



Universidad Pedagógica
y
Tecnológica de Colombia
Escuela de Física
Seccional Tunja

MEDICIÓN DE LÍMITES DE DESCARGA PARA
VERTÍMIENTOS GENERADOS EN MEDICINA
NUCLEAR

Leidy Carolina Alba Martínez

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Seccional Tunja

MEDICIÓN DE LÍMITES DE DESCARGA PARA
VERTÍMIENTOS GENERADOS EN MEDICINA NUCLEAR

Proyecto de Trabajo de Grado

Presentado por

Leidy Carolina Alba Martínez

Código: 200811357

Director de Trabajo de Grado

Dr. Uriel Odeima Chica Villegas

Codirector de Trabajo de Grado

Mg. Jhonny Orlando Tolosa Cetina

Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

15 de mayo de 2015

Página de aceptación:

El presente trabajo cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia para otorgar el título de Profesional en Física.

Director de Tesis

Dr. Uriel Odeima Chica Villegas
Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Codirector de Tesis

Mg. Jhonny Orlando Tolosa Cetina
Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Jurados

Docente Siervo Armando Ramirez
Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Docente Maricel Moreno Gutierrez
Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Índice general

1.. Introducción	9
2.. Descripción de las aplicaciones del ^{131}I en Medicina Nuclear	13
2.1. ¿Qué es el Yodo?	13
2.2. El Yodo en el ser humano	13
2.3. ¿Qué es el Yodo Radiactivo?	14
2.3.1. ¿Cómo funciona el tratamiento?	15
2.3.2. Yodo radiactivo para imágenes de la tiroides	16
2.3.3. Yodo radiactivo para el tratamiento de los trastornos tiroideos	17
2.3.4. Tejido tiroideo normal	19
2.3.5. Cáncer de tiroides	19
2.3.6. Precauciones después del tratamiento con ^{131}I	20
2.3.7. Riesgos a largo plazo del Yodo radiactivo ^{131}I	21
3.. Interacción de la Radiación con la Materia	23
3.1. Interacción de partículas cargadas con la materia	24
3.1.1. Interacción de partículas beta	24
3.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con la materia	26
3.1.3. Efecto Fotoeléctrico	28
3.1.4. Efecto Compton	28
3.1.5. Producción de Pares	29
3.1.6. Desintegración Radiactiva	30
3.2. Decaimiento Radiactivo	32
3.3. Semiperiodo de desintegración	34
3.4. Actividad	34

4.. Detectores	35
4.1. Características intrínsecas de los detectores	36
4.1.1. Detectores de Estado Sólido	37
4.1.2. Detectores de Centelleo	40
4.2. Descripción de instrumentos nucleares	41
4.2.1. Monitor liquido gamma LM211S (off-line)	42
4.2.2. Monitor liquido gamma LM212S (off-line)	43
4.2.3. Monitor de vertido liquido serie LEM	45
4.2.4. Monitor de vertidos liquidos 940-2 (off-line)	47
5.. Métodos y Análisis	50
6.. Conclusiones	60
Bibliografía	62

Índice de figuras

2.1. Yodo Radiactivo	15
2.2. Imágenes donde es absorbido el ^{131}I por el cuerpo	16
2.3. Diagnóstico por imágenes de la tiroides.	18
2.4. Esquema de decaimiento del ^{131}I	18
3.1. Tres procesos principales de interacción de la radiación con la materia	27
3.2. Efecto fotoeléctrico	28
3.3. Dispersión Compton	29
3.4. Producción de pares	30
3.5. Desintegración β^-	31
3.6. Emisión Gamma.	32
4.1. Banda de conducción y banda de valencia.	38
4.2. Esquema de un detector de centelleo.	40
4.3. Monitor liquido gamma LM211S. [Figura tomada de [30]]	42
4.4. Monitor liquido gamma LM212S.	44
4.5. Monitor de vertido liquido serie LEM. [Figura tomada de [32]]	46
4.6. Monitor de vertidos liquidos 940-2 (off-line).	48
5.1. Esquema de un sistema depósito decaimiento	55

Dedicatoria

A mi madre Yudy, por su apoyo incondicional, por sus palabras de ánimo en los momentos más difíciles, por su amor, porque con un abrazo y un te quiero me daba las fuerzas necesarias para seguir adelante.

A mi padre Vicente, por toda su colaboración, por su amor, por su ejemplo de esfuerzo, perseverancia y trabajo, por sus consejos y por ayudarme siempre a buscar soluciones a los problemas que se me presentaban.

A mis hermanos Karen y Marco, porque pese a los momentos en que me llenaba de estrés, estuvieron ahí con una risa y un abrazo brindando a su manera apoyo que me motivaba a continuar.

A mis abuelas, tias(os) y primos porque siempre me brindaron la fuerza necesaria para continuar, por todas sus palabras de ánimo, por brindarme tranquilidad y alegría.

A Giovanni, porque pese a la distancia me brindó su apoyo incondicional, por su comprensión, paciencia, cariño y sus palabras dándome ánimos y valor para seguir adelante.

A todos ellos agradezco, porque han aportado valores a mi vida, porque me han formado para saber como luchar y salir victoriosa ante las diversas adversidades de la vida, por sus enseñanzas que nunca cesan, no me alcanzan las palabras para expresar el orgullo y lo bien que me siento de tener una familia como esta.

“Es precisamente la posibilidad de realizar un sueño lo que hace la vida interesante”. (Paulo Coelho)

Agradecimientos

A Dios por darme la fuerza y fé para creer en lo que me parecía imposible terminar, por ser mi luz y mi camino, por haberme acompañado y guiado durante toda mi carrera, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobretodo por cada una de las personas que colocó en mi camino durante toda ésta trayectoria.

A mi director el Dr Uriel Chica por su colaboración, a mi Codirector el Mg. Jhonny Tolosa, a los Profesores Alejandro Bolivar y Simón Bolivar por su tiempo, apoyo, dedicación, orientación y paciencia durante la realización de este proyecto que enmarca el último escalón de una de las etapas de mi formación como profesional e investigadora.

A cada uno de los docentes por su profesionalismo y entrega que a través de éste tiempo me enseñaron e instruyeron en este camino de formación.

A mis amigos, Lore, Saris y Ludving por todo su apoyo durante y después de que culminarán su carrera, por sus palabras de tranquilidad y por cada uno de los momentos compartidos, A David, por su paciencia y porque a pesar de la distancia siempre estuvo ahí para brindarme su ayuda incondicional. A Nore, amiga desde el colegio, por sus consejos y apoyo, solo me resta darles inmensas gracias.

**“La ciencia sirve para darnos una idea de cuán vasta es nuestra
ignorancia”.**

Robert de Lamennais

Introducción

Las aplicaciones de la física en la medicina han aumentado progresivamente, en variedad y cantidad, desde principios del siglo XX. Nuevas modalidades de tratamiento (radioterapia con fotones, electrones, protones e iones ligeros, radioterapia conformada y con modulación de intensidad, braquiterapia de alta tasa de dosis y radiocirugía estereotáxica, entre otras) y de diagnóstico (tomografía por emisión de positrones, tomografía por emisión de fotón único, radiología digital, resonancia magnética y ultrasonido, entre otras) han requerido que el número de físicos en los hospitales de todo el mundo se incremente, y que su formación académica y entrenamiento clínico se adecúen a las exigencias de las tecnologías avanzadas. La física médica proporciona los fundamentos físicos a múltiples técnicas terapéuticas y la base científica para la comprensión, puesta en marcha y desarrollo de las tecnologías que están revolucionando el diagnóstico médico, y establece los criterios para la correcta utilización de los agentes físicos empleados en medicina.

La Medicina Nuclear es una rama de la medicina que estudia la anatomía y función de los órganos del cuerpo mediante imágenes que se obtienen detectando la emisión de energía de una sustancia radiactiva previamente inyectada al paciente por vía intravenosa o ingerida por vía oral, para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médica. Los estudios diagnósticos de medicina nuclear no son peligrosos y sólo liberan pequeñas cantidades de radiación hacia el organismo.[13]

El ^{131}I es un radionucléido con una alta radiotoxicidad, que se utiliza en medicina

nuclear fundamentalmente para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades tiroideas (cáncer diferenciado de tiroides e hipertiroidismo) Venencia et al., (2002); Navarro et al.,(2.011). El ^{131}I es un emisor beta-gamma con un período de semideintegración de 8.04 días; está dispuesto como yoduro de potasio (KI) o yoduro de sodio (NaI), se administra a pacientes para tratar algunas patologías relacionadas con la glándula tiroides, en dosis de 15 mCi a 30 mCi para hipertiroidismo y de 100 mCi a 300 mCi en tratamientos de cáncer de tiroides. [UNR]

En particular, en el caso de terapias con ^{131}I el paciente debe permanecer en el centro médico hasta que la actividad incorporada llegue a 33 mCi, es decir que a 1 m de distancia la tasa de dosis sea de $70 \mu\text{Sv/h}$; a esta actividad remanente se llega en tiempos de 13.4 h para el paciente que ha recibido 100 mCi, 19 h el de 150 mCi y 23 h el que ha recibido 200 mCi, de donde se concluye que del 62 % al 80 % de la actividad administrada es excretada. Cruz et al., (2.013).

Los vertidos (desechos líquidos radiactivos) que se generan en éstos casos y en una amplia gamma de servicios médicos, educativos, de investigación e industriales, con frecuencia no se gestionan plena y adecuadamente, por tanto, no garantiza la protección al medio ambiente, al público y a los trabajadores.

El almacenamiento seguro de vertidos radiactivos para su decaimiento y posterior descarga requiere una infraestructura técnica y administrativa, así como los controles de protección radiológica. Deben tenerse en cuenta una serie de factores para el almacenamiento de decaimiento de los vertidos, éstos incluyen las disposiciones administrativas y técnicas, diseño de la instalación, la evaluación de la seguridad y el programa de garantía de calidad. Aunque el almacenamiento de decaimiento puede ser aplicable para todos los tipos de residuos que contienen una amplia gama de radionucléidos, es más aplicable para aquellos con vidas medias inferiores a los 100 días. El almacenamiento para decaimiento cubre un período de tiempo adecuado para la descomposición de los residuos radiactivos y el período de recolección de residuos. Barquero et al.,(2.008); Krawczyk et al., (2.012); Barquero et al.,(2.008).

El volumen de vertidos radiactivos derivados de aplicaciones médicas y otras institucionales, en algunos casos, puede no ser regular, por ejemplo, algunos vertidos pueden surgir sólo una vez en una instalación, de una actividad de descontaminación o de un experimento de investigación, entonces, el volumen del vertido generado

puede variar desde unos pocos cm^3 hasta varios m^3 . Por esta razón, debe ser dispuesto un sistema bien estructurado para el almacenamiento de decaimiento de los vertidos y su diseño tanto para descargas de vertidos regulares como irregulares, debe tener como objetivo proporcionar una satisfactoria protección radiológica para los trabajadores, el público y el medio ambiente.[IAEA TECDOC].

En el diseño de instalaciones para el ejercicio de la Medicina Nuclear es necesario tener en cuenta que el material radiactivo administrado al paciente es eliminado a través de los fluidos corporales y las excretas. En un estudio hecho por McDonnell et al., indica que las excretas de los pacientes sometidos a tratamientos en departamentos de medicina nuclear, han sido reconocidas como el factor que más contribuye a las dosis de radiación recibidas por los trabajadores de una planta de tratamiento de aguas residuales. El trabajo de Titley et al., ha indicado que existe la posibilidad de que los trabajadores de saneamiento reciban dosis significativas de los residuos radiactivos que se descargan directamente a una planta de aguas residuales desde un sitio no nuclear y por ello, es importante tener conocimiento del destino de los vertidos de radionucléidos una vez que se descargan.

Estos residuos radiactivos deben ser controlados y en consecuencia los diferentes países basados en estudios de Impacto Radiológico establecen las tasas de vertido máximas. En algunos países se permite verter hasta 1 GBq de ^{131}I al año; en Colombia la Resolución número 180005 del 5 de enero de 2.010, tiene como objetivo establecer responsabilidades administrativas, legales y los requisitos técnicos esenciales para todas las etapas de la gestión de desechos radiactivos en Colombia, con el fin de garantizar seguridad y protección al hombre y al medio ambiente. En sus capítulos presenta la clasificación de los desechos radiactivos; tratamiento, caracterización, almacenamiento y transporte de éstos. Para el ^{131}I establece que se permiten límites de tasa de vertido del orden de 10^3 Bq/día (2.7027×10^5 mCi/día), 10^4 Bq/mes (2.7027×10^4 mCi/mes) o 10^5 Bq/año (2.7027×10^3 mCi/año), lo que implica que es necesario dejar decaer dichos residuales para dar cumplimiento a esta norma.[12]

Esta restricción obliga a implementar métodos de manejo de vertidos generados por los pacientes antes de ser vertidos a las redes de alcantarillado, además exigen la instalación de monitores o de un detector de radiación, por lo que solamente se pueden utilizar detectores de radiación que utilicen sistemas de centelleo o detectores

de estado sólido para que alcancen tal nivel de eficiencia, ya que difícilmente eso se puede conseguir con un detector gaseoso. Además, con estos últimos detectores es imposible discriminar la lectura que se genera en el sistema dependiendo de si es radiación alfa, beta, gamma, cósmica o de cual sea la fuente de radiación.

En Colombia no se ha realizado ningún estudio relacionado con el cumplimiento de éstos límite de dosis, requerido por el Ministerio de Minas y Energía, por tanto, éste trabajo se centra en buscar una alternativa para el cumplimiento de esta resolución, como es el almacenamiento de los vertidos y no su liberación a la red pública en tanto no se verifique que la liberación cumple con los niveles de descarga contemplados en la norma de manera segura y controlada. En el documento IAEA TECDOC SERIES 1714 del 2.013 se plantean estrategias que pueden ser consideradas para el tema de vertimientos, ya que, contempla diversas alternativas para su manejo sin que sea necesario el monitoreo continuo y permanente de actividades vertidas.

Adicionalmente, se analizarán y estudiarán de manera teórica las características y sensibilidad de diferentes detectores que permitan hacer una correcta medición de los límites de descarga en la práctica de medicina nuclear, específicamente en radioterapia con yodo radiactivo para el cáncer de tiroides, teniendo en cuenta datos que en general se manejan en los servicios de medicina nuclear en Colombia y que la única variante es el número de habitaciones, sin pasar por alto las dificultades que se puedan presentar al hacer las mediciones, tales como el tipo de vertido y la ubicación de la red o tanques de difícil acceso, con el fin de garantizar que no se superen los límites establecidos por la resolución.

Descripción de las aplicaciones del ^{131}I en Medicina Nuclear

2.1. ¿Qué es el Yodo?

Es un elemento que se encuentra de manera natural en la tierra y en algunos alimentos que consumimos. Es un mineral que interviene en el crecimiento físico y mental, en el funcionamiento de tejidos nerviosos y musculares, el sistema circulatorio y el metabolismo de otros nutrientes. El yodo es necesario para el metabolismo (proceso de conversión de los alimentos en energía) normal de las células. Los seres humanos necesitan el yodo para el funcionamiento normal de la tiroides y para la producción de las hormonas tiroideas.

2.2. El Yodo en el ser humano

Este elemento es un nutrimento indispensable para el ser humano, ya que permite que la glándula tiroides produzca las hormonas triyodotironina (T3) y tiroxina (T4), las cuales son necesarias para la elaboración de diversas funciones relacionadas con la utilización de nutrimentos en el cuerpo, así como esenciales para el crecimiento y el desarrollo del cerebro, entre otros tejidos.

Los trastornos en los niveles adecuados de yodo pueden desencadenar:

Por deficiencia: Hipotiroidismo, hipotermia, obesidad, la piel y el pelo se muestren secos, disminución de la tasa metabólica basal, palpitaciones cardíacas, aborto en mujeres embarazadas, deformaciones fetales, retraso mental, cretinismo y bocio.

Por exceso: Aumento de la tasa metabólica basal, apetito voraz, sed inagotable, pérdida de peso, debilidad general, intolerancia al calor, nerviosismo y trastornos cardíacos.

Funciones que desempeña el yodo: Estas son algunas de las más importantes:

- Participa en la formación de las hormonas tiroideas T4 y T3.
- Es necesario para obtener energía corporal.
- Ayuda en la absorción de hidratos de carbono.
- Mantiene en buen estado uñas, pelo, piel y dientes.
- Mejora la agilidad mental.
- Ayuda a regular y sintetizar el colesterol.
- Está presente en las fases de crecimiento y desarrollo del organismo.
- Ayuda a que nuestro organismo quemar el exceso de grasa.
- Participa en el funcionamiento de tejidos nerviosos y musculares.
- Participa en el sistema circulatorio.
- Es necesario para el correcto metabolismo de los nutrientes.

2.3. ¿Qué es el Yodo Radiactivo?

Un isótopo radiactivo es una sustancia que emite radiación. El yodo se puede transformar en dos isótopos radiactivos para usos médicos: ^{123}I y ^{131}I . Estos isótopos pueden administrarse por vía oral a pacientes en los que se sospechan afecciones tiroideas. El yodo radiactivo se concentra en el interior de las células tiroideas exactamente de la misma manera que el yodo puede ser usado para diagnosticar o tratar problemas de la tiroides como se muestra en la figura 2.1.

La radiación emitida por el yodo radiactivo puede ser inofensiva para las células tiroideas (^{123}I) o la radiación puede destruir las células tiroideas (^{131}I). El yodo radiactivo que no es concentrado por las células tiroideas es eliminado del cuerpo a través del sudor y la orina. El yodo radiactivo se puede utilizar sin problemas en

pacientes que han tenido reacciones alérgicas a los mariscos o a los agentes de rayos X con contraste, puesto que la reacción alérgica es contra el agente que contiene yodo y no contra el propio yodo. Dentro de los radioisótopos del Yodo tenemos que, el ^{123}I y el ^{131}I son usados en diagnóstico y tratamientos médicos.

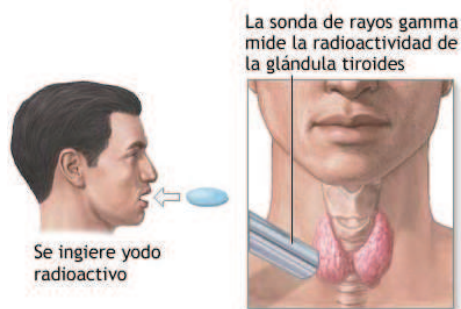


Fig. 2.1: Yodo Radiactivo.[Figura tomada de [14]]

2.3.1. ¿Cómo funciona el tratamiento?

El paciente toma una cápsula que contiene una dosis de ^{131}I , ésta entrará en su corriente sanguínea muy rápidamente y luego el ^{131}I irá a su tiroides y a cualquier sitio del cáncer tiroideo, donde será absorbido. La mayoría de lo que su tejido tiroideo no absorba se eliminará del cuerpo por medio de la orina o excretas durante las próximas 24 h a 48 h. El yodo absorbido por la tiroides o el cáncer tiroideo permanecerá en su cuerpo durante un largo tiempo. El ^{131}I en el tejido tiroideo emitirá partículas beta (partículas diminutas que emiten algunos átomos radiactivos). Las partículas beta irán a su tejido tiroideo o a los sitios del cáncer muy cerca de donde se deprenden (dentro de 1 mm aproximadamente). Éstas dañan el tejido y este daño causará que su tiroides y cualquier cáncer tiroideo mueran con el tiempo. Toma algunos meses hasta que este tratamiento tenga su efecto completo. En la Figura 2.2 se observan imágenes tomadas por una cámara de Medicina Nuclear que muestra las áreas oscuras donde el ^{131}I es absorbido por el cuerpo.

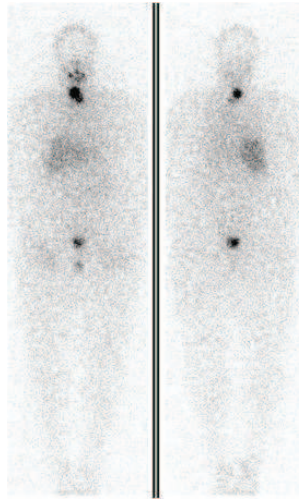


Fig. 2.2: Imágenes tomadas por una cámara especial de Medicina Nuclear que muestra las áreas oscuras donde el ^{131}I es absorbido por el cuerpo.[Figura tomada de [16]]

2.3.2. Yodo radiactivo para imágenes de la tiroides

El ^{123}I es el isótopo utilizado para tomar fotos de la tiroides (Centellograma tiroideo). Se le administra al paciente una dosis "trazadora" muy pequeña de ^{123}I , y luego el paciente regresa entre 3 h y 6 h más tarde para tomar imágenes de la tiroides con una cámara capaz de captar la radiación emitida por el yodo radiactivo. La cámara es parte de una máquina que se parece a un aparato de rayos X o de tomografía computada. Además de tomar la imagen o el centellograma, también se puede contar la cantidad de radiación emitida para determinar que tan activa está la glándula tiroides (Captación de yodo radiactivo). Como la radiación emitida por el ^{123}I es inofensiva, no se necesitan precauciones especiales después de un centellograma o un estudio de captación de yodo. La cantidad total de radiación que el paciente recibirá durante un centellograma tiroideo es menor que la que recibiría si se le hiciera una radiografía de tórax. Generalmente no hay efectos secundarios con el ^{123}I que se administra para estudios de imágenes de la tiroides.[15]

2.3.3. Yodo radiactivo para el tratamiento de los trastornos tiroideos

El ^{123}I es un isótopo radioactivo que se emplea exitosamente en el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades benignas y malignas de la tiroides. Su propiedad de integrarse selectivamente al metabolismo de la tiroides y emitir una señal le permite describir el funcionamiento glandular mediante estudios de captación, y delimitar la morfología y localización de los tejidos que capten yodo, a través de la gammagrafía.

El ^{131}I ha sido extensamente utilizado en el estudio y tratamiento de las enfermedades de la tiroides, glándula que lo capta e incorpora al metabolismo intratiroideo, de modo que su centelleo gammagráfico aporta información diagnóstica sobre la función y estructura del tejido glandular.

Es de fácil administración, no invasiva ni dolorosa, es un producto de fisión nuclear que presenta alta volatibilidad en temperatura ambiente. La forma química del Yodo que es suministrado en centros de medicina nuclear es en $^{131}\text{I}\text{Na}$ que contiene agentes reductores tales como tiosulfatos y agentes alcalinizantes como carbonato o bicarbonato, que se distribuye bajo la presentación de cápsulas y/o solución Velasco et al., (2.004).

Se considera un tratamiento seguro que ha sido empleado durante 70 años. No existe asociación del empleo del radioyodo con la aparición de defectos congénitos, de infertilidad, o con una mayor incidencia de cáncer; no obstante, existen recomendaciones que se deben considerar previo al uso de radioyodo, a fin de garantizar su efectividad e inocuidad. Dentro de los radioisótopos del Yodo tenemos que, el ^{123}I y el ^{131}I son usados en diagnóstico y tratamientos médicos[15]. En la figura 2.3 se muestra como se realiza el examen de los tejidos para obtener un diagnóstico por imágenes de la tiroides, donde el paciente se encuentra recostado en una mesa de examen móvil con la cabeza reclinada hacia atrás y el cuello extendido. La gammacámara luego tomará una serie de imágenes y capturará imágenes de la glándula tiroides desde tres ángulos diferentes.



Fig. 2.3: Diagnóstico por imágenes de la tiroides con una Gammacámara.[Figura tomada de [17]]

Específicamente el ^{131}I tiene un periodo de semidesintegración de 8.04 días, la radiación principal que emite es gamma con 364 keV (81 %) y beta con 606 keV (energía máxima). El esquema de decaimiento del ^{131}I se muestra en la Figura 2.4 y en la Tabla 2.1 se muestran las respectivas energías asociadas al esquema de decaimiento de este radionucleido.

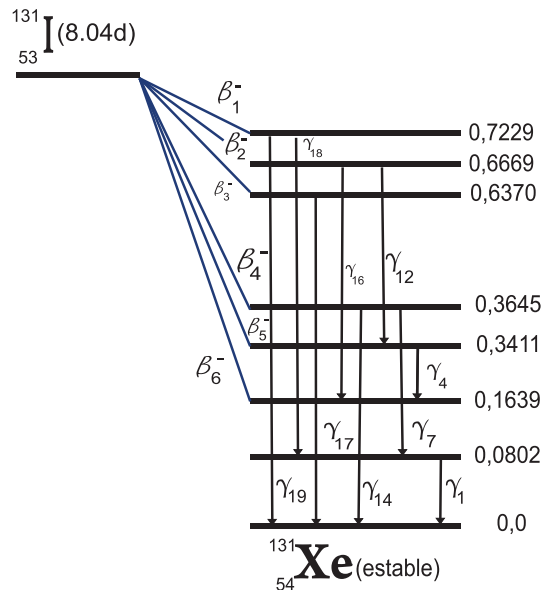


Fig. 2.4: Esquema de decaimiento del ^{131}I . Rodríguez (2.009)

${}^{131}_{53}\text{I} \rightarrow \beta^- + {}^{131}_{54}\text{Xe}$		
Vida Media (días) = 8.0400 ± 0.0024		
Energía (keV)	Emisividad (%)	Tipo de emisión
*247.900	2.100	β_1
*333.800	7.270	β_3
606.300	89.900	β_4
80.185	2.607	γ_1
284.310	6.060	γ_7
325.789	0.267	γ_{12}
364.500	81.200	γ_{14}
503.004	0.359	γ_{16}
636.990	7.260	γ_{17}
722.911	1.796	γ_{19}

Tab. 2.1: Energías asociadas al esquema de decaimiento del ${}^{131}\text{I}$. Rodríguez (2.009)

2.3.4. Tejido tiroideo normal

Se administran pequeñas dosis de ${}^{123}\text{I}$ (5 mCi - 30 mCi) para destruir tejido tiroideo hiperactivo. Con frecuencia, esto convierte una glándula tiroidea hiperactiva en una glándula tiroidea hipoactiva. Dosis de ${}^{123}\text{I}$ en el rango intermedio (25 mCi - 75 mCi) pueden utilizarse para reducir el tamaño de glándulas que están funcionando normalmente, pero que están causando problemas debido a su tamaño.[21]. Los pacientes se pueden ir a casa después del tratamiento con yodo radiactivo, aunque se les pide que tomen ciertas precauciones. Es común que los pacientes tengan algún dolor en la tiroides después del tratamiento del hipertiroidismo con ${}^{123}\text{I}$. El yodo radiactivo puede tardar varios meses en ejercer su efecto.

2.3.5. Cáncer de tiroides

Para destruir células tiroideas cancerosas se utilizan dosis altas (100 mCi - 300 mCi) de ${}^{131}\text{I}$. Si al paciente se le administra una dosis alta, es posible que se le recomiende

permanecer aislado en una habitación especial en el hospital por aproximadamente 24 h para evitar exponer a otras personas a la radiación, especialmente si hay niños pequeños viviendo con él en la misma casa. Las regulaciones que determinan si un paciente necesita permanecer aislado o puede irse a casa después del tratamiento son diferentes en los distintos estados. Como las glándulas salivales concentran débilmente el yodo radiactivo, puede haber dolor e inflamación de las glándulas salivales después de la terapia con altas dosis de ^{131}I para el cáncer de tiroides. Esto se puede prevenir o minimizar tomando unas gotas o caramelos de limón después del tratamiento. En la tabla 2.2 se presentan algunas instrucciones que deben ser tenidas en cuenta para lograr una menor exposición de radiación a otras personas.

ACCIÓN	DURACIÓN (días)
Demora en regresar al trabajo	1
Limitar el tiempo en lugares público	1
No viajar en avión o transporte público	1
No hacer un viaje en coche prolongado con otras personas	2-3
Mantener una distancia prudente de otras personas (3 pies)	2-3
Beber abundantes líquidos	2-3
No preparar alimentos para otras personas	2-3
No compartir los utensilios con otras personas	2-3
Bajar el agua 2 ó 3 veces después de usar el inodoro	2-3
Dormir en una cama separada (7 pies de separación)	5-11
Evitar el contacto prolongado con niños y mujeres embarazadas	5-11

Tab. 2.2: Instrucciones para disminuir el riesgo de exposición a otras personas después del tratamiento con ^{131}I . [15]

2.3.6. Precauciones después del tratamiento con ^{131}I

Como el ^{131}I produce radiación, los pacientes deben hacer lo posible para evitar la exposición de radiación a otras personas, particularmente a las mujeres embaraza-

das y niños pequeños. Por lo tanto, existen ciertas precauciones que los pacientes tratados con yodo radiactivo deben seguir después de su tratamiento. Estas guías cumplen con la Comisión Reguladora Nuclear y serán revisadas con los pacientes por las instituciones médicas que administran el tratamiento.

Es importante notar que la cantidad de exposición a la radiación disminuye en forma marcada a medida que aumenta la distancia de los pacientes. Los pacientes que necesitan viajar inmediatamente después del tratamiento con ^{131}I , deben llevar una carta de explicación por parte de su médico. Esto es debido a que los aparatos de detección de radiación utilizados en los aeropuertos o en los edificios federales, pueden detectar incluso niveles de radiación considerados seguros.[18]

2.3.7. Riesgos a largo plazo del Yodo radiactivo ^{131}I

En general, el yodo radiactivo es un tratamiento seguro y efectivo para los trastornos tiroideos mencionados anteriormente. Cuando se utiliza el yodo radiactivo para el tratamiento del hipertiroidismo (afección en la cual la glándula tiroides produce demasiada hormona tiroidea), es difícil evitar el desarrollo del hipotiroidismo (afección en la cual la glándula tiroides no produce suficiente hormona tiroidea). Por lo tanto, se anticipa el hipotiroidismo y se trata rápidamente con hormona tiroidea. También puede ocurrir un empeoramiento temporal del hipertiroidismo; puede haber un pequeño aumento del riesgo de desarrollar cáncer de tiroides después del tratamiento del hipertiroidismo con yodo radiactivo, aunque esto no se ha visto en todos los estudios.

Es importante saber que una vez que ha sido tratado con yodo radiactivo, el paciente todavía debe ver a su médico para controles periódicos por el resto de su vida[19][20] y además, debe tener ciertas precauciones dependiendo de si es hombre o mujer como se muestra en la tabla 2.3.

Las dosis de yodo radiactivo utilizadas para tratar el cáncer de tiroides pueden causar problemas permanentes con las glándulas salivales que pueden resultar en pérdida del sentido del gusto y sequedad de la boca. Sin embargo, se pueden tomar precauciones para prevenir esto (tales como usar caramelos de limón). También puede verse una disminución temporal o permanente en el recuento total de células

sanguíneas.

MUJERES	HOMBRES
<p>El yodo radiactivo, ya sea el ^{123}I o el ^{131}I no se debe usar nunca en mujeres embarazadas o que estén lactando. Si se administra durante el embarazo, puede dañar la glándula tiroides del bebé y éste puede aparecer en la leche materna y alcanzar al bebé. También, se debe posponer el embarazo por lo menos de 6 hasta 12 meses después del tratamiento con yodo radiactivo ^{131}I, ya que los ovarios están expuestos a la radiación después del tratamiento. Las mujeres que no han alcanzado la menopausia deben discutir con sus médicos todas estas precauciones sobre el uso del yodo radiactivo. No existe evidencia de que el yodo radiactivo conduzca a infertilidad.</p>	<p>Los hombres que reciben tratamiento con yodo radiactivo para el cáncer de tiroides pueden experimentar una reducción en el recuento de espermatozoides e infertilidad temporal hasta por un período de dos años. El médico puede discutir el almacenamiento del esperma en un "banco" con un paciente que deba recibir varias dosis de yodo radiactivo para el tratamiento del cáncer de tiroides.</p>

Tab. 2.3: Consideraciones especiales para mujeres y hombres. [21]

Interacción de la Radiación con la Materia

Cuando se habla de reacciones nucleares se hace referencia a todo tipo de interacción con los núcleos atómicos. Un tema más general, que engloba las reacciones nucleares, es el de las interacciones producidas por los fotones y partículas (agrupados bajo la denominación común de radiación) cuando inciden sobre la materia e interactúan con los núcleos o con los electrones atómicos, lo que se conoce como interacción de la radiación con la materia.

Las radiaciones que más interesan son las constituidas por neutrones y fotones (neutros eléctricamente) y las constituidas por partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, etc.). La diferenciación de ambos grupos es muy importante pues los mecanismo de interacción son completamente diferentes. Las radiaciones de neutrones y fotones, debido a la gran variedad de interacciones que producen y a su capacidad de penetración en la materia, son las de mayor interés.[23]

A continuación se hace una breve descripción de las interacciones que se presentan, teniendo en cuenta que la emisión principal del radiosótomo en estudio (^{131}I) es gamma y beta.

3.1. Interacción de partículas cargadas con la materia

Las partículas cargadas interactúan con los núcleos o los electrones orbitales del medio material mediante colisiones (choques). Estas colisiones se podrán diferenciar en colisiones elásticas cuando se mantiene constante la energía cinética del conjunto, y colisiones inelásticas cuando una parte de la energía cinética inicial se transforma en algún otro tipo de energía, por ejemplo en estados excitados del núcleo o del átomo.

Se pueden clasificar las formas de interacción según los siguientes casos:

- Colisiones elásticas con electrones atómicos.
- Colisiones inelásticas con electrones atómicos.
- Colisiones elásticas con núcleos.
- Colisiones inelásticas con núcleos.

Estos son los mecanismos básicos que determinan la forma en que interactúa una partícula cargada cuando se desplaza en un medio material. La probabilidad de que interactúe mediante uno u otro mecanismo es determinada por la energía de la partícula incidente y el medio absorbente.

La diferenciación en el tratamiento para partículas beta (electrones) y partículas cargadas más pesadas, radica en que estas últimas, por su mayor masa, interactúan preponderantemente por ionización y excitación, siendo su trayectoria prácticamente rectilínea hasta su frenamiento definitivo. Para las partículas beta, su masa pequeña hace que, por el contrario, sufran fuertes aceleraciones convirtiendo su trayectoria en un recorrido tortuoso, siendo significativas las pérdidas de energía por radiación.

Del estudio de la interacción de partículas cargadas, se infieren tres parámetros principales: alcance, poder de frenado y relación alcance-energía.[24]

3.1.1. Interacción de partículas beta

Las partículas beta negativas o positivas, de origen nuclear, tienen velocidades que pueden llegar a ser cercanas a la velocidad de la luz. Pese a ello sus energías son

menores, en general, a las de las partículas alfa, ya que en su mayoría no alcanzan los 4 MeV. Estas velocidades obligan a tratar a la radiación beta en forma relativista.

Las partículas beta son mucho más penetrantes que las alfa, lo que hace necesario el empleo de métodos muy distintos para las mediciones de absorción. Para tener una idea comparativa, una partícula alfa de 3 MeV tiene un alcance en aire de 2,8 cm y produce alrededor de 4000 pares iónicos por milímetro de recorrido, mientras que una partícula beta de igual energía tiene un alcance en aire de más de 100 cm y sólo produce 4 pares iónicos por milímetro.

Son varios los procesos de interacción por los cuales electrones de alta energía pueden interactuar con la materia al atravesarla, los más importantes son:

- **Frenamiento radiactivo:** Cuando un electrón colisiona con un núcleo atómico por interacción coulombiana se pueden producir bruscas aceleraciones, y de acuerdo con las leyes de la electrodinámica, estas aceleraciones darán lugar a la emisión de radiación electromagnética de espectro continuo. Dado que las mayores aceleraciones ocurren sobre electrones energéticos atravesando el campo eléctrico de núcleos con carga elevadas, el frenamiento radiactivo es el proceso más importante en interacción con elementos de Z (número de protones o electrones) alto.
- **Dispersión elástica** Un electrón puede ser dispersado elásticamente en el campo coulombiano de un átomo. Como el átomo es mucho más pesado que el electrón, no hay prácticamente transferencia de energía, si bien puede tener lugar un cambio significativo en la dirección. El efecto es importante por hacer que la trayectoria efectiva se acorte al ser tortuoso el camino de frenado.
- **Dispersión inelástica (ionización y excitación)** El electrón en su desplazamiento puede excitar o ionizar los átomos del material que atraviesa por acción coulombiana. Por este medio, la energía es depositada en el material a lo largo de la trayectoria. Este es el proceso dominante de pérdida de energía por debajo de los límites para el frenamiento por radiación.

Las probabilidades relativas para la interacción por algunos de estos tres procesos

varían con gran dependencia de la energía del electrón incidente y en menor medida, con la naturaleza del medio absorbente.[24]

3.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

La radiación electromagnética que nos interesa desde el punto de vista de su interacción con la materia, es básicamente la radiación γ y los rayos X y su atenuación es cualitativamente diferente a la de las partículas cargadas; mientras que en éstas los alcances están bien definidos en función de la energía y del medio absorbente, la radiación electromagnética sólo puede ser reducida en intensidad aumentando el espesor absorbente interpuesto. El paso de la radiación electromagnética por la materia se caracteriza por una ley de absorción exponencial:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

donde, $I(x)$ es la intensidad de la radiación que es función del espesor absorbente x , I_0 es la intensidad incidente y μ es el denominado coeficiente de atenuación.

Los fotones que componen el haz sufren choques efectivos mucho menos frecuentes que las partículas y son absorbidos por los átomos al arrancar electrones o son dispersados cuando ceden energía a los electrones atómicos. Para los fotones se puede hablar de camino libre medio recorrido por el fotón antes de ser absorbido o dispersado. Este valor corresponde a la distancia media que alcanza antes de desaparecer por algunos de los mecanismos mencionados. Este camino libre medio es igual al espesor para el cual la intensidad del haz se reduce a $1/e$ de su valor inicial.

Una magnitud de uso común, para expresar la atenuación de un haz de radiación γ , es el semiespesor, o sea, el ancho del absorbente necesario para reducir la intensidad incidente a la mitad.

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x \quad (3.2)$$

y haciendo $I/I_0 = 1/2$, queda $\mu = 0,693/x_{1/2}$, donde $x_{1/2}$ es el semiespesor.

De la ecuación anterior surge que el coeficiente de absorción másico es:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{0,693}{(x_{1/2})\rho} \quad (3.3)$$

puesto que μ/ρ varia muy lentamente con Z , la variación $(x_{1/2})\rho$ de un elemento a otro también es lenta. O sea, cuanto mayor es la densidad de un material, menor es el espesor necesario para producir una absorción dada de la radiación. Es por ello que como absorbente suele usarse materiales pesados.

Existen tres mecanismos principales de absorción de los rayos γ por la materia.

- Efecto fotoeléctrico.
- Dispersión Compton
- Producción de pares.

En cuanto a la dependencia de la importancia relativa de los distintos procesos con el material (para una energía fija) el efecto fotoeléctrico es más importante a bajas energías. Si la energía del fotón está en el intervalo en el que se lleva a cabo la producción de pares, dicho proceso también aumenta su importancia al incrementar el número atómico, es decir, cuanto mas pesado sea el material más importantes son el efecto fotoeléctrico y la producción de pares y menos el efecto Compton. La Figura 3.1 muestra las regiones de dominio de los tres procesos principales en función del número atómico del material y la energía del fotón.

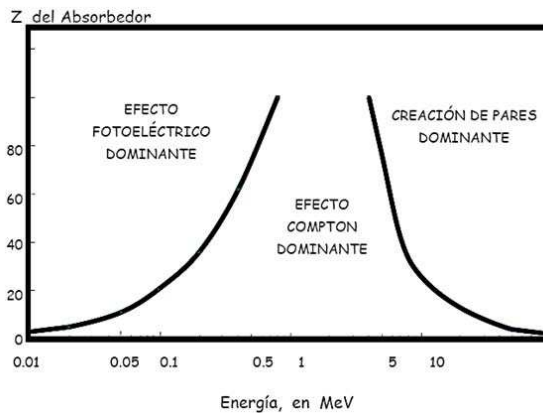


Fig. 3.1: Regiones de dominio de los tres procesos principales de interacción.[23]

3.1.3. Efecto Fotoeléctrico

Este proceso de interacción ocurre cuando el fotón incidente tiene una energía ($h\nu$) mayor que la energía de enlace (E_b) del electrón. El fotón incidente interactúa con un electrón de las capas internas (por lo general, las interacciones tienen lugar con electrones de la capa K o L que corresponden a las más próximas al núcleo del átomo y sus energías de unión son mayores). El electrón de la capa interna absorbe toda la energía del fotón "desapareciendo el fotón" y expulsando el electrón con un exceso de energía cinética, $E_c = h\nu - E_b$. [24]

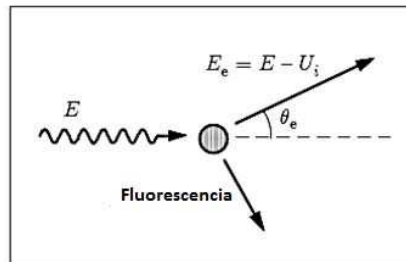


Fig. 3.2: Efecto fotoeléctrico Salvat et al.,(2006)

El fotoelectrón expulsado viajará a través de la materia creando a su paso pares de iones de otros átomos hasta ceder toda su energía; el fotoelectrón ya en reposo es incorporado a un ion positivo, mientras tanto el átomo blanco original ha quedado con una vacancia en su capa interna; por lo que un electrón de las capas externas rápidamente ocupará la vacancia dejando a su vez una vacancia en su capa correspondiente y emitiendo su exceso de energía en forma de un fotón característico. El efecto fotoeléctrico presenta una fuerte dependencia con el número atómico que se manifiesta en su coeficiente de atenuación. Éste coeficiente es proporcional a Z^3 e inversamente proporcional a $(h\nu)$.

3.1.4. Efecto Compton

Esta dispersión se considera como una colisión elástica entre el fotón incidente y un electrón atómico, el que se supone libre por ser la energía del fotón mucho mayor que la de unión del electrón.

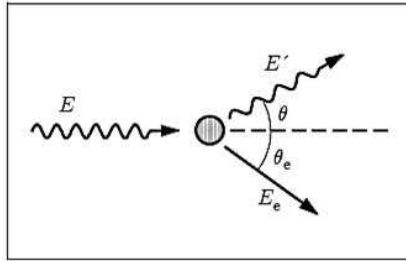


Fig. 3.3: Dispersión Compton. Salvat et al., (2006)

El resultado es la desaparición del fotón (E) y la aparición del otro fotón de energía (E') menor, acompañado de un electrón cuya energía cinética es aproximadamente la diferencia $E - E'$. Este proceso se muestra esquemáticamente en la Figura 3.3. Este mecanismo de interacción prevalece, en general, para fotones cuyas energías están comprendidas entre 0,5 MeV y 10 MeV.

Cada electrón en el medio absorbente actúa como un centro dispersor por lo que las características macroscópicas del medio dependen principalmente de la densidad electrónica por unidad de masa.

3.1.5. Producción de Pares

Este es el tercer mecanismo de interacción de la radiación electromagnética por la materia aparece cuando la energía de los fotones incidentes alcanza al doble de la energía en reposo de los electrones, o sea cuando:

$$h\nu = 2 \times 0,511\text{MeV} = 1,022\text{MeV} \quad (3.4)$$

Creciendo a partir de allí su importancia con el aumento de la energía de la radiación gamma. Consiste en la creación de un par electrón-positrón a partir de un fotón que desaparece en la interacción. Este proceso debe tener lugar en el campo eléctrico existente en la vecindad de un núcleo al que se le entrega cierta energía de retroceso y cierta cantidad de movimiento de forma tal que se cumplan los respectivos principios de conservación.

El coeficiente de atenuación es proporcional al cuadrado del número atómico (Z^2), lo que hace que para fotones de cierta energía la formación de pares aumenta rápidamente con el número atómico. O sea, este proceso tiene importancia a energías elevadas y con elementos pesados. Cuando $E_\gamma = 4,75$ MeV la contribución de la formación de la contribución de pares y del efecto Compton al coeficiente total de absorción μ se iguala. A partir de allí el primer mecanismo predomina.

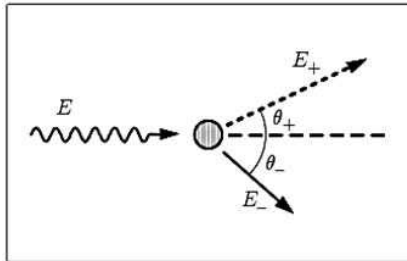


Fig. 3.4: Producción de pares. Salvat et al.,(2006)

La creación de pares está estrechamente ligada con la aniquilación electrón-positrón. Cuando este último es creado va perdiendo velocidad por colisiones sucesivas con los átomos hasta quedar prácticamente en reposo. En ese momento puede interactuar con un electrón que se encuentra en el mismo estado desapareciendo ambas partículas y dando lugar a dos fotones, cada uno de 0,511 MeV, que se mueven en direcciones opuestas. Esta radiación secundaria, llamada radiación de aniquilamiento, acompaña normalmente la absorción de rayos gamma por la materia.

3.1.6. Desintegración Radiactiva

En la naturaleza existen elementos inestables que para alcanzar su equilibrio energético necesitan emitir en forma espontánea partículas o alguna clase de radiación, modificando de esta forma el estado de sus núcleos. Esta emisión se denomina desintegración radiactiva y el fenómeno que se produce es conocido como radiactividad.

La desintegración radiactiva es azarosa y tiene una constante de desintegración (λ) que depende de cada núcleo, ajustándose de esta manera a las leyes estadísticas.

Esta constante de desintegración es la probabilidad de que un núcleo desintegre en la unidad de tiempo y se denota con la letra λ , siendo su unidad la inversa del tiempo,

seg^{-1} , min^{-1} o $año^{-1}$. Existen tres tipos de desintegración: desintegración alfa, desintegración beta y desintegración gamma, teniendo en cuenta las características del radionucleido en interés para el desarrollo de éste trabajo, estudiaremos sólo los dos últimos.

- **Desintegración beta:** La desintegración beta puede ser de dos tipos, negativa o positiva. Las partículas beta negativas (β^-) son electrones que se generan en el núcleo y poseen mayor velocidad que los electrones orbitales. La generación de éstos electrones sigue el mismo mecanismo de transformación de un neutrón en un protón (p^+) más una partícula beta y una partícula sin carga, de masa despreciable, llamada antineutrino ($\bar{\nu}$), como se muestra a continuación en la ecuación (3.6) y se observa en la figura 3.5.

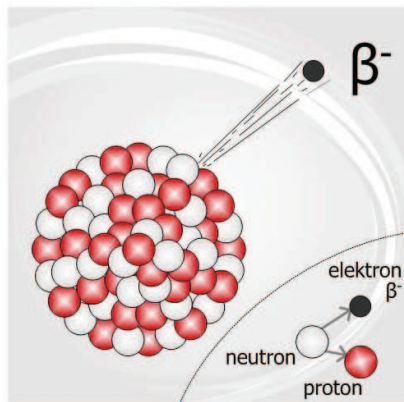


Fig. 3.5: Desintegración β^- . [Figura tomada de [26]].

La desintegración beta negativa se puede representar así:



El lado izquierdo de la ecuación corresponde al nucleido madre y el izquierdo al nucleido hijo.

La emisión beta presenta un espectro de energías que van desde cero hasta un valor máximo, el cual corresponde al valor máximo de la energía que aparece en tablas.

Esto significa que el electrón proveniente del núcleo que se está desintegrando puede adquirir cualquier energía entre cero y su máximo, ya que la energía total involucrada en la desintegración es repartida entre él y el antineutrino (hay energía cinética del núcleo, pero es despreciable). Como consecuencia de todo esto, si se observa un espectro beta se verá que la forma del espectro no presenta picos definidos.

- **Emisión gamma:** La radiación gamma es una radiación electromagnética del mismo tipo que la luz, pero de menor longitud de onda. A diferencia de la radiación alfa o beta, no se desvía en un campo magnético indicando que sus partículas no poseen carga eléctrica y además, no hay variación del número másico A , ni del número atómico Z del núcleo que emite esta radiación gamma.[24] Esta radiación habitualmente acompaña a algunos procesos de desintegración radiactiva en la que el núcleo queda en un estado excitado.

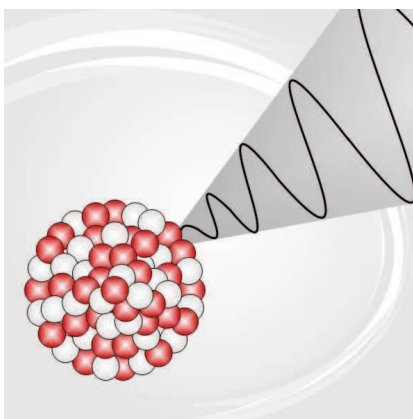


Fig. 3.6: Emisión Gamma. [Figura tomada de [26]].

3.2. Decaimiento Radiactivo

Si consideramos el decaimiento radiactivo de un elemento dado, de tal manera que en el instante $t = t_0$ observamos que hay $N_0 = N(t)$, veremos que en un intervalo

de tiempo Δt a partir de t_0 , se habrán producido algunas desintegraciones, de tal manera que ya no tendremos N_0 núcleos del elemento observado sino un número menor $N(t)$.

La diferencia ΔN entre $N(t_0)$ y $N(t)$ es el número de núcleos que se han desintegrado. Ésta diferencia ΔN es un número negativo, por lo tanto $-\Delta N$ han sido las desintegraciones ocurridas en el lapso Δt .

Cuando se habla de desintegración radiactiva se menciona una constante propia de cada especie que se denota con la letra λ y corresponde a la probabilidad de que un núcleo se desintegre en el tiempo. De ésta forma para calcular la probabilidad de desintegración en el intervalo Δt sabiendo que λ tiene unidades de tiempo⁻¹ sólo tenemos que multiplicar:

$$\lambda \cdot \Delta t \tag{3.8}$$

Por otro lado la misma probabilidad expresada matemáticamente es:

$$\frac{N^0 \text{ de casos favorables}}{N^0 \text{ de casos posibles}} \tag{3.9}$$

El numerador es $-\Delta N$ porque son efectivamente las desintegraciones que se produjeron en Δt y el denominador es N_0 porque cualquiera de los N_0 núcleos presentes a t_0 tenían igual probabilidad de desintegrarse. Entonces la probabilidad es:

$$P = \frac{-\Delta N}{N_0} \tag{3.10}$$

Al igualar las ecuaciones (3.8) y (3.10) se obtiene:

$$-\frac{\lambda N}{N_0} = \lambda \cdot \Delta t \tag{3.11}$$

A partir de ésta ecuación, haciendo algunas operaciones matemáticas de llega a:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \tag{3.12}$$

Esta expresión nos permite calcular el número de núcleos de una sustancia activa presentes en el tiempo t conociendo cuantos había en el instante t_0 .

3.3. Semiperiodo de desintegración

Es definido como el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos que se encontraban presentes en t_0 se reduzca a la mitad. El semiperiodo es otra variable asociada a la velocidad de desintegración. Reemplazando en la ecuación (3.12), $t = T$, podemos hallar su relación con λ :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3.13)$$

El T puede tener varios valores que van desde microsegundos, hasta millones de años.

3.4. Actividad

Usualmente para expresar la velocidad de decaimiento se define la Actividad, que es la variación del número de núcleos por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo $\frac{\lambda N}{\lambda t}$ que es igual a $-\lambda.N$. Entonces:

$$A = -\lambda.N \quad (3.14)$$

Multiplicando la ecuación (3.12) por λ en ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\lambda.N_t = \lambda.N_0.e^{-\lambda t} \quad (3.15)$$

que es lo mismo que:

$$A_t = A_0.e^{-\lambda t} \quad (3.16)$$

donde A_t es la actividad presente en el tiempo t y A_0 la actividad inicial a $t = t_0$. La actividad de una sustancia radiactiva puede medirse en Curies (Ci) o Becquerel (Bq).

Detectores

Existen una serie de procedimientos y aparatos que sirven para detectar, medir y analizar las radiaciones nucleares. Para ello se aprovechan diversos efectos que produce la radiación al atravesar la materia.

Los principales efectos son:

- Ionización (tanto en gases como en semiconductores)
- Excitación de luminiscencia
- Disociación de la materia (placas fotográficas)

Dentro de los detectores se suele distinguir entre sencillos contadores de partículas o fotones que alcanzan el dispositivo, y espectrómetros que son capaces de medir la energía de la radiación incidente. Para la protección radiológica es más importante conocer la dosis, o cantidad de energía depositada por la radiación en el organismo, que el tipo de radiación recibida. Los que realizan esta función se llaman dosímetros.[27]

El funcionamiento básico según el efecto producido será:

Ionización

Cuando una radiación nuclear atraviesa un gas o un material semiconductor provoca la ionización de parte de sus átomos, y por consiguiente, la liberación de iones positivos y electrones. Por lo que el material que se comportaba como un aislante

eléctrico pasa a ser parcialmente conductor. Midiendo la corriente eléctrica que por él circula puede deducirse la intensidad de la radiación que lo atraviesa, actuando así como dosímetro. Si lo que tenemos a la salida del detector es un impulso de corriente (obtenido con la electrónica apropiada) se podrán contar, trabajando en régimen de contador. En muchos casos este impulso es proporcional a la energía depositada, por lo que se trataría de un espectrómetro. Éste es el proceso más frecuente utilizado en los detectores.

Excitación de luminiscencia

En algunos sólidos (sustancias luminiscentes) al paso de la radiación ionizante se produce la excitación de parte de sus átomos, que al desexcitarse emiten fotones luminosos; éstos son recogidos por un fotomultiplicador que a la salida entrega un impulso de corriente. Mediante una electrónica apropiada este impulso proporciona información sobre la energía de la radiación ionizante, por lo que se puede hacer espectroscopía.

Disociación

En algunos casos el fenómeno producido es la disociación de algunas moléculas (por ejemplo, sales de plata). Midiendo el ennegrecimiento producido en las placas fotográficas por la disociación, se puede deducir la dosis de radiación que ha alcanzado a la película fotográfica. Para detectar neutrones (partículas sin carga) se utilizan detectores similares a los anteriores, pero con algún material añadido que reaccione con ellos (por ejemplo B ó Cd).

4.1. Características intrínsecas de los detectores

Eficiencia: Relación entre las partículas registradas y las que llegan al detector.

$$\epsilon = \frac{n}{N} \quad (4.1)$$

Tiempo de resolución o tiempo muerto: Tiempo durante el cual el detector no es capaz de contar, después de haber llegado una partícula.

Resolución: Es la anchura o semialtura de una línea con relación a la energía.

$$R = \frac{F.W.H.M}{E_0} \quad (4.2)$$

Linealidad: La relación entre la energía disipada por un suceso ionizante E y el tamaño del impulso de tensión correspondiente V .

$$E = aV + b \quad (4.3)$$

Las dos últimas se refieren únicamente a los espectrómetros.[27]

Los detectores de radiaciones ionizantes pueden clasificarse en detectores “inmediatos” o “retardados”, según que la información suministrada al observador sea instantánea o diferida con respecto al momento en que se procede a la detección. También, pueden clasificarse en detectores por “ionización” o por “excitación”, según el tipo de fenómeno físico involucrado en el proceso de conversión de la energía del campo en una señal inteligible.[28]

En la tabla 4.1 se muestran los detectores más utilizados de acuerdo a la clasificación mencionada.

	<i>Inmediatos</i>		<i>Retardados</i>	
	<i>Por ionización</i>	<i>Por excitación</i>	<i>Por ionización</i>	<i>Por excitación</i>
TIPO DE DETECTOR	Gaseosos y Semiconductores	de centelleo	de película fotográfica	termoluminiscentes

Tab. 4.1: Detectores de Radiación Ionizante.[28]

4.1.1. Detectores de Estado Sólido

Cuando se habla de detectores de estado sólido se suele referir a detectores basados en las propiedades semiconductoras de los cristales de Si y Ge. Su principio de operación es similar al de los contadores gaseosos, salvo que ahora se crean pares (electrón - hueco) en vez de pares e^{-1} - ión. Son buenos detectores de partículas

cargadas y partículas γ . En efecto, el parámetro más importante que caracteriza las propiedades de los semiconductores como detectores de partículas es la energía necesaria para producir un par e^{-1} - hueco: Si = 3,62 eV para el Si (a 300K) y es aún menor para el Ge = 2,96 eV (a 77K).

La propiedad física que caracteriza los semiconductores es su estructura de bandas de valencia y conducción, que los distingue claramente de los conductores y de los aislantes. Los conductores poseen electrones en la banda de conducción y si se aplica un campo eléctrico siempre hay una corriente eléctrica. En los aislantes sucede lo contrario, nunca hay electrones en la banda de conducción ya que se encuentra a un nivel imposible de alcanzar (la diferencia energética entre la banda de valencia y la de conducción, llamada energía del *gap* E_g , es de unos 10eV). Entre estas dos situaciones se encuentran los semiconductores. Su especial estructura de bandas (con energía del *gap* $E_g \sim 1\text{eV}$) posibilita que, en función de la temperatura pueda haber electrones que puedan “saltar” a la banda de conducción. Sucede que el electrón al saltar a la banda de conducción deja un “hueco” en la banda de valencia, que también tendrá un protagonismo.

Otra característica importante de los semiconductores más utilizados, el Si y el Ge es su alta densidad (2,33 y 5,33 gr/cm³ respectivamente) y su elevado número atómico ($Z=14$ y $Z=32$ respectivamente) que les dotan de aptitudes adecuadas para ser buenos detectores de fotones y de partículas de baja energía.[29]



Fig. 4.1: Banda de conducción y banda de valencia.[Figura tomada de [28]]

Para un dado cristal, la distancia interatómica d es constante y las bandas se pueden

representar de la manera indicada en la Figura 4.1. Entre las bandas permitidas (bp) existen las denominadas bandas prohibidas (bph) o sea, niveles de energía que los electrones de los átomos del cristal no pueden ocupar.

Los niveles más altos se desdoblán antes que los más bajos, pues los primeros son los de mayor energía, que a su vez son los correspondientes a los electrones de las órbitas más alejadas. Una banda permitida (bp) puede estar totalmente llena, totalmente vacía o parcialmente llena.

La banda llena de mayor energía se denomina banda de valencia (bv), pues sus niveles son los de los electrones de valencia. La primera banda vacía se denomina banda de conducción (bc). Los electrones que pueden eventualmente ocuparla, bajo la acción de un campo eléctrico, constituyen una corriente eléctrica. La banda prohibida (bph) que separa la bv de la bc tiene un ancho E que es la energía de activación o sea, la mínima energía que un electrón necesita para saltar de la banda de valencia a la de conducción.[29]

Sobre la base de los conceptos anteriores puede mencionarse la diferencia entre conductores, semiconductores y aisladores.

- Un conductor es todo cristal en el cual la (bv) y la (bc) se superponen parcialmente, por lo que los electrones que originalmente estaban en la (bv) pasan muy fácilmente a la (bc) con muy pequeña energía de activación. En consecuencia, a temperatura ambiente son muchísimos los electrones que están en la (bc), que a su vez se encuentra parcialmente llena, y así el cristal conduce muy fácilmente la corriente eléctrica.
- Los semiconductores son cristales en los cuales la energía de activación es aproximadamente 1 eV.
- Los aisladores son cristales en los cuales la energía de activación es aproximadamente 6 eV.

4.1.2. Detectores de Centelleo

Se basan en luminiscencia al desexcitarse los átomos, después de haber sido excitados por el paso de las partículas cargadas. Este mecanismo es complejo y diferente para materiales orgánicos e inorgánicos. En los primeros, es la desexcitación de los estados moleculares la que produce radiación ultravioleta. En los segundos, la captura de electrones por impurezas producen emisión de luz al desexcitarse.

Cuando una partícula ionizante incide en un material, puede interactuar de acuerdo al mecanismo que corresponda al tipo de partículas, a su energía y al material de que se trate, produciendo partículas cargadas que se mueven en su interior. En ciertos materiales, denominados **centelladores**, pequeña fracción de la energía cinética de las partículas secundarias es convertida en energía luminosa; el resto se transfiere al medio como calor o como vibraciones de su red cristalina. La fracción de la energía que se convierte en luz depende, para un dado centellador, de la naturaleza de la partícula y de su energía. En algunos casos, la eficiencia puede ser independiente de la energía de la partícula, permitiendo una proporcionalidad directa entre la intensidad del impulso luminoso y la energía.[28] En la figura 4.2, se ilustra el esquema con las partes de un detector de centelleo.

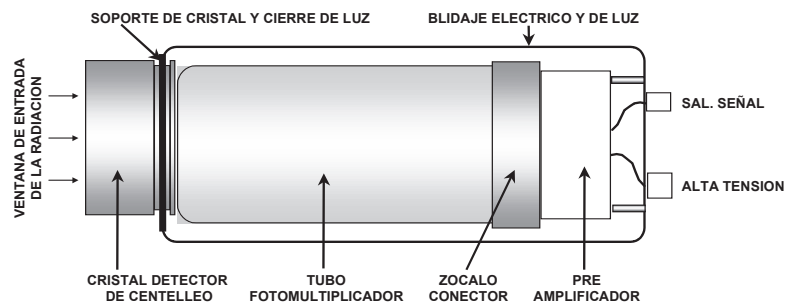


Fig. 4.2: Esquema de un detector de centelleo. [Figura tomada de [28]]

Se distinguen dos tipos de emisión de luz: fluorescencia y fosforescencia.

Características Generales: Ofrecen una respuesta rápida, son sensibles a la energía depositada y son capaces de identificar el tipo de partícula por el tipo de pulso producido.

Se exige de ellos una gran eficiencia de emisión de luz, transparencia a la radiación fluorescente y espectro de emisión similar al de los fotomultiplicadores.

Un material centellador ideal presenta las siguientes propiedades:

- Convierte la energía cinética de las partículas cargadas en energía luminosa con alta eficiencia de centelleo.
- Tal conversión es lineal; la energía luminosa es proporcional a la energía impartida al centellador en un amplio rango de energías.
- Es “transparente” a la longitud de onda que él mismo emite por desexcitación.
- El tiempo de decaimiento de los impulsos luminosos es corto, de manera que las señales generadas son rápidas.
- Posibilita construir detectores de dimensiones adecuadas a la aplicación prevista.
- Su índice de refracción es muy parecido al del vidrio, lo que permite un acoplamiento óptico eficiente con el dispositivo transductor, cuya función es transformar a su vez los impulsos luminosos en señales eléctricas.

Ningún material cumple todas las propiedades enunciadas, por lo que la elección de un centellador en particular resulta una solución de compromiso según la aplicación de que se trate. Los centelladores más utilizados son inorgánicos u orgánicos, cristales, plásticos o líquidos.

4.2. Descripción de instrumentos nucleares usados para medición de límites de descarga

Teniendo en cuenta la física sobre detectores mencionada anteriormente, se hará una descripción de los cuatro equipos que se estudiarán en éste trabajo, de los cuales se presenta una breve descripción de sus características debido a que es información comercial limitada por las empresas que los fabrican y proveen.

4.2.1. Monitor liquido gamma LM211S (off-line)

El LM 211S hace parte de la línea de productos RAMSYS, ha sido desarrollado para muestra de líquidos de una tubería, un tanque o una piscina. Un detector de centelleo de 1 1/4" x 1" NaI frente a una muestra líquida dentro de un blindaje de plomo (4π) para el monitoreo de los isótopos emisores de radiación gamma. Una fuente radiactiva incorporada en el cristal de NaI, permite la compensación del potencial de deriva, siempre y cuando se producen cambios de temperatura. La capacidad (potencial) de espectrometría, basado en un análisis de espectro de 1024 canales, permite la fácil e inmediata identificación del radioisótopo en caso de alarma.



Fig. 4.3: Monitor liquido gamma LM211S. [Figura tomada de [30]]

Aplicaciones:

- Monitoreo del vertido liberado.
- Monitoreo de procesos operacionales.

Características:

- Espectro de energía y compensación por cambios de temperatura.
- Disponible con o sin pantalla o señalización local.
- Disponible bajo 10 CFR 50 App.B, ASME NQA-1 e IEC 61226 programas para aplicaciones de seguridad.

Características físicas:

- Detecta radiación gamma.

- Detector: Centelleo 1 1/4" × 1" + Fuente PMT
- Blindaje de plomo: $4\pi/5$ cm ($4\pi/2$ in)
- Rango de Energía: 100 keV hasta 2.2 MeV.
- Rango de Medida: 3.7×10^3 Bq/m³ hasta 3.7×10^9 Bq/m³ (10^{-7} hasta 10^{-1} μ Ci/cc).

Características ambientales:

- Temperatura a largo plazo: +10°C hasta +40°C (+50°F hasta +104°F).
- Temperatura periódica: -5°C hasta +55°C (+23°F hasta +131°F).
- MTBF: > 20.000 horas, con mantenimiento preventivo.
- TID (Unidad de procesamiento): 100 Gy (10^4 rad).
- TID (Detector): 10^3 (10^5 rad).

Características mecánicas:

- Dimensiones: 1303 mm × 750 mm × 675 mm (51.3 in × 29.5 in × 26.6 in)
- Peso: ~ 410 kg (~ 903 lb)
- Color: gris RAL 7030 (pintura descontaminable)

4.2.2. Monitor liquido gamma LM212S (off-line)

El LM 212S hace parte de la línea de productos RAMSYS, ha sido desarrollado para muestra de líquidos de una tubería, un tanque o una piscina. Un detector de centelleo de 1 1/4" x 1" NaI frente a una muestra líquida dentro de un blindaje de plomo (4π) para monitoreo de los isótopos emisores de radiación gamma. Una fuente radiactiva de ²⁴¹Am incorporada en el cristal de NaI, permite la compensación del potencial de deriva, siempre y cuando se produzcan cambios de temperatura. La capacidad (potencial) de espectrometría, basado en un análisis de espectro de 1024 canales, permite la fácil e inmediata identificación del radioisótopo en caso de alarma.



Fig. 4.4: Monitor liquido gamma LM212S. [Figura tomada de [31]]

Aplicaciones:

- Monitoreo del vertido liberado.
- Monitoreo de procesos operacionales.

Características:

- Espectro de energía y compensación por cambios de temperatura.
- Disponible con o sin pantalla o señalización local.
- Sísmicamente calificado.
- La cubierta de la bisagra montada del blindaje de plomo, facilita el mantenimiento en el detector.
- Disponible bajo los programas 10 CFR App.B ASME NQA-1 y IEC61226, para aplicaciones de seguridad.

Características físicas:

- Detecta radiación gamma.
- Detector: Centelleo 1 1/4" x 1 + Fuente PMT con ^{241}Am .
- Blindaje de plomo: 4π/10 cm (4π/4 in)
- Rango de Energía: 100 keV hasta 2.2 MeV.
- Rango de Medida: $3.7 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ hasta $3.7 \times 10^9 \text{ Bq/m}^3$ (10^{-7} hasta 10^{-1})

$\mu\text{Ci/cc}$).

Características ambientales:

- Temperatura a largo plazo: $+10^{\circ}\text{C}$ hasta $+40^{\circ}\text{C}$ ($+50^{\circ}\text{F}$ hasta $+104^{\circ}\text{F}$).
- Temperatura periódica: -5°C hasta $+55^{\circ}\text{C}$ ($+23^{\circ}\text{F}$ hasta $+131^{\circ}\text{F}$).
- MTBF: > 20.000 horas, con mantenimiento preventivo.
- TID (Unidad de procesamiento): 100 Gy (10^4rad).
- TID (Detector): 1.5×10^4 ($1.5 \times 10^6\text{rad}$).

Características mecánicas:

- Dimensiones: $1303 \text{ mm} \times 750 \text{ mm} \times 675 \text{ mm}$ ($51.3 \text{ in} \times 29.5 \text{ in} \times 26.6 \text{ in}$)
- Peso: $\sim 800 \text{ kg}$ ($\sim 1763 \text{ lb}$)
- Color: gris RAL 7030 (pintura descontaminable)

4.2.3. Monitor de vertido líquido serie LEM

Los monitores de la serie LEM permiten mediciones fuera de línea (off-line) actividad volumétrica gamma de líquidos con actividades detectables mínimas muy bajas. Esto es apropiado para la medición de espectrometría y vertidos líquidos procedentes de instalaciones de fuentes nucleares. Los monitores LEM pueden ser empleados como parte de sistemas de monitores extensos (seguimiento central) o como un monitor autónomo, se presentan los resultados en el lugar de medición o también con una pantalla remota (como un control remoto, se puede manipular a distancia) de los resultados medidos.

Principales Ventajas:

- Sistema optimizado de seguimiento y notificación de vertidos
- Detecta actividad mínima o muy baja cuando se utiliza el detector HPGe
- El sistema combina tanto la cadena de medición y el sistema de control automático (que puede reemplazar el sistema de medición del volumen de líquido que fluye).
- La simplicidad del sistema permite al usuario configurar el monitor de un tipo,

teniendo en cuenta lo utilizado anteriormente para otro detector pero ahora con un sistema modernizado.

- El sistema está preparado para la integración con el sistema de LES para la recolección de muestras estándar y muestras cuando superen condiciones anormales.



Fig. 4.5: Monitor de vertido liquido serie LEM. [Figura tomada de [32]]

Descripción: El monitor de vertidos líquidos LEM consta de las siguientes partes principales:

- Cámara de medición con blindaje (capa protectora) variable.
- Detector de espectrometría ($\text{NaI}(\text{Tl})$, LaBr_3 o HPGe).
- Sistema para evaluación de los datos medidos con un analizador multicanal (como 64.000 canales) y soportes electrónico.
- Unidad de control con pantalla.
- Sistema de control automático de válvulas, elementos de medición estándar y otros accesorios.

El detector se encuentra en un contenedor de medición blindado donde es liberado al medio dentro del sistema de válvula de tal manera que se asegura una mezcla uniforme donde se previene el depósito de sedimentos y desechos. La información del detector es analizada utilizando el analizador multicanal y procesado empleando la unidad de evaluación. La unidad de control del monitor LEM permite:

- Comparación del valor medido con niveles de alarma.

- Mediciones de fondo automáticos a intervalos pre-establecidos.
- Calibración del monitor empleando una fuente sellada de radiación ionizante.
- Llenado de la cámara de medición con la solución de calibración.
- Monitoreo de vertidos y control de hasta dos bombas de entrada.
- Monitoreo de control de flujo, presión y temperatura.
- Transferencia de datos en el sistema receptor (portador).

Las medidas son evaluadas en el modo normal y de emergencia. Hay intervalos de tiempo de medición establecidos para fases individuales. La medición del valor de la actividad de salida está en unidades Bq/l. Durante la medición, la temperatura del líquido que fluye a través del dispositivo también se registra utilizando un termómetro situado en un recipiente en la cámara de medición. Los datos medidos se almacenan en una unidad en forma de hora, día y actas resumidas.

Volumen del recipiente de medición	aprox 16 l (0.565 ft ³)
Velocidad de flujo medio	30 ~ 100 l/min (1 ~ 3.5 cfm)
Rango de temperatura de trabajo medio	5 ~ 25°C (41 ~ 77°F)
Peso estándar con blindaje	864 kg (1905 lb)
Dimensiones	700×1500×1100 mm(28×60×44in)
Blindaje estándar(Pb)	50mm (2in)
Fuente de alimentación	230V/50Hz
Rango de temperatura ambiente	5~50°C(41~122°F)

Especificaciones del detector:

	NaI(Tl)	HPGe	LaBr ₃
Dimensiones del detector	3×3"	3"	2×2"
Rango de Energía	50keV ~ 3MeV	30keV ~ 3MeV	50keV ~ 3MeV
<i>MDA</i> ²	4Bq/l	0.5 Bq/l	N/A

4.2.4. Monitor de vertidos líquidos 940-2 (off-line)

El monitor de vertidos líquidos 940-2 (off-line) garantiza que los materiales radiactivos dentro de los vertidos no excedan las concentraciones máximas permitidas

(MPC), protegiendo al personal frente a la posibilidad de excesiva exposición a la radiación. El Código de Regulaciones Federales solicita que cualquier tipo de vertidos que posiblemente puedan contener radiactividad, sea monitoreada; y el Monitor de vertidos líquidos 940-2 (off-line) cumple con los lineamientos establecidos en las normas de protección radiológica de la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) de los Estados Unidos. Los monitores de vertidos 940-2 (off-line) incluyen generalmente sus propios sistemas de bombeo para asegurar un flujo constante de aguas residuales a través de la cámara de volumen de la muestra con suficiente presión para reintroducir la muestra en el proceso. El monitor de vertidos líquidos 940-2 (off-line), se utiliza normalmente cuando se desea la forma óptima para alcanzar el máximo de sensibilidad. Los detectores de brillo son usados debido a su sensibilidad y fiabilidad.

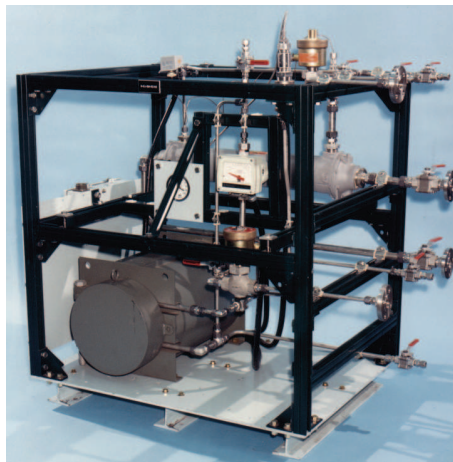


Fig. 4.6: Monitor de vertidos líquidos 940-2 (off-line). [Figura tomada de [33]]

La muestra es extraída de las tuberías de desagüe a través de la línea de muestreo del cliente hacia la entrada del skid de muestreo. La muestra fluye a través del intercambiador de calor (cuando se suministra), luego a través del medidor de volumen al sistema de bombeo y de vuelta a la tubería de desagüe. El caudal de la muestra se indica mediante un rotámetro y es manualmente controlado por una válvula de estrangulación.

La señal de salida del detector se transmite al tacómetro digital universal que muestra los cálculos totales de radiación en los líquidos. Este tacómetro también proporciona conexión con las alarmas de Alerta, de alta radiación y cuando el Canal falla. Una alarma de bajo flujo es incluida en el módulo del sistema de control de bombeo,

con enchufes (enlaces) para uso del cliente. La alarma de bajo flujo también apaga el sistema para proteger la bomba. La verificación de la activación del arranque es manual desde el tacómetro, con las alarmas silenciadas cuando están en el modo de revisión del arranque.

1. **Especificaciones Técnicas:** Requisitos de energía 120 V ac, 50/60 Hz, fase 1.
2. **Caudal de la muestra:** 1 hasta 5 GPM.
3. **Límite de temperatura de la muestra:** 50°F hasta 122°F (10°C hasta 50°C) sin intercambiar calor.
4. **Rango de conteo dinámico:** 10 hasta 107 CPM.
5. **Volumen de la muestra líquida:** 3000 cm³.
6. **Dimensiones totales con skid:** 48in×35in×48in (121.9cm×88.9cm×121.9cm).
7. **Peso con antideslizantes:** 2000 lb (907.18 kg).
8. **El monitor de vertidos líquidos fuera de línea se compone de los siguientes componentes:**
 - Muestreo de líquidos, volumen fijo, con 4 pi blindaje de plomo.
 - Tipo de centelleo detector gamma.
 - Indicador de flujo con caudal manual de válvula de ajuste.
 - Bomba centrífuga.
 - Interruptor de bajo flujo.
 - Entrada manual y válvulas de aislamiento de salida.
 - Tasa de medida digital universal, montaje local o remoto.
 - Está disponible cambiador de calor opcional para el enfriamiento de la muestra, si es necesario.
 - Detectores gamma de centelleo de alta temperatura opcional 943-36H y 943-36HT.

Métodos y Análisis

De acuerdo con la revisión previa realizada al reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia, dado por el Ministerio de Minas y Energía (resolución número 180005 del 2.010), donde se exige el cumplimiento de niveles de descarga en términos de Bq/día, Bq/mes y Bq/año y donde no se contempla en forma explícita que sea necesario un monitoreo continuo y permanente de las actividades vertidas; se analizarán dos alternativas y se escogerá la más apropiada, que permita el cumplimiento de ésta resolución y no su liberación a la red pública en tanto no se verifique que ésta cumple con los niveles de descarga contemplados en la norma. Las estrategias o alternativas, que se analizarán, están planteadas en el protocolo IAEA TECDOC-1714 (2.013) y se encuentran dentro de la línea de soluciones que pueden ser consideradas para el tema de vertimientos.

Se tendrán en cuenta los vertidos generados normalmente en servicios de Medicina Nuclear en Colombia, en los cuales se realizan diagnósticos, tratamientos y prácticas de hospitalización para pacientes con hipertiroidismo y cáncer de tiroides, donde el radioisótopo utilizado es el ^{131}I y los vertidos son descargados directamente a la red de alcantarillado. Se utilizan radioisótopos encapsulados, tanto en pacientes hospitalizados, como en pacientes ambulatorios.

El uso de ^{131}I en el tratamiento del hipertiroidismo y enfermedad de la tiroides ha aumentado significativamente y hoy representa el 90 % de todas las terapias en medicina nuclear.(ICRP 94, 2.004). El éxito de la terapia depende de la captación y

retención de yoduro radiactivo en la tiroides, el tejido restante o metástasis (Wille-gaignon et al., 2006). La actividad que no es retenida en la lesión se excreta a través del sistema urinario y excretas a las aguas residuales en forma de orina radiactiva (vertidos). La cantidad total descargada durante cada procedimiento terapéutico puede variar significativamente de acuerdo con el protocolo que se utiliza para el tratamiento, que puede ser de paciente hospitalizado o ambulatorio.

Para éste trabajo a través de FISRAD S.A.S se tuvo acceso a información muy general de prácticas de medicina nuclear, ya que ésta es reserva de los Centros de Medicina y corresponde a la privacidad de la historia clínica de los pacientes. Se estudiaron 20 casos de cáncer de tiroides (3 pacientes quincenalmente). Las actividades de ^{131}I administrados a los pacientes oscilaron entre 80 mCi (2,96 GBq) a 150 mCi (5,55 GBq), es decir, un promedio de 115 mCi (4,3 GBq).

Teniendo en cuenta lo anterior y para dar cumplimiento de la resolución número 180005 del 2.010, donde se establecen límites de descarga de 10^3 Bq/día, 10^4 Bq/mes y 10^5 Bq/año, se presentan a continuación las dos alternativas que se estudiaron, las descargas directas a la red de alcantarillado y las descargas después de su almacenamiento en depósitos de decaimiento, para luego determinar cuál de éstas es la más apropiada para aplicar en nuestro caso en estudio.

DESCARGA DIRECTA

La descarga directa a la red de alcantarillado es una práctica generalizada, ya que a menudo es la mejor opción para la disposición de vertidos radiactivos de muy baja actividad. Para algunos laboratorios de diagnóstico, los volúmenes y las actividades específicas de los vertidos líquidos radiactivos son generalmente bajos (Bq o kBq por litro) y a menudo se producen a diario con salida directa a la red de alcantarillado, cumpliendo con límites de descarga autorizados. Estas descargas se hacen generalmente a través de los sumideros y compuertas designados y rotulados, limpiados después de la descarga y monitoreados, con el fin de asegurar que no haya contaminación residual.

Para evitar la acumulación de contaminación en las tuberías de drenaje y diluir los vertidos radiactivos de pequeños volúmenes, es común que el agua del grifo se deje caer durante un periodo de tiempo adecuado, tanto antes como después de las

descarga del líquido al desagüe, podrían ser suficientes 10 minutos antes y después de realizar la descarga.

Sin embargo, aunque se realice la descarga directa, es necesario un control estricto de acuerdo con los términos y condiciones dados por la Autoridad Reguladora. El destino de los vertidos radiactivos debe ser claramente entendido y su impacto adecuadamente evaluado, tanto para las personas como para el medio ambiente, con el fin de asegurar que la práctica sigue siendo aceptable. Para la evaluación del impacto de la descarga de dichos vertidos realizada en el sistema de alcantarillado, debe considerarse que la persona encargada realice cálculos de dosis para las personas que trabajan en el mantenimiento de las alcantarillas, los trabajadores de la planta de tratamiento de aguas residuales y de los miembros del público. Además, deben ser conocidos los caminos del sistema de alcantarillado, éste debe ser moderno y no debe tener fugas de aguas residuales en el medio ambiente circundante. La descarga directa de los vertidos radiactivos se diluirá aún más por otros vertidos que más adelante se conectan a las mismas tuberías y así, se consigue una mayor dilución de los desechos procedentes de otras fuentes antes de llegar a la planta de tratamiento de aguas residuales.

En los sistemas acuáticos naturales, el yodo tiende a permanecer predominantemente en forma disuelta, principalmente como yoduro o como yodato que es un poco más reactivo en condiciones oxigenadas, ambas especies generalmente son rechazadas de las cargas negativas en la mayoría de los sedimentos. El yodo también puede formar complejos orgánicos con sustancias húmicas y esto puede provocar la absorción de yodo en los biosólidos en el sistema de alcantarillado y en las plantas de tratamiento. Por lo tanto, al evaluar las posibles dosis de trabajadores de la planta de tratamiento o de un sitio el cual descarga directamente a un sistema de alcantarillado, es importante evaluar las aguas residuales. También debe tenerse en cuenta las dosis de radiación que podrían derivarse de la eliminación de los lodos residuales, que se puede propagar en tierras agrícolas, generando por lo tanto, nuevas vías para la exposición del público, ya sea directamente o a través de las cadenas alimenticias. En algunas circunstancias, también deben ser consideradas las distintas vías de exposición del público y de los trabajadores de alcantarillado. Por ejemplo, cuando el flujo de salida del tratamiento de aguas residuales son liberadas a un arroyo que es utilizado por los pescadores, es necesario considerar otros casos de exposición, como

los antecedentes de radiación local, la ingestión de pescado y la ingestión accidental al caer en el agua. El cálculo de estos parámetros podría identificar que estos miembros del público son el grupo crítico en lugar de los trabajadores.

Para los pacientes a los cuales se les ha administrado radionucleidos como parte del diagnóstico médico, la orina y las heces a menudo estarán contaminadas y luego ésta radiactividad es excretada. Como muchos de estos pacientes vuelven a su casa poco después de ser administrado el radionucleido, es inevitable que las excretas radiactivas se descarguen directamente a las instalaciones de tubería de su casa, tales medios de descarga directa podrían ser insuficientes para proporcionar una protección suficiente a los miembros de la familia y otras personas, así como al medio ambiente. En estas circunstancias, la práctica de la descarga directa no debe ser autorizada y deben tenerse en cuenta una serie de factores antes de seleccionar la descarga directa de vertidos radiactivos como la opción de descarga más adecuada.

SISTEMAS DE DEPÓSITOS DE DECAIMIENTO

Cuando los vertidos se generan regularmente con niveles de radiactividad superiores al límite de descarga, se realiza una evaluación para mostrar lo que sería el impacto radiológico de la descarga directa de los vertidos a la red de alcantarillado y por tanto, se considerarían otras opciones de gestión y ésta evaluación deberá ser presentada a la Autoridad Reguladora.

Para estos casos, se considera un sistema de depósitos de decaimiento, que consta de uno o más tanques que están conectados normalmente juntos y se utilizan para recoger y almacenar vertidos. Este sistema suele ser la mejor opción para el almacenamiento y posterior decaimiento, cuando las cantidades o las actividades de los vertidos radiactivos están por encima de los límites autorizados para la descarga directa. Los depósitos de decaimiento pueden ser utilizados por separado o conectados en serie y pueden tener niveles limitados o extensos para su funcionamiento.

Antes de entrar en la etapa del informe de licitación para el diseño de un sistema de depósito de decaimiento adecuado, es esencial que se realice una amplia recopilación de datos como los detalles de los radionucleidos y sus actividades, actividad específica y el volumen de los vertidos.

Esta información debe incluir también la opción de futuros aumentos de vertidos,

considerando que es fundamental que el sistema de depósito de decaimiento este en capacidad de soportar estos cambios, además, no deben ser de gran tamaño ya que no es rentable para operar y porque lo ideal sería que la zona en la que se vaya a construir el sistema de depósito permita espacio suficiente para la instalación de depósito(s) adicional(es) en el futuro, si es necesario, pero también debe facilitar su desmantelamiento.

Los parámetros y los requisitos del diseño de la instalación determinan el volumen y el número de los depósitos que deben ser instalados. El sistema de depósito de decaimiento opera de tal manera que un depósito puede ser llenado mientras que el contenido del otro(s) está decayendo. El diseño del sistema de depósito debe cumplir con los siguientes requisitos generales:

- Debe estar construido con materiales adecuados por ejemplo acero inoxidable, hormigón o polietileno de alta densidad, con revestimiento interior de un material resistente a la corrosión, que debe ser de buena calidad y se mantenga libre de fugas para toda la vida útil del sistema de depósito de decaimiento.
- Debe tener suficiente capacidad de volumen para almacenar la producción de vertidos en curso y ser capaz de acomodar incrementos en los volúmenes que pueden ocurrir en el futuro. La capacidad adicional de volumen para el último depósito en el sistema podría ser útil para prevenir inundaciones o alternativamente un depósito de inercia independiente para contener cualquier desbordamiento de los vertidos que podrían generarse.
- Debe tener facilidad de acceso para el funcionamiento normal, el mantenimiento y las intervenciones de emergencia.
- Su objetivo debe ser reducir al mínimo la carga de trabajo del operador. Un método por el que esto se puede lograr, es asegurándose de instalar un número optimizado de depósitos de manera que haya capacidad suficiente para permitir que el contenido de depósitos llenos decaigan antes de la descarga.
- Debe contar con sistemas de seguridad apropiados y adecuados en su lugar, para advertir con antelación si los depósitos están bajo amenaza de desbordamiento por ejemplo, controles de nivel.
- Debe tener un adecuado sistema de instrumentación y control de válvulas para operar cuando el nivel del depósito esté casi lleno en relación a su capacidad, de manera que el vertido puede manual o automáticamente cambiar al siguiente

depósito o ser descargado si el contenido cumple con los criterios de regulación.

- Debe tener señales de advertencia apropiadas.
- Debe incorporar funciones que faciliten un futuro desmantelamiento.

El funcionamiento de un sistema de depósito de decaimiento consta de una serie de actividades. La primera etapa es la colección del vertido, en la segunda etapa, se almacena durante un período de tiempo predefinido, la tercera etapa puede incluir el muestreo y análisis, aunque esto puede no ser siempre necesario, como garantía de que el vertido será apropiado para la descarga; puede haber sido logrado mediante el diseño del sistema operativo. La siguiente etapa es el cumplimiento de los límites de descarga de vertidos, que se logra mediante el decaimiento. La etapa final son las medidas de seguimiento necesarias a lo largo de la operación del sistema de depósito de decaimiento y debe darse la debida consideración de su mantenimiento.

Un esquema para el diseño de una operación flexible del sistema de depósito de decaimiento se da en la figura 5.1, que ilustra cómo el sistema de depósito se puede operar de dos maneras diferentes. En primer lugar, los depósitos pueden ser operados en serie, con conexiones adecuadas entre los depósitos; en segundo lugar, siguiendo las líneas de trazos mostradas, se puede ver cómo el diseño del sistema permite el funcionamiento de cada depósito como una sola unidad que tiene su propia entrada y la salida desde cada depósito.

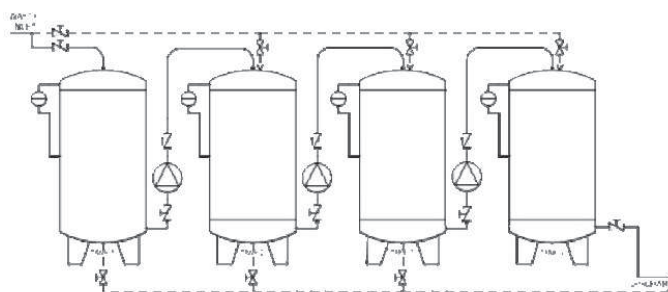


Fig. 5.1: Esquema de un sistema depósito decaimiento

Análisis de las alternativas para el manejo de Desechos Radiactivos

Conociendo las dos alternativas expuestas anteriormente y en razón de la información dada sobre las dosis suministradas en tratamientos para cáncer de tiroides en

centros de Medicina Nuclear en Colombia, se puede decir que la eliminación directa al sistema de alcantarillado de los desechos radiactivos generados por los pacientes operados de cáncer de tiroides, que han recibido dosis terapéuticas con ^{131}I , representan un importante problema para el medio ambiente, pues en sólo 24 h éstos eliminan por ésta vía hasta el 80 % de la actividad total que se les administró (ICRP 54, 1.988). Esta es una actividad significativa que puede provocar efectos indeseables de diversa índole a las personas y al medio ambiente. Por lo que ésta opción sólo se podría considerar en aquellos pacientes ambulatorios a los cuales se les ha suministrado dosis muy bajas de ^{131}I , es decir, menores a los 30 mCi que no representa ningún riesgo a las personas ni al medio ambiente.

Por tanto, es necesario considerar que a los pacientes que se les ha suministrado dosis altas deben estar aislados para evitar la exposición a las radiaciones de trabajadores, miembros del público o familiares que pudieran estar en contacto con ellos, además, se hace necesario controlar el vertimiento de manera directa de sus desechos líquidos y excretas a la red de alcantarillado. [35]

En Colombia ningún Centro de Medicina Nuclear cumple con los requisitos establecidos por la resolución número 180005 del 2.010, por lo que es necesario la construcción de un sistema de canalización de los desechos sanitarios hacia un sistema de depósitos de almacenamiento donde éstos permanecerán el tiempo necesario para su decaimiento y posterior liberación a la red de alcantarillado.

En éste trabajo se aborda la segunda alternativa, por tanto, debe estimarse el tiempo de retención de los vertidos en los depósitos, con el propósito de que la concentración de ^{131}I en los vertidos no supere los valores establecidos por la norma.

Para estimar el tiempo necesario para que los vertidos decaigan hasta un nivel permitido, se considera que en promedio los servicios que prestan los Centros de Medicina Nuclear hacen uso aproximado de 300 mCi (11.1 GBq) de ^{131}I quincenalmente y que la vida media del ^{131}I es de 8.04 días, se reemplaza la ecuación (3.13) en la ecuación (3.16) y despejando t , se obtiene:

$$t = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A_t}{A_0} \quad (5.1)$$

Donde $A_t = 300 \text{ mCi} = 11.1 \text{ GBq}$ (Actividad suministrada quincenalmente) y $A_0 = 10^5 \text{ Bq}$ (Límite de vertido al año).

$$t = -\frac{8,04 \text{ días}}{0,693} \cdot \ln \frac{10^5 \text{ Bq}}{11,1 \times 10^9 \text{ Bq}} \quad (5.2)$$

$$t \approx 135 \text{ días} \quad (5.3)$$

Ahora, para calcular el volumen de vertidos generados por los pacientes, se tiene en cuenta que por cada paciente en promedio quincenalmente se vierten 50 l por día ($0.05 \text{ m}^3 \approx 0.1 \text{ m}^3$), es decir, 150 l quincenales por los 3 pacientes atendidos y que el tiempo promedio de hospitalización corresponde a 2.5 días por paciente.

Por lo tanto, el volumen de vertidos generados por los pacientes se determina a partir de la siguiente relación:

$$V = (150 \text{ litros/días}) \cdot (2,5 \text{ días}) \quad (5.4)$$

$$V \approx 375 \text{ l} \approx 0,4 \text{ m}^3 \quad (5.5)$$

Además, considerando que los pacientes que han recibido dosis terapéuticas con ^{131}I , en sólo 24 h eliminan hasta el 80 % de la actividad total que se les administró [36], para el caso en análisis, corresponde a una actividad de 240 mCi (8.88 GBq) quincenales.

En razón de lo expuesto y de acuerdo con las condiciones tenidas en cuenta, se puede decir que los Centros de Medicina Nuclear con práctica de hospitalización generan un volumen de 375 litros/quincenales (750 litros/mes), un vertido de 240 mCi/quincenales de ^{131}I y que los vertidos tardarían un tiempo aproximado de 135 días en decaer para éste volumen.

Es decir, al mes se genera un volumen de 0.8 m^3 , lo que permite considerar que se podrían usar dos depósitos, cada uno con un volumen de 5 m^3 para el almacenamiento de los vertidos por un período superior a los 6 meses (tiempo requerido para

alcanzar actividades que cumplan con los límites de descarga). Una vez cumplido éste periodo se conmutaría la descarga de vertidos al segundo depósito con la misma capacidad de almacenamiento del primero y por tanto se contaría con un periodo no inferior a 6 meses para el decaimiento del material radiactivo del primer depósito. Luego de que transcurra este periodo, se tomará una muestra del depósito para realizar análisis de espectrometría gamma y calcular la actividad total remanente en el depósito y garantizar así el cumplimiento de los límites de descarga.

Conociendo ya el volumen de los vertidos generados, la energía emitida por el ^{131}I y las características ya presentadas de los instrumentos nucleares: Monitor liquido gamma LM211S (off-line), Monitor liquido gamma LM212S (off-line), Monitor de vertido liquido serie LEM y Monitor de vertidos liquidos 940-2 (off-line), se determinará cual es el más apropiado que permita realizar una correcta medición de los límites de descarga en las prácticas de medicina nuclear.

Teniendo en cuenta que el ^{131}I se desintegra por emisión de radiación gamma con energías de 365 keV (81 %), 637 keV (7.3 %) y 284keV (6.0 %) y radiaciones beta con energías máximas de 606 keV y analizando la sensibilidad de cada uno de los instrumentos de medición, se puede decir que el rango más estrecho de sensibilidad es el del Monitor liquido gamma LM211S (off-line) y el Monitor liquido gamma LM212S (off-line) que corresponde a 100 keV hasta 2.2 MeV, adicionalmente, éstos tienen un rango de medida de $3,7 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$ hasta $3,7 \times 10^9 \text{Bq}/\text{m}^3$, es decir, para el caso en estudio corresponde a un valor de $2,4 \times 10^4 \text{Bq}/\text{m}^3$ que se encuentra dentro de éste rango. Además por sus características físicas son equipos de fácil manejo, que se pueden ajustar a la tubería conectada con los depósitos de decaimiento antes de que se realice la descarga final a las redes de alcantarillado, permitiendo así un control seguro de la medida de la dosis que finalmente es liberada.

Fue descartado el Monitor de vertido líquido serie LEM, porque el volumen del recipiente de medición es de 16 litros (0.02m^3) y el rango de energía es de 50 keV a 3 MeV, lo cual quiere decir que no esta apto para soportar el volumen generado en los cálculos y además el rango de energía es mayor, por lo que se podría decir que no hay gran exactitud a la hora de medir la sensibilidad. El Monitor de vertidos liquidos 940-2 (off-line), cuyo volumen de muestra liquida es de 3000 cc (0.003m^3), no tendría tampoco la capacidad de soportar el volumen obtenido y además, dentro

de las características presentadas por sus fabricantes no se presenta el rango de energía de sensibilidad de éste, lo cual limita aún más su elección.

Conclusiones

Se ha realizado un estudio teórico de la Resolución número 180005 del 5 de enero de 2.010 dada por el Ministerio de Minas y Energía, donde se establece además de los límites de vertido, la clasificación, tratamiento, almacenamiento y transporte de los desechos radiactivos, con el fin de garantizar seguridad y protección del hombre y el medio ambiente.

Se hizo un análisis de cada una de las propuestas presentadas por la IAEA TECDOC-1714 (2.013) para el manejo de vertidos contaminados en la práctica de Medicina Nuclear, encontrando que la mejor opción era almacenar los vertidos en depósitos antes de su liberación al sistema de alcantarillado ya que se está hablando de dosis muy altas en el orden de los 300 mCi, mientras que en casos como los de pacientes ambulatorios a los cuales se les suministran dosis muy bajas por debajo de los 30 mCi, si se podría considerar la opción de liberar los vertidos directamente a la red de alcantarillado, ya que no representan ningún riesgo para las personas ni el medio ambiente.

Se determinó el tiempo necesario para que los vertidos decaigan y el volumen de vertidos generados al mes, con ésta información fue posible estimar la cantidad de depósitos necesarios, el volumen de cada uno de éstos y el tiempo de almacenamiento necesario para que dichos desechos decaigan hasta un nivel de dispensa permitido, concluyendo que para la información suministrada por el FISRAD S.A.S de los Centros de Medicina en Colombia, son necesarios dos depósitos, cada uno con un

volumen de $5 m^3$ para el almacenamiento de los vertidos por un periodo de 6 a 7 meses sin generar ningún tipo de vertido a la red de alcantarillado antes de que se realice un análisis de espectrometría gamma y se calcule la actividad total remanente en el depósito, garantizando así el cumplimiento de los límites de descarga. De ésta manera se proporcionaron soluciones y alternativas que permitan a los Centros de Medicina Nuclear en Colombia cumplir con los requisitos y estándares establecidos por la resolución, ya que, es importante recalcar que hasta la fecha ninguno de éstos centros cumplen con lo establecido por ésta norma.

Finalmente, aún siendo muy limitada la información suministrada por los fabricantes de los instrumentos de medición nuclear, se realizó un estudio teórico de las características de dichos equipos, teniendo en cuenta la energía de las partículas emitidas por el ^{131}I (beta⁻ y gamma) y considerando los resultados obtenidos del volumen de los vertidos generados en promedio en los Centros de Medicina Nuclear en Colombia, concluyendo que de los cuatro equipos estudiados, el Monitor liquido gamma LM211S (off-line) y el Monitor liquido gamma LM212S (off-line) presentan las características adecuadas que permiten una correcta y confiable medición de los límites de descarga de los vertidos antes de que sean liberados al sistema de alcantarillado.

Se espera que éste trabajo sirva de base o referencia para los Centros de Medicina Nuclear en Colombia, con el fin de realizar estudios de los vertidos generados por los pacientes y en concordancia con la resolución número 180005 del 2.010 se cumplan los requerimientos establecidos por ésta.

Bibliografía

- [1] IAEA. "El físico médico: Criterios y recomendaciones para su formación académica, entrenamiento clínico y certificación en América Latina", IAEA Human health reports N°1. Vienna, 2010.
- [2] Venencia C.D, Germanier A. G, Bustos S. R, Giovannini A. A, Wyse E. P. Hospital Discharge of Patients with Thyroid Carcinoma Treated with ^{131}I . Journal of Nuclear Medicine. Vol 43, pág. 61–65, 2002.
- [3] Navarro L, Rangel G, Bolaños F. Tratamiento del Hipertiroidismo con yodo radiactivo (segunda de dos partes). Revista de Endocrinología y Nutrición. Vol 19, pág. 74–82, 2011.
- [4] U. N. R. Commission, Regulatory Guide 8.39, Office of Nuclear Regulatory Research, Us, 1997.
- [5] E. Cruz, M. A. Mayorga, N. M. Quiverio³ y J. D. Villada. Planteamiento de un sistema de remoción de ^{131}I de vertimientos líquidos en una unidad sanitaria de medicina nuclear empleando ^{127}I como patrón de referencia. Sociedad de Protección Radiológica de Brasil. 2013.
- [6] Barquero R, Basurto F, Nuñez C, Esteban R. Liquid discharges from patients undergoing ^{131}I treatments. Journal of Environmental Radioactivity. Vol 99, pág. 1530–1534, 2008.
- [7] Krawczyk E, Piñero G. F, Ferro G. M. Discharges of nuclear medicine radioisotopes in Spanish hospitals. Journal of Environmental Radioactivity. Vol 116, pág. 93–98, 2013.

- [8] Barquero R, Agulla M. M, Ruíz A. Liquid discharges from the use of radionuclides in medicine (diagnosis). *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol 99, pág. 1535–1538, 2008.
- [9] IAEA. Management of Discharge of Low Level liquid Radioactive Waste Generated in Medical, Educational, Research and Industrial Facilities. IAEA TEC-DOC No. 1714. Vienna, 2013.
- [10] McDonnell, C. E., Radiological Assessments for Small Users, NPRPBW63, National Radiation Protection Board, Chilton, UK. 2014.
- [11] Titley, J.G. Investigation of the Sources and Fate of Radioactive Discharges to Public Sewers. R&D Technical Report P288, Environment Agency. 2000.
- [12] República de Colombia, M. d. M. y Energía, Resolución 180005”, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 2010.
- [13] IAEA, IAEA Position Statement on Release of Patients after Radionuclide Therapy. IAEA, Vienna, 2010.
- [14] URL: <http://cancerres.info/?farmaco=yodo-radiactivo-i-131>
- [15] URL: <http://geosalud.com/endocrino/tiroides/yodo.htm>
- [16] URL: https://healthonline.washington.edu/document/health_online/pdf/I131-Radioactive-Iodine-Therapy-Thyroid-Cancer-SP.pdf
- [17] URL: <http://www.larepublica.pe/01-04-2013/medicina-nuclear-sirve-para-el-diagnostico-y-tratamiento-de-cancer>
- [18] Velasco M, Martínez A. Diagnóstico y terapéutica con ^{131}I en afecciones tiroideas. *Rev Cubana Endocrinol*. Vol 15. 2004.
- [19] Graham GD, Burman KD. Radioiodine treatment of Graves disease. An assessment of its potential risks. *Ann Intern Med*. Vol 105, pág. 900–905. 1986.
- [20] Franklyn JA, Boelaert K. Thyrotoxicosis. *Lancet*. Vol 379, pág. 1155–1166. 2012.

- [21] Sisson JC, Freitas J, McDougall IR, Dauer LT, Hurley JR, et al. American Thyroid Association Taskforce on Radioiodine Safety. Radiation safety in the treatment of patients with thyroid diseases by radioiodine ^{131}I : practice recommendations of the American Thyroid Association. *Thyroid*. Vol 21(4), pág.335-346. 2011.
- [22] Rodriguez E. Análisis de la influencia de parámetros radiobiológicos relacionados con la exposición interna de los trabajadores de medicina nuclear con ^{131}I . Tesis digitales. UNC.
- [23] PDF: Interaccion de la radiación con la materia. Instituto Balseiro. Protección Radiológica.
- [24] PDF: Fisica Nuclear Maria Shaw y Amalia Williart. Interacción de la radiación con la Materia. Cap. 3. Aliansa editorial. S.A. Madrid. 1996.
- [25] Salvat F, Fernández J, Acosta E, Sempau J. Penelope A code system for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. Workshop Proceedings. Issy–Les–Moulineaux, France. 2006.
- [26] URL: http://gonzoblog.ru/post/2011/03/28/Radiation_likbez.aspx
- [27] Fisica Nuclear Maria Shaw y Amalia Williart. Detectores. Aliansa editorial. S.A. Madrid. 1996.
- [28] PDF: Principios de detección de la radiación . Instituto Balseiro. Protección Radiológica.
- [29] Física Nuclear y de partículas. Antonio Ferrer Soria. Edición 2. 2003.
- [30] URL: <https://www.mirion.com/products/liquid-monitors/>
- [31] URL: https://m.box.com/shared_item/https%3A%2F%2Fmirion.box.com%2Fs%2F9a0h6l7q5q1i6mnpjux7
- [32] URL: www.flukebiomedical.com/biomedical/usen/nuclear-power-systems/Process-Monitors/940-2-off-line-liquid-effluent-monitor.htm?PID=55568
- [33] URL: www.vf.eu/products/nuclear-industry/liquid-monitors/lem-series-liquid-effluent-monitors.html

-
- [34] U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 8.39 DG–8015. Abril 1997.
- [35] Barreras Caballero A, Brígido Flores O, Lasserra Sánchez O, Hernández García J. Retención de los residuales de I-131 en el sistema de tratamiento del módulo de medicina nuclear de Camagüey, Cuba. Whorkshopon Nuclear and Related Techniques in Environment. 1.999.
- [36] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 54, Oxford: Pergamon Press, 1.988.
- [37] International Commission on Radiological Protection. Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides. In: ICRP Publication 94. Elseiver, 2.004.