Estudio de la exposición debida a la utilización de torio en industrias no radiológicas







Colección Informes Técnicos 36.2013

Estudio de la exposición debida a la utilización de torio en industrias no radiológicas

Estudio de la exposición debida a la utilización de torio en industrias no radiológicas

Autores: Universidad del País Vasco Fernando Legarda Ibáñez (coordinador) Margarita Herranz Soler

Raquel Idoeta Hernandorena

Universidad de Zaragoza Rafael Núñez-Lagos Roglá (coordinador) María Savirón Sánchez Carmen Pérez Marín Alberto Carrión Sanjuán

Colección Informes Técnicos 36.2013



Colección Informes Técnicos Referencia INT-04-29

© Copyright 2013, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye: Consejo de Seguridad Nuclear Pedro Justo Dorado Dellmans, 11 28040 - Madrid-España www.csn.es peticiones@csn.es

Maquetación: Pilar Guzmán

Depósito legal: M-1013-2013

Preámbulo

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del Programa de Investigación y Desarrollo del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), período 2004-2007. Siguiendo el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes [1], el CSN decidió realizar estudios para evaluar el riesgo asociado a las aplicaciones industriales, no nucleares, de diversos materiales radiactivos que existen de forma natural, NORM *(Naturally Occurring Radioactive Materials)*. El programa está orientado, entre otros, a la evaluación del impacto radiológico debido a las instalaciones, actividades o situaciones que, de forma real o potencial, liberen material radiactivo al medio ambiente y, por otro lado, a la evaluación de la exposición a la radiación natural.

El proyecto es el resultado de una colaboración entre el Laboratorio de Medidas de Baja Actividad del Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad del País Vasco en Bilbao, que dirige el profesor Fernando Legarda Ibáñez y el Laboratorio de Bajas Actividades de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza cuyo director es el profesor Rafael Núñez-Lagos Roglá. En él han colaborado Margarita Herranz y Raquel Idoeta, de la Universidad del País Vasco, y María Savirón, Carmen Pérez Marín y Alberto Carrión de la Universidad de Zaragoza.

El objetivo global del proyecto ha sido la determinación del impacto radiológico que el uso de materiales toriados ejerce sobre la población española y el desarrollo de una metodología que permita cuantificar el impacto en instalaciones específicas. Para su realización se ha partido de los documentos de la Unión Europea Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides [2] y Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides [3], así como el de la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos de América Systematic radiological assessment of exemptions for source and byproduct materials [4] donde se señala la necesidad de efectuar estudios del impacto radiológico sobre la población debidos a la utilización de diversos radionucleidos naturales, entre ellos el uso de

materiales toriados. Así mismo, se han utilizado otros documentos referidos al uso de materiales con contenido radiactivo natural [5,6,7].

El torio, los materiales toriados y las consecuencias radiológicas de su empleo han sido objeto de estudio por diversos autores con anterioridad pero sin embargo, se puede considerar muy escaso. A pesar de ser un elemento natural tres veces más abundante en la naturaleza que el uranio, son pocos los estudios existentes sobre la utilización del torio sobre todo si se comparan con los del uranio. Una posible explicación podría residir en que su utilización en la producción energética nuclear es prácticamente nula. Sin embargo, el ²³²Th, que es el 100% del torio natural, es la fuente del ²³³U, a través de una captura neutrónica y dos procesos de desintegración beta, mecanismo análogo al de la producción de ²³⁹Pu a partir del ²³⁸U.

²³²Th + n \rightarrow ²³³Th \rightarrow (beta T_{1/2} = 22,3 min) ²³³Pa +e⁻ + v* \downarrow (beta T_{1/2} = 27,0 días) ²³³U + e⁻ + v*

El ²³³U es un excelente combustible nuclear equiparable al ²³⁵U y al ²³⁹Pu y el proceso está, además, exento de producción de transuránidos.

En el presente trabajo se han analizado las diversas aplicaciones y usos que el torio y los materiales toriados tienen en España y su implicación radiológica. Para ello se han realizado diversas tareas que más adelante se detallan, y cuyos epígrafes generales podrían ser los siguientes:

- Identificación de los usos actuales de este elemento en España, así como de los lugares en que tales usos se implementan y una selección de instalaciones representativas.
- 2. Obtención de información detallada, toma de muestras y realización de medidas *in situ*, en las instalaciones seleccionadas.
- 3. Preparación y medida de las muestras en el laboratorio.
- Análisis de los resultados y ampliación de la adquisición de muestras y datos donde fuese conveniente.
- 5. Valoración del impacto radiológico.
- Estudio de los residuos generados en las instalaciones que utilizan materiales toriados y de su impacto en el medio ambiente.
- 7. Elaboración de un informe final.

Se ha identificado un amplio conjunto de usos de materiales toriados y se puede concluir que hoy día prácticamente casi todas las utilizaciones han sido abandonadas o reemplazadas. En este sentido, merece la pena señalar que la mayor utilización reside en los electrodos toriados para soldadura de tungsteno en atmósfera inerte de gas (*Tungsten Inert Gas*, TIG) y únicamente el personal vinculado al uso de electrodos toriados podría llegar a experimentar una exposición apreciable en determinadas condiciones. Sumario

Preámbulo	5
Introducción	9
Camisas de incandescencia para lámparas de gas .	15
Electrodos de soldadura	19
Lámparas de alta densidad	39
Tubos de vacío. Magnetrones	45
Lentes ópticas	49
Tubos de rayos X	51
Crisoles para muy alta temperatura	53
Conclusiones	55
Referencias	57
Anexo	61

1. Aspectos generales del torio

El torio, descubierto por el químico sueco Berzelius en 1828, es un elemento químico perteneciente al grupo de los actínidos de la tabla periódica. Sus principales características son:

Peso atómico 232,0381, número atómico Z = 90, número másico A = 232, punto de fusión 1.750 °C, punto de ebullición 4.788 °C, gravedad específica 11,72. Valencias +4,+3,+2.

El único isótopo existente en la tierra de forma natural es el 232 Th que constituye el 100% del torio natural. Es radiactivo con un período de 1,4 x 10¹⁰ años. Se conocen 28 isótopos del torio con números másicos del 210 al 237, ninguno es estable y sus períodos son cortos comparados con el período del de número másico 232. Pueden verse en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Períodos de los distintos isótopos del torio ordenados por sus números másicos

Nı m	úmero Iásico	Período	Número másico	Período	Número másico	Período
	210	9 ms	220	9,7 µs	230	75.380 a
	211	37 ms	221	1,68 ms	231	25,52 h
	212	30 ms	222	2,8 ms	232	1,405x10 ¹⁰ a
	213	140 ms	223	0,60 s	233	22,3 m
	214	100 ms	224	1,05 s	234	24,10 d
	215	1,2 s	225	8,72 m	235	7,1 m
	216	28 ms	226	30,57 m	236	37,5 m
	217	0,252 ms	227	18,72 d	237	5 m
	218	109 ns	228	1,9116 a		
	219	1,05 µs	229	7.340 a		

De ellos los únicos relevantes son el ²³²Th, el ²²⁸Th y el ²³⁰Th. El primero es el que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, puesto que por su largo período todavía existe con cierta abundancia desde que se originó en la formación del sistema solar.

El segundo, forma parte de la familia radiactiva que el ²³²Th origina y el último, con un período considerable, forma parte de la cadena radiactiva del ²³⁸U.

La familia del ²³²Th contiene siete desintegraciones alfa y cinco beta hasta llegar al ²⁰⁸Pb, núcleo que es doblemente mágico y, por tanto, extraordinariamente estable. Puede verse en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Familia radiactiva del ²³²Th indicando el tipo de desintegración y el período de cada radionucleido

Rama principal			Rama secundaria			
Nucleido	Desinte- gración	Período	Nucleido	Desinte- gración	Período	
²³² Th	alfa	1,405x10 ¹⁰ a				
²²⁸ Ra	beta	5,75 a				
²²⁸ Ac	beta	6,15 h				
²²⁸ Th	alfa	1,91 a				
²²⁴ Ra	alfa	3,66 d				
²²⁰ Rn	alfa	55,6 s				
²¹⁶ Po	alfa	145 ms				
²¹² Pb	beta	10,64 h				
²¹² Bi	alfa	60,55 m	²¹² Bi	beta	60,55 m	
²⁰⁸ TI	beta	3,053 m	²¹² Po	alfa	0,299 ms	
²⁰⁸ Pb	estable		²⁰⁸ Pb	estable		

El torio se encuentra de forma natural en los minerales torita (ThSiO₄), torianita (ThO₂ + UO₂) y monacita, que es un fosfato complejo de torio, uranio, cerio y lantánidos. Su abundancia en la corteza terrestre es semejante a la del plomo y el molibdeno, lo que supone que es unas tres veces más abundante que el uranio.

Hay varios métodos de producción de torio, si bien usualmente se obtiene a partir del mineral monacita que contiene del 3 al 9% de ThO_2 junto con otras tierras raras. La arena se digiere con hidróxido sódico, y se precipitan los hidróxidos de torio, junto con uranio y cerio. La separación del torio se consigue por extracción posterior con tributilfosfato. Se puede obtener también reduciendo el ThO_2 con calcio, por electrólisis de cloruro de torio anhidro en sal fundida de cloruros de sodio y potasio, por reducción del tetracloruro de torio con un metal alcalino y por reducción del tetracloruro de torio por una mezcla de calcio y cloruro de zinc anhidro.

El torio puro es un metal plateado bastante estable en aire y que retiene su brillo durante meses. Cuando se oxida se vuelve grisáceo y termina siendo negro. Sus propiedades físicas dependen del grado de oxidación que tenga. El torio puro, que siempre contiene algunas impurezas de óxido, se puede laminar en frío, estampar y extrudir. El polvo de torio metálico es pirofórico y debe manejarse con precaución. Cuando se calienta en aire, el torio arde con una llama blanca muy brillante.

El compuesto de torio más utilizado en la industria es el óxido, debido a sus excepcionales características. El óxido de torio es un sólido blanco inodoro, con un peso molecular de 264,04 g/mol, tiene un punto de fusión de 3.220 °C, que es el más elevado de todos los óxidos, un punto de ebullición de 4.400 °C y una gravedad específica de 11,7 y se usa mezclado con otros elementos cuando se requiere un alto grado de resistencia a la temperatura. El óxido de torio se suele alear con wolframio que tiene un punto de fusión aún más elevado (3.422 °C) para mejorar las propiedades del wolframio.

Hasta hace poco tiempo, el principal uso del torio ha sido el de impregnar las rejillas Welsbach que se utilizan en las lámparas incandescentes de gas y alearlo con el wolframio, constitutivo de los electrodos de soldadura, para mejorar la chispa y mantener una mayor estabilidad del arco. Se ha utilizado también en aleación con magnesio para mejorar sus propiedades mecánicas a altas temperaturas y, dada su elevada emisión de electrones por su baja función de trabajo, se utiliza para recubrir los filamentos de wolframio en los equipos en los que se requiera una producción de electrones, como tubos catódicos, tubos de rayos X, magnetrones, válvulas electrónicas, etc.

El óxido se ha utilizado para controlar el tamaño de grano en los filamentos de wolframio de las lámparas de incandescencia y para la fabricación de crisoles para alta temperatura. Los vidrios con óxido de torio tienen un índice de refracción muy elevado y muy baja dispersión cromática, por lo que se han utilizado en lentes de alta calidad para cámaras fotográficas e instrumentos científicos. El óxido también se ha empleado como catalizador en la conversión de amoníaco en ácido nítrico, en el *cracking* del petróleo y en la producción de ácido sulfúrico, pero no se han localizado aplicaciones en la industria química (ácidos nítrico y sulfúrico) ni petroquímica.

También, en el pasado se utilizó para la fabricación de películas fotográficas y de dosímetros para neutrones, aplicaciones de las que no se han encontrado ejemplos en el mercado español.

2. Aplicaciones con mayor significación radiológica

De las numerosas aplicaciones del torio citadas más arriba, quizá sean los electrodos toriados para soldadura los responsables de la mayor exposición a radiaciones ionizantes inducidas por el uso de este elemento y por ello merece una consideración especial. En particular, la industria metalúrgica presenta un elevado potencial de riesgo de exposición a radiaciones ionizantes en este escenario.

Muchos electrodos usados en soldadura TIG están hechos de un alambre de tungsteno que contiene dióxido de torio (ThO₂) u otro óxido metálico (por ejemplo, magnesio, lantano, cerio, zirconio o itrio). La adición de óxido metálico proporciona varios beneficios, que incluyen una emisividad electrónica incrementada, mayor capacidad de transporte de corriente, mayor resistencia a la contaminación del electrodo y una vida útil prolongada debido a la reducción de la tasa de erosión del electrodo. Estas características resultan en una más fácil iniciación del arco, en una mejora de su estabilidad durante la soldadura y una reducción en la frecuencia de afilado y reemplazamiento de electrodo [4].

Los electrodos toriados contienen entre un 1 y un 4% de dióxido de torio y, a pesar de la investigación intensiva que se realiza para reemplazarlo por otros elementos, todavía no se ha encontrado un sustituto que lo mejore. La exposición externa producida por el torio en almacenes y lugares de acumulación de electrodos se puede controlar como si de una fuente encapsulada se tratase. Sin embargo, el riesgo radiológico interno proviene de la inhalación de torio, de polvo contaminado con torio o de radionucleidos de su cadena en los diversos procesos de producción industrial.

En España no se fabrican electrodos toriados, todos los utilizados son importados, principalmente de China, y el mercado actual es de unas 300.000 a 400.000 unidades al año. Se ha seguido la vida de estos electrodos: llegada, almacenaje, utilización y residuo. Se han efectuado numerosas medidas *in situ* y en laboratorio, y se ha evaluado el impacto radiológico en cada una de las etapas.

La siguiente utilización actual más importante es el uso de óxido de torio en los recubrimientos de los electrodos de las lámparas de descarga de alta intensidad HID (*High Intensity Discharge*) y, en tercer lugar, su utilización en los magnetrones para la producción de microondas, tanto en radares como en hornos domésticos e industriales.

Las camisas de incandescencia para lámparas de gas se han impregnado tradicionalmente en óxido de torio, para obtener un mayor brillo y luminosidad, sin embargo en Europa el uso del torio para este fin es prácticamente nulo al encontrar que reemplazándolo por itrio se obtienen resultados bastante satisfactorios.

La industria aeronáutica y aeroespacial ha utilizado solamente en cantidades limitadas las aleaciones toriadas en ciertas piezas de los motores. Sin embargo, las aleaciones Ni-Th dejaron prácticamente de usarse en la década de los 90 del siglo pasado y las aleaciones Mg-Th dejaron de ser consideradas por la misma época [8]. En las lentes ópticas se utilizaban vidrios con torio añadido para mejorar sus propiedades ópticas pero parece ser que motivos de seguridad y medioambientales, junto a que otros elementos consiguen resultados similares, y la mejora de los sistemas de producción han llevado a descartar el torio en este tipo de industrias desde los años 80.

Finalmente, se encontraron citas que indicaban un uso del torio en la fabricación de crisoles para alta temperatura.

Como resumen de los usos del torio descritos, se puede construir la siguiente relación, que actuará como referencia en el rexto del estudio:

- 1. Camisas de incandescencia para lámparas de gas.
- 2. Electrodos para soldadura de alta precisión: acero inoxidable, aluminio, aleaciones de níquel y otras.
- 3. Filamentos de wolframio para lámparas de iluminación por descarga.
- 4. Electrodos de tubos electrónicos (magnetrones y rayos X).
- 5. Cristales para lentes (cámaras y binoculares).
- 6. Crisoles para muy alta temperatura.

Efectuando ahora una comparación de los estudios consultados y de cuanta información ha podido ser reunida, puede construirse la tabla 1.3.

Como puede comprobarse, la relación de los usos del torio estudiados es significativamente más amplia que la considerada en los documentos de la Comisión Europea. *Radiation Protection* números 139 [9], 146 [10] y 147 [11].

Introducción

Tabla 1.3. Usos del torio estudiados

	Uso	NUREG-1717 [4]	RP-107 [3]
1	Camisas de incandescencia para lámparas de gas	V	
2	Electrodos de tubos electrónicos (magnetrones y rayos X)	V	
3	Electrodos de soldadura	V	V
4	Filamentos de wolframio para lámparas de iluminación por descarga	V	
5	Lámparas germicidas, solares y para iluminación industrial o de exteriores	V	V
6	Productos de aleación Mg-Th	V	
7	Cristales para lentes ópticas	V	V
8	Componentes de motores de aviación que contienen aleación Ni-Th	V	V
9	Crisoles para alta temperatura		

CAMISAS DE INCANDESCENCIA PARA LÁMPARAS DE GAS



Las camisas de incandescencia para lámparas de gas son también conocidas como camisas de Welsbach, por haber sido el Baron Carl Auer von Welsbach quien las inventó en 1885, desde entonces su uso se extendió rápidamente en la iluminación urbana y doméstica. La invención de la bombilla de incandescencia supuso un lento decrecimiento de su utilización, si bien hoy en día sigue utilizándose en las lámparas de acampada. Hasta la invención de la soldadura TIG las camisas de incandescencia para lámparas de gas ha sido el mayor uso del óxido de torio. Las camisas se podían comprar en una gran variedad de formas y tamaños, diseñadas para cada uno de los tipos de dispositivos de iluminación que existían en el mercado.

Para obtener su gran brillo y luminosidad las camisas tienen que alcanzar una temperatura comprendida entre 1.870 y 2.370°C, que es la necesaria para que el óxido de torio se ponga incandescente. Esta temperatura se consigue poniendo la camisa en contacto o en las cercanías de una llama, generalmente de gas ciudad, gas natural, butano, propano o keroseno, que arde mientras la lámpara está en funcionamiento.

La mayor incandescencia se obtiene con camisas, que después de haber sido pre-quemadas en fábrica, han quedado con un 99% de óxido de torio y un 1% de óxido de cerio. La energía calorífica se acumula en el óxido de torio y la energía absorbida se transfiere al óxido de cerio que es quien emite la intensa luz visible. Sin el óxido de cerio, la energía absorbida por el óxido de torio se libera principalmente como radiación infrarroja, el óxido de cerio absorbe la radiación infrarroja del ThO₂ y la devuelve en fotones del espectro visible.

No hay mucha información sobre el contenido de torio que tienen las camisas. El documento NUREG-1717 [4] supone que, a efectos de cálculos de impacto radiológico, una camisa típica contiene unos 250 mg (0,027 μ Ci = 1.000 Bq), sin embargo pueden contener entre 50 y 500 mg de torio.

Las camisas se fabrican poniendo en remojo un tejido o tela de rejilla en una solución que contiene nitratos de torio, de cerio, y otros metales, como berilio, que se añaden para obtener una brillante luminosidad y fortalecer la frágil estructura de la camisa [12]. Una vez saturada la camisa se saca de la solución y se deja secar. En ciertos casos, la tela se trata químicamente para convertir los nitratos solubles en compuestos insolubles, en su mayoría hidróxidos, y a continuación se lava y se seca. Por último, la tela se recubre con laca, se seca, se corta y se le da la forma y el tamaño deseado. En muchos casos la camisa se pre-quema en fábrica para convertir los metales en óxidos, en particular el torio.

La mayor parte de las camisas tienen un tamaño, cuando se extienden, que oscila entre los 4 y los 11 cm de longitud y de 2 a 7 cm de anchura. Existen esencialmente dos tipos de camisas, blandas y duras. Las camisas blandas se forman cosiendo el tejido en forma de tubo o saco y se le añade una cinta para poderla fijar al quemador. Las camisas duras se preforman añadiéndolas a una estructura rígida que se pueda asentar sobre el quemador. Las camisas blandas terminadas se empaquetan normalmente en bolsas de plástico con varias unidades, las duras suelen empaquetarse individualmente en cajas. La distribución se efectúa como un producto ordinario de consumo. La vida de las camisas depende del medio en que se encuentran, en condiciones normales una camisa puede durar de seis a ocho meses antes de romperse. En situaciones inestables, como es el caso de las linternas de acampada, la duración estimada es de unas 50 horas. En cualquier caso, siempre se supone que la duración de una camisa es inferior a un año.

En la figura 2.1 se puede ver una fotografía del envase de una camisa actual comprada en España donde puede leerse claramente "Camisa no radiactiva".

Según el documento NUREG/CR-1775 [13], en 1950 todavía se utilizaban camisas incandescentes de gas en la iluminación urbana de muchas ciudades y en 1952 el 65% de la producción de torio en los Estados Unidos se dedicaba a la fabricación de camisas [14]. En 1974 se estimaba que la producción de camisas era de unos 20 millones de unidades al año [15] y en 1981 su uso principalmente doméstico se había incrementado hasta los 25 millones de unidades al año [12]. Actualmente, en los Estados Unidos se estima que el consumo es de unos 50 millones de unidades/año [4]. Figura 2.1. Fotografía del envase de una camisa actual donde puede leerse claramente "camisa no radiactiva", de otra antigua de la marca Coleman radiactiva y de otra moderna de la misma marca no radiactiva







Dado el riesgo potencial que tiene el torio, su uso en las camisas de incandescencia no está justificado hoy en día y, de hecho, ha sido suprimido por la mayoría de los fabricantes. El torio se ha sustituido por itrio y las camisas producen una luz tan brillante e intensa como las toriadas. En Europa no se fabrican camisas toriadas desde los años 90 y no se encuentran en el mercado. En los Estados Unidos el mayor fabricante (Coleman), que supone aproximadamente el 50% de la producción, dejó de fabricarlas en 1995, pero se calcula que el 50% de las ventas, es decir unos 25 millones de unidades de camisas toriadas todavía se venden cada año.

El principal problema que presentaban las camisas toriadas, al igual que con muchos otros productos radiactivos es que se vendían sin ninguna información concerniente a la radiactividad, requisito esencial para que los consumidores pudieran decidir sobre su compra. En Europa actualmente no se fabrican camisas de incandescencia para lámparas de gas que contengan torio y no se ha podido encontrar en España, actualmente, ninguna de ellas a la venta. No obstante, se han comprado en diversos comercios camisas de distintas marcas y se ha medido su contenido radiactivo en el laboratorio sin encontrar componentes radiactivos en ellas, excluyendo por tanto la posibilidad de venta de camisas con la denominación "no radiactiva" pero que efectivamente contengan material radiactivo [16,17]. También se han efectuado medidas en una antigua camisa toriada para comprobar si en efecto contenía torio y un simple análisis gamma ha confirmado su presencia. Dado que desde hace años no se comercializan en España y que se ha comprobado que no existen en el mercado, no se ha proseguido con un análisis detallado mediante espectrometría alfa.

ELECTRODOS DE SOLDADURA

La industria metalúrgica tiene un riesgo potencial elevado para los trabajadores debido a las radiaciones ionizantes del torio contenido, principalmente, en ciertos electrodos de soldadura. Este quizá sea, hoy en día, el uso más extendido del torio entre las aplicaciones industriales no nucleares.

Los electrodos toriados de soldadura son electrodos de wolframio con un contenido entre el 1 y el 4% de óxido de torio que se utilizan en la soldadura de electrodo de wolframio en atmósfera de gas inerte, conocida como soldadura TIG. Las siglas TIG son las iniciales de Tungsten Inert Gas, sistema de soldadura que también se conoce como GTAW, iniciales de Gas Tungsten Arc Welding. Este tipo de soldadura se utiliza en la industria cuando son necesarias uniones de alta calidad y fiabilidad en diversos materiales como aluminio, acero inoxidable, láminas delgadas de metal, etc. La soldadura TIG ofrece además la ventaja de que se puede realizar en cualquier posición, incluida la situación invertida y vertical. Los electrodos toriados para soldadura TIG son varillas de 15 cm de longitud; excepcionalmente las hay de 17 cm, con diámetros que varían entre 1 y 4,8 mm. La varilla se utiliza para producir un plasma de alta temperatura en una atmósfera de un gas inerte, generalmente argón, introducido y mantenido en la zona de soldadura mediante un flujo continuo. El arco entre la varilla y la pieza es de uno a dos centímetros de longitud y el gas evita, además, la oxidación de la soldadura. El torio se añade al wolframio de la varilla en una proporción que varía entre el 1 y 4% para obtener una mejor estabilidad del arco y evitar fluctuaciones en la llama. Los fabricantes de electrodos han tratado de sustituir el torio por otros elementos, no radiactivos, con análogas propiedades metalúrgicas v térmicas, como lantano y cerio, pero el rendimiento no se mejora y, tanto los productores de electrodos de wolframio para soldadura en atmósfera de gas inerte, como los fabricantes de lámparas de descarga de alto rendimiento y los de magnetrones, siguen apoyándose en el torio, como el aditivo más efectivo, para obtener productos de alta calidad y rendimiento. El torio también se añade a las muelas de aluminio utilizadas para afilar la punta de los electrodos para soldadura TIG. En España, los electrodos toriados más utilizados son los que tienen un 2% de

óxido de torio con diámetros de 1,6, 2 y 2,4 mm. Los diámetros 1 y 4 mm se usan solo esporádicamente.

En España no se fabrican electrodos de wolframio para soldadura TIG y todos son importados, en particular los toriados. El principal suministrador en la actualidad es la República Popular de China y el mercado español de electrodos toriados es de unas 300.000 a 400.000 unidades por año.

Se contactó con los dos principales suministradores de electrodos del país que permitieron la entrada del equipo investigador en sus almacenes y la realización de medidas *in situ*. Suministraron distintos tipos de electrodos para realizar medidas en el laboratorio y permitieron la medida en sus talleres-escuela durante la realización de distintos modos de soldadura TIG, tanto automática como manual, aspecto que permitió obtener una información muy completa sobre este tipo de soldadura.

1. Almacenamiento de los electrodos

Para estudiar el almacenamiento de los electrodos en las empresas se visitó a diferentes importadores y se construyó un modelo, realista, considerando como estaban almacenados los electrodos.

Normalmente los 300.000 a 400.000 electrodos que el mercado español consume anualmente no se importan de golpe, sino que se importan periódicamente, lo que supone un bajo número de unidades en los almacenes españoles, salvo contadas excepciones en que se mantiene un stock importante de unas 20.000 unidades. Es evidente que el número no es constante, pues se reduce a medida que se consume, pero a efectos de cálculo de dosis se supuso que el número se mantenía constante.

Para efectuar el cálculo de la distribución de dosis en el almacén, se consideró un elevado número de electrodos situados en un almacén en el que se empleaba una agrupación por tipo de producto, lo que suponía que todos los electrodos toriados estaban juntos.

Este stock, que representa los hábitos de consumo del mercado español, presenta las características que se muestran en la tabla 3.1

Cajas de electrodos toriados									
Diámetro (mm)	Número	Ancho (cm)	Largo (cm)	Alto (cm)	Volumen (cm³)	Peso (kg)			
1,6	850	4	18	0,5	30,6	64,5			
2	300	4	18	0,5	10,8	37,5			
2,4	850	6	18	0,8	73,4	153,4			

Tabla 3.1. Distribución del stock de 20.000 electrodos en cajas de 10 electrodos

En un principio se propuso una distribución de las cajas de electrodos en las estanterías, siguiendo criterios de peso y geometría. De esta manera, cada una de las alturas de la estantería guarda un número determinado de cajas de electrodos de distinto diámetro. Este planteamiento del problema, obtendría soluciones diferentes para cada tipo de disposición del stock. Cada caja contiene 10 unidades.

Sin embargo, si se considera un valor medio de las diferentes configuraciones podría obtenerse un valor que podría considerarse representativo del conjunto de posibles configuraciones.

Para ello, de la tabla se obtuvo una densidad media de 2,22 g/cm³, de la cual 1,75 g/cm³ correspondían al electrodo y el resto al plástico (PE y PVC) integrante de la caja, y una única geometría de cajas. Estas se distribuyeron en fracciones iguales en las estanterías en las que se almacenaban los electrodos.

El escenario que se propuso fue un conjunto de estanterías de 2 m de altura, 2 m de anchura y 1 m de profundidad que albergaban cuatro pilas de cajas con electrodos por estante de un tamaño de 84 cm de largo, 18 cm de ancho (que es la longitud de la caja) y 4,8 cm de alto. En ellas se supuso que se encontraban almacenados los electrodos toriados de wolframio con un contenido de un 2% de óxido de torio. Se consideraron electrodos de 1,6, 2 y 2,4 mm de diámetro y 15 cm de longitud, que se encontraban en cajas de PVC o polietileno conteniendo 10 unidades cada caja.

De este modo se tenía un volumen almacenado de 116,1 dm³ en lugar de los 114,8 dm³ del total de cajas considerado. Esta desviación del 1% se consideró admisible. Un esquema puede verse en la figura 3.1.

Figura 3.1. Esquema de distribución de cajas de electrodos de wolframio toriado que se ha supuesto para la simulación



Para calcular el campo de radiación creado por el conjunto de electrodos almacenados se empleó una simulación aplicando técnicas de Monte Carlo. Esta simulación se implementó mediante el código MCNP-4C [18] para calcular el flujo de fotones en una malla de puntos que rodea a la estantería con objeto de evaluar la tasa de dosis esperable en el entorno del lugar en el que se encuentran los electrodos y evaluar, en consecuencia, las dosis recibidas por los trabajadores.

El término fuente era la distribución de cajas descrita que contenía electrodos de wolframio con un 2% de ThO₂. Solamente se consideró la emisión gamma a efectos de la radiación exterior a las cajas. A efectos de cálculo, se tuvo en cuenta una cadena de desintegración del ²³²Th en equilibrio secular, y todas sus emisiones, X y γ , con probabilidad de emisión mayor que 0,1% agrupadas en intervalos de 30 keV con objeto de obtener un numero de fotones que simplificase la simulación numérica.

Con estas hipótesis se consideró en el cálculo el 99,02% de los fotones emitidos y la emisión de 3,87 fotones por desintegración del precursor de la cadena. Esta agrupa-

ción suponía una energía media del fotón emitido de 594 keV muy aproximada al valor medio real de 605 keV. En la tabla 3.2 se detalla el espectro de energías considerado en el cálculo con el código MCNP con sus respectivas frecuencias, que, a su vez, está representado en la figura 3.2. Las energías se refieren a los puntos medios de los intervalos de 30 keV considerados.

Energía (keV)	Frecuencia						
15	2.08E-01	315	1.74E-02	705	1.03E-03	975	5.45E-02
45	4.10E-03	345	3.11E-02	735	1.89E-02	1065	1.97E-03
75	1.10E-01	405	5.56E-03	765	8.40E-03	1245	1.70E-03
105	1.85E-02	465	1.31E-02	795	1.53E-02	1455	2.22E-03
135	7.39E-03	495	1.86E-03	825	5.81E-03	1485	2.26E-03
165	2.40E-03	525	2.17E-02	855	1.40E-02	1515	2.08E-03
195	1.17E-02	555	3.30E-03	885	1.44E-03	1575	9.96E-03
225	1.13E-01	585	8.02E-02	915	6.89E-02	1635	9.62E-03
255	1.14E-02	675	1.15E-03	945	1.74E-03	2625	9.25E-02
285	1.64E-02						

Tabla 3.2. Frecuencias de emisión de la cadena del ²³²Th agrupadas en intervalos de 30 keV

Figura 3.2. Frecuencias de emisión de la cadena del ²³²Th agrupadas en intervalos de 30 keV



Se consideró que la estantería se encontraba sobre una placa de hormigón de 30 cm de grueso y que tenía los estantes a 5, 70, 135 y 200 cm del suelo.

La dosis efectiva fue calculada empleando factores de paso de flujo, calculados con MCNP, a kerma y de kerma a dosis [19] en la hipótesis, en este último caso, de una exposición isótropa a la radiación que reflejase el hecho de que la fuente era muy extensa, y un factor de exposición lateral o rotatorio que produjera una subestimación de la dosis calculada.

El conjunto de puntos en los que se calculó la dosis se encontraba distribuido en dos planos distantes 20 y 60 cm de la estantería como se muestra en la figura 3.3.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Figura. 3.3. Líneas de cálculo de la tasa de dosis



Tabla 3.3. Tasa de dosis en microSv/h en distintas posiciones de las caras frontal y lateral de la estantería, a distintas alturas desde el suelo y a 20 cm de la estantería

	Distancia a la estantería 20 cm Altura respecto al suelo (cm)									
L	200	170	135	105	70	40	5			
-120	0,98	1,29	1,23	1,41	1,25	1,33	1,05			
-100	1,31	1,75	1,66	1,90	1,68	1,80	1,41			
-50	2,20	2,83	2,74	3,06	2,76	2,90	2,37			
0	2,11	2,89	2,69	3,13	2,71	2,97	2,27			
50	2,20	2,83	2,74	3,06	2,76	2,90	2,37			
100	1,31	1,78	1,68	1,93	1,70	1,83	1,42			
120	0,96	1,29	1,23	1,41	1,25	1,34	1,03			
140	1,023	1,45	1,37	1,60	1,35	1,50	1,09			
190	1,25	1,67	1,56	1,83	1,58	1,72	1,33			
240	1,02	1,45	1,34	1,60	1,35	1,50	1,09			
260	0,98	1,29	1,23	1,41	1,25	1,33	1,05			

Tabla 3.4. Tasa de dosis en microSv/h en distintas posiciones de las caras frontal y lateral de la estantería, a distintas alturas desde el suelo y a 60 cm de la estantería

	Distancia a la estantería 60 cm Altura respecto al suelo (cm)										
L	200	170	135	105	70	40	5				
-160	0,51	0,61	0,58	0,66	0,60	0,64	0,55				
-100	0,81	1,08	0,98	1,18	1,01	1,12	0,88				
-50	1,10	1,46	1,35	1,61	1,38	1,52	1,18				
0	1,16	1,56	1,45	1,72	1,48	1,62	1,25				
50	1,10	1,46	1,35	1,61	1,38	1,52	1,18				
100	0,81	1,10	0,99	1,20	1,02	1,14	0,88				
160	0,50	0,66	0,58	0,72	0,61	0,69	0,55				
220	0,61	0,78	0,76	0,87	0,77	0,81	0,65				
270	0,72	0,90	0,87	0,98	0,88	0,93	0,77				
320	0,61	0,78	0,76	0,87	0,77	0,81	0,65				
380	0,51	0,61	0,58	0,66	0,60	0,64	0,55				

Se observa en estas tablas que el máximo se encuentra aproximadamente a 100 cm del suelo y que disminuye al descender y al ascender, pero estos descensos no son uniformes, como es lógico y cabe esperar hay ligeras variaciones cuando se pasa por los puntos más cercanos a los estantes donde se encuentran las cajas.

El efecto se observa más claramente aún en la figura 3.4 en la que está representada gráficamente la distribución de tasa de dosis en μ Sv/h en la parte central de la cara frontal para distintas alturas desde el suelo y a 20 y 60 cm de la estantería.

Con objeto de validar los resultados obtenidos, se efectuó una determinación de la tasa de dosis en un almacén con una estantería como la modelizada y en la posición centrada, a 60 cm de la estantería y a 105 cm del suelo.

La estantería contenía cerca de 10.000 electrodos de wolframio toriado entre un total de 24.000 electrodos de wolframio.

Aquellos electrodos estaban colocados mayoritariamente (90%) en el estante colocado a 5 cm del suelo, y el resto (10%) estaba colocado en el estante ubicado a 135 cm del suelo.

En estas condiciones se repitió el cálculo de dosis introduciendo ahora los correspondientes factores de paso a dosis ambiental H*(10) tomados de la referencia [19], obteniendo una tasa de dosis de 1,04 μ Sv/h, valor que no consideraba el blindaje adicional proporcionado por los 14.000 electrodos de wolframio no toriados presentes en la estantería.

La tasa de dosis registrada por una cámara de ionización calibrada en tasa de dosis ambiental $H^*(10)$ fue de 0,36 μ Sv/h.

El valor registrado fue inferior al de cálculo coherentemente con la no consideración del blindaje adicional y con una cierta mayoración de los resultados de cálculo que colocaba la estimación en una posición conservadora. Figura 3.4. Distribución de tasa de dosis en microSv/h en la parte central de la cara frontal para distintas alturas desde el suelo y a 20 cm y 60 cm de la estantería



Las figuras 3.5 y 3.6 representan las dosis efectivas a 20 cm de altura y a 60 cm de altura en función de la distancia al centro de la estantería

Figura 3.5. Dosis efectiva a 20 cm de la estantería



Figura 3.6. Dosis efectiva a 60 cm de la estantería



Se puede observar que la tasa de dosis a 5 cm del suelo es superior a la tasa de dosis a 200 cm por efecto del albedo sobre la placa del suelo.

Considerando ahora que el personal de servicio en el almacén circula por los pasillos a una distancia no inferior a unos 60 cm de la estantería, puede efectuarse un ajuste de la tasa de dosis a una función apropiada y calcular por integración la dosis que recibiría un trabajador al pasar junto a la estantería.

Así, la dosis recibida sería:

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{D} \, \frac{ds}{v}$$

siendo *D* la dosis por paso, D la función tasa de dosis calculada, *ds* un tramo infinitesimal de camino y v la velocidad a la que circulan los operarios y que se ha tomado de 3 km/h.

Para calcular la función tasa de dosis (D) que se representa en la figura 3.7 se consideró la distribución de tasa de dosis en la posición en que esta era máxima, a 1 m del suelo, y se supuso que el trabajador se desplazaba a 60 cm de la estantería y a lo largo del pasillo situado delante de la misma.



Figura 3.7. Distribución de la tasa de dosis en microSv/h a lo largo del corredor a 1 m del suelo y 60 cm de distancia de la estantería

La dosis recibida cada vez que se realizaba el tránsito era de 1,7 x 10^{-3} µSv. Si ahora se considera que se produce un tránsito por hora y que la jornada laboral anual es de 1.700 horas, puede estimarse que la dosis recibida por el trabajador sería de 2,9 µSv.

De igual modo se podría suponer que un trabajador, cada vez que se acerque a la estantería a recoger una caja de electrodos recibiría una dosis con dos componentes. La primera sería la de tránsito y tendría el valor expuesto, y la segunda sería la debida a la permanencia junto a la estantería mientras coge la caja.

Para estimar esta componente se consideró que el trabajador se acercaba a la estantería en la posición central de las pilas de cajas de electrodos, en la posición + o -50, y permanecía a una distancia de 20 cm de la estantería.

En esta posición la tasa de dosis sería de 3,1 μ Sv/h y cabría esperar que el trabajador no permaneciera allí durante más de 1 minuto.

Así, la dosis recibida en cada operación sería de 0,05 μ Sv y si se considerase una operación por hora, cabría esperar una dosis de 88 μ Sv/año.

En conclusión, se podría afirmar que el almacenamiento de electrodos toriados en las condiciones extremas esperables en España supondría una dosis inferior a 100 μ Sv/año y este valor sería además una sobreestimación del valor real debido a que la cadena de desintegración no se encontraría en las condiciones de equilibrio secular supuestas.

Las valoraciones efectuadas con objeto de determinar el estado de equilibrio de la cadena se describen en el apartado 2.

El equilibrio radiactivo de la cadena del ²³²Th en los electrodos toriados, pone de manifiesto que la cadena presenta actividades de ²²⁸Th, y consecuentemente de todos sus descendientes, en torno a 0,33 de la actividad del precursor y actividades de ²²⁸Ac en torno a 0,34 de la actividad del precursor, relación que será di-

rectamente aplicable al ²²⁸Ra. En concreto, se encontraron valores para la relación de actividades comprendidos entre 0,27 y 0,39 con un valor medio de 0,33 y una desviación estándar de 0,045 para ²²⁸Th, y comprendidos entre 0,22 y 0,45 con un valor medio de 0,34 y una desviación estándar de 0,087 para ²²⁸Ac. El equilibrio está, pues, roto y esto hace que los efectos inducidos por la actividad, la dosis absorbida por ejemplo, pueda cifrarse en alrededor del 1/3 de la debida a la cadena en equilibrio secular.

Evaluando el espectro de emisión en estas condiciones para la cadena en equilibrio y sin equilibrio se obtiene que estos, como puede verse en la figura 3.8, son extraordinariamente similares, por lo que cabe colegir que la dosis efectivamente recibida sería 1/3 de las estimadas más arriba y así la dosis recibida por un trabajador del almacén sería de 29 μ Sv/año.

Figura 3.8. Espectros de emisión gamma de la cadena radiactiva del ²³²Th con y sin equilibrio



Finalmente, se estimó la dosis recibida durante el manejo de cajas de electrodos tras su recepción en el almacén o previo a su envío a clientes. Con objeto de no repetir cálculos, y considerando que se realizaba un manejo más intensivo de electrodos durante su utilización en soldadura y afilado, podía utilizarse el valor de dosis calculado en los apartados 7.1. Exposición ex-



terna (durante la soldadura) y 8.1. Exposición externa (durante el afilado) para acotar superiormente el de manejo durante el almacenamiento.

Así, la dosis recibida por manejo de electrodos durante el almacenamiento podría acotarse superiormente con 16 μ Sv/año.

2. El equilibrio radiactivo de la cadena del ²³²Th en los electrodos toriados

Para estudiar el estado de cada uno de los radioisótopos que componen la cadena radiactiva del 232Th se procedió a realizar determinaciones cuantitativas del contenido en torio mediante espectrometría alfa y a medir los emisores gamma mediante espectrometría gamma. El objetivo del estudio era poder definir con cierta precisión el término fuente del campo de radiación y conocer el contenido de los radionucleidos generados en las diversas etapas del uso de los electrodos y de sus residuos. El análisis de los radionucleidos emisores gamma se llevó a cabo utilizando un detector de germanio intrínseco de bajo fondo, tipo reverse de la marca Canberra, con un 40% de eficiencia, blindaje de plomo de 15 cm de grueso, veto activo de plástico de centelleo para la detección de los muones cósmicos y reducción de la componente dura de la radiación cósmica y flujo continuo de nitrógeno gas para mantener una sobrepresión en la zona de detección y desplazar el radón. El análisis de los emisores alfa se realizó mediante cámaras Canberra dotadas con detectores de la misma marca, tipo Pasivated Implanted Planar (PIP) Silicon Detectors de 450 mm² de área activa.

Las actividades específicas teóricas que deberían tener los electrodos toriados, si en su composición hubiese una determinada proporción de óxido de torio, se encuentran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Actividades específicas para distintas concentraciones de óxido de torio en los electrodos

Concentración de ThO $_2~\%$	Actividad específica Bq/g
1,7	61,16
2,0	71,8
2,2	79,22

Si se alcanza el equilibrio en la cadena, las actividades del ²³²Th y del ²²⁸Th tienen que ser idénticas. Si como resultado de una medida se concluye que esto no es así, el equilibrio estaría roto lo que indicaría que se realizó una extracción del torio y ambos torios habrían

sido por tanto extraídos simultáneamente de la cadena donde se encontraban. La razón entre ambos torios, ²²⁸Th/²³²Th, que en el momento inicial de la extracción era 1.0, pues se encontraban en equilibrio, disminuve con el tiempo hasta alcanzar un mínimo al cabo de 39.855 horas que son 4,55 años en los que alcanza el valor 228 Th $/^{232}$ Th = 0,422. Si la razón es todavía inferior a este número es un claro indicativo de que una segunda extracción tuvo que llevarse a cabo. Si esta segunda extracción se hubiese realizado precisamente en el instante en el que el cociente de ambos isótopos hubiera alcanzado su valor mínimo, es decir la condición inicial no es que ambos tuviesen la misma actividad sino precisamente $A(^{228}Th) = 0,422 \times A(^{232}Th)$, el valor que hubiera alcanzado la razón en el nuevo mínimo habría sido 228 Th $/^{232}$ Th = 0,178. Las ecuaciones de la desintegración dan para la razón de ambos isótopos:

$$\frac{A\left(^{228}Th\right)}{A\left(^{232}Th\right)} = 1 + \left[\frac{\lambda_4}{(\lambda_2 - \lambda_4)}e^{-\lambda_2 t}\right] + \left[1 + \frac{\lambda_2}{(\lambda_4 - \lambda_2)}e^{-\lambda_4 t}\right] \approx 1 + 1,4980 \left[e^{-\lambda_4 t} - e^{-\lambda_2 t}\right]$$

donde λ_2 es la constante de desintegración del ²³²Th y λ_4 la del ²²⁸Th.

Los resultados que se obtuvieron en las distintas medidas están resumidos en la tabla 3.6 a la que se ha añadido, para mayor completitud y posible comparación con otros electrodos no toriados, las medidas que se efectuaron sobre electrodos TIG lantanados y ceriados. La incertidumbre de las medidas fue de alrededor del 1% con k = 1.

Los resultados indican que al menos se efectuaron dos separaciones en la fabricación de los electrodos toriados en ambas marcas. La primera separación era evidente y tuvo que suceder cuando el torio se extrajo del mineral, pero se tuvo que realizar al menos una segunda extracción posteriormente puesto que el valor del cociente de las actividades de ambos isótopos fue de alrededor de 0,3 que era claramente inferior al mínimo de 0,422 cuando solo había una extracción.

	Diámetro (mm)	Peso (g)	₉₀ Th ²³² Bq/g	₉₀ Th ²²⁸ Bq/g	₉₀ Th ²²⁸ / ₉₀ Th ²³²
Marca 1					
2% ThO ₂	1	0,1431	78,23	20,95	0,268
2% TO ₂	2,4	0,8652	64,40	20,40	0,317
2% ThO ₂	4	2,5675	60,53	18,46	0,305
Marca 2					
Brand 2					
2% ThO ₂	1	0,1169	51,40	19,17	0,373
2% ThO ₂	2,4	0,4521	63,00	24,29	0,386
2% ThO ₂	4	2,2371	62,86	23,74	0,378
La and Ce					
2% La0 ₂	2	0,2452	0,45	0,13	0,289
2% CeO ₂	2	0,2209	0,20	0,06	0,30

Tabla 3.6. Resultados obtenidos para las actividades específicas del ²³²Th y del ²²⁸Th para dos marcas de electrodos y para electrodos lantanados y ceriados

3. Distribución del ThO₂ en los electrodos

Los electrodos toriados se fabrican normalmente por sinterización de una mezcla de wolframio y óxido de torio en polvo, eventualmente también puede haber presión y en muchos casos extrusión para obtener el diámetro deseado. Se estudió la homogeneidad de la distribución del ThO₂ en los distintos electrodos, midiendo la actividad de diferentes segmentos del electrodo mediante espectrometría alfa y gamma, y se completó el estudio mediante análisis por

Figura 3.9. Microfotografía SEM realizada con 4.000 aumentos del corte transversal de un electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro. El Th O_2 son los granos de color gris



microscopía electrónica de barrido (Scannning Electrón Microscopy, SEM) de la superficie de los electrodos y de la distribución radial y longitudinal en distintas partes a lo largo del electrodo. Los resultados indicaron que los gránulos de ThO₂ estaban, en efecto, distribuidos a lo largo de todo el electrodo de forma más o menos homogénea como puede verse en las figuras 3.9 y 3.10. En los cortes longitudinales se observa muy bien la extrusión que sufrió el electrodo al estar los granos alargados en el sentido del eje.

Figura 3.10. Microfotografía SEM realizada con 4.000 aumentos del corte longitudinal de un electrodo toriado de 2,4 mm de diámetro. Se observa claramente el estiramiento de los granos de ThO₂ indicativo de la extrusión a que se sometió al electrodo en el proceso de fabricación



Figura 3.11. Microfotografía SEM a 45 aumentos de la punta de un electrodo de 2,4 mm de diámetro tras 2 horas 30 minutos de soldadura continuada robotizada con una intensidad de 140 A de corriente continua



Se estudió con el microscopio electrónico con detalle el extremo afilado en el que se produce el arco de plasma. Las fotografías indicaron que podría existir fusión y sublimación de los granos de óxido de torio en la superficie o que permanecian en el interior cubiertos por el material depositado tras la operación de soldadura, ya que estaban prácticamente ausentes de la superficie después de haber funcionado durante 2,5 horas de forma continuada, por lo que se hacía necesario el afilado del electrodo.

En conclusión puede decirse que el torio se encuentra distribuido de manera razonablemente uniforme por el electrodo, que la soldadura puede prolongarse durante varias horas en caso de emplear robots para la tarea ya que el daño al electrodo es pequeño, mientras que el daño es grande si se utiliza soldadura manual y debe procederse con frecuencia a su afilado ya que se produce pérdida de torio en la superficie de la punta del electrodo como consecuencia de la alta temperatura a la que la soldadura tiene lugar o del depósito de material extraño.

4. Utilización de los electrodos

La utilización en taller o fábrica de los electrodos toriados consta de un conjunto de etapas que dan lugar a diferentes escenarios de exposición, pero que en todo caso son disjuntas con las de almacenamiento, de Figura 3.12. Ampliación a 4.000 aumentos de la microfotografía de la figura anterior que muestra la estructura de los cristales de W en la superficie del electrodo producidos por sublimación



modo que la exposición debida a ambas facetas tiene lugar en personas diferentes. Por ello, es necesario cuantificar y llegar a conclusiones de manera separada.

El operario recoge unos pocos electrodos del almacén, los suficientes para poder proceder a su afilado unas pocas veces al día, y procede a su afilado, toda vez que estos tiene forma cilíndrica y es de vital importancia que tengan punta y esta esté bien afilada, la calidad de la soldadura depende en gran medida de este extremo.

El afilado tiene lugar, en general, de forma manual empleando una piedra de amolar, si bien hay ocasiones en las que se emplea un dispositivo diseñado a este fin y que recoge el polvo resultante del afilado. En este trabajo no se tuvo en consideración el empleo de estos dispositivos ya que su uso dista de ser generalizado.

Una vez afilados los electrodos se procede a su colocación en el equipo de soldadura y se puede comenzar a soldar.

La soldadura sin interrupción viene a durar unos 20 minutos, al cabo de los cuales la punta del electrodo ha perdido el ángulo de ataque y con frecuencia presenta adherencias que imposibilitan continuar con una soldadura de la calidad requerida. Por ello se procede a su afilado. Si la soldadura es realizada en sistema robotizado, realmente no hay límite al tiempo que un electrodo puede estar soldando sin interrupción. En el transcurso de los trabajos realizados en este proyecto se llevaron a cabo ensayos sobre equipos robotizados que permitieron verificar que un electrodo podía realizar tareas de soldadura durante varias horas sin pérdida de calidad. En este caso, dado que la presencia humana es muy reducida, se consideró que la exposición era una extrapolación de la encontrada para soldadura manual.

En la soldadura manual se tienen las siguientes vías de exposición [2,3]:

- Exposición externa: se considera aquí la exposición debida a la presencia en la vecindad, o el contacto, con alguno o algunos pocos electrodos durante las diferentes fases del trabajo con ellos:
 - Electrodos en el bolsillo o en el banco de trabajo durante la soldadura.
 - Electrodos en contacto con la mano para afilado.
- Inhalación de polvo o humos: se produce la inhalación del polvo generado en el afilado de los electrodos o los vapores generados por la alta temperatura existente durante el uso en soldadura del electrodo.
- Depósito sobre la piel: se produce una exposición de la piel de la mano debido al depósito de polvo del electrodo durante el afilado.
- Ingestión: se produce la ingestión del polvo depositado sobre la mano durante el afilado de electrodos.

En la soldadura robotizada la exposición es sensiblemente inferior a la debida a la soldadura manual por no haber operarios en la vecindad del lugar en que se suelda y porque las necesidades de afilado son sensiblemente inferiores a las de la soldadura manual como se ha señalado más arriba.

En la soldadura manual existen dos fases de trabajo diferentes:

- Soldadura.
- Afilado.

En cada una de ellas la exposición tiene lugar a través de las siguientes vías:

- Soldadura:
 - Exposición externa: exposición debida a la presencia de electrodos en el bolsillo o en el banco de trabajo durante la soldadura.
 - Inhalación de humos: exposición por inhalación de los vapores generados por la alta temperatura existente durante la soldadura.
- Afilado:
 - Exposición externa: exposición debida al manejo de electrodos durante el afilado.
 - Inhalación de polvo: exposición por inhalación del polvo generado en el afilado de los electrodos.
 - Depósito sobre la piel: exposición de la piel de la mano debido al depósito de polvo del electrodo durante el afilado.
 - Ingestión: exposición por ingestión del polvo depositado sobre la mano durante el afilado de electrodos.

Con objeto de realizar una valoración de la exposición debida a cada uno de los caminos, se efectuó una cuantificación de las diferentes magnitudes básicas. Estas fueron la concentración de radionucleidos en el polvo y los humos en suspensión en el aire durante las fases de afilado y soldadura respectivamente, y el depósito de radionucleidos sobre la piel durante el afilado de electrodos.

Estas magnitudes junto con los parámetros fisiológicos y radiológicos necesarios permiten estimar la dosis que recibiría un trabajador que opere en las condiciones supuestas.

Los datos radiológicos básicos fueron recogidos de las publicaciones del ICRP *Publication*, 74 [19] ICRP CD1 [20] y los parámetros fisiológicos fueron tomados de la publicación nº 89 del ICRP [21]. 5. La radiactividad de las partículas en suspensión en el aire y el polvo atmosférico en el proceso de soldadura

Se efectuaron medidas en lugares de trabajo mientras se estaba realizando la soldadura, recogiendo muestras de polvo y de las partículas que pudiera haber en suspensión. Para ello se utilizaron muestreadores de aire que permitían simular con fiabilidad, las condiciones de respiración de los trabajadores. El estudio se llevó a cabo en el proceso de soldadura, tanto en su modo manual como robotizado, y en el proceso de afilado. También se tomaron muestras de la radiactividad ambiental en el lugar de trabajo.

La operación del equipo de soldadura tuvo lugar con una intensidad de corriente continua de 80-90 amperios para soldadura manual y 140 amperios para el caso de soldadura en una máquina robot automática.

Estos valores se encuentran en el rango habitualmente utilizado en la industria ya que los electrodos toriados se emplean con corriente continua toda vez que con corriente alterna es difícil mantener la punta del mismo en la forma adecuada. Las intensidades empleadas dependen del material a soldar y de su grosor, variando entre 30 amperios para acero y 80 amperios para cobre por milímetro de espesor [22].

El lugar elegido para la toma de muestras fue una escuela taller de formación de una de las grandes empresas españolas, que brindó esta posibilidad y dio toda clase de facilidades.

Esta opción fue elegida sobre otras posibilidades debido a que permitía determinar la concentración ambiental máxima de radionucleidos durante una jornada de trabajo en las condiciones operativas habitualmente utilizadas en los talleres o fábricas.

En un taller, las condiciones de medida habrían estado condicionadas sin duda por la presión de la producción, lo que hubiese forzado la obtención de valores de incertidumbre elevada.

Por otro lado, la escuela taller permitió disponer de todo tipo de soldadores, tanto de amplísima experiencia en el profesorado, como profesionales que van a perfeccionar sus técnicas, e incluso aprendices.

El objetivo perseguido en los ensayos fue obtener las concentraciones atmosféricas de radionucleidos que se tendrían durante el desarrollo de las tareas de soldadura en condiciones reales para con ellas obtener las dosis que recibirán los trabajadores en una jornada laboral anual de máxima eficiencia, es decir con el número mínimo de paradas.

Esto se consideró que envolvía razonablemente todas las posibilidades de trabajo real que podrían encontrarse en la industria.

Respecto al ambiente de fondo del taller, este fue analizado mediante la toma y medida de muestras de aerosoles, sin encontrar rastro de los materiales procedentes del electrodo.

No se prestó atención a los posibles filtros del sistema de ventilación de la instalación debido, por un lado, a las bajas concentraciones de radionucleidos encontrados, y por otro, a los reducidos valores de los períodos de semidesintegración de los radionucleidos que en todo caso cabría esperar encontrar allí, los descendentes del ²²⁰Rn (Torón).

Se utilizaron filtros de nitrocelulosa de 47 mm de diámetro y un diámetro nominal de poro de 0,8 micras. La toma se efectuó en un robot soldando en continuo y en un proceso de soldadura manual, tratando siempre de poner la boquilla portafiltro del muestreador en una posición equivalente a la de la nariz de un trabajador y de modo que el flujo de aire fuese de 30 l/min con objeto de aproximarse al promedio de respiración humana de 23,5 l/min [21].

La radiactividad ambiental de fondo fue determinada mediante la toma de muestras por un muestreador situado en la sala de soldadura, separado de los puestos de trabajo y de la maquinaría.

Los resultados obtenidos tras una minuciosa preparación y medida de las muestras en el laboratorio se han resumido en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9.

			Th-232			Th-228			Th-230		
Soldadura r	oldadura robotizada										
Actividad en aire	Volumen aspirado (m ³)	Pedo del depósito (mg)	Actividad (Bq/m³)	Incertidumbre (Bq/m³)	Límite de detección (Bq/m³)	Actividad (Bq/m³)	Incertidumbre (Bq/m³)	Límite de detección (Bq/m³)	Actividad (Bq/m³)	Incertidumbre (Bq/m³)	Límite de detección (Bq/m³)
Serie 1	2,25	1,5	8,8E-04	6,5E-05	4,1E-05	2,8E-04	3,7E-05	5,5E-05	0		4,1E-05
Serie 2	3,6	1,4	1,7E-04	2,3E-05	2,5E-05	0		3,4E-05	0		2,5E-05
Serie 3	3,96	4,6	3,6E-04	4,7E-05	3,6E-05	0		4,9E-05	0		3,6E-05
Serie 4	6,15	4,4	0		1,4E-05	0		2,6E-05	0		1,4E-05
Valor medio*			4,7E-04	2,78E-05		2,8E-04	3,7E-05		0		
Soldadura n	nanual										
Serie 1	1,508	3,7	0		5,3E-05	0		1,8E-04	0		5,3E-05
Serie 2	1,14	3,2	4,6E-03	2,4E-04	8,0E-05	2,4E-03	1,7E-04	1,4E-05	0		8,0E-05
Serie 3	2,27	4,8	3,0E-03	1,2E-04	4,0E-05	1,3E-03	8,2E-05	7,0E-05	4,3E-04	4,6E-05	4,0E-05
Valor medio*			3,8E-03	1,4E-04		1,8E-03	9,4E-05		4,3E-04	4,6E-05	

Tabla 3.7. Actividad específica de las partículas en suspensión en aire y del polvo

* Referido al conjunto de valores diferentes de cero.

Tabla 3.8. Actividad depositada sobre la mano durante la soldadura manual

		Th-232			Th-228			Th-230		
Depósito sobre la mano	Superficie de muestreo (cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)
Serie 1	40	0		3,0E-06	0		5,0E-06	0		3,0E-06
Serie 2	27,5	0		1,7E-05	0		3,0E-05	0		1,7E-05
Serie 3	26	0		4,0E-06	0		7,0E-06	0		4,0E-06
Valor medio*	0			0			0			

* Referido al conjunto de valores diferentes de cero.

Tabla 3.9. Actividad depositada sobre la mano durante el afilado

		Th-232		Th-228			Th-230			
Depósito sobre la mano	Superficie de muestreo (cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)	Actividad (Bq/cm²)	Incertidumbre (Bq/cm²)	Límite de detección (Bq/cm²)
Serie 1	27,5	0		1,1E-05	0		1,5E-05	0		1,1E-05
Serie 2	16,3	1,3E-02	1,9E-04	1,6E-05	4,1E-03	1,1E-04	2,2E-05	1,8E-04	7,1E-05	1,6E-05
Serie 3	31,5	3,0E-03	8,9E-05	1,5E-05	1,4E-03	6,2E-04	2,1E-05	6,5E-03	4,2E-05	1,5E-05
Valor medio*		8,0E-03	1,1E-04		2,8E-03	3,2E-04		3,34E-03	4,1E-05	

* Referido al conjunto de valores diferentes de cero.

De los resultados obtenidos puede concluirse que la concentración de radionucleidos en el aire durante la soldadura manual fue de 3,8 10⁻³ Bq/m³ de ²³²Th, en buen acuerdo con los valores obtenidos por Jankovic [23], y 1,8 10⁻³ Bq/m³ de ²²⁸Th, no habiendo sido posible determinar las actividades de los restantes radionucleidos dado lo reducido de su valor y la baja eficiencia de la espectrometría gamma. Por ello, a efectos de realizar las correspondientes estimaciones dosimétricas, se supuso que cada radionucleido se encontraba en equilibrio con su precursor, es decir, aquellos radionucleidos ubicados en la cadena entre los dos isótopos de torio estarían en equilibrio con el 232Th y los restantes con el ²²⁸Th. No obstante, dado lo reducido de los factores de dosis de esos radionucleidos no es relevante la hipótesis que se adopte.

Los valores de actividad encontrados son comparables con los obtenidos por Ludwig [24] si bien este autor determina la actividad tras la máscara de protección y por ello obtiene valores inferiores, aunque del mismo orden, a los encontrados en el trabajo a que se refiere este informe.

Puede afirmarse que no hay presencia de ²³⁰Th, procedente de la cadena de desintegración del ²³⁸U, salvo en un caso, probablemente debido a una presencia de uranio en la pieza que se soldaba.

La medida de la actividad de los depósitos en las manos mientras se está efectuando la soldadura resultó tan pequeña que se consideró despreciable.

 La radiactividad en las partículas en suspensión en el aire y el polvo atmosférico en el proceso de afilado de los electrodos

Se recogieron muestras de partículas en suspensión en el aire y polvo atmosférico mientras se efectuaba la operación de afilado de los electrodos. Esta operación se efectúa manualmente en una muela de afilar, el operario sujeta el electrodo con su mano, en la que habitualmente lleva guantes de protección. Esta precaución de llevar guantes en las manos está en el protocolo de afilado de cualquier objeto y no es específica de los electrodos toriados, entre otras razones por la elevada temperatura que puede alcanzar el electrodo. El proceso de afilado de un electrodo depende de la habilidad del operario pero es bastante breve y dura entre 1 y 2 minutos y, con objeto de reducir pérdidas de tiempo en desplazamientos, normalmente se acumulan varios electrodos (hasta 10) y se afilan posteriormente todos seguidos, por lo que un operario puede emplear 15 o 20 minutos en el afilado de electrodos cada vez que necesita afilar, y esto ocurre cada tres horas aproximadamente. Así, para las estimaciones dosimétricas se consideró que un operario empleaba 20 minutos en el afilado cada tres horas y media, lo que anualmente suponía 486 ciclos de soldadura-afilado que totalizaban 1.540 horas de soldadura y 160 horas de afilado.

Se muestrearon las partículas en suspensión en el aire con la boquilla portafiltros del muestreador colocada junto a la nariz del operario y se tomaron también muestras del polvo que se depositaba en las manos del operario durante el afilado (aunque normalmente llevan guantes) para poder evaluar la dosis que, eventualmente, el operario podría recibir. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.9, excepto para el caso del polvo atmosférico ya que la cantidad recogida fue tan pequeña (~0,3 mg) que no se pudo realizar un análisis y por lo tanto se consideró que esta vía no contribuía a la dosis recibida.

Los filtros arrojaron el resultado de una actividad muy baja, indetectable, incluso en el caso en que varios electrodos se hubieran afilado sucesivamente. Por tanto, se puede suponer con fiabilidad que la dosis que recibe el operario en el proceso de afilado es despreciable.

No obstante, en la literatura se encuentran datos de concentración de ²³²Th en aire durante el afilado, pero responden a situaciones que fuerzan la presencia del radionucleido. Saito [25] encuentra 40 mBq/m³ tras 10 minutos ininterrumpidos de afilado, cuando en el taller los 10 minutos de afilado se distribuyen en no menos de 20 minutos por las paradas de cambio de electrodo. Reichelt [26] encuentra 0,27 Bq/m³ al afilar electrodos de 4% de ThO₂ pero no especifica las condiciones, sin embargo le permiten efectuar una determinación de la granulometría del polvo captado con impactores.

Gäfvaert [27] no encuentra ²³²Th en la fracción respirable, lo encuentra por debajo del LID, y Crim [28] no encuentra ²³²Th tras forzar las condiciones de afilado (seis minutos consecutivos) ya que afilando un solo electrodo no se encuentra el radionucleido. Ludwig [29] reporta valores en casos extremos, si bien no detalla las condiciones en las que el afilado ha tenido lugar, principalmente el tiempo sin interrupción de afilado.

El depósito en las manos, principalmente en la mano izquierda (para una persona diestra) asciende a 8,0 10⁻³ Bq/cm² de ²³²Th y de 2,8 10⁻³ Bq/cm² de ²²⁸Th, y nuevamente no se pudo determinar la actividad de emisores gamma.

7. Estimación dosimétrica durante la soldadura

Como se ha expuesto anteriormente, la dosis en esta etapa se debe a la exposición externa por la presencia de electrodos en el bolsillo o en el banco de trabajo durante la soldadura y exposición interna por inhalación de los vapores generados por la alta temperatura existente durante la soldadura.

7.1. Exposición externa

Para estimar la dosis debida a este concepto se supuso que el operario portaba 9 de los 10 electrodos de una caja en un bolsillo, de modo que pudiera suponerse que recubrían una parte de su cuerpo sin que unos electrodos ofrecieran blindaje a la radiación emitida por otros, como se muestra en la figura, y separados 5 mm de la piel debido a la ropa.



Para evaluar la dosis debida a esta fuente se calculó el flujo atribuible a uno de los electrodos, considerado como una barra delgada y por lo tanto asimilada a una línea recta de 150 mm de longitud cuya actividad por unidad de longitud era de 71,5 Bq/g de ²³²Th en equilibrio con su cadena de desintegración. Esta fuente lineal tenía una tasa de emisión de fotones, *S*, de 168 cm⁻¹ s⁻¹.

Para evaluar la dosis debida a esta fuente se calculó el flujo de fotones debido a una fuente lineal a una profundidad de 10 mm, sin tener en cuenta efectos de atenuación, obteniéndose su valor medio en una superficie equivalente a la sección recta corporal, en la evaluación se empleó el área de la piel (1,78 m²) y la altura del trabajador (1,69 m) [21] para diferentes posiciones del electrodo y tomando el mayor valor.

Así, el flujo debido a 1 electrodo era 0,14 cm⁻² s⁻¹ y el debido a los 9 electrodos 9 veces mayor, es decir 1,26 cm⁻² s⁻¹.

Para calcular el factor de paso a dosis se consideró el espectro de emisión de fotones de la cadena de ²³²Th en equilibrio con su descendencia y los coeficientes másicos de absorción de energía [30], obteniendo un valor medio de 3,26 pGy cm².

Teniendo en cuenta que el operario lleva los electrodos en el bolsillo durante 1.540 horas por año, la dosis en el punto elegido ascendería a

> $D = 1,26 \times 3,26 \times 1.540 \times 3.600 =$ = 2,3 10⁷ pSv/año = 23 μ Sv/año

Se consideró un factor de calidad para la radiación de 1.

No obstante, sería razonable considerar el desequilibrio existente en la cadena y por lo tanto aplicar un factor de 1/3, como se indicó en el apartado 2, esto llevó a la estimación de dosis a 8 μ Sv/año pero habría que tener en cuenta que aún así existen en este valor un importante conjunto de factores mayorantes como es el hecho de que la longitud de los electrodos se acorta por el uso.

No obstante lo indicado se limitó la estimación de dosis a los 8 μ Sv/año consignados.

7.2. Exposición interna

Para estimar la dosis recibida por este concepto se consideró que el operario respiraba un aire que contenía las concentraciones de radionucleidos determinadas y expuestas en el apartado 5.

La soldadura tuvo lugar durante 1.540 horas por año, estimándose un caudal de respiración 23,50 l/min que corresponde a una actividad ligera según ICRP [21].

En este caso no pudo suponerse el desequilibrio de cadena encontrado en los electrodos toda vez que los factores de transferencia a la atmósfera de los diferentes radionucleidos serían distintos debido por lo menos a sus diferentes temperaturas de ebullición y coeficientes de difusión en el electrodo. Ciertamente se encontró una relación de actividad de ²²⁸Th a ²³²Th de 0,5 en lugar del valor 0,3 existente en el electrodo, posiblemente debido a una mayor movilidad del ²²⁸Th derivada de los procesos de desintegración.

Para obtener el compromiso anual de dosis se utilizaron los factores de dosis por inhalación [1] para aerosoles con una distribución de tamaños tal que la mediana del diámetro aerodinámico (AMAD) era de 5 micras de acuerdo con las recomendaciones de ICRP [31] para estimaciones de dosis en centros de trabajo y las determinaciones efectuadas por Jankovic [23] y fracciones de tipo M (moderada tasa de absorción en el tracto respiratorio del radionucleido). En la mayoría de los casos era el mayor valor.

En la determinación del factor de dosis por unidad de actividad de ²³²Th se consideró toda la cadena de desintegración del ²³²Th, incluyendo al ²²⁰Rn (torón) y sus descendientes, con una relación de desequilibrio entre la actividad de ²²⁸Th y ²³²Th de 0,5.

Así, la dosis comprometida anualmente debida a este concepto sería:

$$D = 3,8 \ 10^{-3} \times 1,4 \times 4,3 \ 10^{-5} \times 1.540 =$$

= 3,5 \ 10^{-4} Sv/año = 350 \ \mu Sv/año

7.3. Dosis total

La dosis total recibida en esta actividad sería la suma de las contribuciones de la exposición externa e interna y el total ascendería a 373 µSv/año

8. Estimación dosimétrica durante el afilado

Como ya fue establecido, la dosis en esta etapa es debida a exposición externa por el manejo de electrodos y al depósito de polvo sobre la mano durante el afilado, y a exposición interna por inhalación de los aerosoles generados e ingestión del polvo depositado sobre la mano durante el afilado.

8.1. Exposición externa debida al manejo de electrodos

En el escenario de exposición se consideró un electrodo de 2 mm de diámetro y 15 cm de longitud, emisor alfa, beta y gamma, sujeto directamente por la mano del operario e irradiando básicamente la piel ya que la exposición a radiación gamma sería similar a la considerada en el apartado 7.1, es decir 8 μ Sv/año.

Para evaluar la dosis debida a la emisión alfa, se consideró que los emisores alfa se encontraban uniformemente distribuidos en el electrodo, como los análisis por microscopía electrónica permitieron suponer, y que estos tenían el siguiente espectro de emisión:

Energía (MeV)	4.000	5.400	5.700	6.100	6.300	6.800	8.800
Frecuencia de emisión	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

En este caso se consideró el desequilibrio existente en la cadena, dado por un valor de la relación de actividades ²²⁸Th a ²³²Th de 0,33 transformándose así el espectro en el siguiente.

Energía (MeV)	4.000	5.400	5.700	6.100	6.300	6.800	8.800
Frecuencia de emisión	0,34	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Para analizar la significación radiológica de esta emisión se desarrolló un programa de simulación de trayectorias empleando técnicas de Monte Carlo con datos de alcance y poderes de frenado para partículas alfa en wolframio de la referencia SRIM2003 [32]. Este programa fue aplicado al escenario considerado, es decir un electrodo de 2 mm de diámetro y 15 cm de longitud con un contenido en óxido de torio del 2% y que permitió determinar que el flujo de energía de partículas alfa por unidad de superficie de electrodo era de 0,88 keV/cm² por desintegración del precursor de la cadena y esto, considerando 160 horas de afilado por año, un factor de peso de la radiación de 20 y un espesor másico de la piel de 0,15 g/cm², suponía una dosis de 21 mSv/año por centímetro cuadrado de piel expuesta.

La emisión beta asociada a esta emisión alfa está constituida por las partículas beta emitidas por el ²²⁸Ra, el ²²⁸Ac, el ²¹²Pb y el ²¹²Bi. Estos nucleidos, con un espectro de emisión inmanejable por lo complicado, emiten partículas beta de las siguientes energías medias [33]: 15, 391, 101 y 492 keV con las siguientes frecuencias de emisión, teniendo en cuenta el mismo desequilibrio de cadena que el considerado para la emisión alfa: 0,33, 0,33, 0,33, 0,21. Debe aclararse que la energía media de la emisión del ²²⁸Ra ha sido obtenida a partir de la máxima de emisión, considerando que la energía disponible para el electrón en la desintegración beta es aproximadamente 1/3 de la máxima toda vez que la referencia citada no proporciona este dato.

Con objeto de evaluar la dosis que esta emisión podría inducir, se consideró que el 50% de estas partículas depositaban toda su energía en la piel, cuyo grosor másico es 0,15 g/cm², y así la dosis debida era de 11 mSv/año por cm² de piel expuesta. Este valor es ligeramente superior al contenido sin referenciar en la tabla D9 de la referencia [3], por lo que se ha mantenido el valor determinado para este documento.

En resumen, puede decirse que el trabajador recibirá por este concepto una dosis de 8 μ Sv/año a cuerpo entero y una dosis de 32 mSv/año por cm² de piel expuesta. En relación con este valor, debe señalarse que esta dosis en la mayoría de las ocasiones será nula debido a que los trabajadores suelen emplear guantes para el afilado de los electrodos, fundamentalmente debido a la elevada temperatura que pueden alcanzar, lo que hace casi imposible su manejo.

8.2. Exposición interna por ingestión de polvo de afilado

Para estimar la dosis recibida por este concepto se consideró que la mano izquierda del operario, cuando este era diestro, resultaba cubierta por una capa de polvo formado por polvo de abrasivo y polvo de electrodo que contenía la cantidad de radionucleidos consignada en la tabla 3.9.

Una parte de este contenido podría ser ingerido por el trabajador con posterioridad. Ahora bien, debe considerarse que en muchos casos se emplean guantes para el afilado, lo que llevaría la ingestión a cero, y que la cantidad de polvo es importante, habiendo observado que inmediatamente tras el afilado la mayor parte de este polvo cae al suelo. Así cabe esperar que la cantidad ingerida no sobrepase el 10% del total a diferencia de la hipótesis considerada en la referencia [3] que tiene en cuenta una fracción del 50%.

La cantidad de radionucleido depositada sobre la mano cada vez que se realiza el proceso de afilado es de 8 10^{-3} Bq/cm² de ²³²Th que como cabría esperar presenta la relación de actividad respecto al ²²⁸Th encontrada en el electrodo, es decir 0,33.

Este depósito de radionucleidos junto con la dimensión de la superficie en la que el depósito tiene lugar, que se estima en unos 50 cm², permiten evaluar el depósito sobre la mano en $8 \cdot 10^{-3} \times 50 = 0.4$ *Bq*.

El afilado, como se ha indicado en el apartado 6, tiene lugar 486 veces por año, lo que supone una ingesta de ²³²Th de:

$$I = 486 \times 0.4 \times 0.1 = 19.4 \ Bq$$

Para obtener el compromiso anual de dosis debido a esta ingesta, se utilizaron los coeficientes de paso a dosis por ingestión del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes [1].

Así, la dosis comprometida anualmente debida a este concepto sería

$$D = 19,4 \times 5,7 \cdot 10^{-7} = 1,1 \cdot 10^{-5} Sv/año = 11 \ \mu Sv/año$$

8.3. Exposición externa por el depósito de polvo de afilado sobre la piel

En este caso el depósito considerado en el apartado anterior sería causa de la irradiación de la piel mediante la emisión alfa y beta, ya que ahora la contribución gamma sería despreciable. Para evaluar la dosis se consideró que los radionucleidos presentaban el grado de desequilibrio del electrodo, que el 50% de la energía emitida, que asciende a 17.191 keV por desintegración del precursor ²³²Th, era absorbida por la piel y que la exposición tenía lugar durante toda la jornada laboral, es decir 1.600 horas por año.

Así, se obtenía que la dosis recibida ascendía a 8,3 μSv/año por cm² de piel expuesta.

En este sentido debe señalarse que esta dosis no es sumable con la dosis a la piel correspondiente al manejo de electrodos para proceder a su afilado, toda vez que tiene lugar en lados diferentes de la mano. Este en el dorso y aquel en la palma.

9. Residuos

Los electrodos toriados empleados en la industria española son reducidos a polvo en una fracción que se encuentra entre 2/3 y 3/4 como consecuencia de los varios procesos de afilado a que son sometidos. El resto, que es una fracción comprendida entre 1/3 y 1/4 se mantiene en forma de barra al final de la vida del electrodo.

Los electrodos toriados tras su utilización son considerados residuos convencionales y, por lo tanto, no reciben ningún tipo de tratamiento especial. En algunos casos el resto de electrodo es considerado chatarra e incorporado a los restos metálicos de la fábrica o taller.

La actividad involucrada en los residuos, considerando un mercado total nacional de 400.000 electrodos con la distribución de diámetros mostrada en la tabla 3.1, es de 365 MBq/año.

En base a lo anterior cabe considerar que entre 2/3 y 3/4, acéptese un valor intermedio de 0,70, se encuentra en forma de polvo, generalmente mezclado con

una mayor cantidad de polvo procedente de arranque de partículas de la piedra de amolar, y el conjunto se incorpora a la basura convencional y es enviado a vertederos municipales.

Estos residuos, considerando que la utilización de electrodos tiene lugar por todo el país, serán generados y desechados también por todo el país, en cantidades, por tanto, que cabe imaginar reducidas en cada uno de los vertederos. Se estima que en España hay activos unos 3.700 vertederos de residuos urbanos a los que hay que añadir unos 3.000 ilegales. Además, el residuo se genera de manera aproximadamente continua a lo largo de todo el año.

Los restos que se encuentran en forma de barra supondrían una fracción de 0,3 del total.

Algunas veces se incorporan a los restos metálicos del taller y son comercializados como chatarra mezclados con ella y otras veces, las menos, siguen el camino del polvo y son remitidos al vertedero municipal.

Con el ánimo de efectuar una valoración de las dosis que estos desechos pueden inducir en los trabajadores del sistema de gestión de residuos convencionales, pueden utilizarse los modelos recogidos en el documento *Practical use of the concepts of clearance and exemption* [34].

Para su aplicación, se consideró que por tratarse de barras sólidas y vertidos convencionales no se producirían aerosoles durante el traslado de los residuos al camión de transporte al vertedero, por encontrarse estos en bolsas o contenedores. Por ello las vías de ingestión e inhalación no habrían de ser tenidas en consideración.

Por otro lado, la dosis recibida por los conductores de los camiones de residuos sería notablemente inferior a la recibida por el trabajador del vertedero, del orden del 10%, por lo que no se tuvo en consideración.

Finalmente, para evaluar la dosis que estos desechos podían inducir en los trabajadores del vertedero por exposición externa se consideró que, de acuerdo con la referencia [34], la dosis recibida por un trabajador que desarrollase su actividad en un vertedero que recibiese pequeñas cantidades de materiales NORM, dentro de una cantidad 36.000 Mg/año de residuos de los que un 10% fuera material contaminado con ²³²Th en equilibrio con sus descendientes, recibiría una dosis de 1.118 μ Sv/año por cada Bq/g del radionucleido en el material contaminado. Se consideró una jornada laboral del trabajador del vertedero de 1.800 horas/año.

Para evaluar la concentración de actividad en el material contaminado se supuso que este vertedero recibía todos los desechos de electrodos toriados generados en todo el país, tanto el polvo como los restos de electrodo, lo que suponía una actividad de 365 MBq/año. De acuerdo con el modelo, esta actividad se consideró dispersa en la masa contaminada, que era del 10% del total y suponía 3.600 Mg/año. Así, la concentración de actividad sería 0,1 Bq/g y la dosis anual recibida por el trabajador del vertedero sería de 1.118 x 0,1 = 112 μ Sv/año.

La dosis realmente recibida sería al menos dos o más órdenes de magnitud inferior a este valor, debido a que los residuos se depositan en vertederos diseminados por todo el país, y hay varios miles de ellos, y además alguno de estos residuos se incorporará al mercado de chatarra y seguirá el camino de la fabricación de acero.

LÁMPARAS DE ALTA DENSIDAD

1. Introducción

Una gran variedad de lámparas utilizadas comúnmente para iluminación pueden contener torio en alguno de sus componentes [35,36,37,38]. En el pasado se usaron filamentos de wolframio toriado en lámparas que tenían que soportar muy altas temperaturas para conseguir una iluminación potente. Hoy en día la mayoría de estas lámparas utilizan filamentos de wolframio con renio. El torio también se ha utilizado en lámparas con electrodos que requieren muy alta emisividad, en aquellas en las que se necesita la producción de una luz muy intensa, como las utilizadas en vehículos, y en lámparas diseñadas para emitir un espectro muy específico.

El tipo más común de lámparas de exterior e industriales que utilizan torio en su composición y las más utilizadas para estos fines son las lámparas de descarga de alta intensidad, conocidas como lámparas HID siglas en inglés de *High Intensity Discharge*, que incluyen lámparas de vapor de mercurio, de haluros metálicos y lámparas de arco de mercurio–xenon. Estas lámparas están construidas con unas paredes de vidrio especial muy grueso o cuarzo diseñado para poder soportar fuertes variaciones de temperatura y un uso no muy cuidadoso.

Las fuentes artificiales de luz se pueden dividir en dos grandes grupos en función de la forma de producción:

- a) Fuentes de luz incandescentes (incandescentes o halógenas).
- b) Fuentes de luz por descarga (fluorescencia o las lámparas de descarga de alta intensidad denominadas HID).

Las primeras producen luz por un fenómeno de incandescencia, mientras que en el segundo tipo la luz se produce por una descarga eléctrica. En general, las lámparas de descarga tienen la ventaja de conseguir una mayor eficiencia luminosa, más horas de vida y reproducir varios tonos de luz.

El funcionamiento de estas lámparas se basa en la luz emitida por un gas o vapor inducida por una descarga eléctrica. Dependiendo de la sustancia que se incorpora en el interior existen varios tipos:

- HID de vapor de Hg.
- HID de Na de alta o baja presión.
- HID de halogenuros metálicos.

El funcionamiento básico de estas lámparas de descarga HID es el siguiente:

- El tubo de descarga de la lámpara está fabricado generalmente en cuarzo (material de baja absorción a radiación ultravioleta y visible, y que soporta altas temperaturas). Contiene una pequeña cantidad de Na, Hg o halogenuros metálicos, en función del tipo de lámpara.
- En ambos extremos del tubo existen dos electrodos que son los encargados de mantener el arco de descarga. Al establecerse el arco se produce un aumento de temperatura en el interior del tubo de descarga que vaporiza el Na, Hg o el halogenuro metálico. Los vapores de los diferentes elementos producen radiaciones en la zona del visible en diferentes longitudes de onda que corresponden a distintos colores.
- Los electrodos en las lámparas de HID están formados por pequeños filamentos de wolframio, y sobre ellos se depositan las sustancias emisoras de electrones como el óxido de torio. La proporción de óxido de torio que indican los fabricantes oscila entre un 1 y un 2%.

Las lámparas HID de halogenuros metálicos tienen las siguientes aplicaciones:

- Iluminación de interiores: plantas de oficinas, hoteles, iglesias, grandes almacenes, tiendas de ropa, etc.
- Iluminación de exteriores: uso más frecuente en iluminación de escaparates, de edificios, campos deportivos.
- Algunas lámparas HID de halogenuros metálicos también se usan en automoción, en concreto para faros de automóviles.

Las lámparas HID de vapor de Na y Hg tienen las siguientes aplicaciones:

- Iluminación vial.
- Iluminación industrial y agrícola.
- Iluminación decorativa de calles y fachadas.

Existen otras lámparas de alta potencia, basadas en el esquema de las lámparas HID y que se emplean en rodajes de cine, en TV y en espectáculos o discotecas.

Estas lámparas requieren que sea una luz similar a la luz solar y para ello se necesita alcanzar altas temperatura y altas potencias.

Para conseguir esas altas temperaturas se incorpora una mezcla de tierras raras en la atmósfera donde se produce el arco entre los dos electrodos y gas xenón. En algunos casos estos tipos de lámparas contienen electrodos recubiertos con óxido de torio.

Se llevó a cabo una búsqueda de los distribuidores más representativos del mercado español de estas lámparas HID, se estudiaron sus usos más extendidos y se realizó una estimación de ventas anuales de estas lámparas en nuestro país. Posteriormente, se adquirieron algunas de estas lámparas y se realizaron medidas de espectrometría alfa y gamma en el laboratorio. Para ello se seleccionaron dos de las más importantes empresas del sector que, además, suministraron información relevante.

2. Estimación del volumen de ventas en España

Se obtuvieron datos de una empresa multinacional que es, además, una de las más importantes casas comerciales implantadas en España. Las estimaciones de ventas anuales de cada uno de los tipos y sus aplicaciones se resumen en los siguientes cuadros:

	Unidades/año
HCI (halogenuros metálicos ceramicos)	180.000
HQI (halogenuros metálicos cuarzo)	600.000

Aplicaciones en iluminación:

- Interiores: plantas oficinas, hoteles, galerías de arte, grandes almacenes, tiendas de moda.
- Exteriores: escaparates, edificios.

	Unidades/año
Lámparas de descarga de sodio	414.000

Aplicaciones en iluminación vial y decorativa de calles.

	Unidades/año
Lámparas de sodio de alta presión (VIDO x)	480.000

Aplicaciones en alumbrado público (autopistas).

	Unidades/año
Lámparas con usos médicos	684

Aplicaciones en quirófanos, microscopios, laparoscopia.

	Unidades/año
Lámparas proyeccion de cine	2.000
Lámparas rodajes de cine y TV	80.000
Lámparas de faros de coches	200.000

Se puede estimar, por tanto, que el volumen de ventas de esta empresa en España es de unos 2.000.000 de unidades/año.

Dadas las características de la empresa y su cobertura de mercado se puede estimar que en España el volumen anual de ventas sería de unas 10.000.000 unidades/año.

3. Sistema de recogida de lámparas

En el Real Decreto 2008/2005 de 25 de febrero sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus

residuos [39,40] se establece que: "los últimos poseedores podrán devolver los aparatos sin coste, a los distribuidores o a las entidades locales que recogerán tanto los procedentes de uso particular como los de uso profesional. Posteriormente, el productor debe hacerse cargo de ellos y proceder a su correcta gestión por medio de gestores autorizados".

En el anexo I de dicho real decreto se indican los productos incluidos en su ámbito de aplicación. En la categoría 5 de aparatos de alumbrado, se incluyen las lámparas de descarga de alta densidad (HID). En el anexo III se indica el tratamiento selectivo de los distintos componentes, en las lámparas HID se deberá extraer el gas y eliminar el mercurio.

Además, se estipula que el porcentaje de reutilización y reciclado de componentes, materiales y sustancias de lámparas de descarga de gas deberá alcanzar el 80% del peso de las lámparas.

En el Departamento de Gestión de Residuos del Instituto Aragonés de Gestión Medioambiental (INAGA), nos corroboran que el fabricante es el responsable último del residuo y que según el real decreto anterior tiene la obligación de la recogida del producto. De hecho los fabricantes cobran una tasa del 0,3 % del precio del producto, donde se incluyen los gastos de tratamiento del residuo que generan.

En concreto para las lámparas HID existen las siguientes tres vías básicas de recogida del residuo:

- Los particulares pueden depositar el residuo en los puntos limpios del ayuntamiento (los menos por las aplicaciones de estas lámparas).
- Las tiendas y almacenes de iluminación recogen las lámparas de ciertas marcas, no de todas, tanto de particulares como de industrias. Tienen unos contenedores especiales para su almacenamiento y posteriormente las llevan a un gestor autorizado.
- Los organismos públicos (ayuntamientos, universidades, diputaciones) tienen sus propios gestores autorizados que recogen las lámparas y las envían a los gestores finales.

Se realizaron varias consultas a una serie de gestores autorizados por la comunidad autónoma de Aragón.

La mayoría de las empresas fabricantes de lámparas se han adherido, a través de un Sistema de Gestión Integrada (SIG), a un programa de recogida coordinada de sus residuos por gestores autorizados. Algunos fabricantes no están adheridos a este programa pero también los envían a estos gestores.

Las empresas que se encargan de la recogida de estas lámparas, las tratan como residuos peligrosos, las acondicionan y envían a los gestores finales, que son los encargados del reciclaje o del almacenaje en vertederos autorizados.

En España hay algunas empresas dedicadas a la recogida final y reciclado de lámparas HID, tienen carácter nacional y en ellas proceden a:

- La separación de los gases por aspiración (Hg, Na o halogenuros).
- La extracción del mercurio, dada su alta toxicidad, para proceder a su reutilización.
- El reciclado del vidrio.
- La separación del metal (casquillo) para su reciclaje o chatarra.
- 4. Medidas en laboratorio de lámparas HID

Se adquirieron en el mercado algunas lámparas HID de gran consumo, representativas del mercado español, y se procedió a la extracción de los electrodos o filamentos para estudiarlos mediante espectrometría gamma de alta resolución y espectrometría alfa, lo que requirió una minuciosa preparación de las muestras.

Las lámparas tienen formas y tamaños exteriores muy variados pero esencialmente todas ellas contienen en su interior una cápsula de cuarzo de aproximadamente 1,5 cm de diámetro y unos 2,5 a 3 cm de longitud. En ambos extremos del eje central del cilindro están situados los electrodos que contienen o están recubiertos de óxido de torio ThO₂.

4.1. Medidas por espectrometría gamma

A título ilustrativo se presentan los resultados y un espectro gamma de los electrodos de wolframio toriado para una lámpara de alta densidad de 150 W. Se utilizó un detector de germanio de bajo fondo, Extended Range de 43,7% de eficiencia con 15 cm de grosor de blindaje de plomo, blindaje activo anticósmico y ventilación de nitrógeno para evitar la entrada de radón en el recinto de detección.

En la figura 4.1 se presenta el espectro obtenido después de 60 horas de medida.

Figura 4.1. Espectro gamma de los electrodos de una lámpara HID



En este espectro, se observa la presencia de los hijos de la cadena radiactiva del torio, en particular el pico de 2.614,7 keV del ²⁰⁸Tl. El pico que aparece muy claramente en el espectro corresponde a una energía de 511 keV debida a la aniquilación de positrones.

La actividad específica encontrada para el ²³²Th deducida a partir de la actividad correspondiente al pico medido del ²⁰⁸Tl, supuesto un equilibrio en la cadena y sin ninguna pérdida de ²²⁰Rn fue de 0,30 Bq/g por lo que la actividad por lámpara resultaría ser de 0,07 Bq/lámpara. No obstante esta actividad es sin duda inferior a la real, dadas las hipótesis realizadas. Un medida más fiable se tiene que realizar mediante espectrometría alfa.

4.2. Medidas por espectrometría alfa

Con objeto de obtener unos resultados fiables y tener una información más detallada sobre el contenido de torio se prepararon unas muestras para poder medirlas mediante espectrometría alfa utilizando los mismos electrodos que se habían medido anteriormente mediante espectrometría gamma. El espectro obtenido utilizando un espectrómetro alfa de cámara doble con dos detectores de implantación iónica en un sistema integrado model 7401 Canberra, después de siete días de recogida de datos, puede verse en la figura 4.2

Figura 4.2. Espectro alfa de los electrodos de una lámpara HID



En el espectro se observan claramente los picos correspondientes a la energía de 4.012,3 keV del ²³²Th, la de 4.845,3 keV del ²²⁹Th y la de 5.423,15 keV del ²²⁸Th.

La actividad específica encontrada a partir del pico de ²³²Th fue de 2,9 Bq/g y por tanto la actividad de la lámpara debida al ²³²Th fue de 0,7 Bq/lámpara.

En el cuadro siguiente se resumen los parámetros más relevantes:

Peso filamento (g)	Composición	Bq/g	Bq/lámpara
0,24	$W + ThO_2$	2,9	0,7

5. Dosis estimada. Riesgo radiológico

La actividad medida fue muy pequeña y tan solo en unas dos milesimas de la de un único electrodo toriado de soldadura de 2,4 mm de diámetro, si a ello se añade que el óxido de torio se encuentra en electrodos que están encapsulados en un recinto con paredes de cuarzo, que a su vez está en el interior de otro mayor de paredes de vidrio y que por tanto no existen emisiones de torón, ²²⁰Rn al exterior, se concluye que únicamente la radiación gamma sería capaz de alcanzar el exterior de las lámparas y son estas radiaciones las que cabría considerar al realizar una eventual estimación de la dosis.

La actividad del ²³²Th resultó ser de 0,7 Bq por lámpara, una cantidad a todas luces despreciable. El riesgo radiológico podría existir en caso de rotura o en la finalización de su vida útil. El sistema de recogida y tratamiento de residuos está bien establecido en estas lámparas. Considerando que el volumen anual en nuestro país de este tipo de lámparas es de unos 10.000.000 de unidades, supone una actividad total de 7 MBq (0,19 mCi).

Con objeto de estimar la implicación radiológica del torio contenido en una lámpara debe considerarse que la constante específica de rayos gamma (γ) para la cadena de este radionucleido en equilibrio secular es de 5,7 10⁻¹⁰ mSv/h.Bq a 1 m [41].



Los cátodos de los tubos de vacío se fabrican con alambres de tungsteno toriado, con un contenido de ²³²Th que oscila entre el 1 y el 2%. El empleo de torio se justifica debido a su facilidad de emisión de electrones a temperaturas relativamente bajas cuando es calentado en vacío.

El mercado actual de tubos de vacío es básicamente el de magnetrones para hornos de microondas. Básicamente en el mundo solo hay cinco empresas multinacionales que fabriquen magnetrones, entre las que destaca Daeyean que suministra magnetrones a Toshiba, Panasonic, LG y Samsung, y todos están hechos en China o Corea. En España por tanto todos son importados, en la mayoría de los casos se importa el horno completo. Puestos en contacto con las empresas más relevantes del mercado español se estima que las ventas de estos magnetrones en España se elevan a unos 1,25 millones de unidades al año. La cantidad de ²³²Th en cada magnetrón, como se justifica mas abajo, es aproximadamente de tan sólo 1 mg por tubo (3,4 Bq).

Existen algunas aplicaciones de mucha menor cuantía, como son los filamentos para equipamiento científico que emplean fuentes de rayos X o manómetros iónicos [42] en los que se tienen actividades de ²³²Th de unos 55 Bq.

1. Funcionamiento básico de un magnetrón

Los hornos microondas funcionan básicamente transformando la energía eléctrica en ondas de alta frecuencia. Las microondas son producidas por un tubo electrónico conocido como magnetrón, que se compone básicamente de un cátodo, un ánodo e imanes.

En el magnetrón, el filamento que es de wolframio toriado con un 1 a 2% de óxido de torio, sirve como cátodo y está ubicado en el centro del magnetrón, el cátodo está rodeado por el ánodo y todo el conjunto está rodeado por un potente imán circular. En la figura 5.1 se puede ver un magnetrón típico con su blindaje y refrigerador, tal como va montado en un horno microondas.

Figura 5.1. Magnetrón con su blindaje y refrigerador



En la figura 5.2 se puede ver el cátodo que constituye el magnetrón. El conjunto se encuentra en el interior de lo que se muestra en la figura 5.1.

Figura 5.2. Magnetrón. Ánodo y cátodo



Cuando se aplica una tensión al cátodo se calienta y emite electrones, que se ven atraídos hacia el ánodo debido a una diferencia de potencial aplicado entre ambos. Los electrones que en condiciones normales saldrían atraídos hacia el ánodo, se ven obligados a moverse en una órbita circular por efecto del imán, al estar sometidos a una aceleración pierden energía por radiación de frenado (*bremsstrahlung*). Esta radiación son los fotones que los magnetrones producen en el microondas.

2. Medidas realizadas en laboratorio

Las distintas casas suministradoras de hornos microondas proporcionaron algunos magnetrones con objeto de que se pudiesen efectuar medidas en el laboratorio. En general desconocían la existencia de óxido de torio en los magnetrones. Se han efectuado medidas mediante espectrometría gamma de los magnetrones enteros tal y como se observa en la figura 5.3 para comprobar la existencia de torio mediante la detección de ²⁰⁸Tl, y una vez comprobada se efectuaron medidas del cátodo mediante espectrometría gamma (figura 5.4) y alfa.

Figura 5.3. Espectro gamma de un magnetrón completo

2.1. Medidas por espectrometría gamma

En la figura 5.3 se observa el espectro gamma de un magnetrón entero en el que se aprecia claramente la presencia de los hijos de la cadena radiactiva del torio, en particular el pico de 2.614,7 keV de ²⁰⁸Tl.



Figura 5.4. Espectro gamma del filamento (cátodo) de un magnetrón



En la figura 5.4 se observa el espectro gamma del filamento toriado (cátodo) en el que también se puede ver la presencia de los hijos de la cadena radiactiva del torio. En particular es muy visible la línea de 2.614.7 keV de ²⁰⁸Tl. La actividad específica encontrada para el ²³²Th deducida a partir de la actividad correspondiente al pico medido de ²⁰⁸Tl, supuesto un equilibrio en la cadena y sin ninguna pérdida de ²²⁰Rn fue de 3,6 Bq/g. En el cuadro siguiente se detallan algunos parámetros relevantes.

Peso filamento (g)	Composición	Bq/g	Bq/magnetrón
0,26	$W + ThO_2$	3,6	0,9

Si en lugar del pico de talio se utiliza la línea de 911,204 keV del pico de ²²⁸Ac se obtiene una actividad especifica para el ²³²Th de 9,4 Bq/g lo que conduce a una actividad de 2,4 Bq/magnetrón. Este resultado indica que hay una perdida importante de ²²⁰Rn.

2.2. Medidas por espectrometría alfa

La actividad específica encontrada para el ²³²Th fue de 31,1 Bq/g, y considerando que el peso del filamento era de 0,11 g, la actividad de este radionucleido fue de 3,4 Bq/magnetrón.

Peso filamento (g)	Composición	Bq/g	Bq/magnetrón
0,11	$W + ThO_2$	31,1	3,4

Se observó que el contenido de 228 Th era de 16,3 Bq/g, el 52% del contenido en 232 Th, cifra que resulta superior a la encontrada en los electrodos toriados.

3. Dosis estimada. Riesgo radiológico

Haciendo uso de la constante específica de rayos gamma para la cadena de ²³²Th, que es de 5,7 10⁻⁴ mSv/h.MBq a 1 m la tasa de dosis debida a la actividad, considerada como fuente puntual, contenida en el magnetrón de un horno de microondas (3,4 Bq) y desprovista de todo tipo de blindaje será de 48,5 pSv/h a 20 cm, distancia que se puede considerar como la dimensión de un horno

La actividad involucrada en el comercio de hornos microondas es de

$$1,25 \ 10^5 \times 3,4 = 4,25 \ 10^5 \text{ Bq}$$



El torio se añadía a las lentes ópticas para mejorar sus propiedades ópticas, en particular por una modificación del índice de refracción. Los vidrios con óxido de torio tenían un índice de refracción muy elevado y muy baja dispersión cromática por lo que se utilizaban en lentes de muy alta calidad para cámaras fotográficas e instrumentos científicos. La posibilidad de riesgo radiológico, motivos de seguridad y medioambientales, junto a que con otros elementos se consiguen resultados similares y unido a la mejora de los sistemas de producción, han llevado a descartar el torio en este tipo de industrias desde los años 80.

Se contactó con varios fabricantes multinacionales de gran relevancia mundial y aseguraron que en la actualidad no incorporan torio en ninguna de sus lentes [43,44].

Algunos modelos de cámaras fotográficas de 35 mm, que incorporaban Th en sus lentes, ya no se fabrican en la actualidad y solo tienen un posible mercado en el de segunda mano. Hoy en día con el advenimiento de las cámaras digitales, este mercado de segunda mano de maquinas convencionales está prácticamente extinguido.

También se consultaron algunos fabricantes de lentes ópticas para gafas con el mismo resultado. En el informe remitido ante la consulta efectuada, uno de los fabricantes mayores del mundo de lentes ópticas dice textualmente: "la producción de vidrios ópticos con torio como constituyente se abandonó hace más de 20 años. Se añadía básicamente para aumentar el índice de refracción. En la actualidad no se emplea torio como componente de las lentes ópticas. Pueden existir trazas de torio como resultado de la radiactividad natural de los elementos de partida".

Para más información remite a un informe del año 2005 de su compañía, que por completitud se adjunta como anexo I.

TUBOS DE RAYOS X

Puestos en contacto con los gestores autorizados para la recogida de los tubos de rayos X empleados en el Hospital Clínico de Zaragoza, confirmaron que hace 25 o 30 años los filamentos de wolframio llevaban una pequeña proporción de óxido de torio, pero en la actualidad no llevan este componente.

La razón de que se retirara el torio como componente, fue que al alcanzar el filamento temperaturas de 1.200 °C el óxido de torio se desprendía del filamento y se depositaba sobre la ampolla de vidrio, produciendo cortes de tensión y haciendo necesarias calibraciones muy frecuentes, por tanto se producía un mal funcionamiento del sistema.

Se facilitó un tubo de rayos X y se midieron los dos filamentos que contenía por espectrometría gamma, descartando por completo la presencia de torio en dichos filamentos, lo que corroboraba la veracidad de la información suministrada.



Se contactó con 12 fabricantes entre los que cabe destacar Ceramtec, Haldenwanger y Nahita y todos ellos manifiestaron que sus productos no incorporaban torio, lo que fue comprobado afirmativamente en el laboratorio por espectrometría gamma.

Otros fabricantes (Rosenthal y HCT) de los que se tenían piezas no respondieron, porque no fue posible localizarles quizá porque han desaparecido del mercado, y se comprobó que los crisoles disponibles en el laboratorio no contenían torio.



El análisis efectuado de la exposición debida al uso de torio en industrias no nucleares pone de manifiesto que la mas intensa de las exposiciones se produce en la utilización de electrodos toriados y en este caso la dosis estimada anual no llega a 500 μ Sv, bien por debajo del nivel por debajo del cual no se requiere control regulador.

En relación con los residuos toriados cabe señalar que la mayor aportación anual se produce en el uso de electrodos, con un valor de 245 a 275 MBq en forma de polvo, 120 a 90 MBq en forma de barras de W-ThO₂ de unos 5 cm de longitud y 2-3 mm de diámetro, distribuidos por todo el país. El resto de las actividades producen aportaciones que en unos casos, como las lámparas HID, son retornados al fabricante por mandato legal y en el resto son al menos dos órdenes de magnitud inferiores.

Todas estas cantidades son excesivamente reducidas como para adoptar algún tipo de medida de control.

Por todo ello, todas las actividades en las que se utiliza torio, consideradas en el presente documento, inducen dosis inferiores a 1 mSv/año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. Real Decreto 783/2001 (BOE 178 de 26 de julio de 2001).

[2] "Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides." *European Commission Reports Radiation Protection*, 95, 1999.

[3] "Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides." Penfold, J. S. S.; Mobbs, S. F.; Degrange, J. P.; Schneider, T. *European Commission Reports Radiation Protection*, 107, 1999.

[4] "Systematic radiological assessment of exemptions for source and byproduct materials." NUREG-1717. USNRC, 2001.

[5] Regulatory and management approaches for the control of environmental residues containing naturally occurring radioactive material (NORM). IAEA. TECDOC-1484. 2006.

[6] Naturally occurring materials (NORM IV). IAEA. TECDOC-1472. 2005.

[7] Technologically enhanced natural radiation (TENR II). IAEA. TECDOC-1271. 2002.

[8] *Magnesium alloys: the light choice for aerospace.* Duffy, L. Materials World, 4(3), 1996.

[9] "A Review of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union." J. Shaw, J. Dunderdale and R. A. Paynter. *European Commission Reports Radiation Protection*, 139. 2003.

[10] "A Review of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union." J. Shaw, J. Dunderdale and R. A. Paynter. *European Commission Reports Radiation Protection*, 146. 2007.

[11] "Guidelines for the Regulatory Control of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union." J. Shaw, J. Dunderdale and R. A. Paynter. European Commission Reports Radiation Protection, 147. 2007.

[12] Assessment of radiation doses from incandescent gas mantles that contain thorium. O'Donnell, F. R. and Etnier, E. L. –NUREG/CR-1910. USNRC, 1981.

[13] Assessment of Consumer Products Containing Radioactive Material. Buckley, D. W., et al. -NUREG/CR-1775. USNRC, 1980.

[14] Cuthbert F. L., *Thorium production technology*. Addiso-Wesley, New York, 1958.

[15] *Radioactivity in consumer products*. Barker, R. F. and Tse, A. H. NUREG/CP-0001. USNRC, 1978.

[16] "Beyond low-level activity: On a 'non-radioactive' gas mantle." Karin Poljanc, K.; Steinhauser, G.; Sterba, J.H.; Buchtela, K.and Bichler, M. *Science of the Total Environment* 374, 2007.

[17] "Comparison between radioactive and non-radioactive gas lantern mantles." Furuta, E.; Yoshizawa, Y. and Aburai, T. J. *Radiological Protection*, 20, 2000.

[18] MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code – Versión 4C. Los Alamos National Laboratory, USA.

[19] "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation." ICRP Publication 74. 1995.

[20] The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public Version 2.01. ICRP, 2001.

[21] "Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values." ICRP Publication 89.

[22] *Manual del soldador*. G. Hernández Riesco. Cesol, Madrid, 2004.

[23] "Exposures from thorium contained in thoriated tungsten welding electrodes." Jankovic, J. T.;

Underwood, W. S. and Goodwin G. M. American Industrial Hygiene Association Journal, 60. 1999.

[24] "Intakes of thorium while using thoriated tungsten electrodes for TIG welding." Ludwig *et al. Health Physics*, 77(4). 1999.

[25] "Thorium⁻²³² exposure during tungsten inert gas arc welding and electrode sharpening." Saito, H. *et al. Industrial Health*, 41. 2003.

[26] "The measurement of released radionuclides during TIG-welding and grinding." Reichelt, A. *et al.* IRPA-10, Hiroshima. 2000.

[27] Gäfvaert, T.; Pagels, J. and Holm, E. "Thorium exposure during tungsten inert gas welding with thoriated tungsten electrodes." *Radiation Protection Dosimetry* 103 (4), 2003.

[28] "Measurements of Air concentration of thorium during grinding and welding operations using thoriated tungsten electrodes." Crim, E. M. and Bradley, T. D. *Health Physics*, 68 (5), 1995.

[29] "Thorium exposure during welding and grinding with thoriated tungsten electrodes." Ludwig, T. and Seitz, G. IRPA-9, Vienna, 1996.

[30] Ref: Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. NISTIR 5632. Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD (USA). 1995.

[31] "Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers." ICRP Publication 68. 1995.

[32] *The stopping and range of ions in matter*. Ziegler, J. F. and Beiersack, J. D. SRIM.com. Annapolis, MD 21037, USA.

[33] *Table of radioactive isotopes*. E. Browne and R. B. Firestone. J. Wiley and Sons. 1986.

[34] "Practical use of the concepts of clearance and exemption." Part II. *European Commission Reports Radiation Protection*, 122. 2001.

[35] *Radioactive Substances in Lighting Products*. European Lighting Companies Federation. Brussels, 2003.

[36] "Electric lamp and tube manufacture." A. M. Zielinski. *Encyclopaedia of occupational health and safety*. International Labour Organization, 1983.

[37] Light and environment: Environmental information on D headlight lamps. Osram. 2004.

[38] Osram Guideline Hazardous substances. Osram Technical templates. Osram. 2007.

[39] Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.

[40] Directiva 2002/96/CE de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

[41] *Handbook of health physics and radiological health.* 3rd edition. B. Shleien *et al.* Williams&Wilkins. 1998.

[42] *Risk assessment. Area: handling of thoriated filaments.* RISK24.DOC. Thermo electron corporation. 2003.

[43] Certificate about radioactivity of optical and colored glasses. Schott, A. G. Mainz, Germany, 2005 (anexo I).

[44] Comunicaciones personales de Canon, Indo, Kodak.

ANEXO

Certificate about radioactivity of optical and colored glasses

SCHUTTIAG - Postrach 2480 - 55014 Mainz		Hattenbergstraße 10 55122 Mainz
		Germany Telefon +49 (0)6131/66-0 Telefax +49 (0)6131/66-2000 www.schott.com
Unser Zeichen. Unsere Nachricht vom:	Telefon: +49 (0) 6131/66-2168 Telefax: +49 (0) 6131/66-2074	Datum: 20.09.2005 E-Mail: peter.hartmann@schott.com
Certificate about Radioactivity	of Optical and Colored Glas	ses
Optical White and Colored Glass	s from SCHOTT	
SCHOTT optical white and colo weight thorium oxide or other ra present as in many everyday s materials.	ored glass types do not conta adioactive material. Negligible substances as a result of the	in more than 0.05 percent of inherent radioactivity can be e natural radioactivity of raw
The production of thorium contai has been discontinued more than	ining optical glasses and uraniun 20 years ago.	um containing colored glasses
The disposal of used single pa containing colored glasses is be each country.	arts from thorium containing eing done by the user accordi	optical glasses and uranium ing to the regulations valid in
Poter Sterfunce	in	
Dr. Peter Hartmann		
Application / Astro Space / Q-Ma Optics for Devices SCHOTT AG	nagement	
Hattenbergstraße 10, D- 55122 M phone: +49 (0) 6131/66-2168, fax mail to: peter.hartmann@schott.	Mainz, Germany x.: + 49 (0) 6131/66-2074 com http://www.schott.com/op	tics_devices
SCHOTT AG Vorsitzender des Aufsichtsrates: Tilman Todenhöfer Vorstand: Dr. Udo Ungeheuer (Vorsitzender), Dr. Karl-Pr Sitz der Gesellschaft: Mainz - Amtsgericht Mainz - HR Scommerzbank AG, Mainz - BLZ 550 400 22 - Konto 2 26 Deutsche Bank AG, Mainz - BLZ 550 700 40 - Konto 0 12	eter Merz, Klaus Rübenthaler 8555 - UST-IdNr.: DEB11120270 30 008 00 - SWIFT: COBADEFF550 - IBAN-Nr. DE9/ 23 265 00 - SWIFT: DEUTDE5M - IBAN-Nr. DE7155	2550400220226000800 50700400012326500

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PF	REÁ	MBULO	5
1.	IN	NTRODUCCIÓN	9
	1.	Aspectos generales del torio.	10
	2.	Aplicaciones con mayor significación radiológica	11
2.	C.	AMISAS DE INCANDESCENCIA PARA LÁMPARAS DE GAS	15
3.	E	LECTRODOS DE SOLDADURA	19
	1.	Almacenamiento de los electrodos	20
	2.	El equilibrio radiactivo de la cadena del ²³² Th en los electrodos toriados	27
	3.	Distribución del ThO ₂ en los electrodos	28
	4.	Utilización de los electrodos	29
	5.	La radiactividad de las particulas en suspensión en el aire y el polvo atmosférico en el proceso de soldadura	31
	6.	La radiactividad de las particulas en suspensión en el aire y el polvo atmosférico en el proceso de afilado de los electrodos	33
	7.	Estimación dosimétrica durante la soldadura	34
		7.1. Exposición externa.	34
		7.2. Exposición interna	34
		7.3. Dosis total	35
	8.	Estimación dosimétrica durante el afilado	35
		8.1. Exposición externa debida al manejo de electrodos	35
		8.2. Exposición exposición interna por ingestión de polvo de afilado	36
		8.3. Exposición externa por el depósito de polvo de afilado sobre la piel	37
	9.	Residuos	37
4.	L	ÁMPARAS DE ALTA DENSIDAD	39
	1.	Introducción	40
	2.	Estimación del volumen de ventas en España	41
	3.	Sistema de recogida de lámparas	41

	4.	Medidas en laboratorio de lámparas HID	42		
		4.1. Medidas por espectrometria gamma	43		
		4.2. Medidas por espectrometria alfa	43		
	5.	Dosis estimada. Riesgo radiológico	44		
5.	ΤI	UBOS DE VACIO. MAGNETRONES	45		
	1.	Funcionamiento básico de un magnetrón	46		
	2.	Medidas realizadas en laboratorio	46		
		2.1. Medidas por espectrometría gamma	47		
		2.2. Medidas por espectrometría alfa	48		
	3.	Dosis estimada. Riesgo radiológico	48		
6.	LI	ENTES ÓPTICAS	49		
7.	ΤI	UBOS DE RAYOS X	51		
8.	C	RISOLES PARA MUY ALTA TEMPERATURA	53		
9.	С	ONCLUSIONES	55		
10	. RI	EFERENCIAS BIBLIÓGRAFICAS	57		
Aľ	NEXO				
	Се	ertificate about radioactivity of optical and colored glasses	62		

Estudio de la exposición debida a la utilización de torio en industrias no radiológicas

Colección Informes Técnicos 36.2013

