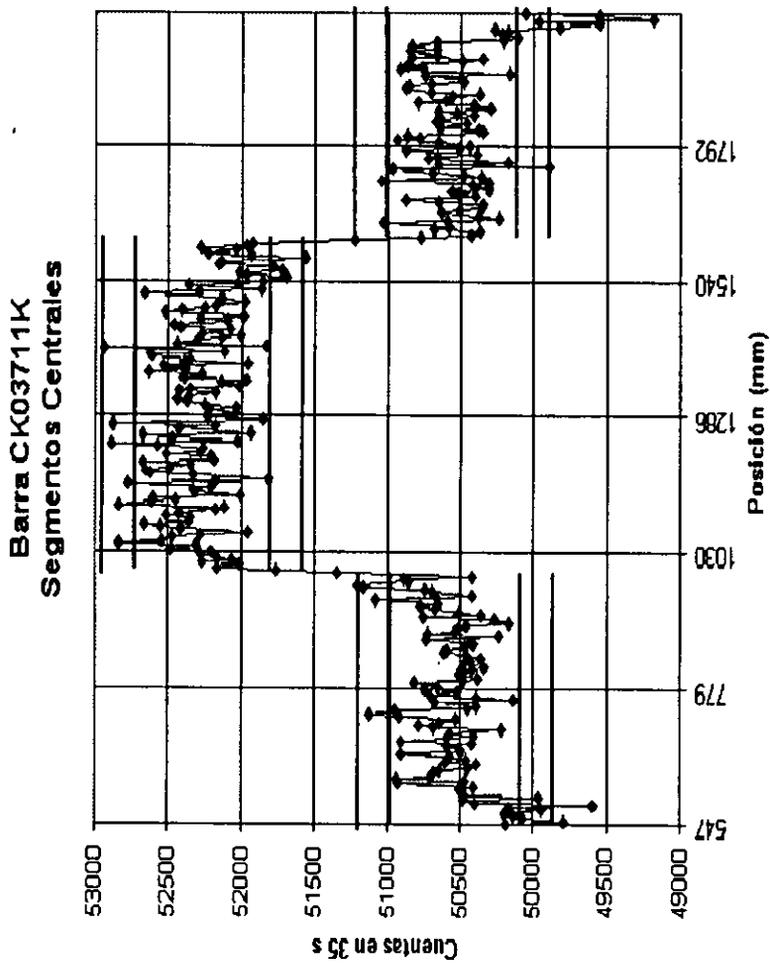


Fig.4.13 Perfil gráfico de zonas centrales de la barra CK03711K. Se representan los límites del promedio ± 2 y 3σ . Segmentos de 2.60%, 3.00% y 2.60 %.

4.2. Resultados de la determinación del enriquecimiento de columnas homogéneas de pastillas en barras de combustible nuclear.

En base a los promedios obtenidos con los datos de las columnas homogéneas de las barras de prueba y cuyos resultados se presentan en la tabla 3.8. se comprobó que las barras de producción estuvieran armadas conforme a diseño.

Los resultados para cada una de las barras de producción hasta el lote 28 se presentan en el anexo II.

En la tabla 4.11 se presentan los promedios por enriquecimiento de todos los segmentos de las barras de producción de combustible nuclear analizadas. La última columna presenta la desviación estándar obtenida al calcular el promedio con el número de segmentos que se indica en la tabla y aunque la que hay que considerar es la que está en la tercera columna, se calculó para mostrar la poca dispersión de los resultados.

Los valores obtenidos son muy cercanos a aquellos calculados por regresión lineal (inciso 3.7) y las diferencias se presentan en la tabla 4.12.

Resultados de Barras de Producción

% de U ²³⁵	Número de segmentos	Cuentas en 35 s	Desv.Std Global
3.95	60	56105+/-237	+/- 80
3.60	36	54557+/-234	+/-137
3.40	18	53718+/-232	+/-168
3.20	47	52859+/-230	+/- 98
3.00	36	52214+/-228	+/- 105
2.60	53	50466+/-225	+/- 182
2.40	9	49585+/-223	+/- 194
2.20	12	48723+/-221	+/- 125
2.00	18	48080+/-219	+/- 161
1.80	3	47384+/-218	+/- 14

Tabla 4.11 Promedios de conteos por enriquecimiento de barras de combustible nuclear entregadas a la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde

Comparación de Resultados

% de U²³⁵	Valor Calculado por Regresión Lineal	Valor de las Barras de Producción	Diferencias Relativas (%)
3.95	56183	56105	0.1
3.60	54685	54557	0.23
3.40	53840	53718	0.22
3.20	52995	52859	0.25
3.00	52150	52214	0.12
2.60	50460	50466	0.01
2.40	49615	49585	0.06
2.20	48769	48723	0.09
2.00	47925	48080	0.32
1.80	47080	47384	0.64

Tabla 4.12 Diferencias entre los valores calculados por regresión lineal y los obtenidos en producción.

4.3. Resultados de las verificaciones.

Se efectuó una verificación del sistema haciendo el barrido de la barra WW01503J cada que se analizaban 1 lote de producción .Los resultados se presentan en la tabla 4.13.

Resultados de las Verificaciones

Fecha	Promedio de los Conteos	Conteos en los Insertos			
20 Feb	55951	54738	54410	53913	53090
27 Feb	56090	54755	54692	54202	53552
5 Mar	56026	54500	54700	53542	53513
12 Mar	56012	54895	54489	53841	53883
19 Mar	56075	55100	54524	54023	53354
26 Mar	56051	54756	54416	53926	53831
1 Abr	56280	55373	54661	54228	53762
9 Abr	56202	55086	54363	53747	53419

Tabla 4.13 Resultados de las verificaciones del sistema con la barra WW01503j y valores de conteo obtenidos en promedio en el segmento y en los insertos.

5.- CONCLUSIONES Y PROPUESTAS.

El sistema de análisis descrito en el presente trabajo, desarrollado para cubrir una exigencia de control de calidad de la fabricación de ensambles combustibles para la central nucleoelectrónica de Laguna Verde cumplió su función, ya que permite evidenciar la presencia de pastillas que tengan enriquecimiento diferente al de las circundantes en un ± 0.4 % o mayor en una columna homogénea con un nivel de confianza del 99%.

Así mismo, con este sistema se pueden determinar cambios de enriquecimiento mayores de ± 0.2 % de segmentos homogéneos de longitud mayor a 12" con un nivel de confianza del 95 %.

En todos los casos las determinaciones presentan un error relativo menor al 1%.

Es posible mejorar el sistema modificando el mecanismo de tracción de la barra de manera que el desplazamiento sea más uniforme, esto se podría lograr alineando perfectamente los soportes mecánicos y cambiando el material de los rodillos que los motores mueven para jalar la barra en cada paso (sería conveniente utilizar uno que retenga menos residuos que el que se utilizó); con esos cambios se podría lograr una mayor resolución en el posicionamiento de la barra.

Haciendo las modificaciones mencionadas en el párrafo anterior y agregando dos detectores con soportes y un buen sistema de colimación se podrían realizar determinaciones simultáneas de enriquecimiento y densidad de las pastillas de UO_2 del combustible.

La instalación puede adaptarse fácilmente a un sistema de producción en línea si se agrega un mecanismo que coloque automáticamente las barras para hacer el barrido.

Con un detector de tamaño y forma adecuada y adaptaciones del sistema de arrastre se puede tener una aplicación muy útil para caracterizar desechos radioactivos. Y, utilizando el mismo principio pero instrumentación adecuada a las condiciones que se tienen en los reactores nucleares, se podría diseñar un sistema para inspeccionar combustible "in situ" irradiado o sin irradiar.

6.- REFERENCIAS

- 1) R.D. Evans. The Atomic Nucleus. International Series in Pure and Applied Physics, 1955.
- 2) G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons. 1979.
- 3) P. Matussek. Accurate Determination of the ^{235}U Isotope Abundance by Gamma Spectrometry. EC-NRM-171/NBS-SRM-969 KFK 3752, Mai, 1985.
- 4) Manual de Detectores Harshaw, 1990.
- 5) General Electric. Engineering Change Noticing "Indirect, Contacting and Incorporated Materials". 1991.
- 6) M.G. Natrella. Experimental Statistics. NBS Handbook 91. October 1966.
- 7) E.L. Grant, L.S. Leavenworth. Statistical Quality Control. Mc Graw Hill Publishing Company. Sixth Edition.
- 8) EG&G ORTEC. Detectors and Instruments for Nuclear Spectroscopy Catalog. 91/92
- 9) R. Stephenson. Introduction to Nuclear Engineering. International Student Edition. Second Edition. Pp 175-217.
- 10) ORTEC. Single Channel Analyzer. Operating and Service Manual. Model 550. 1990.
- 11) ORTEC. High Voltage Power Supply. Operating and Service Manual. Model 556. 1990.
- 12) ORTEC. Amplifier Operating and Service Manual. Model 570, 1990.
- 13) W. Seelman, G. Pfenning, H. Münzel. Chart of the Nuclides. 5th edition, 1981.

- 14) Augustonson P.H., Reilly T.D. Fundamentals of Passive Non Destructive Assay of Fissionable Material. LA5651-M,1974.
- 15) Reilley T.D., Parker J.L. A Guide to Gamma Ray Assay for Nuclear Material Accountability.Los Alamos Scientific Laboratory UC-15, Dec 1974.
- 16) Winn W.G. Non Destructive Assay of Uranium Enrichment with Gamma Rays. Savannah River Laboratory DP-1654, March 1983.
- 17) ANSI N15.20-1975.Guide to Calibrating Nondestructive Assay Systems.
- 18) Norma ASTM G2-88 "Standard test method for corrosion testing of products of Zirconium , Hafnium and their alloys in water at 680 °F or in steam at 750 °F".
- 19) L.A. Currie , "Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination" Analytical Chemistry, Vol 40, No. 3, March 1968.
- 20) E.L. Rojas, T. Rivero, "Análisis de Enriquecimiento en Barras de Combustible Nuclear", Memorias del VIII Congreso de la Sociedad Nuclear Mexicana, Guanajuato México ,Noviembre 1997

7.- Lista de tablas y figuras

Fig. 2.1 Distribución de energías de los electrones después de una interacción por Compton.....	6
Fig. 2.2 Regiones preferenciales de ocurrencia de las interacciones de fotones según la energía y el número atómico del absorbedor.....	8
Fig. 2.3. Fotopico y pico de escape de rayos x característicos.....	12
Fig. 2.4. Fotopico y pico adicional por interacción con el blindaje.....	12
Fig. 2.5 Representación del FWHM y Eo en una curva de distribución de energía para un pico de energía.....	13
Tabla 2.1 Rayos gamma característicos entre 120 y 300 kev del ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁴ U, ²³⁶ U, ²³² U, ²³³ U y ²³⁷ U.....	18
Fig. 3.1. Detector de yoduro de sodio con perforación transversal y fotomultiplicador integrado.....	20
Fig. 3.2 Eficiencia de absorción del NaI(Tl). (Ref. 4). Cada curva representa el porcentaje de absorción de un rayo paralelo de rayos gamma incidiendo normalmente en un cristal del grosor indicado.....	21
Fig. 3.3a. Vista lateral del detector con las estaciones de tracción y el blindaje.....	26
Fig. 3.3b. Vista superior del detector con las estaciones de tracción y el blindaje.....	26
Tabla 3.1. Configuración de barras de prueba.....	28
Tabla 3.2. Configuración de barras de producción de tres segmentos de enriquecimiento.....	29
Tabla 3.3. Configuración de barras de producción de cinco segmentos de enriquecimiento.....	29
Fig. 3.4. Diagrama a bloques del sistema para determinar voltaje de operación.....	30
Tabla 3.4. Tasa de conteo en función del voltaje aplicado al detector.....	30
Fig. 3.5. Conteo de fondo y respuesta del detector de yoduro de sodio ante una fuente de ²³⁵ U.....	31
Fig. 3.6 Blindaje exterior del detector.....	33
Fig. 3.7. Blindaje interior o colimador.....	33

Tabla 3.5. Características de los materiales considerados para blindaje.....	35
Fig. 3.8 Corte lateral del detector y blindaje interior o colimador	36
Fig. 3.9 Angulo máximo del cual proviene radiación directa de las pastillas de UO ₂	37
Fig.3.10 Perfil gráfico de enriquecimiento de una barra de combustible	42
Fig. 3.11 Plano de distribución de la barra de prueba WW01517J.....	44
Tabla 3.6.Expresiones de trabajo de Currie	45
Fig.3.12 Informe de encamisado de la barra de prueba WW01517J.....	46
Fig. 3.13 Reporte de salida del programa de cómputo empleado para automatizar la selección de puntos que cumplan con los criterios estadísticos establecidos	47
Tabla 3.7.Promedios de los datos de las columnas homogéneas obtenidos de los análisis de las barras de prueba	49
Fig. 3.14. Relación lineal obtenida con los resultados de las barras de prueba.....	50
Tabla 3.8. Valores calculados para las barras de producción según la regresión lineal.....	50
Tabla 3.9 .Promedios por enriquecimiento de las columnas homogéneas de las barras de prueba.....	51
Fig. 4.1 Fragmento del archivo generado por el sistema de análisis de enriquecimiento para la barra 7G02602e.....	53
Fig. 4.2. Perfil gráfico general de la barra WW01516j.....	54
Fig.4.3 Ampliación del primer segmento de la barra WW01516J.....	55
Fig 4.4. Ampliación del quinto segmento de la barra WW01516J.....	55
Fig. 4.5 Perfil gráfico general de barra con insertos en las zonas de cambio de enriquecimiento.....	56
Fig.4.6 Perfil gráfico de las zonas centrales de la barra .Se pueden distinguir las pastillas insertadas en las zonas de cambio de enriquecimiento.....	56
Fig. 4.7. Plano de distribución de la barra WW01515J.....	57
Tabla 4.1 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de Chauvenet	58
Tabla 4.2. Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de los rangos estudentizados.....	59
Tabla 4.3 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de ± 2 sigma.	60
Tabla 4.4 Intervalos de referencia para selección de puntos por el criterio de ± 3 sigma.	61

Tabla 4.5. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Barra cuyo principal enriquecimiento es 3.95 %.....	62
Fig. 4.8 Perfil gráfico de la barra WW01503J donde se distinguen perfectamente cuatro insertos.	63
TABLA 4.6. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento era de 2.60 %.....	64 y 65
Fig. 4.9 Perfil gráfico de la barra WW01517J donde se distinguen perfectamente siete insertos.	66
TABLA 4.7. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento es de 1.80 %.....	67
Fig. 4.10 Perfil gráfico de la barra WW01520J donde se distinguen cuatro insertos.	68
TABLA 4.8.. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis y hallazgo de insertos. Esta es una barra cuyo principal enriquecimiento es de 2.60 %.....	69 y 70
Fig. 4.11 Perfil gráfico de la barra 8H59398E donde se distinguen a simple vista diez insertos.	71
TABLA 4.9. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis. El enriquecimiento de cada uno de los tres segmentos centrales es : 3.0 %, 3.4 % y 3.0 %.....	73
Fig.4.12 Perfil gráfico de los segmentos centrales de la barra G201211K. Se representan los límites del promedio en los intervalos $\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$. Segmentos de 3.00%, 3.40% y 3.00%.....	74
Tabla 4.10. Puntos fuera de los intervalos establecidos mediante los criterios estadísticos de análisis. Los enriquecimientos base de cada uno de los segmentos son : 2.60 %, 3.00 % y 2.60 %.....	75
Fig.4.13 Perfil gráfico de zonas centrales de la barra CK03711K. Se representan los límites del promedio ± 2 y 3σ . Segmentos de 2.60%, 3.00% y 2.60 %.....	76
Tabla 4.11 Promedios de conteos por enriquecimiento de barras de combustible nuclear. entregadas a la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde.....	77
Tabla 4.12 Diferencias entre los valores calculados por regresión lineal y los obtenidos en producción.	78
Tabla 4.13 Resultados de las verificaciones del sistema con la barra WW01503j y valores de conteo obtenidos en promedio en el segmento y en los insertos.....	79

8.- Anexos

ANEXO I

RESULTADOS DE BARRAS DE PRODUCCIÓN

RESULTADOS DE BARRA TIPO G20

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G202407E SEGMENTO 2
LOTE: LT-M.BA-018E

Media de la Posición: 4.885746 Media de Conteo: 50662

Desviación estándar posición: 0.610948
Desviación estándar cuentas: 227.964966

Valor umbral alto: 51117.929688 Valor umbral bajo: 50206.070312

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
143	903.00	51336
178	1081.59	50075
185	1117.31	50185
211	1248.82	50008
216	1273.85	51171

Cantidad total de picos: 5
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

211 1248.82 50008

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $x \pm 3\sigma$ por lo tanto se descarta como inserto (ver pag 92).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G202407E SEGMEN TO 3
LOTE: LT-M.BA-018E

Media de la Posición: 5.212255 Media de Conteo: 52223

Desviación estándar posición: 0.948988
Desviación estándar cuentas: 234.886978

Valor umbral alto: 52692.773438 Valor umbral bajo: 51753.226562

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
46	1766.69	52724
72	1901.91	52780
87	1984.66	51745
101	2049.16	52700
121	2154.88	52725
149	2313.98	51710
259	2890.09	52714

Cantidad total de picos: 7
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

NINGUNO

RESULTADOS DEL ANALISIS:-----

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G202407E SEGMENTO 4
LOTE: LT-M.BA-018E

Media de la Posición: 5.084081 Media de Conteo: 50646

Desviación estándar posición: 0.650029
Desviación estándar cuentas: 246.006470

Valor umbral alto: 51138.011719 Valor umbral bajo: 50153.988281

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Linca	Posic.	Valor Pico
38	3332.26	51200
56	3423.70	50144
69	3490.59	51189

Cantidad total de picos: 3
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

NINGUNO

RESULTADOS DEL ANALISIS: -----

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E LETICIA ROJAS C CLAVE: 4443

Barra G202407E

Segmento 2

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

Posición	Cuentas
379	50162
903	51336
1082	50075
1117	50185
1249	50008
1274	51171
1521	50180

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$

No hay

Segmento 3

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

Posición	Cuentas
1616	51674
1767	52724
1902	52780
1985	51745
2049	52700
2155	52725
2314	51710
2890	52714
3083	51737

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$

No hay

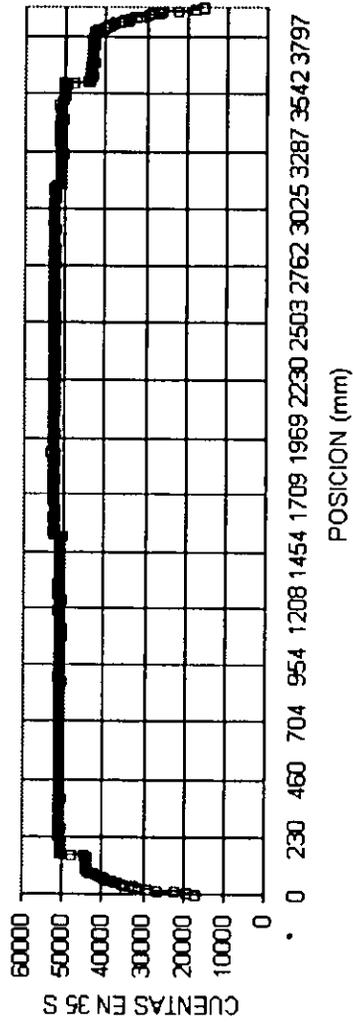
Segmento 4

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

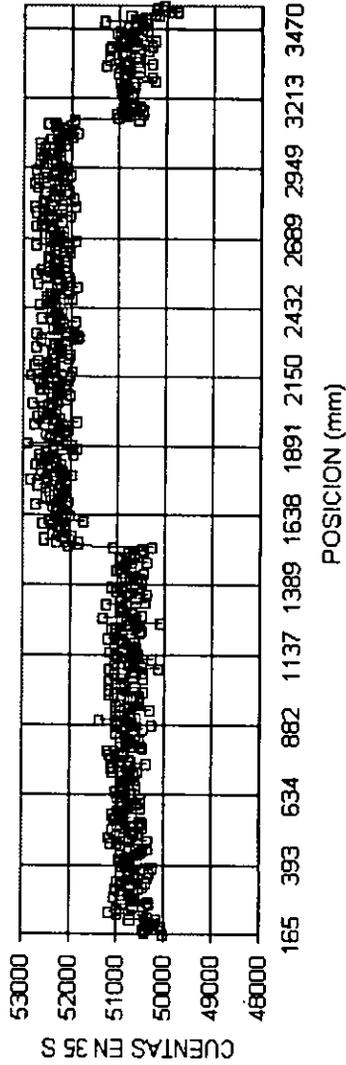
Posición	Cuentas
3332	51200
3424	50144
3491	51189
3516	50076
3521	50130

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$

BARRA G202407E
Perfil Gráfico



BARRA G202407E
Zonas Centrales



RESULTADOS DE BARRA TIPO G10
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G102001E_SEGMENTO 2
LOTE: LT-M.BA-021E

Media de la Posición: 4.941319 Media de Conteo: 52890

Desviación estándar posición: 0.442213
Desviación estándar cuentas: 241.982742

Valor umbral alto: 53373.964844 Valor umbral bajo: 52406.035156

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
76	569.24	53439
108	725.60	52303
125	809.88	53449
148	920.28	52352
192	1139.49	53386
255	1457.46	53379

Cantidad total de picos: 6
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

148 920.28 52352

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $\bar{x} \pm 3\sigma$ por lo tanto se descarta como inserto (ver pag 98).

ACEPTADA DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G102001E SEGMENTO 3
LOTE: LT-M.BA-021E

Media de la Posición: 5.045407 Media de Conteo: 54705

Desviación estándar posición: 0.404661
Desviación estándar cuentas: 244.582489

Valor umbral alto: 55194.164062 Valor umbral bajo: 54215.835938

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
15	1622.51	55342
37	1734.60	55387
50	1801.28	55619
71	1909.41	55331
203	2576.47	55409
234	2730.59	55268
246	2791.41	54157
255	2838.72	55388
261	2869.05	54148
287	2999.12	54065

Cantidad total de picos: 10
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

71 1909.41 55331

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $\bar{x} \pm 3\sigma$ por lo tanto se descarta como inserto (ver pag 98).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: G102001E_SEGMENTO 4
LOTE: LT-M.BA-021E

Media de la Posición: 4.902306 Media de Conteo: 52840

Desviación estándar posición: 0.831451
Desviación estándar cuentas: 266.929169

Valor umbral alto: 53373.859375 Valor umbral bajo: 52306.140625

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
0	3105.51	53502
14	3174.26	53398
24	3224.52	52281

Cantidad total de picos: 3
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

0 3105.51 53502

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: Hay un punto adyacente fuera de $\pm 3\sigma$ pero es un punto en zona de cambio de enriquecimiento.

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

Barra G102001E

Segmento 2

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

Posición	Cuentas
193	52356
207	52315
222	52177
232	52182
277	52393
469	52375
569	53439
726	52303
810	53449
920	52352
1139	53386
1457	53379
1537	53576
1542	53587

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$
No hay

Segmento 3

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

Posición	Cuentas
1623	55342
1735	55387
1801	55619
1909	55331
2576	55409
2731	55268
2736	55244
2791	54157
2839	55388

Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$
No hay

Segmento 4

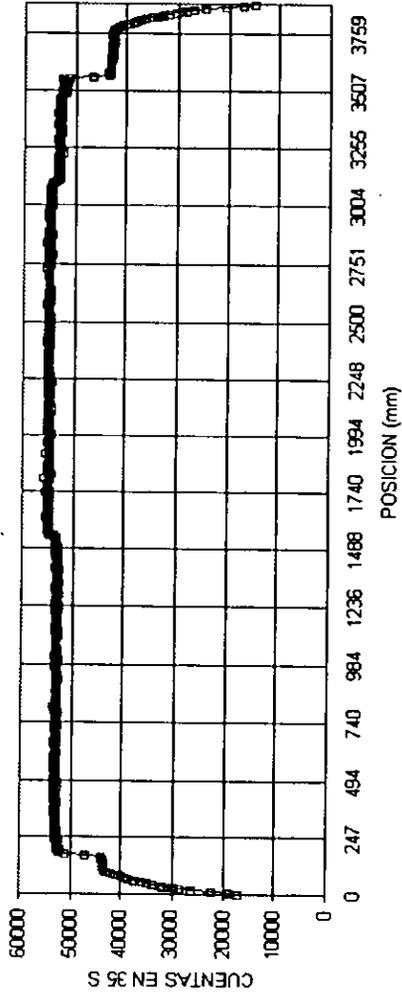
Puntos fuera de $\bar{X} \pm 2\sigma$

Posición	Cuentas
3101	54202
3106	53502
3488	52167

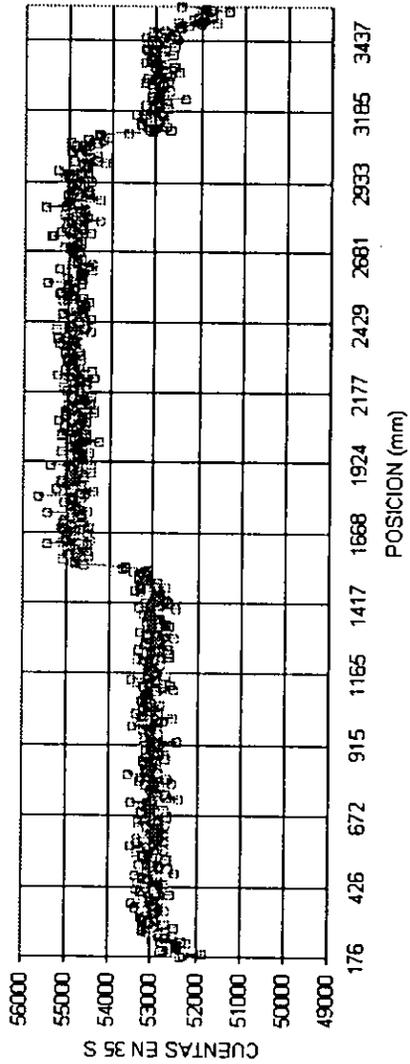
Puntos fuera de $\bar{X} \pm 3\sigma$

3101	54202
------	-------

BARRA G102001E
Perfil Gráfico



BARRA G102001E
Zonas Centrales



RESULTADOS DE BARRA TIPO 8H

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

BARRA: 8H96074E

LOTE: LT-M.BA-018E

Media de la Posición: 5.043912 Media de Conteo: 56129

Desviación estándar posición: 0.651040

Desviación estándar cuentas: 260.722626

Valor umbral alto: 56650.445312 Valor umbral bajo: 55607.554688

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
45	394.72	56662
64	485.19	55527
83	575.14	56842
103	673.27	55572
173	1025.11	56704
187	1096.19	56654
240	1368.05	55556
253	1433.17	55521
272	1528.98	56695
283	1584.90	55592
315	1743.50	56777
349	1922.85	56654
386	2112.58	55413
396	2164.49	55596
442	2402.92	55484
459	2486.73	56796
518	2783.86	55586
541	2904.93	56658
547	2935.77	55536
583	3119.63	55570
644	3437.63	56734

Cantidad total de picos: 21

Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

83 575.14 56842

173 1025.11 56704

518 2783.86 55586

541 2904.93 56658

Existe(n) 4 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $\bar{x} \pm 3\sigma$ en ningún caso y por lo tanto se descartan como insertos todos (ver página 102).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

BARRA 8H96074E

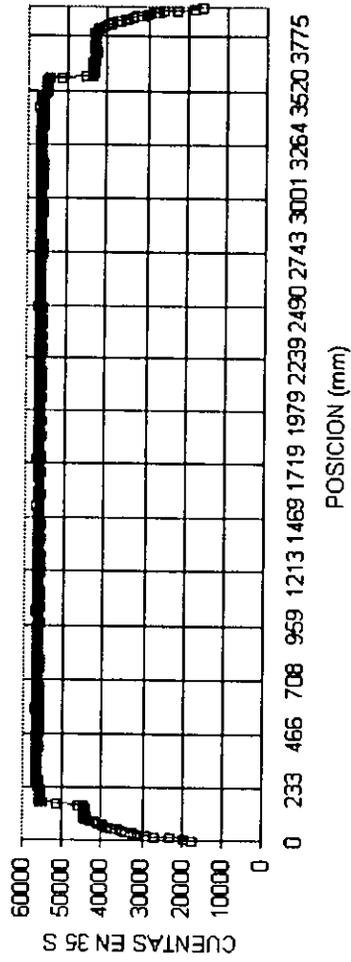
PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
191	55609
200	55613
205	55333
214	55437
219	55287
223	55689
228	55632
262	55532
395	56720
485	55554
575	56948
653	55705
673	55683
1025	56810
1096	56714
1368	55608
1433	55632
1529	56809
1585	55651
1744	56873
1774	56693
1923	56688
2113	55524
2164	55652
2403	55586
2487	56830
2784	55645
2905	56690
2936	55595
2967	55650
3120	55683
3438	56848
3494	55692

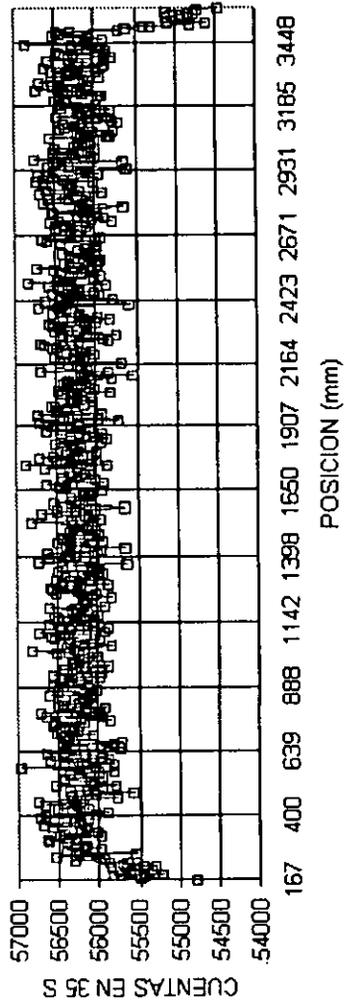
PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
205	55333
219	55287

BARRA 8H96074E
Perfil Gráfico



BARRA 8H96074E
 Segmento Central



RESULTADOS DE BARRA TIPO DN

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

BARRA: DN02821E

LOTE: LT-M.BA-24E

Segmento 2

Media de la Posición: 4.932000 Media de Conteo: 52866

Desviación estándar posición: 0.458346

Desviación estándar cuentas: 214.230576

Valor umbral alto: 53294.460938 Valor umbral bajo: 52437.539062

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
2	261.49	53512
6	281.42	52344
32	406.46	52249
33	411.39	53364
44	463.60	53355
151	989.98	53387
177	1119.01	53389
189	1178.86	52410

Cantidad total de picos: 8
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

NINGUNO

RESULTADOS DEL ANALISIS: _____

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: RICARDO-OLVERA

CLAVE: 4469

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

BARRA: DN02821E

LOTE: LT-M.BA-24E

Segmento 3

Media de la Posición: 5.049702 Media de Conteo: 54325

Desviación estándar posición: 0.596646

Desviación estándar cuentas: 257.960846

Valor umbral alto: 54840.921875 Valor umbral bajo: 53809.078125

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea Posic. Valor Pico

14	1625.97	54845
34	1728.30	53730
41	1763.82	55008
53	1825.05	54990
98	2051.98	55032
108	2102.01	53794
124	2182.49	53702
140	2264.65	54921
184	2486.24	55151
195	2542.78	53751
250	2820.75	54909
265	2897.22	54862
283	2988.43	54848

Cantidad total de picos: 13

Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

53	1825.05	54990
98	2051.98	55032
265	2897.22	54862

Existe(n) 3 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes a los señalados que salgan del intervalo de $\pm 3\sigma$ por lo tanto se descartan como insertos (ver pag. 108).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORÓ: RICARDO-OLVERA

CLAVE: 4469

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: DN02821E
LOTE: LT-M.BA-24E
Segmento 4

Media de la Posición: 5.032143 Media de Conteo: 52827

Desviación estándar posición: 0.926630

Desviación estándar cuentas: 235.880356

Valor umbral alto: 53298.761719 Valor umbral bajo: 52355.238281

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea Posic. Valor Pico

5 3152.39 53338

35 3301.00 52341

Cantidad total de picos: 2

Picos formados por: 5 puntos

Picos para an lisis detallado:

5 3152.39 53338

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $\bar{x} \pm 3\sigma$ por lo tanto se descarta como inserto (ver pag 108).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: RICARDO-OLVERA

CLAVE: 4469

BARRA DN02821E
SEGMENTO 2

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
217	52346
222	52084
227	52052
237	52160
261	53512
281	52344
406	52249
411	53364
464	53355
990	53387
1119	53389
1504	53379
1539	53531

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
222	52084
227	52052

SEGMENTO 3

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
1539	53531
1626	54845
1728	53730
1764	55008
1825	54990
2052	55032
2182	53702
2265	54921
2486	55151
2543	53751
2821	54909
2830	54886
2897	54862
2988	54848
3040	53598
3097	53749

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
2486	55151

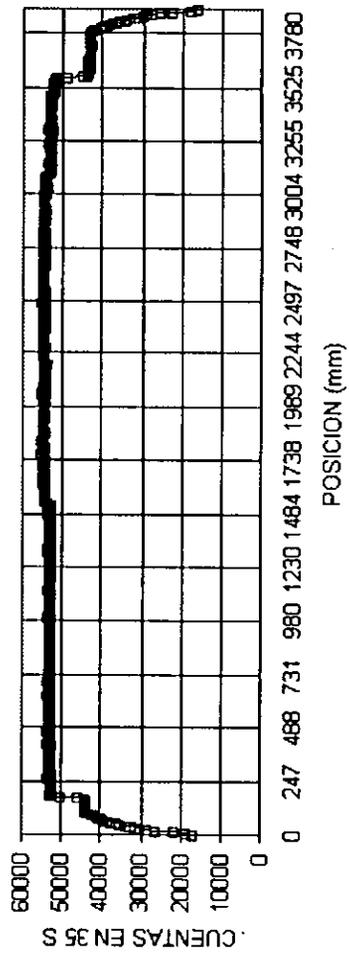
BARRA DN02821E
SEGMENTO 4

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

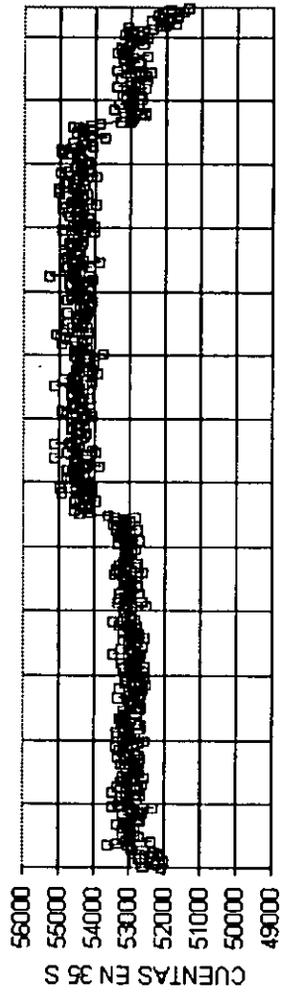
POSICION	CUENTAS
3152	53338
3301	52341
3474	52286

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA
No hay

BARRA DNQ2821E
 Perfil Gráfico



BARRA DND2821E
Zonas Centrales



RESULTADOS DE BARRA TIPO 8D
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: 8D02301E SEGMENTO 2
LOTE: LT-M.BA-019E

Media de la Posición: 4.990218 Media de Conteo: 48127

Desviación estándar posición: 0.665976

Desviación estándar cuentas: 233.992386

Valor umbral alto: 48594.984375 Valor umbral bajo: 47659.015625

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
20	281.07	48786
105	697.84	48639
135	844.18	48595
210	1223.73	47634
222	1284.19	48903
246	1407.62	48605

Cantidad total de picos: 6

Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

NINGUNO

RESULTADOS DEL ANALISIS: -----

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: 8D02301E SEGMENTO 3
LOTE: LT-M.BA-019E

Media de la Posición: 5.105780 Media de Conteo: 49612

Desviación estándar posición: 0.412316
Desviación estándar cuentas: 225.101379

Valor umbral alto: 50062.203125 Valor umbral bajo: 49161.796875

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
48	1805.36	50066
50	1815.79	49146
55	1841.26	50079
144	2299.96	50123
175	2458.65	49158
185	2510.09	49124
200	2587.74	50161
299	3094.23	49089

Cantidad total de picos: 8
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

144 2299.96 50123

Existe(n) 1 pico(s) para analizar.

RESULTADOS DEL ANALISIS: No hay puntos adyacentes al de interés que salgan de el intervalo de $\bar{x} \pm 3\sigma$ por lo tanto se descarta como inserto (ver pag 115).

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
REPORTE DEL GAMMA SCANNER PASIVO
DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD
BARRA: 8D02301E SEGMENTO 4
LOTE: LT-M.BA-019E

Media de la Posición: 5.155310 Media de Conteo: 48121

Desviación estándar posición: 0.754547
Desviación estándar cuentas: 236.956650

Valor umbral alto: 48594.914062 Valor umbral bajo: 47647.085938

Picos fuera del intervalo de 2.00 desv. estándar.

Línea	Posic.	Valor Pico
36	3331.86	48596
45	3379.56	48719

Cantidad total de picos: 2
Picos formados por: 5 puntos

Picos para análisis detallado:

NINGUNO

RESULTADOS DEL ANALISIS: -----

ACEPTADA

DISCONFORME

ELABORO: E-LETICIA-ROJAS-C

CLAVE: 4443

BARRA 8D02301E
SEGMENTO 2

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
176	47554
195	47435
214	47442
281	48786
698	48639
1224	47634
1284	48903
1408	48605
1527	48686
1557	48623

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
1284	48903

SEGMENTO 3

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
1562	49048
1583	49154
1765	48770
1805	50066
1816	49146
1841	50079
2300	50123
2459	49158
2510	49124
2588	50161
2598	50067
3074	49108
3094	49089
3135	49083

PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
1765	48770

SEGMENTO 4

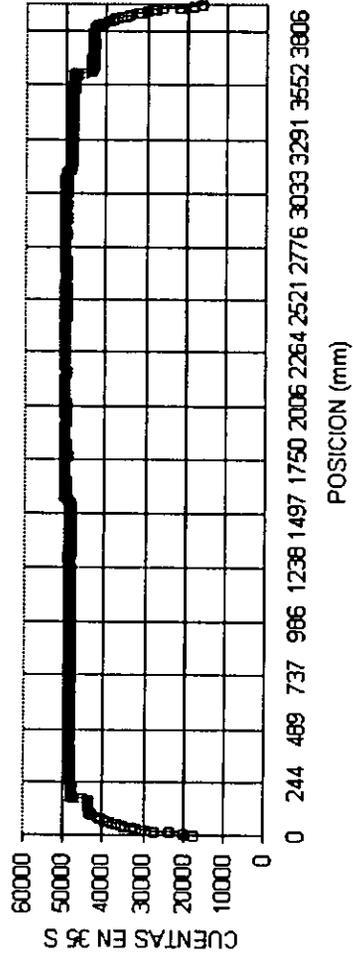
PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 2$ SIGMA

POSICION	CUENTAS
3332	48685
3380	48805
3537	47644
3542	47599

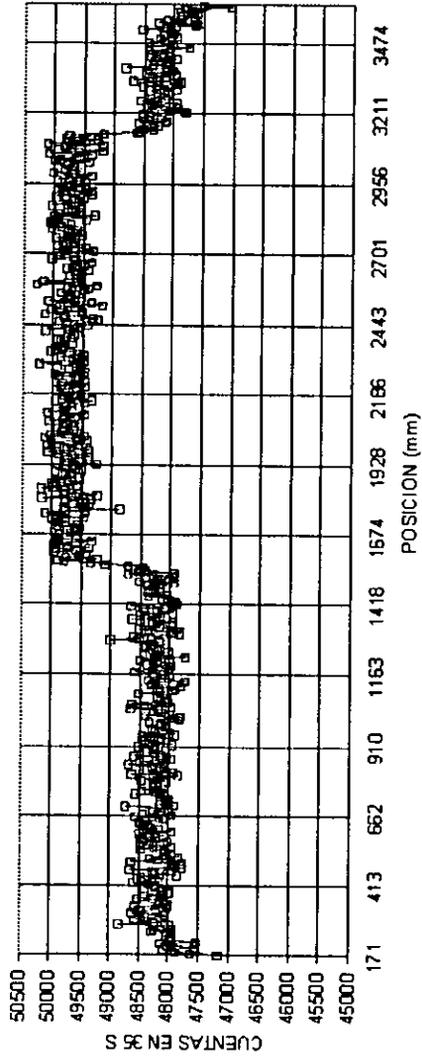
PUNTOS FUERA DE $\bar{X} \pm 3$ SIGMA

No hay

BARRA 8002301E
Perfil Gráfico



BARRA 6D02301E
 Segmentos Centrales



Anexo II

Promedios Generales de Cuentas Acumuladas en 35 s por Segmento de Barra de Producción

Barras con 3.95 % de 235U

Tipo 8H

<u>Lote 9</u>	+/-	<u>Lote 10</u>	+/-	<u>Lote 11</u>	+/-
56115	244	56144	250	56180	234
56143	228	56143	228	56146	239
56133	235	56153	250	56109	252
56136	251	56137	223	56167	236
56145	248	56168	245	56171	238
56090	227	56121	238	56203	236
56125	253	56221	246	56164	234
56064	232	56155	236	56157	236
56134	262	56130	236	56156	248
56138	246	56145	261	56144	236
<u>Lote 12</u>	+/-	<u>Lote 13</u>	+/-	<u>Lote 17</u>	+/-
56154	246	56169	246	56121	284
56171	254	<u>Lote 22</u>	+/-	<u>Lote 18</u>	+/-
56153	243	56960	247	56098	236
56130	228	55875	268	56128	241
56140	232	56009	277	56129	261
56100	258	56103	284	56183	240
56137	229	55918	257	56097	243
56165	232	55976	260	<u>Lote 19</u>	+/-
56164	244	55913	258	56201	231
56090	239	55954	271		
<u>Lote 23</u>	+/-	<u>Lote 28</u>	+/-		
55954	257	55934	251		
56022	241				

Barras con 3.60 % de 235U

Tipo DN 3er Segmento

<u>Lote 14</u>	+/-	<u>Lote 24</u>	+/-	<u>Lote 26</u>	+/-
54682	237	54416	222	54345	246
54653	250	54418	235		
54616	237	54345	225		
54678	245	54325	258		
54607	254	54413	229		
54582	250	54367	229		
54532	248	54407	232		
54528	251	54403	226		
		54428	221		

Tipo 8G

<u>Lote 14</u>	+/-	<u>Lote 15</u>	+/-
54676	234	54654	245
54659	245	54674	240
		54625	233
		54593	231
		54677	241
		54676	247
		54667	238
		54689	241
		54623	234
		54632	241

Tipo G10 Segmento 3

<u>Lote 19</u>	+/-	<u>Lote 21</u>	+/-
54570	253	54705	245
54572	260	54741	251
54555	238	54699	249

Barras con 3.40 % de 235U

		Tipo CK	3er Segmento
<u>Lote 20</u>	+/-		
53680	243		
53648	245		
53635	218		
53656	230		
53638	254		
53695	236		

		TIPO 9B	
<u>Lote 13</u>	+/-	<u>Lote 20</u>	+/-
53813	232	53747	249
53802	244		
<u>Lote 21</u>	+/-		
53862	243	53232	247
53894	233	53643	236
53873	242		
53523	233		
53927	229		
53914	224		
53752	232		

Barras con 3.20 % de 235U

Tipo G10

<u>Lote 19</u>				<u>Lote 21</u>			
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
52890	242	52840	267	52727	235	52801	227
52906	257	52898	229	52768	228	52727	267
52821	240	52844	269	52698	234	52776	293

Tipo D3

<u>Lote 18</u>	+/-	<u>Lote 19</u>	+/-	<u>Lote 28</u>	+/-
52666	242	52824	231	52750	254

TIPO DN

<u>Lote 14</u>				<u>Lote 24</u>			
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
53009	258	530430	226	52870	238	52905	227
52970	258	53011	261	52842	226	52772	249
52954	268	53010	239	52815	225	52906	217
53040	277	53031	235	52866	214	52827	236
53021	272	52974	294	52881	232	52911	392
52781	295	52799	282	52832	236	52806	231
52762	283	52806	261	52857	223	52870	238
52735	293	52851	267	52812	227	52775	258
				52852	237	52805	263

Barras con 3.0% de 235U

<u>Lote 16</u>		Tipo G20		Segmento 3		<u>Lote 18</u>	
	+/-	<u>Lote 17</u>	+/-				+/-
52137	261	52202	241	52223		52223	235
52135	233	52220	229	52233		52233	215
52177	253	52246	241				
52122	249	52225	226				
52158	234	52183	235				
52192	238						
52272	265						
52274	228						
52259	234						
52133	267						

<u>Lote 25</u>		Tipo 7G		Segmento 3		<u>Lote 28</u>	
	+/-	<u>Lote 26</u>	+/-				+/-
52184	240	52034	241	51846		51846	255
52196	231	52172	250				
		52125	246				

<u>Lote 20</u>		Tipo CK	
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
52272	251	52308	257
52303	214	52336	240
52243	216	52505	216
52354	252	52256	253
52277	264	52329	214
52327	224	52266	265

Barras con 2.60 % de 235u

Tipo CI Segmento 3

<u>Lote 23</u>	+/-	<u>Lote 27</u>	+/-
50200	252	50142	242
50126	247		
50201	232		
50067	284		
50219	267		

Tipo 7G

<u>Lote 25</u>	
Segmento 2 +/-	Segmento 4 +/-
50410 231	50337 265
50301 258	50412 271

<u>Lote 26</u>	
50193 269	50308 285
50364 231	50333 307
50248 245	50177 363

<u>Lote 28</u>	
50211 246	50008 264

Barras con 2.60 % de ²³⁵U (Continuación)

Tipo G20

<u>Lote 16</u>				<u>Lote 17</u>			
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
50475	255	50479	200	50602	248	50584	260
50567	248	50532	245	50537	244	50583	306
50482	232	50543	222	50620	251	50622	357
50551	253	50578	263	50633	233	50630	296
50564	248	50609	277	50484	247	50516	228
50627	233	50585	246				
50695	245	50666	273				
50837	268	50593	297				
50600	247	50578	328				
50478	251	50477	221				
<u>Lote 18</u>				<u>Lote 27</u>			
50662	228	50646	246	50528	255	50264	229
50623	241	50663	179				

Barras con 2.40% de ²³⁵U

Tipo 8D Segmento 3

<u>Lote 19</u>	+/-	<u>Lote 21</u>	+/-	<u>Lote 25</u>	+/-	<u>Lote 26</u>	+/-
49692	230	49681	226	49204	225	49300	225
49746	226	49720	227				
49649	240	49665	228				
49612	225						

Barras con 2.20% de 235U

Tipo CI

<u>Lote 23</u>				<u>Lote 27</u>			
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
48764	236	48714	220	48648	227	48527	318
48739	223	48546	279				
48838	232	48837	274				
48628	224	48631	249				
48871	225	48934	390				

Barras con 2.0% de 235U

Tipo 8D

<u>Lote 19</u>				<u>Lote 21</u>			
Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
48205	239	48197	244	48125	232	48128	206
48273	244	48181	246	48219	212	48102	268
48199	220	48193	216	48137	231	48077	289
48127	234	48121	237				

Lote 25

Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-	Segmento 2	+/-	Segmento 4	+/-
47797	224	47872	210	47768	224	47887	212

Lote 26

Barras con 1.80% de 235U

Tipo D20

<u>Lote 17</u>	+/-
47369	212
47397	227
47387	227