



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA**

**CARRERA DE BIOFÍSICA**

**“DISEÑO Y CÁLCULO DE BLINDAJES PARA ZONAS DE ALTO  
RIESGO RADIOLÓGICO EN LA UNIDAD DE MEDICINA  
NUCLEAR DEL HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO,  
IESS - GUAYAQUIL”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Tipo: Proyecto de Investigación**

Trabajo de titulación presentado para optar al grado

Académico de:

**BIOFÍSICA**

**AUTORA:** Mary Elizabeth Ganán Andino

**TUTORA:** Biof. Vilma Nohemí Yanchapanta Bastidas Msc.

Riobamba – Ecuador

2018

©2018, Mary Elizabeth Ganán Andino

Yo, Mary Elizabeth Ganán Andino soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS**

**CARRERA: BIOFÍSICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: **“Diseño y Cálculo de blindajes para zonas de alto riesgo radiológico en la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo, IESS - Guayaquil”**, de responsabilidad de la Señorita Mary Elizabeth Ganán Andino, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Biof. Vilma Yanchapanta Bastidas Mgs.  
**DIRECTORA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Lic. Nadia González López MSc  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

“Yo, Mary Elizabeth Ganán Andino, declaro que soy autora del presente Trabajo de Titulación el cual fue elaborado por mi persona bajo la dirección de la Biof. Vilma Yanchapanta Mgs. y con la colaboración externa del Dr. Juan Miguel Olalla, haciéndome responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del mismo, pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.”

Mary Elizabeth Ganán Andino.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación lo dedico a Dios y a la Virgencita por haberme dado la oportunidad de terminar mis estudios y por haberme acompañado en este largo camino de aprendizaje.

A mis padres Mario y Ligia quienes me han acompañado en cada paso que he dado y han sido mi motor para salir adelante en todo momento.

Mary Elizabeth.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco profundamente a Dios por haberme dado la oportunidad de haber culminado mis estudios a la Virgencita por nunca haberme abandonado y guiar mi camino, a mis padres por los consejos, paciencia y todo el amor que me han brindado.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por haberme dado la oportunidad de estudiar en ella, a mis profesores de la Escuela de Física y Matemática quienes me impartieron sus conocimientos un agradecimiento especial a mi directora de tesis Biof. Vilma Yanchapanta Mgs. por el tiempo y la ayuda brindada para que este proyecto de titulación pueda culminarse de la mejor manera.

A la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IEES-Guayaquil, al Dr. Miguel Olalla por haberme brindado la oportunidad de realizar mi trabajo de titulación en esta institución.

Mary Elizabeth.

## ABREVIATURAS

1. **APPM** American Association of Physicists in Medicine
2. **AIEA** International Atomic Energy Agency
3. **ALARA** As Low As Reasonably Achievable
4. **B** Factor de transmisión
5. **CDR** Capa Decimoreductota
6. **CHR** Capa Hemirreductora
7. **CT** Computed Tomography o Tomografía Computarizada
8. **CSN** Consejo de Seguridad Nuclear
9. **ICRP** Comisión Internacional de Protección Radiológica
10. **IESS** Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social
11. **MN** Medicina Nuclear
12. **MeV** Mega electrón Voltio
13.  $N_w$  Número de pacientes por semana
14. **NCRP** National Council on Radiation Protection and Measurements
15. **OIEA** Organismo Internacional de Energía Atómica
16. **POE** Personal Ocupacionalmente Expuesto
17. **P** Restricción de dosis
18. **PEM** Mastografía por emisión de positrones
19. **PET-CT** Tomografía por emisión de positrones
20. **PR** Protección Radiológica
21. **RI** Radiación Ionizante
22. **SCAN** Subsecretaría de Control de Aplicaciones Nucleares del Ecuador
23. **SPECT** Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica
24. **sem** Semana

- 25. **TC** Tomografía Computarizada
- 26. **T** Factor de Ocupación
- 27. **W** Carga de trabajo
- 28. **U** Factor de Uso
- 29. **μSv** micro Sievert



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xvi
SUMMARY .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>1. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Identificación del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación del problema.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1. Objetivo general .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>8</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Fundamentos generales de radiación ionizante y su empleo en la Medicina Nuclear.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1. Radiación ionizante .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con la materia .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2.1. Dispersión de Rayleigh (Dispersión Coherente) .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2.2. Efecto Fotoeléctrico o absorción Fotoeléctrica.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.3. Efecto Compton o dispersión de Compton.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2.4. Producción de Pares .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3. Clasificación de la radiación ionizante .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.3.1. Radiación directamente ionizante.....</b>	<b>12</b>

2.1.3.2.	<i>Radiación indirectamente ionizante</i> .....	13
2.1.4.	<i>Efectos de la radiación ionizante</i> .....	13
2.1.4.1.	<i>Efectos genéticos</i> .....	13
2.1.4.2.	<i>Efectos somáticos</i> .....	13
2.1.4.3.	<i>Efectos estocásticos</i> .....	14
2.2.	<b>Medicina Nuclear</b> .....	14
2.2.1.	<i>Radioisótopos</i> .....	15
2.2.2.	<i>Radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear</i> .....	16
2.2.2.1.	<i>Yodo-131</i> .....	16
2.2.2.2.	<i>Tecnecio-99m</i> .....	17
2.2.2.3.	<i>Fósforo-32</i> .....	18
2.2.2.4.	<i>Samario-153</i> .....	18
2.3.	<b>Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica (SPECT- CT)</b> .....	19
2.3.1.	<i>Principales partes de un equipo SPECT-CT</i> .....	19
2.3.2.	<i>Fundamentos físicos de la Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica</i>	20
2.4.	<b>Principales estudios diagnósticos realizados en Medicina Nuclear</b> .....	21
2.4.1.	<i>Rastreo de cuerpo total</i> .....	21
2.4.2.	<i>Estudio cardiovascular</i> .....	21
2.4.3.	<i>Estudio pulmonar</i> .....	22
2.4.4.	<i>Estudio renal</i> .....	22
2.4.5.	<i>Estudio de tiroides</i> .....	22
5.2.	<b>Protección radiológica</b> .....	23
2.5.1.	<i>Exposiciones radiológicas</i> .....	23
2.5.2.	<i>Principios de la protección radiológica</i> .....	23
2.5.3.	<i>Reglas fundamentales de protección radiológica contra toda fuente de radiación ionizante</i> .....	25
2.5.4.	<b>Protección radiológica en Medicina Nuclear</b> .....	25
2.5.4.1.	<i>Seguridad radiológica en la Unidad de Medicina Nuclear</i> .....	25

<b>2.6. Principales protocolos establecidos para el diseño y cálculo de blindaje para Unidades de Medicina Nuclear .....</b>	<b>27</b>
2.6.1. <i>Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) .....</i>	27
2.6.2. <i>National Council on Radiation Protection &amp; Measurements (NCRP) .....</i>	27
2.6.2.1. <i>Structural shielding design for Medical X-Ray Imaging Facilities .....</i>	28
2.6.2.2. <i>Structural shielding design and evaluation for megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities .....</i>	28
2.6.3. <i>American Association of Physicists in Medicine (AAPM) .....</i>	28
2.6.4. <i>Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) .....</i>	29
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>30</b>
<b>3. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>30</b>
3.1. <b>Metodología .....</b>	<b>30</b>
3.1.1. <i>Diseño del área de Medicina Nuclear .....</i>	30
3.1.2. <i>Dimensiones del equipo SPECT-CT y sala de control.....</i>	34
3.1.3. <i>Diseño y distribución de los ambientes .....</i>	34
3.1.4. <i>Determinación de las distancias desde las fuentes de radiación hasta las barreras de protección .....</i>	35
3.2. <b>Radiofármacos utilizados en Medicina Nuclear .....</b>	<b>35</b>
3.3. <b>Características del SPECT-CT Symbia Intevo™ Excel .....</b>	<b>35</b>
3.4. <b>Materiales sugeridos a utilizar en el blindaje .....</b>	<b>36</b>
3.4.2. <i>Concreto.....</i>	38
3.5. <b>Recolección de datos .....</b>	<b>38</b>
3.5.1. <i>Actividad Administrada.....</i>	38
3.5.2. <i>Barreras de protección .....</i>	39
3.5.3. <i>Carga de trabajo (W).....</i>	39
3.5.4. <i>Factor de uso (U) .....</i>	40
3.5.5. <i>Factor de ocupación (T).....</i>	40
3.5.6. <i>Restricción de dosis (P).....</i>	40

<b>3.6.</b>	<b>Procesamiento de datos.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6.1.</b>	<b><i>Cálculo de blindaje.....</i></b>	<b>41</b>
<b>3.6.2.</b>	<b><i>Ecuaciones de cálculo.....</i></b>	<b>41</b>
<b>3.6.2.1.</b>	<b><i>Cálculo de barrera primaria.....</i></b>	<b>42</b>
<b>3.6.2.2.</b>	<b><i>Límite de dosis fuera de la sala de tratamiento en cualquier hora (<math>R_h</math>).....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.6.2.3.</b>	<b><i>Tasa equivalente a la dosis promediada en el tiempo semanal (<math>R_W</math>).....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.6.2.4.</b>	<b><i>Tasa instantánea de dosis equivalente medida (IDR).....</i></b>	<b>43</b>
<b>3.6.2.5.</b>	<b><i>Cálculo de blindaje para puertas.....</i></b>	<b>44</b>
	<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>45</b>
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Dispersión Rayleigh .....	10
<b>Figura 2-2:</b> Efecto Fotoeléctrico .....	10
<b>Figura 3-2:</b> Efecto Comptom .....	11
<b>Figura 4-2:</b> Producción de Pares .....	12
<b>Figura 5-2:</b> Ejemplo de un radiofármaco utilizado en Medicina Nuclear.....	16
<b>Figura 1-3:</b> Plano del Hospital Teodoro Maldonado Carbo.....	30
<b>Figura 2-3:</b> Distribución de un departamento de Medicina Nuclear.....	31
<b>Figura 3-3:</b> SPECT-CT Symbia Intevo <sup>TM</sup> Excel.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

	pp.
<b>Tabla 1-2:</b> Tiempo de Vida Media del Tecnecio-99m .....	18
<b>Tabla 2-2:</b> Componentes del SPECT-CT .....	19
<b>Tabla 3-2:</b> Límites de dosis establecidos por el ICRP .....	24
<b>Tabla 1-3:</b> Valores del espacio físico de la Unidad de Medicina Nuclear .....	30
<b>Tabla 2-3:</b> Distribución de ambientes Área controlada.....	32
<b>Tabla 3-3:</b> Distribución de ambientes Área no controlada.....	32
<b>Tabla 4-3:</b> Radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear.....	34
<b>Tabla 5-3:</b> Valores de TVL para los materiales usados en el cálculo de blindaje.. ..	37
<b>Tabla 6-3:</b> Espesor y peso de las placas de plomo.....	37
<b>Tabla 7-3:</b> Actividades máximas a utilizar para el cálculo de blindaje.....	38
<b>Tabla 8-3:</b> Factores de Ocupación .....	40
<b>Tabla 1-4:</b> Blindaje requerido para la zona de alto riesgo radiológico: .....	46
<b>Tabla 2-4:</b> Blindaje requerido para puertas.....	47
<b>Tabla 3-4:</b> Blindaje requerido para las zonas de que presente un valor medio de riesgo radiológico .....	50
<b>Tabla 4-4:</b> Blindaje requerido para las zonas de bajo riesgo radiológico .....	51
<b>Tabla 5-4:</b> Blindaje requerido para piso.....	52
<b>Tabla 6-4:</b> Blindaje requerido para techo.....	53

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A:</b> Diseño original de la unidad de medicina nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo.....	66
<b>Anexo B:</b> Diseño propuesto para la unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo.....	67
<b>Anexo C:</b> Dimensiones del recinto que albergara al equipo SPECT-CT .....	68
<b>Anexo D:</b> Cálculo de blindaje a barreras primarias para la Tomografía Computarizada .....	69
<b>Anexo E:</b> Cálculo de blindaje a barreras secundarias para la Tomografía Computarizada.....	71

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y cálculo del blindaje para una instalación SPECT-CT en la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil. Para ello se tuvo en cuenta las consideraciones técnicas de radioprotección aplicadas por Organismos internacionales: National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) de los Estados Unidos en sus recomendaciones No. 147 y 151, en los reportes The American Association of Physicists in Medicine (AAPM) en su reporte TG-108, el Consejo de Seguridad Nuclear de España (CSN 5.11) y por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA SRS-2/1). Para el cálculo de blindaje se utilizó una hoja programada en MATLAB donde se tuvieron en cuenta las restricciones de dosis: personal ocupacionalmente expuesto ( $100\mu\text{Sv/semana}$ ) así como el público ( $20\mu\text{Sv/semana}$ ). El radiofármaco tomado como referencia fue el Yodo-131. Los resultados obtenidos en la presente investigación fueron el diseño 30 locales, de ellos 11 necesitaron protección de blindaje. Se concluye que los espesores de la barrera de protección en plomo y concreto de los 11 locales que necesitan protección fueron: para concreto de 25 a 65cm y para plomo de 4 a 10mm. Se recomienda realizar nuevos cálculos de blindaje en las barreras de protección si se varía el diseño original propuesto e implementar un programa de Protección Radiológica con el fin de comprobar el cumplimiento de los límite de dosis establecidos por la Autoridad Reguladora.

**Palabras clave:** <RADIOPROTECCIÓN>, <CÁLCULO DE BLINDAJE>, <SPECT-CT>, <CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES>, <YODO-131>, <BLINDAJE>, <RADIOFÁRMACO>, <MEDICINA NUCLEAR>.



## SUMMARY

The objective of this work is the design and calculation of shielding for a SPECT-CT installation in the Nuclear Medicine Unit of the Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil. To this end, the radioprotection technical considerations applied by international organizations were taken in to account: the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) of the United in its recommendations N<sub>o</sub>. 147 and 151, in the reports The American Association of Physicians in Medicine (AAPM) in its report TG-108, the Nuclear Safety Council of Spain (CSN 5.11) and the International Atomic Energy Agency (IAEA SRS-2/1). For the calculation of shielding, a sheet programmed in MATLAB was used, taking in to account dose restrictions: occupationally exposed personnel (100 $\mu$ Sv/sem) as well as the public (20 $\mu$ Sv/sem). The radiopharmaceutical taken as reference was Iodine-131. The results obtained in the present investigation were the design of 30 locations, of which 11 needed shielding protection. It is concluded that the thickness of the protection barrier in lead and concrete of the 11 premises that need protection were: for concrete from 25 to 65cm and for lead from 4 to 10mm, It is recommended to carry out new shielding calculations in the protection barriers if the proposed original design is varied and Radiological Protection program is implemented in order to verify compliance with the dose limits established by the Regulatory Authority.

**Key words:** <RADIOPROTECTION>, <CALCULATION OF SHIELDING>, <SPECT-CT>, <EXACT AND NATURAL SCIENCE>, <IODINE-131>, <SHIELDING>, <RADIOPHAMER>, <NUCLEAR MEDICINE>

## INTRODUCCIÓN

Durante algún tiempo el ser humano ha hecho uso de materiales o equipos de radiación ionizante para su propio beneficio, las áreas implicadas son la medicina, industria, la producción de energía e incluso la elaboración de armas, por lo que existe gran preocupación de los efectos que puedan causar sobre el ser humano y el entorno, originando así que Organismos nacionales e internaciones imitan reportes estableciendo medidas que puedan garantizar la protección radiológicas a las personas relacionadas con el uso de fuentes de radiación (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2016).

La protección radiológica es un tema de vital importancia para clínicas, laboratorios y todo centro que hago uso de fuentes generadoras y emisoras de protección radiológica, esto dependerá únicamente de los hábitos de trabajo, medidas de protección que tenga cada lugar para que este tipo de instituciones cumplan con los niveles de exposición establecidos por los diferentes Organismos.

El blindaje el parámetro más importantes en el momento de la protección radiológica es mismo hace referencia a una barrera física que sirve de protección y a la vez reduce o evita un detrimento<sup>a</sup> por efecto de las radiaciones ionizantes al Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE), público y medio ambiente que se encuentran dentro de las instalaciones o al entorno.

Es importante en este trabajo de Titulación lograr que la radiación generada por el SPECT-CT y emitida por el paciente, no sean un peligro externo para las áreas colindantes, por lo que es de suma importancia que las estructuras como el techo, piso, paredes, ventanas y puertas se encuentren revestidos de un apropiado blindaje, con la finalidad de que la dosis externa de la sala se encuentre dentro de los límites permisibles establecidos por la Autoridad Reguladora del país (SCAN).

El diseño y cálculo de blindaje para haces de fotones en el uso en Medicina Nuclear (MN), está basado principalmente en recomendaciones brindadas por los Organismos Internacionales como la National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) de los Estados Unidos en sus reportes No. 49, 147 y 151, en los reportes The American Association of Physicists in Medicine (AAPM), Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

En el caso del blindaje para las barreras primarias van a variar para cada sala de tratamiento, esto se debe a que están en función de varios factores como: tipo de radiación y energía, características propias del equipo, carga de trabajo, técnicas de tratamiento y diagnóstico, uso de las instalaciones colindantes y del tipo de personal presente en las diferentes salas de la Unidad de MN (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005).

El Capítulo I se presenta la identificación del problema por lo dio inicio a la investigación, es decir, ¿Cómo se realizará el diseño y cálculo de blindaje para las zonas de alto riesgo radiológico en la Unidad de MN?, la justificación sustenta la necesidad del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil en contar con un servicio de MN.

En el capítulo II abarca todos los conceptos básicos que se deben considerar en momento de realizar el diseño y cálculo de la Unidad de Medicina Nuclear, los mismos que están sujetos a recomendaciones de Organismos internacionales.

El capítulo III detalla la metodología utilizada, la misma que está enfocada en protocolos para el diseño y cálculo de blindaje de la Unidad de Medicina Nuclear y entidades que se encargan de la regulación y medidas de protección Radiológica, las que detallan los parámetros, condiciones y ecuaciones proporcionadas las recomendaciones están dados por : El NCRP 147 y 151 del Consejo Nacional de Protección y Medición de Radiación (National Council on Radiation Protection & Measurements y el Task Group TG 108 del grupo de trabajo de la Asociación Americana de Físicos en Medicina (American Association of Physicist in Medicine, AAPM).

El capítulo IV se reportan los cálculos realizados bajo los parámetros de los protocolos del NCRP y del AAPM y se muestran los resultados obtenidos durante la investigación.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. Identificación del problema

EL Hospital de Especialidades Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil fue inaugurado el 07 de octubre del 1970, siendo uno de los Hospitales más importantes del país por cubrir las necesidades de varias provincias aledañas a la provincia del Guayas. Lidera las acciones médicas en especialidades como: cirugía cardiovascular, la nefrología, el trasplante de riñón, laboratorio hormonal y de citogenética, como oftalmología, gineco-obstetricia, fisioterapia, rehabilitación y Medicina Nuclear (Carbo, 2017).

En la actualidad la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital de Especialidades “Teodoro Maldonado Carbo IESS- Guayaquil” no cuenta con infraestructura hospitalaria adecuada que cumpla con los requerimientos mínimos establecidos por los Organismos pertinentes para la instalación y puesta en marcha de un equipo híbrido de Single Photon Emission Computer Tomography (por sus siglas en ingles SPECT-CT). Por tanto, es de gran importancia realizar el diseño y cálculo de blindaje de todas las áreas donde existe la presencia de radiaciones ionizantes para resguardar la seguridad del Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE), pacientes, público y medio ambiente.

El diseño y cálculo de blindajes en las zonas de alto riesgo radiológico de la Unidad Técnica de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil, permitirá contar con la documentación necesaria para cumplir con los requerimientos necesarios para la Autoridad Reguladora del país, documentación que servirá como soporte para la posterior construcción de la infraestructura e instalación del equipamiento de diagnóstico de Medicina Nuclear, considerando la delimitación de zonas de alto, mediano y bajo riesgo radiológico de acuerdo a las exigencias establecidas por los Organismos Reguladores para este tipo de Instalaciones.

## 1.2. Justificación del problema

El Hospital de Especialidades Teodoro Maldonado Carbo IEES-Guayaquil brinda los servicios de Medicina Nuclear de forma limitada, ya que solamente se realizan los procedimientos relacionados con terapia metabólica usando Yodo-131 a pacientes con patologías tiroideas, mientras que no se realizan los estudios de diagnóstico usando otros radiofármacos por la falta del equipamiento necesario (Sistema SPECT – CT); ni con la infraestructura física hospitalaria que permita la instalación de este sistema SPECT – CT, por lo que se deriva el 100% de pacientes a otras casa de salud.

Por lo antes mencionado y la gran demanda de pacientes que necesitan este tipo de servicio, es de vital importancia para la implementación realizar el diseño y cálculo de blindaje del área que albergará el Sistema SPECT-CT considerando las zonas de alto riesgo radiológico.

Por la gran demanda de pacientes que necesitan este tipo de servicio, es necesario diseñar y realizar el cálculo de blindaje de las áreas donde existe la presencia de radiaciones ionizantes, creando barreras de protección que permitirá disminuir la exposición a los niveles máximos permisibles, asegurando de tal forma que la seguridad ocupacional y que el Hospital de Teodoro Maldonado Carbo IEES-Guayaquil cumpla con las normas de radio-protección para el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE), pacientes y el público.

El espesor de blindaje necesario en cada una de las área donde se va a encontrar el equipo SPECT-CT está dado en función de varios parámetros como: el tipo de radiación y su energía, el uso de las instalaciones colindantes (en zonas de paso el blindaje será menor que en zonas de trabajo) y tipo de personal presente en esas instalaciones para así constatar que el ambiente de trabajo del POE se encuentre dentro de los límites establecidos (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2017).

El espesor de las barreras protectoras de la instalación tiene como objeto lograr que estas radiaciones no sean un peligro externo y así fomentar la protección y seguridad radiológica en los lugares de trabajo del personal que ópera y del público que se encuentra cerca de dichas instalaciones (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007).

Con la adquisición e implementación del SPEC-CT en Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IEES-Guayaquil, será una de las instituciones que forme parte de un proceso de actualización de tecnología para mejorar el servicio de diagnóstico de enfermedades oncológicas, ayudando así a toda la comunidad que necesita este servicio.

### 1.3. Antecedentes de la investigación

En 1976 el NCRP dio las primeras recomendaciones las cuales se referían a valores de blindajes que entonces se consideraban necesarios para la protección de los radiólogos y poco después a los valores de dosis de radiación que no debían exceder las personas que trabajaban con radiaciones (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005)

En la actualidad, este Consejo constituye el organismo internacional que lidera la concepción filosófica y práctica de la Protección Radiológica (Radiológica, 2008, pp. 12-16), emitiendo reportes con requerimientos para las habilitaciones de Servicios de Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear, a fin de garantizar las medidas de Protección Radiológica (PR) para todo el personal en riesgo potencial a exposición con radiaciones ionizantes.

La Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM), es una organización científica y profesional, fundada en 1958, compuesta por más de 8000 científicos cuya práctica clínica está dedicada a garantizar la precisión, la seguridad y la calidad en el uso de la radiación en procedimientos médicos tales como imágenes médicas, radioterapia y medicina nuclear. En el 2006 se emite una recomendación por parte del Task Group AAPM 108: PET and PET/CT Shielding Requirements en el que se encuentran los requerimientos para poder realizar el cálculo de blindaje del PET-CT (American Association of Physicists in Medicine (AAPM), 2010).

Néstor Cornejo Díaz, Alejandro Hernández Saz, Alina Martínez González del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) de la Ciudad de La Habana – Cuba en el resumen de la IAEA (International Atomic Energy Agency) del 2005, realizaron una comparación entre los métodos Tasa de Dosis Máxima de Proyecto (TDMP) y de Tiempos Reales de Exposición (TRE) para los cálculos de blindaje, obteniéndose así diferencias significativas en niveles de tasas de dosis y espesores de blindaje estimados por ambos métodos para algunas instalaciones. Concluyendo que el empleo de tiempos reales de exposición es más adecuado para la optimización de los principios de protección radiológica, aunque este método demanda mayor cuidado en su aplicación (Cornejo, 2005).

En el 2011, en el Hospital de Especialidades en Salud Mental en México –Zacatecas se realizó una ***“EVALUACIÓN DE BLINDAJE DE UNA SALA PARA RADIODIAGNÓSTICO”*** a cargo de Padilla Z., Acuña E., Escareño E., y Vega H. el mismo que se ejecutó en función de la Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002 (NOM 2002), en la que se señalan las medidas de protección radiológica en establecimientos de diagnóstico médico con rayos X, con la

finalidad de determinar el tipo de equipo de radiología que puede albergar la entidad a partir de analizar la ubicación del recinto, las áreas que lo rodean y las dimensiones de cada muro (Padilla, et al., 2011).

En la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, en el año 2013 Vilma Yanchapanta, realizó el **“CÁLCULO DE BLINDAJE PARA EL ACELERADOR LINEAL MONOENERGÉTICO DEL INSTITUTO DE CÁNCER SOLCA- NÚCLEO DE LOJA”** en donde se considera los fundamentos básicos de la física de las radiaciones, estructura del Acelerador Lineal Clínico (LINAC) y los principales protocolos existentes para el cálculo de blindajes de fotones de alta energía. Dicho trabajo de titulación tiene como objetivo calcular el blindaje para el búnker que alojará al Acelerador Lineal Monoenergético de SOLCA NÚCLEO DE LOJA, mismo que fue realizado cumpliendo con los requisitos de Seguridad y Protección Radiológica establecidas por la Autoridad Competente del Ecuador “SCAN” y las características requeridas para la instalación del equipo (Yanchapanta, 2013).

En el año 2015, en el Hospital General IESS de la Ciudad de Riobamba, Paulina Morocho realizó el **“CÁLCULO DE BLINDAJE PARA LA SALA DE RAYOS X DEL EQUIPO DE RADIOLOGÍA DIGITAL EcoRay**, para cumplir con los parámetros establecidos en seguridad y protección radiológica por la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN). El cálculo de blindaje se realizó en base de los criterios y procedimientos establecidos en los protocolos N°147 del NCRP y la guía de seguridad N° 5.11 del CSN, aplicando los parámetros de diseño de la sala, carga de trabajo, áreas colindantes, tipo de personal, factores de uso y de ocupación, tipo de personal que permanece en las áreas colindantes (Morocho, 2015).

En la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el Departamento de Medicina Nuclear se realizó la investigación e implementación del **“CÁLCULO DE BLINDAJES DEL NUEVO DEPARTAMENTO DE MEDICINA NUCLEAR DEL INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA”** en el año 2015, teniendo en cuenta una instalación donde se utilizarán fuentes radiactivas requiere el cálculo de blindajes necesarios para limitar las dosis recibidas por los trabajadores y el público en general. El Departamento de Medicina Nuclear contará con una cámara gamma, una cámara de tomografía por emisión de fotón único (SPECT-CT), cámaras de tomografía por emisión de positrones (PET) y 2 mastógrafos por emisión de positrones (PEM). Cada modalidad de imagen contará con sus propios cuartos de captación. Materiales y métodos: Se aplicó la metodología presentada en el reporte TG-108 de la AAPM y las publicaciones 147 y 151 de la NCRP (Canseco & Rodríguez-Lagunab, 2015).

En el 2016, en la Universidad Nacional de Gral. San Martín de Argentina se realizó un trabajo de grado titulado **“APLICACIÓN DE BLINDAJE EN TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES (PET)”** en la que se encuentra como autor Nanci Maniscalco. Este trabajo de investigación trata acerca de los blindajes de los recintos orientados a encapsular la radiación proveniente del radioisótopo desde el momento en que arriba al servicio de Medicina Nuclear (MN) (Maniscalco, 2016).

En el Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo en conjunto con la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina con la colaboración de Vilma Nohemí Yanchapanta Bastidas realizaron el trabajo de Investigación de **“METODOLOGÍA PARA ADAPTAR RECINTOS DE IRRADIACIÓN DE BRAQUITERAPIA HDR CON Ir-192 A Co-60”** en la que se trata de la Braquiterapia de alta tasa dosis (HDR por sus siglas en inglés) cumple un papel de gran importancia en los tratamientos radiantes. Tradicionalmente, hasta fines de la década pasada, los equipos más difundidos para realizar Braquiterapia de alta tasa de dosis se han basado en Ir-192, pero en los últimos se ha introducido al mercado equipos con fuentes de Co-60, los cuales ya están siendo utilizados en varias instituciones oncológicas con una clara tendencia a ir en aumento (Yanchapanta, 2016).

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar y Calcular el blindaje para las zonas de alto riesgo radiológico en la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo, IEES - Guayaquil”

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar el estudio del arte en lo referente al diseño y cálculo de blindajes para las zonas de alto riesgo radiológico;
- Diseñar el recinto que albergará al equipo SPECT-CT en la Unidad de Medicina Nuclear;
- Calcular el espesor necesario en las barreras de protección para las instalaciones del equipo SPECT-CT; Salas de Hospitalización; Cuarto Caliente; Cuarto de Desechos; Cuarto de Almacenamiento y Cuarto de Inyección.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Fundamentos generales de radiación ionizante y su empleo en la Medicina Nuclear

##### 2.1.1. Radiación ionizante

Se define una radiación como ionizante cuando al interactuar con la materia produce ionización de la misma, es decir, que origina partículas con carga eléctrica (iones). El origen de estas radiaciones es atómico, pudiéndose producir tanto en el núcleo del átomo como en los orbitales y pudiendo ser de naturaleza corpuscular (partículas subatómicas) o electromagnética (rayos X, rayos gamma ( $\gamma$ )) (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2000).

Las radiaciones ionizantes de naturaleza electromagnética son similares en naturaleza física a cualquier otra radiación electromagnética pero con una energía fotónica muy elevada (altas frecuencias, bajas longitudes de onda) son capaz de ionizar a los átomos. Las radiaciones corpusculares están constituidas por partículas subatómicas que se mueven a velocidades próximas a la de la luz (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2000).

Existen varios tipos de radiaciones emitidas por los átomos, las más frecuentes: la desintegración, " $\alpha$ ", la desintegración " $\beta$ ", la emisión " $\gamma$ " y la emisión de rayos X y neutrones. Las características de cada radiación van a depender de un tipo a otro, es importante considerar la capacidad de ionización y su poder de penetración, que en gran parte son consecuencia de su naturaleza (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2000).

##### 2.1.2. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Las características esenciales de las radiaciones ionizantes (fotones, neutrones, partículas cargadas) es su capacidad de penetrar en la materia e interactuar con ella. En estas interacciones, la radiación va a perder parte o toda su energía cediéndola al medio que lo

atraviesa mediante mecanismos de interacción que van a depender esencialmente del tipo de radiación, de su energía y de las propiedades del medio material con el que interaccionan. Estos procesos de interacción de la radiación con la materia son la causa de los efectos producidos por las radiaciones (en particular, los efectos biológicos producidos en seres vivos) y determinan las condiciones de propagación de la radiación en un medio material así como el diseño de los blindajes apropiados para cada tipo de radiación (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2013).

La interacción de un haz de fotones con un blanco es de tipo probabilístico o estocástico por lo que es posible conocer a priori si un fotón va a interaccionar o no, tan solo se puede conocer la probabilidad de interacción. Por lo tanto, se define la sección eficaz ( $\sigma$ ) como el cociente entre la probabilidad de interacción con el blanco (P) y la fluencia de partículas ( $\Phi$ ) para una sustancia que actúa como blanco frente al campo de radiación. La unidad especial de sección eficaz es el barn (barnios) siendo  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$  (ATTIX, 1986).

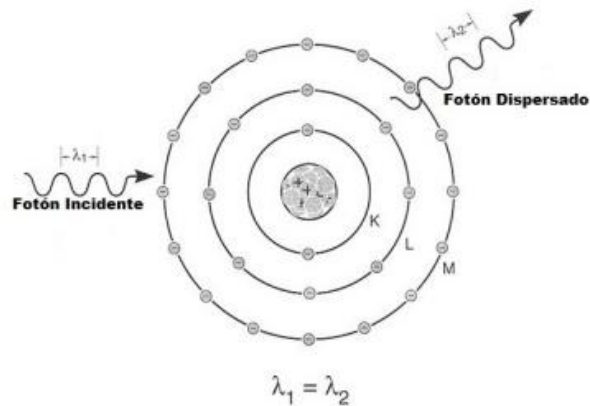
$$\sigma = \frac{P}{\Phi} \quad (1)$$

La sección eficaz de cada interacción aumenta con el número atómico del material absorbente y sirve para predecir la probabilidad que ocurra cualquiera de los mecanismos de interacción de los fotones con la materia (ATTIX, 1986).

Al interaccionar los fotones con los electrones o núcleos del blanco, la intensidad de la radiación se va atenuando de manera exponencial, conforme aumente el espesor del material atravesado, pero nunca llegan a anularse, así también la energía es transferida total o parcialmente por medio de diferentes fenómenos, los cuales dependerán de su energía y del número atómico Z del material a interaccionar (ATTIX, 1986).

#### *2.1.2.1. Dispersión de Rayleigh (Dispersión Coherente)*

Se origina con rayos X de bajas energías, como las empleadas en mamografía las mismas que van desde 15 a 30 kV. Durante este fenómeno, el fotón no pierde la energía, esto se debe a que estos fotones son dispersados elásticamente por electrones atómicos que se encuentran fuertemente ligados, sin excitar el átomo y el ángulo es relativamente pequeño, por lo tanto, como no hay transferencia de energía al medio (ATTIX, 1986).

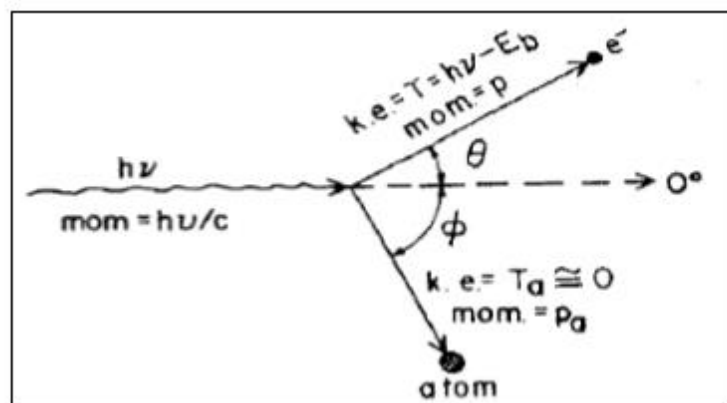


**Figura 1-2:** Dispersión Rayleigh

Fuente: (Mercado, 2016)

### 2.1.2.2. Efecto Fotoeléctrico o absorción Fotoeléctrica

El efecto fotoeléctrico predomina para energías menores a un 0.1MeV, es un proceso de absorción que ocurre cuando se origina una interacción entre un fotón y un átomo, representado por uno de sus electrones suficientemente ligado. La consecuencia de una interacción fotoeléctrica es la emisión de electrones (fotoelectrones), debido a la absorción total de la energía del fotón por el electrón ligado (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2013).

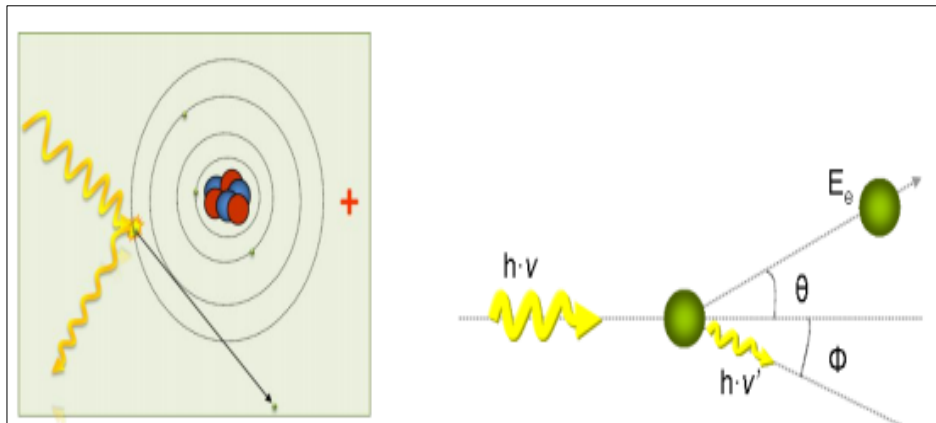


**Figura 2-2:** Efecto Fotoeléctrico

Fuente: (ATTIX, 1986)

### 2.1.2.3. Efecto Compton o dispersión de Compton

La interacción de tipo Compton es dominante a energías cercanas a 1MeV, dicho proceso se origina con la interacción de un fotón y un electrón que se encuentra débilmente ligado al átomo que se puede considerar como libre, considerando entonces la colisión como elástica (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2013). Después de la colisión, el fotón incidente cede parte de su energía, desprendiendo al electrón con un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección del fotón incidente, que tiene una energía cinética  $T$  y un momento lineal  $p$ , el resto de la energía del fotón incidente la lleva el fotón dispersado con un ángulo  $\phi$  al lado opuesto de la dirección del fotón incidente, el cual lleva una energía  $h\nu'$  y un momento lineal  $h\nu'/c$ , con lo cual el fotón incidente pierde energía originando más radiación dispersa que los otros procesos de interacción de los fotones con la materia (BUSHONH, 1999).

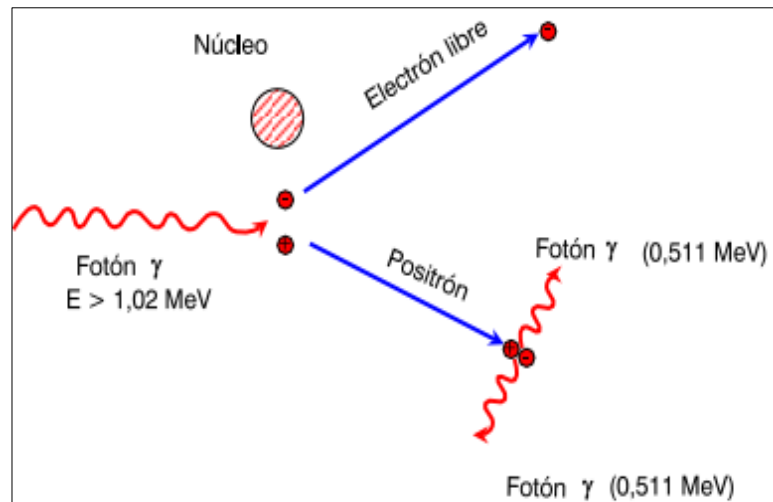


**Figura 3-2:** Efecto Compton

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2013)

### 2.1.2.4. Producción de Pares

El fotón interactúa con el campo electromagnético del núcleo y cede toda su energía en el proceso creando un par electrón-positrón. Para que suceda este proceso de interacción es necesario que la energía umbral del fotón incidente sea de 1.022 MeV, ya que la energía másica en reposo del electrón es equivalente a 0,511 MeV al igual que del positrón, como se puede ver en la Figura 4-2 (ATTIX, 1986)



**Figura 4-2:** Producción de Pares

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2013)

De tal forma que las dos partículas producidas (electrón y positrón), el electrón se une a cualquier átomo cercano, mientras que el positrón encuentra otro electrón en su camino y se aniquilarán, dando lugar a un par de fotones de aniquilación de 0.511 MeV cada uno, los mismos que se alejan en sentidos opuestos formando un ángulo de  $180^\circ$  (ATTIX, 1986)

### 2.1.3. Clasificación de la radiación ionizante

El Consejo Nacional de Protección y Medición de Radiación (NCRP), recomienda cierta terminología en el momento de hablar de las radiaciones ionizantes, dando importancia a las grandes diferencias entre las interacciones de carga y sin carga de las radiaciones con la materia. Es así que la radiación por la ionización que provoca se clasifica en: (Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2017).

#### 2.1.3.1. Radiación directamente ionizante

En esta clasificación se encuentran las partículas cargadas rápidas ( $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ ), este tipo de radiación ionizante interactúa con la materia sobre todo mediante la fuerza de Coulomb, la cual hace repeler o atraer electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas (Cherry, 2014).

#### *2.1.3.2. Radiación indirectamente ionizante*

Es producida por partículas sin carga, los tipos más comunes de radiación ionizante indirecta son los generados por fotones con energía superior a 10 keV (rayos X y rayos gamma) y todos los neutrones (Cherry, 2014).

#### *2.1.4. Efectos de la radiación ionizante*

El daño que causa la radiación en los órganos y tejidos depende de la dosis recibida, o dosis absorbida, que se expresa en una unidad llamada gray (Gy). El daño que puede producir una dosis absorbida depende del tipo de radiación y de la sensibilidad de los diferentes órganos y tejidos (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2016).

Dependiendo de varios parámetros complejos, cuando la radiación ionizante transfiere su energía a un sistema biológico, provocará una o más consecuencias. La incidencia general y la severidad del resultado o consecuencia final estará directamente relacionado con la dosis de radiación absorbida por el sistema con el cual interactúa dicha radiación los efectos provocados por la radiación ionizante se dividen en (Kelley, 2013):

##### *2.1.4.1. Efectos genéticos*

Son aquellas alteraciones genotípicas hereditarias ocasionadas por las mutaciones en los genes o cromosomas de células germinales, es decir, las células germinales haploides. Los efectos genéticos muestran una relación dosis-efecto similar a los efectos estocásticos en que la descripción de incidencia es sólo válida en grandes poblaciones de individuos expuestos (Núñez, 2008).

##### *2.1.4.2. Efectos somáticos*

Involucran primordialmente a las células diploides (aquellas que presentan un juego de cromosomas duplicado). El efecto somático se manifestará en el individuo que absorbe la dosis de radiación, se clasifican en dos tipos: efectos de relativa certeza (efectos determinísticos) y los que ocurren al azar o estocásticos (efectos no determinísticos) (Núñez, 2008).

## **Efectos determinísticos**

Son aquellos que poseen altas dosis sobre porciones grandes del cuerpo. Se caracterizan por tener un umbral de dosis por debajo por lo que no se observa ningún efecto, un corto período de latencia y la severidad depende de la dosis. Los efectos determinísticos se pueden categorizar en efectos tempranos y tardíos (Núñez, 2008).

**Efectos tempranos.-** se dan durante el del primer año de la exposición y guardan relación con el número de células muerta. Algunos ejemplos más comunes son: eritemas o enrojecimiento de la piel, la caída del pelo, la neumonitis radica o inflamación pulmonar fibrótica (Kelley, 2013).

**Efectos tardíos.-** se originan luego del año de recibir la dosis, están relacionados con el daño inicial producido por la dosis y al deterioro debido a los mecanismos de reparación. Algunos ejemplos incluyen la queratosis, la fibrosis pulmonar y las cataratas (Núñez, 2008).

### *2.1.4.3. Efectos estocásticos*

Los efectos estocásticos son aquellos en los cuales la probabilidad de que se produzca el efecto se encuentra en función de la dosis, mientras que la severidad del mismo no dependerá de la dosis, no tienen umbral el daño se puede presentar luego de largos períodos (Gisone & Pérez , 2014).

## **2.2. Medicina Nuclear**

La Medicina Nuclear es una de las especialidad médica que utiliza radiotrazadores (radiofármacos) con la finalidad de evaluar las funciones corporales y para diagnosticar y tratar enfermedades (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2016). Equipos especiales que se emplean en MN permite a los médicos rastrear la ruta de estos radiotrazadores Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica (SPECT-CT) y la Tomografía por Emisión de Positrones (PET-CT) son las dos modalidades más comunes y actuales que son empleadas en Medicina Nuclear (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2016).

Los materiales radioactivos usados en este tipo de exploraciones son denominados radiofármacos o radiosondas que, según el tipo de examen estos se podrán inyectar, ingerir por vía oral o inhalar como gas, para que finalmente se acumulan en el órgano o área del cuerpo a examinar por afinidad bioquímica que posea cada uno se estos. Las emisiones radioactivas de los radiofármacos son detectadas por una cámara especial o aparato para tomar imágenes que

van a proporcionar información molecular detallada (Radiological Society of North America (RSNA), 2016).

El principio básico de la MN es el mismo, pero existen dos grandes grupos de radioisótopos que permiten que se originen dos subespecialidades: la MN Convencional y la No Convencional. La MN Convencional utiliza isótopos emisores de fotones; en cambio, la MN No convencional lo hace con isótopos emisores de positrones por lo sé que requiere el uso de un equipo especial para la generación de estos isótopos la misma que debe estar en las cercanías de centro de diagnóstico esto se debe el tiempo de vida media que estos radioisótopos presentan (Radiological Society of North America (RSNA), 2016).

Ambos grupos de isotopos tienen diferencias muy profundas en el interior de la especialidad, la MN Convencional permite conocer estructura, y en casos muy particulares, posibilita inferir funciones metabólicas, la MN no convencional se justifica exclusivamente de los procesos metabólicos (Radiological Society of North America (RSNA), 2016).

### ***2.2.1. Radioisótopos***

Los radioisótopos están formados por moléculas transportadoras las mismas que se encuentran ligadas fuertemente a un átomo radiactivo. Estas moléculas transportadoras dependerán del propósito del escaneo. Algunos trazadores emplean moléculas que interactúan con una proteína específica o azúcar en el cuerpo y además pueden emplear las propias células del paciente (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2016).

Es importante que la vida media o el periodo de semi-desintegración que posee el radioisótopo, y por tanto, el radiofármaco sea la adecuada. La vida media, se define como el tiempo que tarda la actividad (número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo) de una muestra de átomos radiactivos en llegar a la mitad de su actividad inicial. Existe una vida media característica para cada átomo radiactivo (Lovera, 2015).





**Figura 5-2:** Ejemplo de un radiofármaco utilizado en Medicina Nuclear

Fuente: (Lovera, 2015)

### ***2.2.2. Radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear***

Un radiofármaco es un compuesto radiactivo utilizado para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades por lo general los radiofármacos se utilizan en un 95 % en diagnóstico mientras que aproximadamente el 5 % es utilizado para terapia (Chain & Illanes, 2015)

#### ***2.2.2.1. Yodo-131***

Conocido como radio-yodo, el yodo fue descubierto por Glenn Seaborg y John Livingood en el año 1938 en la Universidad de California, Berkeley. Posee un periodo de semi-desintegración de 8,04 días (LeMar et al, 2010).

Su modo de desintegración es beta y gamma, el Yodo-131 ocasiona mutaciones y la muerte de las células que penetra e incluso a otras células que se encuentran a varios milímetros de distancia. Debido a estas características este radioisótopo se usa en el ámbito clínico tanto en diagnóstico y tratamiento en anomalías presentes en la glándula tiroidea como: cáncer de tiroides, tratamiento del bocio simple y recientemente en el diagnóstico y tratamiento del neuroblastoma (LeMar et al, 2010).

#### **Aspectos físicos del Yodo-131**

El yodo es un elemento no metálico, representado por la letra I, tiene como número atómico 53, el más pesado de los halógenos que se encuentran en la naturaleza. En condiciones normales se

presenta de forma de sólido negro, lustroso, y volátil; recibe su nombre por su vapor de color violeta el yodo se puede combinar casi con cualquier elemento ( Robledo & Russo, 2009).

De los isótopos artificiales, el más importante es el Yodo-131, esto se debe a las propiedades radiactivas, se utiliza con trazadores radiactivos y ciertos procedimientos terapéuticos ( Robledo & Russo, 2009).

### **Obtención del Yodo-131**

El Yodo radiactivo (Yodo-131) se obtiene a partir de reacciones de fisión nuclear producidas por la descomposición del elemento uranio. Puede ser producido con fines médicos, tales como la producción de medicamentos para el tratamiento de la glándula tiroidea y el uso industrial ( Robledo & Russo, 2009).

### **Tipo de emisión y niveles de energía del Yodo-131**

El Yodo-131 es un isótopo radiactivo del Yodo que posee una vida media física de 8,04 días, emisor de radiación  $\gamma$  (gamma) y  $\beta$  (beta). Decae por emisión  $\gamma$  de alta energía (364 keV) y emisión de partículas  $\beta$ . La emisión  $\beta$  tiene una energía promedio de 192 keV (energía máxima de 606 keV), la partícula  $\beta$  deposita la mayor parte de su energía hasta un rango de 2,2 mm (distancia promedio igual a 0,5 mm) de su sitio de origen ( Robledo & Russo, 2009).

### **Forma física de administración del Yodo-131**

Es suministrado en cápsulas o por solución líquida de yoduro de sodio para una administración oral. El yoduro de sodio ( $^{131}\text{I-NaI}$ ) es una solución líquida clara e incolora volviéndose isotónica con solución salina fisiológica. Las cápsulas, en cambio, son preparadas evaporando una solución alcohólica de  $^{131}\text{I-NaI}$  en el interior de una cápsula de gelatina donde la actividad permanece confinada ( Robledo & Russo, 2009).

#### *2.2.2.2. Tecnecio-99m*

El tecnecio es un elemento químico cuyo radioisótopo es el Tecnecio99-m, se utiliza para el diagnóstico de enfermedades en Medicina Nuclear tiene una vida media corta (6 horas). Se obtiene a partir de un generador de Molibdeno, que es su radionúclido padre (Casado, 2016, pp. 2-5).

Una ventaja es que el rayo gamma es de simple energía por lo que no se produce emisión beta, y eso permite una alineación más precisa para los detectores de imágenes (Nave, 2015).

**Tabla 1-2:** Tiempo de Vida Media del Tecnecio-99m

Isótopo	Semi-vidas en horas		
	T <sub>Física</sub>	T <sub>Biológica</sub>	T <sub>Efectiva</sub>
<sup>99m</sup> Tc	6	24	4.8

**Fuente:** (Nave, 2015)

**Realizado por:** Mary Ganán. 2018

El Tecnecio-99m se obtiene por el bombardeo del Molibdeno-98, con neutrones. El Molibdeno-99 resultante, decae con una semi-vida de 66 horas. Este proceso permite la producción de Tecnecio-99m para fines médicos. La obtención del Molibdeno-99 es por un producto de fisión del Uranio-235, se puede separar de los otros productos de la fisión, y usarse para generar Tecnecio-99m (Nave, 2015).

#### 2.2.2.3. Fósforo-32

El Fósforo-32 es un isótopo radioactivo emisor de partículas beta poseen una energía de 1,71 MeV, tiene un período de semi-desintegración de 14.3 días, se estima que 60% del radioisótopo ingerido se excreta dentro de las primeras 24 horas, el 1% por día se excreta después del segundo o tercer día siguiente (Specific Handling, 2014).

El fósforo-32 se utiliza en la identificación de tumores malignos porque las células cancerosas tienden a acumular más fosfato que las células normales, la radiación emitida por el fósforo-32 puede usarse con fines terapéuticos y de diagnóstico (European Atomic Energy Community, 2011).

#### 2.2.2.4. Samario-153

El Sm-153 es un radioisótopo emisor de radiaciones beta y gamma. Presenta una semivida física corta, tiene una alta afinidad por el esqueleto óseo y su eliminación es por la orina se emplea con fines diagnósticos y en terapia paliativa del dolor se usa para tratar el cáncer de hueso y otros cánceres, el cual se acumula en el hueso y de allí libera la radiación (Instituto Nacional del Cáncer, 2017).

### 2.3. Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica (SPECT- CT)

El SPECT-CT es la modificación de una gamma-cámara que dispone de uno o más cabezales, detectores giratorios los que permiten la adquisición de proyecciones desde varios ángulos alrededor de un eje central. A partir de las proyecciones, por medio del uso de algoritmos de reconstrucción, se puede realizar la reconstrucción de los datos y obtener la distribución tri-dimensional del trazador en el organismo, logrando así visualizar cortes en cualquier orientación (Puchal Añé, et al., 2009).

Los nuevos equipos SPECT-CT, permiten la fusión de la imagen gamma gráfica con la radiológica, las que proporcionan una información más precisa de los órganos y estructuras anatómicas más complejas o de más difícil diagnóstico para la gammagrafía convencional, como corazón, columna vertebral, pelvis y sobre todo los estudios de cerebro (Clinica Universidad de Navarra, 2017).

El tiempo que dura el estudio oscila entre 30 a 40 minutos los primeros 3-5 minutos implican el componente de exploración CT, y el resto del tiempo es necesario para el estudio SPECT, es muy importante que durante el estudio el paciente permanezca inmóvil en el caso de los dos estudios tanto para que el SPECT y la TC para que estas puedan combinarse con precisión en caso de que no se pueda mantener el paciente inmóvil durante este periodo de tiempo se deberá notificar al personal que labore en la unidad de MN para que reciba la ayuda necesaria (Soo & Cain, 2015).

#### 2.3.1. Principales partes de un equipo SPECT-CT

La Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica (SPECT-CT), permite observar imágenes en reconstrucción tomográfica, por medio de cortes de un órgano en planos sagital, coronal, transaxial y la reconstrucción de imágenes de tipo 3D (Lovera, 2015). El SPECT-CT consta básicamente de:

**Tabla 2-2:** Componentes del SPECT-CT

COMPONENTES	FUNCIÓN
Cabezal	Detector de radiación

Colimador	Generalmente está hecha de plomo tienen la función de seleccionar y permitir el paso de aquellos fotones que no son absorbidos por las paredes de plomo
Cristal de centelleo	Tiene 9 mm de grosor de Ioduro de Sodio, que es capaz de detectar los fotones y transformarlos en un impulso eléctrico.
Tubos fotomultiplicadores	Incrementan el voltaje electrónico producido por las señales luminosas
Camilla	Debe de estar suspendidas en el aire, paralela al detector y hecha de un material que atenué muy poco la radiación gamma
Gantry	Es un sistema mecánico que permite girar a los detectores
Detectores	Encargan en detectar las partículas gamma mediante un cristal de Ioduro de Sodio
Computador	Permite ver y procesar las imágenes funcionales del órgano estudiado.

**Fuente:** (Morales, 2017)

**Realizador por:** Mary Ganán.2018

### ***2.3.2. Fundamentos físicos de la Tomografía Computarizada de Emisión Monofotónica***

Para adquirir un estudio de SPECT-CT, se hace rotar una gamma-cámara convencional alrededor del paciente, registrando una imagen en cada paso angular. La cámara únicamente se mueve alrededor del paciente tomando imágenes estáticas desde diferentes ángulos. (Córdova, 2015). Las imágenes se obtienen después de la inyección del radiofármaco que se utiliza para exploraciones de MN. El radiofármaco inyectado se adhiere a áreas específicas del cuerpo, dependiendo de qué radiofármaco se use y el tipo de exploración realizada, por ejemplo mostrará hueso para un escáner óseo y vesícula biliar y conductos biliares para la exploración hepatobiliar (Soo & Cain, 2015).

El radiotrazador es detectado por la gamma-cámara, la cámara o las cámaras giran en un arco de 360 grados alrededor del paciente, lo que permite la reconstrucción de una imagen en tres dimensiones (3D) hepatobiliar (Soo & Cain, 2015).

La similitud entre SPECT y CT en el método de procesamiento de imágenes permite combinar imágenes. La combinación de información de un estudio SPECT de Medicina Nuclear y una tomografía computarizada CT permite que la información sobre la función se combine fácilmente con información sobre cómo se ve la estructura corporal en la tomografía computarizada hepatobiliar (Soo & Cain, 2015).

## **2.4. Principales estudios diagnósticos realizados en Medicina Nuclear**

Los procedimientos por imágenes para medicina nuclear, no son invasivos, generalmente constituyen exámenes médicos indoloros que ayudan a los médicos a diagnosticar y evaluar problemas de salud (Radiological Society of North America (RSNA), 2016).

Según el tipo de estudio que el paciente necesite va a depender la radiosonda se puede inyectar, ingerir por vía oral o inhalar como gas, y finalmente se acumula en el órgano o área del cuerpo a examinar. Emisiones radioactivas de la radiosonda son detectadas por una cámara especial para tomar imágenes que producen fotografías y las que van a proporcionar información molecular detallada. Los principales estudios que se realizan son (Radiological Society of North America (RSNA), 2016):

### ***2.4.1. Rastreo de cuerpo total***

Es un tipo de examen que controla la reaparición o expansión del cáncer se llama rastreo corporal total, o RCT. En este examen el paciente ingiera una pastilla o bebida la misma que contiene yodo radiactivo (Yodo-131), posteriormente se lo ubicará debajo de una gran cámara que toma una imagen centellográfica (rastreo) de su cuerpo. Si alguna célula tiroidea está presente, aparecerá como una pequeña mancha en la película centellográfica (Pitoia, 2017).

### ***2.4.2. Estudio cardiovascular***

Las imágenes por MN cardíaca evalúan el corazón para identificar la enfermedad coronaria de las arterias y la cardiomiopatía. También se puede usar para ayudar a determinar si el corazón ha sido afectado por la quimioterapia o la radioterapia. La MN utiliza pequeñas cantidades de

materiales radiactivos llamados radiosondas que generalmente se inyectan en el torrente sanguíneo, se inhalan o se tragan (Radiology.Info.Org, 2017).

La radiosonda viaja a través del área examinada y entrega energía en la forma de rayos gamma que son detectados por una cámara especial y una computadora para crear imágenes del interior de su cuerpo. Las imágenes proporcionan información única que generalmente no se puede obtener usando otros procedimientos de toma de imágenes (Radiological Society of North America (RSNA), 2016)

#### **2.4.3. Estudio pulmonar**

La gammagrafía pulmonar de perfusión y ventilación es un procedimiento diagnóstico que proporciona información detallada de la distribución relativa de la irrigación y la ventilación de los pulmones. El radiofármaco adecuado para el estudio de la perfusión corresponde a microesferas formadas por la agregación de albúminas humanas marcadas con Tecnecio-99m (Medicine, 2001).

#### **2.4.4. Estudio renal**

La exploración del riñón y las vías urinarias con radiofármacos es una de las situaciones en que mejor se pone de manifiesto el carácter no invasivo y funcional de la MN. Esta evaluación incluye aspectos morfológicos y funcionales (García, 2000).

El radiofármaco más utilizado es el Tecnecio-99m-DMSA (ácido dimercaptosuccínico). A las dos horas de su administración por vía intravenosa el 40% o 65% de la dosis se fija a la corteza renal. La captación cortical dependerá del flujo sanguíneo renal y de la función de transporte de la membrana de las células tubulares proximales (García, 2000).

#### **2.4.5. Estudio de tiroides**

Las gammagrafías con yodo radiactivo se pueden usar para ayudar a determinar si alguien con una protuberancia en el cuello podría tener cáncer de tiroides. A menudo, se usan también en personas que ya han sido diagnosticadas con cáncer tiroideo diferenciado (papilar, folicular o célula Hürthle) para ayudar a mostrar si se ha propagado. Debido a que las células del cáncer medular de tiroides no absorben el yodo, no se usan las gammagrafías con yodo radiactivo en este cáncer (American Cancer Society, 2017).

## 5.2. Protección radiológica

Es un conjunto de medidas establecidas para la seguridad y la protección de los seres humanos y del medio ambiente frente a los posibles riesgos que se deriven de la exposición a las radiaciones ionizantes (Miralles, 2016). La ICRP, en su publicación número 60 afirma que “el objetivo de la Protección Radiológica consiste en proporcionar un adecuado nivel de protección a las personas, sin limitar indebidamente las prácticas beneficiosas a las que da lugar la exposición a radiaciones ionizantes” (Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP 60), 2017).

### 2.5.1. Exposiciones radiológicas

La Protección Radiológica se interesa por la protección de toda persona que resulte o pueda resultar expuesta a radiación ionizante (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012, pp. 5-10). Según la naturaleza del vínculo entre las personas y las fuentes de radiación las exposiciones se clasifican en:

**Exposición ocupacional:** la que se produce durante el desarrollo del trabajo con fuentes radiactivas artificiales o naturales.

**Exposición médica:** la que es consecuencia de los procedimientos de diagnóstico o de tratamiento a que pueden ser sometidos los individuos previos la justificación de la práctica.

**Exposición del público:** comprende todas las exposiciones que no sean exposiciones ocupacionales ni exposiciones médicas de pacientes.

### 2.5.2. Principios de la protección radiológica

**Justificación de la práctica:** No debe adoptarse ninguna práctica que signifique exposición a la radiación ionizante si esta no produce un beneficio neto positivo. Naturalmente, la práctica que implique la exposición a las radiaciones ionizantes debe suponer un beneficio para la sociedad. Deben considerarse los efectos negativos y las alternativas posible (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012, pp. 2-10).

La justificación evalúa el beneficio y el detrimento asociados con la práctica. Su aplicación conduce a impedir la utilización de fuentes de radiación con fines vanos, puesto que, el detrimento está asociado con la operación normal de las instalaciones y las que puedan derivarse de posibles accidentes (International Atomic Energy (IAEA), 2000)



**Optimización de la protección radiológica:** Para cualquier fuente de radiación, las dosis individuales, el número de personas expuestas, y la probabilidad de verse expuestas, deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible cumpliendo así el principio ALARA (Rincón Educativo de Foro Nuclear, s.f.), Siglas inglesas de As Low As Reasonably Achievable, es decir, “Tan bajo como sea razonablemente posible”. Toda dosis de radiación implica algún tipo de riesgo; por ello no es suficiente cumplir con la restricción de dosis que están fijados en las normativas nacionales e internacionales (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012, pp. 2-10).

**Limitación de dosis individual:** Las dosis de radiación recibidas por las personas no deben superar los límites establecidos en la normativa de organismos nacionales e internacionales, para cada circunstancia. Los límites de dosis establecidos en la legislación española garantizan que las personas no deben ser expuestas a niveles que sobrepasen a los niveles ya establecidos (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2012, pp. 2-10).

La ICRP considera que los límites de dosis existentes para los miembros del POE y para el público en general se establecen bajo una serie de límites de dosis que no deben ser superados los cuales se detallan a continuación (Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2007).

**Tabla 2-3:** Límites de dosis establecidos por el ICRP

<b>Tipo de límite</b>	<b>Ocupacional</b>	<b>Público</b>
<b>Dosis Efectiva</b>	20mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años	1mSv en un año
<b>Dosis Equivalente anual en</b>		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	

**Fuente:** (Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2007)

**Realizador por:** Mary Ganán. 2018

### ***2.5.3. Reglas fundamentales de protección radiológica contra toda fuente de radiación ionizante***

Las principales formas de disminuir la exposición a las radiaciones ionizantes son:

**Distancia:** La intensidad de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco productor (a mayor distancia, menor intensidad) ( Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2007).

**Tiempo:** La dosis absorbida es directamente proporcional al tiempo de exposición (aumenta el tiempo, aumenta la dosis) ( Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2007).

**Blindaje:** Recurso empleado entre la fuente y el individuo cuando no son suficientes los parámetros de distancia y de tiempo ( Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), 2007).

### ***2.5.4. Protección radiológica en Medicina Nuclear***

Las medidas de protección vienen condicionadas por aspectos fundamentales como el diseño de la instalación, la construcción y adquisición de elementos de blindaje o la definición de los procedimientos de trabajo. Debe cumplir ciertos requisitos básicos: ser segura, funcional y cumplir con la normatividad vigente (Barreda, 2013).

Una de las necesidades radiológicas es evitar posibles dispersiones de material radiactivos en un ambiente de trabajo, por tanto, es importante buscar zonas contiguas con factores de ocupación casi nulos (Barreda, 2013).

El personal ocupacionalmente expuesto (POE) que trabaja en la unidad debe contar con dosimetría personal de cuerpo completo, y localizada para manos, y la instalación deberá contar con dosimetría ambiental de los puntos más críticos o difíciles de proteger (Barreda, 2013).

#### ***2.5.4.1. Seguridad radiológica en la Unidad de Medicina Nuclear***

Las instalaciones de Medicina Nuclear deben cumplir con ciertos requisitos de seguridad, para que puedan garantizar la Protección Radiológica del personal ocupacionalmente expuesto y el público, con la finalidad de evitar algún tipo de exposición innecesaria a radiación ionizante de alta energía, que puede causar daños a la salud o al medio ambiente ( Belt Ibérica, 2012).

Para evitar este tipo de riesgos es necesario, entre otros requerimientos que las paredes, los pisos, la puerta del recinto que albergara al sistema SPECT-CT requiere un blindaje adecuado, de tal manera que dosis (tasa de dosis) fuera del recinto se encuentre por debajo de los límites de dosis máximos permitidos por las Autoridades Reguladoras nacionales e internacionales (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2017).

El recinto es un ambiente cerrado construido con la finalidad de contener la radiación ionizante de alta o baja energía y prevenir exposiciones innecesarias al POE, pacientes, médicos, público y medio ambiente. Todos los recintos poseen principios de diseños semejantes, aunque sus características de tamaño y diseño van a varias según el equipo que se vaya a requerir (NUCLEAR, 1996).

El área en el que se encontrará en equipo SPECT-CT consta de una sala de diagnóstico a la que se llega por un pasillo (corredor) que se diseñó con la finalidad que la radiación dispersa interactúe primero con la pared antes que con el pasillo. Normalmente se diseña el recinto con un solo punto de entrada con el objetivo de proteger a las personas de la radiación dispersa fuera de este (International Atomic Energy (IAEA), 2006).

La instalación que alberga un equipo SPECT-CT generador de radiación ionizante debe ser un área segura por lo que es necesario que cumpla los siguientes aspectos:

- El espesor del blindaje deben ser los adecuados en las paredes, pisos, techos y puertas del de manera que sean compatibles con los límites de dosis establecidos y los factores de ocupación de las áreas colindantes (International Atomic Energy (IAEA), 2000).
- Para mantener los límites de dosis establecidos por la ICRP se debe aplicar un Programa de Garantía de Calidad en Medicina Nuclear con la finalidad de minimizar cualquier tipo de error (International Atomic Energy (IAEA), 2000).
- Poseer dimensiones que permitan el alojamiento cómodo del equipo.
- Poseer monitores de radiación, señalización y alarmas.
- Poseer un sistema de visualización e intercomunicación con el interior de la sala.

## **2.6. Principales protocolos establecidos para el diseño y cálculo de blindaje para Unidades de Medicina Nuclear**

### **2.6.1. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)**

El CSN es un organismo independiente de la Administración Central del Estado español, competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Capacitado para suspender la construcción o el funcionamiento de las instalaciones por razones de seguridad (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2005).

El CSN desde su creación en 1976 por la Junta de Energía Nuclear publica Guías de Seguridad bajo el título “Guía para solicitar la puesta en marcha de las instalaciones de manipulación y almacenamiento de isótopos radiactivos (2.a y 3.a categoría)”, (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2005) que asumen la vigilancia y el control del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas de España y de los países que deseen hacer uso de estas guías (Consejo de Seguridad Nuclear España (CSN), 2004).

El objetivo de esta guía es recomendar los requisitos técnicos generales aplicables en la fase del diseño, construcción, pruebas de aceptación y el funcionamiento de las instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico con la finalidad que cada una de estas fases cumplan con los la garantía de calidad y Protección Radiológica necesaria para tener una optimización de todas ellas (Consejo de Seguridad Nuclear España (CSN), 2004).

### **2.6.2. National Council on Radiation Protection & Measurements (NCRP)**

Es una Institución fundada en 1964 por el Congreso de los Estados Unidos cuya finalidad es reunir, analizar y desarrollar información sobre Protección Radiológica. Esta norma internacional americana, se ha convertido en las más utilizadas debido a que sus reportes tienen valiosa información sobre el diseño, construcción, cálculo del espesor de las barreras de protección de las instalaciones y las características de los materiales que pueden ser utilizados para el blindaje (National Council on Radiation Protection (NCRP), 2009).

Los reportes publicados por el NCRP han sido modificados con el pasar del tiempo debido al avance de la tecnología se han creado nuevos equipos por lo cual, este organismo encargado de la Protección Radiológica y medidas emite nuevas publicaciones modificando ciertas normas, técnicas y parámetros de las publicaciones anteriores, brindando así recomendaciones actualizadas cada cierto periodo de tiempo (National Council on Radiation Protection (NCRP), 2009).

### *2.6.2.1. Structural shielding design for Medical X-Ray Imaging Facilities*

En el reporte N<sub>o</sub> 147 la NCRP brinda recomendaciones de diseño y evaluación de blindaje para uso médico de rayos X, que se emitió en Septiembre de 1976 (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007).

Este es de gran ayuda principalmente para el diseño y cálculo de blindaje el mismo que presenta recomendaciones e información técnica relacionado con el diseño e instalación de blindaje estructural para instalaciones que usan rayos X para imágenes médicas (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007).

### *2.6.2.2. Structural shielding design and evaluation for megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*

El Reporte N<sub>o</sub> 151 publicado en diciembre del 2005 sustituye al reporte N<sub>o</sub> 49 debido a que con el paso de los años se han ido creando nuevos equipos, con energías mayores a los 10 MeV, el uso de nuevas técnicas de tratamiento, ha hecho que se realice un el diseño del recinto con uno o dos laberintos, con cierta variedad de materiales y sobre todo porque contiene mayor información sobre los datos necesarios para el cálculo de blindajes (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005).

El método de cálculo introducido por el NCRP tiene como finalidad facilitar el diseño y el cálculo del espesor de las barreras protectoras debido a que proporciona los datos necesarios para un departamento moderno (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005).

### *2.6.3. American Association of Physicists in Medicine (AAPM)*

La Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM), es una organización científica y profesional, fundada en 1958, compuesta por más de 8000 científicos cuya práctica clínica está dedicada a garantizar la precisión, la seguridad y la calidad en el uso de la radiación en procedimientos médicos tales como imágenes médicas, radioterapia y Medicina Nuclear (American Association of Physicists in Medicine (AAPM), 2010).

En el 2006 se emite una recomendación por parte del Task Group AAPM 108: PET and PET/CT Shielding Requirements en el que se encuentran los requerimientos para poder realizar el cálculo de blindaje del PET-CT (American Association of Physicists in Medicine (AAPM), 2010).

#### **2.6.4. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)**

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entro en vigor el 29 de julio de 1957, su Sede se encuentra en Viena.

Se encarga de establecer protocolos de dosimetría, reglamentos de uso de sustancias radiactivas y generadores de radiación y mantiene la base de datos nucleares. La OIEA publica periódicamente normas de seguridad y protección radiológica aplicable a las industrias, medicina y demás prácticas que utilizan radiaciones (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2017)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Metodología

En este trabajo, se mencionan los requerimientos que se deben considerar para el diseño de la Unidad de Medicina Nuclear y finalmente realizar el cálculo de blindaje necesario para que la instalación que abarcará al equipo SPECT-CT cumpla con los niveles de dosis máximos permisibles fuera del recinto. Este proyecto se basa en las recomendaciones y metodología establecida por los reportes internacionales que proporcionan información sobre la construcción específica de áreas donde se instala equipos de PEC-CT, aceleradores lineales, tomógrafos, rayos X pero ninguno de estos son específicos para la instalación de un SPECT-CT, por tal razón se realizó una minuciosa investigación para realizar el diseño y cálculo de blindaje.

Los reportes principales en los que se sustenta el presente trabajo de titulación son: el Reporte NCRP 147 y 151 del Consejo Nacional de Protección y Medición de Radiación (National Council on Radiation Protection and Measurements) y el Task Group TG 108 del grupo de trabajo de la Asociación Americana de Físicos en Medicina (American Association of Physicist in Medicine, AAPM) en el año 2006, entre otros.

Uno de los métodos que se considera para controlar la exposición a las radiaciones ionizantes es el empleo de blindajes o barreras de protección, de materiales adecuados entre la fuente de radiación y las personas para reducir la intensidad de estas, a los niveles permisibles establecidos por la OIEA.

#### *3.1.1. Diseño del área de Medicina Nuclear*

Para la elaboración del diseño de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil, se empezó por reconocer el lugar, donde se va a construir la Unidad de Medicina Nuclear, en la cual se pudo obtener las dimensiones del terreno, cabe recalcar que las dimensiones del lugar que abarcará dicha construcción fueron proporcionadas por autoridades del Hospital Teodoro Maldonado Carbo.



**Figura 1-3:** Plano del Hospital Teodoro Maldonado Carbo

**Fuente:** (Carbo, 2017)

En la figura 1-3 se puede observar el espacio físico de la Unidad de MN, las áreas que se encuentran alrededor de la Unidad son un su mayoría área verde siendo este un parámetro importante en el momento de realizar el cálculo de blindaje de la Unidad.

Las dimensiones establecidas para el diseño de la Unidad de MN son:

**Tabla 1-3:** Valores del espacio físico de la Unidad de Medicina Nuclear

Ancho [m]	Largo [m]
16m	25m
Área Total	400m <sup>2</sup>

Realizado por: Mary Ganán.2018

Con las dimensiones establecidas en la Tabla 1-3 se procedió a realizar el diseño de la Unidad de MN, Organismos internacionales recomiendan que la distribución de áreas debe ser de mayor a menor actividad siendo este criterio uno de los puntos más importantes en el momento de realizar la distribución de las áreas.





**Figura 2-3:** Distribución de una Unidad de Medicina Nuclear

**Fuente:** (Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2012)

Teniendo como referencia lo establecido en recomendaciones de Organismos internacionales de Protección Radiológica y Seguridad en Medicina Nuclear, se ha clasificado en dos grupos los diferentes ambientes de la Unidad de MN:

- Área Controlada
- Área no controlada

Esta clasificación depende de la restricción de dosis equivalentes usados para la protección de los trabajadores y público ya que, cada área adyacente a la instalación de MN tiene una restricción de dosis asignado (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005).

- **Área controlada:** Es una lugar de limitado acceso donde se requiere en condiciones normales de operación que los trabajadores sigan procedimientos preestablecidos en estas áreas el personal está bajo la supervisión de un profesional con conocimientos de protección radiológica (National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP 151), 2005).
- **Área no controlada:** Las áreas no controladas son aquellas ocupadas por individuos tales como pacientes, visitantes a la instalación y empleados que no trabajan rutinariamente con o alrededor de las fuentes de radiación (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007).

La distribución de los ambientes que existen en la Unidad de MN (Ver Anexo B) están dados bajo la clasificación de áreas que se mencionaron anteriormente por lo que el diseño de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo cuenta con:

**Tabla 2-3:** Distribución de ambientes Área controlada

<b>ÁREA CONTROLADA</b>	
<b>Número</b>	<b>Ambientes</b>
4	Habitaciones de internamiento
1	Habitación para la enfermera en turno
1	Sala de equipo SPECT-CT
1	Sala de control
1	Cuarto de Inyección
2	Salas de espera para pacientes inyectados
1	Cuarto caliente
1	Sala de Ergometría
1	Cuarto de Desechos
1	Cuarto de Almacenamiento

Realizado por: Mary Ganán. 2018

**Tabla 3-3:** Distribución de ambientes Área no controlada

<b>ÁREA NO CONTROLADA</b>	
<b>Número</b>	<b>Ambientes</b>
1	Sala de Físicos Médicos
2	Consultorios Médicos

1	Sala de lectura de resultados
1	Bodega
4	Baños
1	Sala de espera
1	Estación de enfermería
1	Secretaría
2	Estaciones de cabinas telefónicas
1	UPS
1	Sala de tableros eléctricos
1	Sala de control de incendios

Realizado por: Mary Ganán. 2018

### ***3.1.2. Dimensiones del equipo SPECT-CT y sala de control***

Para poder diseñar el ambiente donde se va albergar el equipo SPECT-CT se consideró las recomendaciones de la casa fabricante del equipo las que se muestran en el Anexo 1.

### ***3.1.3. Diseño y distribución de los ambientes***

Para el diseño y distribución de ambientes se ha tomado como referencia las recomendaciones dadas por la NCRP 151, y la IAEA. El diseño y distribución de la sala del equipo SPECT-CT, se desarrolló en base a los siguientes criterios:

- Las áreas se han distribuido de tal manera que las salas con mayores niveles de tasa de dosis (habitaciones, sala de imagen, sala de captación, cuarto caliente, cuarto de desechos y almacenamiento) estén cerca al límite del hospital (área libre) y que las salas con menores niveles de tasa de dosis (consultorio ,oficinas, secretaría, estación de enfermería, sala de espera) estén próximos a las áreas donde se encuentra público en general (Guevara Rojas, et al., 2014).
- Las dimensiones de las salas, se determinaron considerando las dimensiones del equipo SPECT-CT (para la sala de imagen), la cámara de flujo laminar (para el cuarto caliente), camas (para las habitaciones de internamiento) (Guevara Rojas, et al., 2014).

- El cuarto caliente y la sala de captación del paciente están separados del ambiente donde se encuentra el equipo SPECT-CT (sala de imagen) por un corredor, con la finalidad de que estas salas no aumenten la radiación de fondo y puedan alterar las lecturas del equipo SPECT-CT debido a la sensibilidad del equipo (Guevara Rojas, et al., 2014).

### 3.1.4. *Determinación de las distancias desde las fuentes de radiación hasta las barreras de protección*

Con el diseño de las áreas ya establecidas, se procedió a determinar las distancias de las posibles fuentes de radiación en las diferentes áreas de la Unidad de MN. Las distancias consideradas para el cálculo de la infraestructura se midieron desde el centro del paciente (fuente) hasta el punto que se desea blindar.

### 3.2. *Radiofármacos utilizados en Medicina Nuclear*

Los radiofármacos en Medicina Nuclear son utilizados como compuestos de contraste que se inyecta al paciente, por vía intravenosa, ingerir por vía oral o inhalar como gas, permitiendo observar el interior del organismo de un modo no invasiva y obtener así la imagen del organismo o la patología determinada que se pretende estudiar (Torres, et al., 2014).

**Tabla 4-3:** Radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear

Isótopo	Vida Media	Energía	Tipo de Emisión
Yodo-131	8.04 días	364keV	Beta y gamma
Tecnecio-99m	6 horas	140keV	Gamma
Samario-153	46.3 horas	70keV	Beta y gamma

Fuente: (Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2012)

Realizado por: Mary Ganán. 2018

### 3.3. *Características del SPECT-CT Symbia Intevo™ Excel*

Symbia Intevo Excel Figura 3-3, es un sistema SPECT de última generación con un TC de alto rendimiento para una localización anatómica precisa y una corrección de atenuación, lo que brinda a los médicos una excelente calidad de imagen. Además, ofrece aplicaciones que reducen la exposición a la radiación. Symbia Intevo Excel proporciona imágenes de alta calidad y es una solución a las necesidades clínicas y comerciales de las instituciones de atención médica en todo el mundo (SIEMENS, 2017).



**Figura 3-3:** SPECT-CT Symbia Intevo™ Excel

Fuente: (SIEMENS, 2017)

#### **3.4. *Materiales sugeridos a utilizar en el blindaje***

Para realizar el cálculo de blindaje es necesario conocer la energía y el tipo de emisión que van a presentar los diferentes radioisótopos, conocer las especificaciones técnicas del equipo SPECT-CT que va adquirir el Hospital Teodoro Maldonado Carbo y finalmente los materiales que se utilizaron para el cálculo de blindaje de la Unidad de Medicina Nuclear.

Los materiales recomendados para un blindaje están relacionados con el poder de penetración de las diferentes emisiones radiactivas. Los materiales utilizados para blindar fuentes de radiación X y gamma, tienen masa y número atómico alto, capaces de atenuar la radiación. Los materiales recomendados a usarse para atenuar la radiación X y gamma son el plomo y el concreto de alta densidad.

En lo que se refiere al material de blindaje, la densidad y el espesor del mismo van de la mano para reducir la intensidad de la radiación, en general es verdad que a mayor número atómico mayor densidad de material y viceversa. Por lo que al tener un material con un alto número atómico se cumple el objetivo de disminuir la exposición a la radiación a los empleados y público en general a niveles tolerables según la legislación vigente (Escobar, 2006).

La capa decirreductora (CDR o TVL) es el espesor de un material que al interponerse a la radiación X o gamma, va atenuar la intensidad de la radiación en un 10% de su valor inicial (Fernandez, 1996). El valor de la capa decirreductora es característico para cada material y para cada valor de energía en la Tabla 5-3 se muestran los valores de TVL requeridos para el cálculo de blindaje de la Unidad de Medicina Nuclear.

**Tabla 5-3:** Valores de TVL para los materiales usados en el cálculo de blindaje

<b>Material</b>	<b>TVL</b>
Plomo (11,35 g/cm <sup>3</sup> )	3.1mm
Concreto (2.3 g/cm <sup>3</sup> )	18cm

**Fuente:** ( Robledo & Russo, 2009).

**Realizado por:** Mary Ganán. 2018

Los valores de TVL que se muestran en la Tabla 5-3 están dados para una energía de 364keV (energía de Yodo-131), en la Tabla 4-3 se describen los valores de energía que presentan los radioisótopos que son usados en MN, se debe considerar que para realizar el cálculo de blindaje se utilizó el radioisótopo que presente la mayor energía por lo que el blindaje estará hecho para cualquier otro radionúclido que tenga una energía no mayor a los 364keV.

### 3.4.1. Placas de Plomo

El Plomo es un excelente blindaje frente a las radiaciones electromagnéticas (rayos X y gamma) esto se debe a la densidad que tiene de 11.33g/cm<sup>3</sup>, alto número atómico (82) y a sus niveles de estabilidad, otra característica importante de este elemento es la facilidad que presenta para trabajar. Una de las desventajas de este material son sus costos elevados (AMAT Metal Plas, 2014).

**Tabla 6-3:** Espesor y peso de las placas de plomo

<b>Espesor (mm)</b>	1	1.5	2	2.5	3	4	5
<b>Peso (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	12	8	24	30	35	46	58

**Fuente:** (AMAT Metal Plas, 2014)

**Realizador por:** Mary Ganán. 2018

El costo de las láminas de Plomo oscila entre los 100 y 150 dólares libre de impuestos de importación y tardan de 7 a 10 días en llegar al país.

### 3.4.2. *Concreto*

El concreto es uno de los materiales más utilizados en blindajes esto se debe a las características como su densidad  $2.3\text{g/cm}^3$  la misma que requiere una adecuada combinación de otros materiales (Guzmán, 2007). El concreto es una mezcla de dos componentes: la pasta está compuesta compuesto de cemento y agua, una a los agregados (arena y grava o piedra triturada), para formar una masa semejante a una roca ya que la pasta se endurece por una reacción química entre el cemento y el agua (Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto, 2016). La desventaja que presenta el concreto ante otros materiales es que se necesita espacios grandes.

### 3.5. **Recolección de datos**

En esta parte del Trabajo de Titulación, se indicará los datos que son necesarios para realizar el cálculo de blindaje para la Unidad de Medicina Nuclear los mismos que son: la actividad administrada al paciente, las barreras de protección, la carga de trabajo, el factor de uso y el factor de ocupación y la restricción de dosis.

#### 3.5.1. *Actividad Administrada*

La actividad que se va administrar al paciente dependerá de algunos parámetros a considerar por parte del Médico Nuclear, pero para el caso del cálculo de blindaje se debe establecer la actividad máxima que pueda recibir un paciente los mismos que viene establecidos en protocolos, bajo esta consideración en la Tabla 7-3 se establece la actividad máxima para realizar el cálculo de blindaje en las diferentes áreas de la Unidad.

**Tabla 7-3:** Actividades máximas a utilizar para el cálculo de blindaje

Área	Actividad [mCi]	Actividad en [MBq]
Cuarto de pacientes	200	7400
SPECT-CT	20	740
Sala de espera 1	20	740
Cuarto caliente	350	9250
Sala de Ergometría	20	740

Cuarto de desechos	5	185
Cuarto de almacenamiento	200	7400
Sala de espera 2	5	185

**Fuente:** (Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2012)

**Realizado por:** Mary Ganán. 2018

### 3.5.2. Barreras de protección

Según las recomendaciones de Organismos internacionales establecen que en MN se debe considerar que todas las paredes sean barreras primarias, debido a que la fuente (paciente) es isotrópica, es decir que la radiación emitida por la fuente es hacia todas las direcciones con la misma intensidad.

### 3.5.3. Carga de trabajo ( $W$ )

El Hospital se encuentra en una de las ciudades más importantes del Ecuador y solventa necesidades de los cantones aledaños a la provincia del Guayas, información necesaria para determinar la carga de trabajo, por lo que se recomienda que la Unidad de MN trabaje en doble jornada por la demanda de pacientes que el Hospital Teodoro Maldonado Carbo posee.

Para determinar la carga de trabajo en las habitaciones se consideró que el paciente permanecerá internado 72 horas (3 días), la actividad máxima administrada 7400MBq, y el número máximo de pacientes a la semana son 2pacientes. Para el caso de la sala en la que se encuentra el equipo SPECT-CT, el tiempo de permanecerá el paciente en la sala es 40 minutos, la actividad máxima administrada 740MBq y el número máximo de pacientes a la semana son 90 pacientes.

La carga de trabajo proporcionar cierta indicación del rendimiento de la radiación por semana del haz externo de la fuente de rayos X o de rayos gamma. Se expresa en  $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{sem}$  (American Association of Physicists in Medicine (AAPM), 2010).

$$W = \Gamma A_0 t l N_W \quad (2)$$

Dónde:

$\Gamma$ : Factor gamma del radionúclido a utilizar

$A_0$ : actividad

$t$ : tiempo de estudio



$N_w$ : número de pacientes por semana

### 3.5.4. Factor de uso ( $U$ )

Es la fracción de la carga de trabajo para la cual el haz útil está dirigido hacia cada barrera considerada a proteger. El valor de  $U$  depende del tipo de instalación radiactiva  $U$  para las barreras de una instalación de MN es 1.

### 3.5.5. Factor de ocupación ( $T$ )

El factor de ocupación Tabla 8-3 es la fracción de las horas de trabajo en la semana que una persona determinada ocuparía, promediada durante el año. Este factor debe ser determinado por un experto cualificado ya que tiene incidencia en el cálculo del blindaje (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007).

**Tabla 8-3:** Factores de ocupación

Tipo de área	NCRP 147
Oficinas administrativas o administrativas; laboratorios, farmacias y otras áreas de trabajo totalmente ocupadas por un individuo; áreas de recepción, asistieron a la espera habitaciones, áreas de juego interiores para niños, radiografía adyacente salas, áreas de lectura de películas, estaciones de enfermeras, rayos x salas de control.	1
Salas utilizadas para exámenes y tratamientos de pacientes.	1/2
Corredores, habitaciones de pacientes, salas de empleados, descanso del personal habitaciones.	1/5
Puertas del corredor.	1/8
Baños públicos, áreas expendedoras sin vigilancia, almacenamiento habitaciones, áreas al aire libre con asientos, sin vigilancia Salas de espera, áreas de espera para pacientes.	1/20
Áreas al aire libre con solo peatones transitorios o tráfico vehicular, estacionamientos sin supervisión, vehículos dejar áreas (sin vigilancia), áticos, escaleras, ascensores sin supervisión, armarios de conserjería	1/40

**Fuente:** (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007)

**Realizado por:** Mary Ganán. 2018

### 3.5.6. Restricción de dosis

Son las restricciones de dosis equivalentes usadas para la protección radiológica del POE (20mSv/año) y miembros del público (1mSv/año) (National Council on Radiationl on Radiation Protection and Measurements (NCRP-147), 2007). Cada área adyacente a una instalación de MN tiene un límite

de dosis asignado que no se debe exceder para evitar los efectos determinísticos y disminuir los efectos estocásticos.

### 3.6. Procesamiento de datos

En esta parte del Trabajo de Titulación se describe el procesamiento de datos que se requiere para realizar el cálculo de blindaje de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo.

#### 3.6.1. Cálculo de blindaje

Se utilizó el programa MATLAB, para elaborar una hoja de cálculo, considerando la metodología establecida en la publicación American Association of Physicists in Medicine (AAPM).

CÁLCULO DE BLINDAJE PARA LA UNIDAD DE MEDICINA NUCLEAR								
Institución: Hospital de Especialidades Teodoro Maldonado Carbo				Barrera:				
Sala: Habitación de Paciente				Dependencia contigua:				
				Clasificación de zonas:				
DATOS GENERALES			Símbolo	Valor	Unidades	CÁLCULO DE BARRERAS PRIMARIAS		
Factor de uso	U					Símbolo	Valor	Unidades
Factor de ocupación	T					B		
Restricción de dosis	P			uSv/sem				mm
Actividad administrada	Ao			MBq				cm
Rendimiento	$\Gamma$			uSvm <sup>2</sup> /MBqh	COMPROBACIÓN DEL BLINDAJE DETERMINADO			
Tiempo de estudio	ti			h	Comprobación del factor de transmisión	B'		
Número de pacientes por semana	Nw			pacientes/sem	Número de capas décimo reductoras	n		
Tiempo de vida media	$T^{1/2}$			h	Tasa de dosis equivalente	H		uSv/sem
Tiempo de captación	tu			h	Tasa de dosis instantánea	IDR		uSv/h
Constante 1					Tasa de dosis semanal	Rw		uSv/sem
Constante 2				uSvm <sup>2</sup> /MBqh	Tasa de dosis fuera de la sala de tratamiento	Rh		uSv/h
Constante 3					BLINDAJE DETERMINADO DEFICIENTE, SE PROCEDE AUMENTAR CAPAS DECIMOREDUCTORAS			
Distancia 1	d1			m	Espesor para concreto	x'		cm
Distancia 2	d1+0,3			m	Factor de transmisión	B''		
TVL del plomo				mm	Espesor para plomo	x''		mm
TVL del concreto				cm	Número de capas décimo reductoras	n		
Número de pacientes tratados en 1h	Nmax				Tasa de dosis equivalente	H		uSv/sem
Media de pacientes tratados en 1h	Nh				Tasa de dosis instantánea	IDR		uSv/h
Horas de trabajo por semana				h	Tasa de dosis semanal	Rw		uSv/sem
PARÁMETROS PARA DETERMINAR EL BLINDAJE						Tasa de dosis fuera de la sala de tratamiento	Rh	uSv/h
Carga de trabajo	W	0		uSvm <sup>2</sup> /sem	ESPESOR FINAL			
Factor de reducción	Rtu				CONCRETO			0 cm
Tasa de dosis inicial	Do			uSv/sem	PLOMO			0 mm

Gráfica 1-3: Formato del cálculo de blindaje

Realizado por: Mary Ganan. 2018

#### 3.6.2. Ecuaciones de cálculo

Para determinar el espesor de las barreras primarias requeridas y lograr mantener la restricción de dosis, es necesario estimar la carga de trabajo W, el factor de transmisión, la tasa de dosis señal, la tasa de dosis fuera de la sala de tratamiento a cualquier hora y finalmente la tasa de dosis instantánea.

### 3.6.2.1. Cálculo de barrera primaria

El espesor (x) de la barrera primaria se determina calculando el factor de transmisión (B), que es una medida de la efectividad de la barrera. Se encarga de reducir el campo de radiación a un nivel aceptable y está dada (American Association of Physicists in Medicine (AAPM), 2010).

Para los cuartos de inyección, radio-farmacia y habitaciones de internamiento de pacientes se considera:

$$B = \frac{10.9 \times P \times d^2}{T \times N_W \times A_0 \times t_U(h) R_{tU}} \quad (3)$$

Donde:

P: Restricción de dosis

d: distancia fuente-punto de cálculo

T: factor de ocupación

N<sub>W</sub>: número de pacientes por semana

A<sub>0</sub>:: actividad del radionúclido

t<sub>U</sub>: tiempo de captación

R<sub>tU</sub>: Factor de reducción de la dosis al tiempo de captación

Para la sala en la que se encuentra el SPECT-CT se considera:

$$B = \frac{12.8 \times P \times d^2}{T \times N_W \times A_0 \times F_U \times t_I(h) \times R_{tI}} \quad (4)$$

Donde:

P: restricción de dosis

d: distancia fuente-punto de cálculo

T: factor de ocupación

N<sub>W</sub>: número de pacientes por semana

A<sub>0</sub>: actividad del radionúclido

t<sub>I</sub>: tiempo de estudio

F<sub>U</sub>: factor de decaimiento debido al tiempo de captación

$R_{tI}$ : Factor de reducción de la dosis al tiempo del estudio

Para el cálculo del espesor de la barrera (B) está dado por:

$$x = TVL \times \log \left( \frac{1}{B} \right) \quad (5)$$

### 3.6.2.2. Límite de dosis fuera de la sala de tratamiento en cualquier hora ( $R_h$ )

Ayuda para conocer si la restricción de dosis fuera de la sala de tratamiento se encuentra dentro de los límites establecidos por las autoridades de cada país. Estos valores son dependientes de cada instalación ya que están en función de W y U.

$$R_h = \left( \frac{N_{max}}{40 \times N_h} \right) \times R_W \quad (6)$$

Donde:

$N_{max}$ : es el número máximo de pacientes tratados por hora

$N_h$ : es la media de pacientes tratados en una hora

$R_W$ : tasa equivalente a la dosis promediada en el tiempo semanal

### 3.6.2.3. Tasa equivalente a la dosis promediada en el tiempo semanal ( $R_W$ )

Es la dosis equivalente promediada durante un tiempo o período de funcionamiento en un lugar en específico.

$$R_W = \frac{IDR \times W \times U}{D_o} \quad (7)$$

Donde:

IDR: tasa de dosis instantánea medida

W: carga de trabajo

U: factor de uso

$D_o$ : tasa de dosis inicial

### 3.6.2.4. Tasa instantánea de dosis equivalente medida (IDR)

Ayuda a evaluar la adecuación de una barrera, por lo que ayuda a determinar la tasa de dosis en cualquier instante la cual no podrá superar los límites de dosis ya establecidos para cada una de las diferentes áreas.

$$IDR = \frac{D_0 B}{d^2} \quad (8)$$

Donde:

$D_0$ : dosis que existe en la sala

$B$  : factor de transmisión

$d$ : distancia fuente-punto de cálculo

#### 3.6.2.5. *Cálculo de blindaje para puertas*

La Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM), recomienda que para realizar el cálculo de blindaje para las puertas se debe considerar que estas son barreras primarias, por lo que las ecuaciones que se mencionaron anteriormente son válidas para realizar el cálculo de blindaje para las mismas.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de blindaje para las zonas que presentan riesgo radiológico (alto, medio, bajo) de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo IESS-Guayaquil

Para determinar que los espesores calculados tanto en pared, piso, techo y puertas y cumplan con las recomendaciones de la Protección Radiológica, se revisaron varios parámetros de cálculo recomendados por el NCRP 151, el cual establece que: la tasa de dosis equivalente (H) debe estar dentro de los límites permitidos para POE ( $100\mu\text{Sv/sem}$ ) y público ( $20\mu\text{Sv/sem}$ ), la tasa instantánea de dosis equivalente medida (IDR) y la tasa de dosis media fuera de la sala de tratamiento ( $R_h$ ) deben estar dentro de los límites, cumpliendo estos parámetros se podrá determinar si el espesor calculado cumple con las recomendaciones brindadas por este Organismo.

Para presentar los resultados obtenidos se ha realizado una clasificación, las mismas que van a estar relacionadas con el riesgo radiológico (alto, medio, bajo) que presente cada zona de la Unidad de Medicina Nuclear, esto con la finalidad de determinar en qué zona se encontraran las paredes de mayor espesor, las mismas que van a depender: del tiempo que dure el estudio, la actividad administrada y la distancia que exista entre la fuente y el punto de cálculo.

En la Tabla 1-4 se muestran los valores requeridos para el blindaje de: las habitaciones, cuarto caliente, cuartos de desechos y almacenamiento. El cálculo de blindaje este hecho para concreto con una densidad de  $2.3\text{g/cm}^3$  y plomo con densidad de  $11.33\text{g/cm}^3$ .

**Tabla 1-4:** Blindaje requerido para la zona de alto riesgo radiológico

<b>ZONA DE ALTO RIESGO RADIOLÓGICO</b>					
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Pared</b>	<b>Espesor en Concreto [cm]</b>	<b>Espesor en Plomo [mm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
<b>Habitación 1</b>	A1	65	11	1,00	20
	B1	37	6	40,05	100
	C1	49	8	1,00	20
<b>Habitación 2</b>	A2	62	11	1,00	20
	B2	39	7	40,05	100
	C2	65	11	8,01	20
<b>Habitación 3</b>	A3	62	11	1,00	20
	B3	52	9	8,01	20
	C3	39	7	40,05	100
	D3	65	11	8,01	20
<b>Habitación 4</b>	A4	62	11	1,00	20
	B4	65	11	1,00	20
	C4	51	9	1,00	20
<b>Radio Farmacia</b>	A	55	9	2,78	100
	B	56	10	1,60	20
	C	45	8	0,85	20
	D1	45	8	6,52	100
	D2	42	7	3,67	100
<b>Cuarto de desechos</b>	A	46	8	2,00	20
	B	46	8	20,03	100
<b>Cuarto de Almacenamiento</b>	A	65	11	4,01	20
	B	59	10	4,01	20
	C	55	9	10,01	100
	D	59	10	2,00	20

Realizado por: Mary Ganan.2018

**Tabla 2-4:** Blindaje requerido para puertas

<b>BLINDAJE PARA PUERTAS</b>				
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Puerta</b>	<b>Espesor en Plomo [mm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
Habitación 1	P1	4	80,09	100
Habitación 2	P2	4	80,09	100
Habitación 3	P3	4	80,09	100
Habitación 4	P4	4	80,09	100
SPECT-CT	P5	3	2,26	100
Cuarto de inyección	P6	2	25,38	100
Sala de espera 1	P7	2	38,39	100
Radio farmacia	P8	2	28,21	100
Sala de ergometría	P9	2	7,36	20
Cuarto de almacenamiento	P10	4	53,40	100
Baño de la sala de espera 2	P11	3	0,28	20

Realizador por: Mary Ganán. 2018



En los cálculos realizados para obtener el espesor necesario de las habitaciones de internamiento para pacientes que han recibido Yodo-131, se consideró que el paciente permanecerá internado por 72 horas. En el caso de la habitación uno los espesores se encuentran entre los 37 a 65cm de espesor, esto depende de los factores de ocupación ya que para cada área colindante existe un factor de ocupación específico.

En el caso de las habitaciones dos y tres los espesores requeridos son muy semejantes, los mismo que van desde los 39 a 65cm, el espesor que se requiere en las paredes C2 y D3 es de 65cm un espesor muy considerable el mismo que es justificado por el área colindante y el factor de ocupación (1/5) que establece el NCRP 147.

Para la habitación cuatro los espesores calculados varían entre 51 y 65cm, las paredes A4 y B4 tienen como área colindante área verde y la pared C una bodega por lo que la restricción de dosis en esta habitación fue de  $20\mu\text{Sv/sem}$  para las áreas colindantes ya mencionadas.

En este trabajo también se hizo el cálculo de blindaje de las paredes del cuarto caliente, como si no hubiera contenedores de plomo que almacenan a las fuentes radiactivas. Por lo que el blindaje calculado bajo esta consideración proporciona valores de 45 a 56cm de espesor para concreto y 7 a 8mm para plomo.

En el caso del cuarto de desechos se obtuvo el espesor para dos paredes A 48cm y B 46cm debido a que el cuarto de desechos se encuentra colindando con la sala de ergometría y el cuarto de almacenamiento, dichas áreas manejan mayor actividad en comparación con el cuarto de desechos por lo que se considera que el blindaje calculado para la sala de ergometría y el cuarto de almacenamiento satisfacen el blindaje para el cuarto de desechos. Los espesores que se necesitan en el cuarto de desechos son justificados mediante el tiempo de permanencia que estarán los bultos radiactivos y los viales.

La última zona que se considera que tiene alto riesgo radiológico es el cuarto de almacenamiento, dicha área se encuentra destinada para almacenar las moléculas transportadoras que se usarán para los diferentes radioisótopos, además se consideró este lugar en donde se almacenara los bultos que contengan sábanas, vómito, etc. Por esta razón los espesores calculados para el blindaje de esta área se encuentra entre los 55 y 65cm, dichos espesores se justifican por la actividad que se consideró (7400MBq) para esta área, el tiempo de permanencia, los factores de ocupación y las áreas colindantes.

En la Tabla 3-4 se encuentran los valores de espesor para la zona que presenta un nivel intermedio de riesgo radiológico en dicha zona esta: la SPECT-CT, sala de inyección y la sala de espera uno.

La sala del equipo SPECT-CT, el cuarto de inyección y la sala de espera (uno) para pacientes inyectados, requieren un blindaje menor los valores se encuentran entre 28 a 50cm de concreto y de 5 a 9 mm en plomo, esto se debe a la actividad que se va administrar al paciente, al tiempo de permanencia que habrá en la sala y gracias a las distancias de la camilla hacia las barreras primarias (paredes, techo y piso) para el caso del SPECT-CT.

Las zonas de bajo riesgo radiológico Tabla 4-4 se encuentran: la sala de ergometría, baño para pacientes y el cuarto de comandos. Los espesores que se requieren en esta zona varían entre los 25 y 45cm.

La sala de ergometría requiere espesores que varían entre los 30 a 45cm de concreto. El baño de pacientes requiere un muro de concreto (37cm), debido a que colinda con el área verde del Hospital donde se encuentra público, el cual se consideró un factor de ocupación de 0.025 según las recomendaciones del NCRP 147.

Para la sala de comandos no se requiere blindaje el mismo que se justifica por la distancia que existe entre la camilla del SPECT-CT hacia las barreras primarias (paredes, techo y piso) de la sala de control. La sala de control necesita una venta de 5mm de vidrio plomado, para tener comunicación entre la sala de SPECT-CT y la sala de control, en caso de no existir la ventana se deberá considerar la comunicación que debe existir entre las salas.

La tabla 2-4 se muestra los espesores para puertas en plomo las que requiere un adecuado blindaje para las zonas en las que se trabaja con material radioactiva, el espesor requerido para cada área va a depender exclusivamente de: la actividad que se administre, el tiempo de permanencia en la sala, las áreas colindantes y el factor de ocupación que se requiera para cada caso.

Se consideró realizar el cálculo de blindaje para el piso y techo de todas las áreas que trabajan con material radioactivo, bajo la recomendación del protocolo del TG 108, el mismo que indica que se debe considerar el factor de ocupación igual a 1 (para los dos casos) y la restricción de dosis ( $20\mu\text{Sv/sem}$ ).



**Tabla 3-4:** Blindaje requerido para las zonas que presente un valor medio de riesgo radiológico

<b>ZONAS DE MEDIO RIESGO RADIOLÓGICO</b>					
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Pared</b>	<b>Espesor en Concreto [cm]</b>	<b>Espesor en Plomo [mm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
<b>Sala SPECT-CT</b>	A	33	6	3,03	100
	B	37	6	9,70	20
	C	33	6	3,03	100
	D	28	5	6,07	20
<b>Cuarto de Inyección</b>	A	40	7	4,30	100
	B	48	8	13,32	20
	C	45	8	2,27	20
<b>Sala de espera 1</b>	A	45	8	1,09	20
	B	48	8	2,96	20

Realizador por: Mary Ganán. 2018

**Tabla 4-4:** Blindaje requerido para las zonas de que presente un valor medio de riesgo radiológico

<b>ZONAS DE BAJO RIESGO RADIOLÓGICO</b>					
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Pared</b>	<b>Espesor en Concreto [cm]</b>	<b>Espesor en Plomo [mm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
<b>Sala de Ergometría</b>	A	30	8	2,22	20
	B	45	8	2,22	100
	C	25	4	12,09	100
	D	34	6	2,22	100
<b>Baño</b>	A	37	6	0,06	20
<b>Sala de espera 2</b>	A	30	5	1,33	20
<b>Sala de Control</b>	A	a	a		100
	B	a	a		100
	C	a	a		100

Realizador por: Mary Ganán. 2018

a: Barrera que no requiere blindaje

**Tabla 5-4:** Blindaje requerido para piso

<b>BLINDAJE PARA PISOS</b>				
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Piso</b>	<b>Espesor en Concreto [cm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
Habitaciones	Piso 1	16	16,02	20
SPECT-CT	Piso 2	26	2,43	20
Cuarto de inyección	Piso 3	15	12,74	20
Sala de espera 1	Piso 4	20	3,44	20
Radio farmacia	Piso 5	25	4,31	20
Sala de ergometría	Piso 6	15	9,70	20
Cuarto de almacenamiento	Piso 7	42	16,02	20
Baño de la sala de espera 2	Piso 8	15	3,02	20
Sala de espera 2	Piso 9	15	0,85	20

Realizador por: Mary Ganán. 2018

**Tabla 6-4:** Blindaje requerido para techo

<b>BLINDAJE PARA TECHO</b>					
<b>Zona a Blindar</b>	<b>Techo</b>	<b>Espesor en Concreto [cm]</b>	<b>Espesor en Plomo [mm]</b>	<b>Dosis Equivalente [uSv/sem]</b>	<b>Límite Permitido [uSv/sem]</b>
Habitaciones	T1	53	9	16,02	20
SPECT-CT	T2	30	5	9,70	20
Cuarto de inyección	T3	25	4	12,13	20
Sala de espera 1	T4	28	5	8,93	20
Radio farmacia	T5	25	4	51,95	20
Sala de ergometría	T6	25	4	10,21	20
Cuarto de almacenamiento	T7	57	10	16,02	20
Baño de la sala de espera 2	T8	25	4	1,28	20
Sala de espera 2	T9	15	3	4,34	20

Realizador por: Mary Ganán.

## CONCLUSIONES

- Se realizó la revisión bibliográfica de los conceptos, las recomendaciones de Organismos internacionales sobre diseño y cálculo de blindaje para Medicina Nuclear, tanto a nivel nacional como internacional, se determinó que la información disponible sobre este tópico, es limitada.
- Se diseñó el recinto de la Medicina Nuclear que cuenta con un total de 30 locales, los cuales fueron distribuidos de acuerdo a las recomendaciones del OIEA SRS-2/1 referente a la clasificación de las zonas de riesgo y de estancia de pacientes, de ellos 11 necesitaron protección de blindaje.
- Se calculó el blindaje utilizando una hoja programada en MATLAB donde se tuvieron en cuenta las restricciones de dosis: personal ocupacionalmente expuesto ( $100\mu\text{Sv}/\text{semana}$ ) así como el público ( $20\mu\text{Sv}/\text{semana}$ ). El radiofármaco tomado como referencia fue el Yodo-131.
- Se determinó los espesores de las barreras de protección de los 11 locales que necesitan protección fueron: para pared, piso y techo en concreto de 25 a 65cm y en plomo de 4 a 10mm para puertas.



## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda que de realizarse algún cambio en el diseño original propuesto en este Trabajo de Titulación, se deberá realizar nuevos cálculos de blindaje en las barreras de protección teniendo en cuenta el nuevo diseño y densidades de los materiales utilizados.
- Implementar un programa de Protección Radiológica para corroborar los valores de tasa de dosis después de adquisición y puesta en servicio del equipamiento, con el fin de comprobar el cumplimiento de límite de dosis tanto para el POE y público.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**AMAT Metal Plas.** *Planchas y placas de plomo para protección radiológica.* [En línea]. Estados Unidos, 2012. [Consultado el: 12 de enero de 2018.] Disponible en:<http://www.pbamat.com/planchas-plomo-proteccion-radiologica.html>.

**AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE (AAPM).** *Radiation shielding for megavoltage photon therapy machines.*[En línea] Diseño de una instalación PET/CT considerando El cálculo de blindaje según AAPM TG – 108. [Consulta: 14 de noviembre de 2017]. Disponible en: <https://www.aapm.org/pubs/reports/detail.asp?Docid=107>

**AMERICAN CANCER SOCIETY.** Cáncer de tiroides. [En línea] Estados Unidos, 2013. [Consulta: 18 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.oncologia.org.ve/site/userfiles/svo/Tiroides.pdf>.

**ATTIX, F.** Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. New York- Estados Unidos : Wiley & Sons, 1986, págs. 38-55, 124-157.

**BELT Ibérica.** *Seguridad y protección* [En línea]. Protección radiológica en hospitales pequeños. [Consulta: 13 de septiembre de 2017.] Disponible en: [http://www.belt.es/expertos/home2\\_experto.asp?Id=5966](http://www.belt.es/expertos/home2_experto.asp?Id=5966).

**BARREDA, Carlos.** *Requisitos de protección radiológica y seguridad en medicina nuclear* [En línea]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. [Consulta: 23 de enero 2018.] Disponible en: [http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/normatividad/otan\\_req\\_medicina\\_nuclear.pdf](http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/normatividad/otan_req_medicina_nuclear.pdf).

**BUSHONH, S.** Manual de radiobiología para técnicos. 6<sup>a</sup> ed. Madrid – España., : Hardcourt, 1999, pág. 126-129.

**CANSECO, Hernández & RODRÍGUEZ LAGUNAB, A.** *Cálculo de blindajes.* [En línea] [Consulta: 12 de agosto 2017.] Disponible en: [http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Proteccion\\_radiologica.pdf](http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Proteccion_radiologica.pdf).

**CHERRY, Robert N.** radiaciones ionizantes. Protección Radiológica. Madrid-España : Enciclopedia OIT, 2014, págs. 2-5.

**CLINICA UNIVERSIDAD DE NAVARRA.** *Tecnología de vanguardia* [En línea]. [Consulta: 26 de octubre de 2017] Disponible en: [http://www.cun.es/es\\_EC/quienes-somos/la-clinica/tecnologia/spect-ct](http://www.cun.es/es_EC/quienes-somos/la-clinica/tecnologia/spect-ct).

**COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA (ICRP 60).** Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. Wisconsin. Madrid-España 2017, págs. 22-29

**COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA (ICRP).** Recomendación 2007 de la protección radiológica . Madrid- España 2007, págs. 71-116

**CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR ESPAÑA (CSN).** Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2005, págs. 3-7.

**CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR ESPAÑA (CSN).** La protección radiológica en la industria, la agricultura, la docencia o la investigación. Madrid España : CSN, 2004, págs. 33-34.

**CÓRDOVA, U.** *SPECT-CT* [En línea] México: Universidad Estatal de México [Consulta: 17 de octubre de 2017] Disponible en:  
[Http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Fundamentos\\_SPECT.pdf](Http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Fundamentos_SPECT.pdf).

**CORNEJO, s** “Cálculos de blindajes: optimización vs. paradigmas”. Cuba : 2ª ed. 2005, págs. 15-30.

**EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY. 2011.** *Comisión nacional de energía atómica (CNEA)*. [En línea]. [Consulta: 11 de septiembre de 2017.] Disponible en: [http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?Reference=EPRS\\_BRI%282017%29608665](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?Reference=EPRS_BRI%282017%29608665).

**GUEVARA ROJAS, Vanessa Yuliana , ROMERO Carlos Nicolás & BERROCAL TI, Mariella.** 1ª ed. QC DOSE S.A.C. Lima-Perú : 2014, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, págs. 10-18.

**GARCÍA JIMÉNEZ Hoyuela.** “Técnicas de medicina nuclear para la exploración del riñón y vías urinarias” Revista *El Siever* [En línea], 2000, (España) vol. 35, nº 1 págs.2-5 [Consulta: 2 de febrero de 2018.] Disponible en: <http://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-tecnicas-medicina-nuclear-exploracion-del-15351>.

**GISONE, Pablo & Pérez , María Rosario.** *Efectos biológicos de la radiación.* [En línea]. Barcelona : Universidad de Barcelona [Consulta: 19 de diciembre de 2017.] [Http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/\\_Public/33/052/33052454.pdf](Http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/_Public/33/052/33052454.pdf).

**GUSTAVO FERNANDEZ.** *Cálculo de blindaje.* NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-156-SSA1-1996. México : Dirección General de Salud Ambiental, 1996, págs. 5-7.

**GUZMÁN SÁNCHEZ, Diego.** *El concreto.* [En línea]. Bogota: Colombia. [18 de febrero de 2017.] Disponible en: <http://blog.360gradosenconcreto.com/blindaje-la-radiacion-concreto-alta-densidad/>.

**HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO.** *Historia del Hospital Dr. Teodoro Maldonado Carbo.* [En línea]. Guayaquil: Ecuador [Consulta: 28 de junio 2017.] Disponible en: <https://www.iess.gob.ec/documents/10162/3321619/PMF+HOSPITAL+TEODORO+MALDONADO+CARBO.pdf>.

**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO.** *Radiaciones ionizantes:* [En línea]. Madrid: España [Consulta: 12 de septiembre de 2017.] Disponible en: [Http://www.insht.es/inshtweb/Contenidos/Documentacion/fichastecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp\\_614.pdf](Http://www.insht.es/inshtweb/Contenidos/Documentacion/fichastecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_614.pdf).

**INSTITUTO NACIONAL DEL CÁNCER.** *Radiofármacos.* [En línea] Características de los radiofármacos. [Consulta: 12 de febrero de 2018.]Disponible en: <Https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/samario-sm-153>.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA).** Aspectos físicos de la garantía de calidad. Austria : s.n., 2000, págs. 1-60.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (AIEA).** Radiation protection in the design of facilities. Vienna : s.n., 2006, págs. 15-68.

**INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA).** *Informe anual del oiea para 2012* [en línea]. Viena-Austria 2012. [Consulta 12 de enero 2018.] Disponible en: <https://www.iaea.org/>, [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc573\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc573_sp.pdf).

**KELLEY, Guillermo.** *Efectos biológicos de las radiaciones.* [En línea]. Barcelona : Universidad de Barcelona 2013. [Consulta: 19 de diciembre de 2017.]  
[Http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec\\_10.htm](Http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_10.htm).

**LEMAR & H, J.** *Thyroid adaptation to chronic tetraglycine hydroperiodide water purification tablet use. Department of medicine, madigan army medical center, tacoma.* [En línea]. Lima: Perú, 2010. [Consulta 20 de enero 2018.] Disponible en: <https://academic.oup.com/jcem/article-abstract/80/1/220/2650765/Thyroid-adaptation-to-chronic-tetraglycine?Redirectedfrom=fulltext>.

**LOVERA FERNÁNDEZ, César.** *Nociones básicas para entender la medicina nuclear.* [En línea] 2016. [Consulta: 22 de enero del 2018 ]. Disponible en: <http://www.medicinanuclear.cl/generalidades.htm>.

**MANISCALCO, Nanci.** *Aplicación de blindaje en tomografía por emisión de positrones (PET).* [En línea] 2016. [Consulta 12 de febrero de 2018.] Disponible en: [http://www.unsam.edu.ar/escuelas/ciencia/alumnos/PUBLIC.1999-2006%20Alumnos%20P.F.I/\(RP\)%20MANISCALCO%20NANCI.pdf](http://www.unsam.edu.ar/escuelas/ciencia/alumnos/PUBLIC.1999-2006%20Alumnos%20P.F.I/(RP)%20MANISCALCO%20NANCI.pdf).

**MEDICINE, SEMINARS OF NUCLEAR..** Value of ventilation-perfusion scan in acute pulmonar. [En línea] 2001.[Consulta 19 de marzo 2018]. Disponible en: <Http://www.fac.org.ar/material/consenso001/03c-nuclear.pdf>.

**MIRALLES, Estefania.** *Protección radiológica.* [En línea] 2016. [Consulta: 26 de 02 de 2016.] Disponible en: <http://www.radiologia-salud.es/radiological-protection/proteccion-radiologica-concepto-y-principios-generales/>.

**MORALES, Patricio. 2017.** *Partes de una gamma-cámara.* [En línea] 2017. [Consulta 12 de marzo 2018].h Disponible en: <ttps://grupo3modulo2.wordpress.com/2012/02/16/partes-de-la-gamma-camara/>.

**MOROCHO, Paulina.** *Cálculo de blindaje para la sala de rayos x del equipo de radiología digital ecoray.* [En línea] 2015.[Consulta 20 de diciembre de 2017]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/4798/1/86T00020%20UDCTFC.pdf>.

**NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION & MEASUREMENTS (NCRP 151).** Structural shielding design and evaluation for megavoltage x-and gamma-ray radiotherapy facilities. España : s.n., 2005. Págs. 71-140.

**NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION & MEASUREMENTS.** *National council on radiation protection.* [En línea] 2009. [Consulta: 11 de enero de 2018]. Disponible en: <http://ncrponline.org/>.

**NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION & MEASUREMENTS (NCRP-147).** NCRP report no. 147, structural shielding design for medical x-ray imaging facilities. [En línea] 2007.[Consulta 30 de enero de 2018]. Disponible en: [http://www.ncrponline.org/Publications/Press\\_Releases/147press.html](http://www.ncrponline.org/Publications/Press_Releases/147press.html)., págs. 4-10, 31-43, 47-48, 133-134, 147-148 .

**NATIONAL INSTITUTE OF BIOMEDICAL IMAGING AND BIOENGINEERING.** *National institute of biomedical imaging and bioengineering.* [En línea] 2016. [Consulta: 15 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/medicina-nuclear>.

**NAVE, M Olmo R. 2015.** *Hyperphysics.* [En línea] 2015.[Consulta 09 de julio de 2017]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/technetium.html>.

**CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR ESPAÑA. 1996.** Manual sobre recintos blindados. España : s.n., 1996, págs. 7-23.

**NÚÑEZ, Margarita.** *Efectos biológicos de las radiaciones.* [En línea] 2008. [Consulta: 14 de diciembre de 2017.] Disponible en: [http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Efectos\\_biologicosdelasradiaciones.pdf](http://www.alasbimn.net/comites/tecnologos/material/Efectos_biologicosdelasradiaciones.pdf).

**ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (OIEA).** *Protección radiológica en medicina nuclear.* [En línea] 2012. [Consulta 05 de marzo de 2018.] Disponible en: <https://www.iaea.org/es>

**ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS).** *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección.* [En línea] 2016. [Consulta 20 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>.

**PADILLA, y otros. 2011.** Evaluación de blindaje de una sala para radiodiagnóstico. Mexico : s.n., 2011, págs. 149-151.

**PITOA, Dr. Fabian. 2017.** Cáncer de tiroides. [En línea] 2017. [Consulta: 17 de diciembre de 2017.] Disponible

En:[http://www.cancerdetiroides.com.ar/vnj/index.php?Option=com\\_content&view=article&id=107&Itemid=514](http://www.cancerdetiroides.com.ar/vnj/index.php?Option=com_content&view=article&id=107&Itemid=514).

**PUCHAL AÑÉ, Rafael , PAVÍA SEGURA, Javier & SETOAIN PEREGO, Xavier.** Medicina nuclear- spect-ct. *Fundamentos de la Física Médica*. Madrid : España, 2009, pág. 49.

**RADIOLOGICAL SOCIETY OF NORTH AMERICA (RSNA).** *Medicina nuclear general. radiologyinfo*. [En línea] 2016.[Consulta: 01 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.radiologyinfo.org/sp/pdf/gennuclear.pdf>.

**RADIOLOGY.INFO.ORG. 2017.** *Radiology.info.org*. [En línea] 2017. [Consulta 12 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?Pg=cardinuclear>.

**RINCÓN EDUCATIVO DE FORO NUCLEAR.** *Protección radiológica. Rincón educativo de foro nuclear*. [En línea] 2016. [Consulta 22 de julio de 2017]. Disponible en: [http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/6proteccion\\_radiologica.html](http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/6proteccion_radiologica.html).  
*Samarium-153-Lexidronam (EDTMP) en el tratamiento de las metástasis óseas*

**ROBLEDO, J & RUSSO, S.** *Protocolo de radioprotección destinado al personal de internación al cuidado de pacientes en tratamiento con <sup>131</sup>I*. [En línea] 2009. [Consulta: 15 de enero de 2018]. Disponible en:

[Http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/\\_Public/44/098/44098465.pdf](Http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/_Public/44/098/44098465.pdf).

**SIEMENS..** Siemens SPECT-CT. [En línea] 2017. [Consulta 08 de diciembre de 2017.] Disponible en:

<Https://www.healthcare.siemens.com/molecular-imaging/xspect/symbiaintevoexcel>.

**SOO, Geoffrey & CAIN, Timothy. 2015.** SPECT-CT Scan. [En línea] 2015. [Consulta: 10 de septiembre de 2017.] Disponible en: <https://www.insideradiology.com.au/spect-ct-scan/>.

**SPECIFIC HANDING.** Fosforo-32. [En línea] 2014. [Consulta: 14 de septiembre de 2017.] Disponible en: <https://ehs.yale.edu/sites/default/files/files/radioisotope-p32.pdf>.

**TORRES, F., y otros. 2014.** 1, Madrid : s.n., Febrero de 2014, Sociedad Española del Dolor, Vol. 11, págs. 2-5.

**UREÑA, Mynor.** Radioactividad. [En línea] 2014. [Consulta 14 de septiembre de 2017.] Disponible en: <http://unidadderadiactividad.blogspot.com/p/particulas.html>.

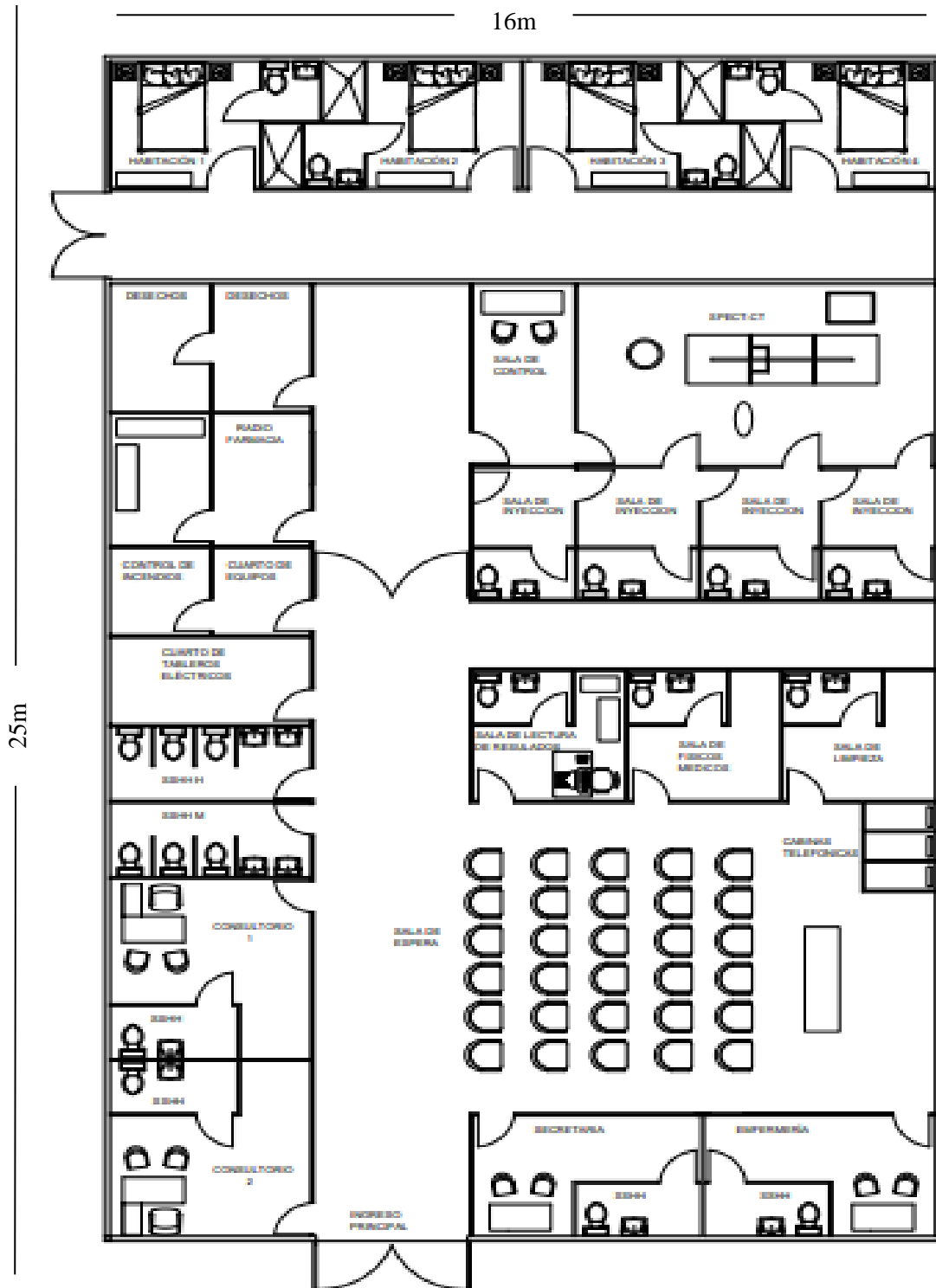
**YANCHAPANTA, Vilma Nohemí.** *Cálculo de blindaje para el acelerador lineal monoenergético del instituto de cáncer solca- núcleo de loja.* [En línea] 2013. [Consulta: 22 de junio de 2017.] Disponible en:  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3090/1/86T00015.pdf>.

**YANCHAPANTA, Vilma Nohemí.** *Metodología para adaptar recintos de irradiación de braquiterapia HDR con ir-192 a co-60.* [En línea] 2016.[Consulta 22 de junio de 2017.] Disponible en: <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/571/1/1Yanchapanta.pdf>.



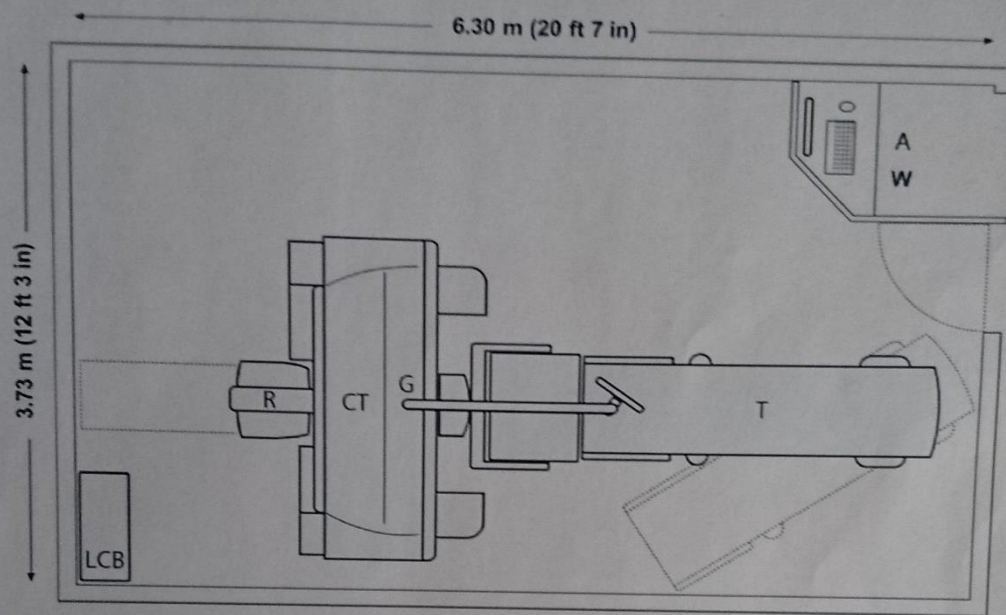
# ANEXOS

Anexo A: Diseño original de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital Teodoro Maldonado Carbo



Anexo C: Dimensiones del recinto que albergara al equipo SPECT-CT

## Symbia Intevo Excel – Minimum Room Size



Room Size	3.73 m (12 ft 3 in)x6.30 m (20 ft 7 in)
Ceiling Height	2.44 m (8 ft 0 in)
Hung Ceiling Height	2.29 m (7 ft 5 in)

Example layout. Please request site specific plans for your project.

**Anexo D:** Cálculo de blindaje a barreras primarias para la Tomografía Computarizada

**HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO IESS-GUAYAQUIL**

**Sala:** SPECT-CT

**Barrera:** Primaria

**Área colindante:** Corredor

**Pared:** A

<b>DATOS GENERALES</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALORES</b>
Factor de uso	<i>U</i>	0,25
Factor de ocupación	<i>T</i>	0,2
Clasificación de zona		
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,1
<b>DATOS DE CARGA SEMANAL</b>		
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	5000
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130
Rendimiento (mSv.m2/mA.min)		50
<b>DISTANCIA DE CÁLCULO</b>		
Distancia Foco-Barrea (m)	<i>d</i>	2,4
<b>FACTOR DE ATENUACIÓN</b>		
	<i>A</i>	21701,3889
<i>ESPESOR PLOMO (DIN 6812) (mm)</i>		2,88
<b><u>Espesor equivalente en otros materiales</u></b>		
<i>Hormigón barritado de 32 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		3,86
<i>Hormigón de 2,3 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		21,86
<i>Ladrillo macizo de 1,8 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		29,91

## HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO IESS-GUAYAQUIL

**Sala:** SPECT-CT

**Barrera:** Primaria

**Área colindante:** Corredor

**Pared:** C

DATOS GENERALES	SÍMBOLO	VALORES
Factor de uso	<i>U</i>	0,25
Factor de ocupación	<i>T</i>	0,2
Clasificación de zona		
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,1
<b>DATOS DE CARGA SEMANAL</b>		
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	5000
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130
Rendimiento (mSv.m <sup>2</sup> /mA.min)		50
<b>DISTANCIA DE CÁLCULO</b>		
Distancia Foco-Barrea (m)	<i>d</i>	2,4
<b>FACTOR DE ATENUACIÓN</b>		
	<i>A</i>	21701,3889
<i>ESPESOR PLOMO (DIN 6812) (mm)</i>		2,88
<b><u>Espesor equivalente en otros materiales</u></b>		
<i>Hormigón barritado de 32 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		3,86
<i>Hormigón de 2,3 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		21,86
<i>Ladrillo macizo de 1,8 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		29,91

## HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO IESS-GUAYAQUIL

**Sala:** SPECT-CT

**Barrera:** Primaria

**Área colindante:** Área libre

**Pared:** Techo

<b>DATOS GENERALES</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALORES</b>
Factor de uso	<i>U</i>	0,25
Factor de ocupación	<i>T</i>	1
Clasificación de zona		
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,1
<b>DATOS DE CARGA SEMANAL</b>		
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	5000
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130
Rendimiento (mSv.m2/mA.min)		50
<b>DISTANCIA DE CÁLCULO</b>		
Distancia Foco-Barrea (m)	<i>d</i>	3
<b>FACTOR DE ATENUACIÓN</b>	<i>A</i>	69444,4444
<i>ESPESOR PLOMO (DIN 6812) (mm)</i>		3,36
<b><u>Espesor equivalente en otros materiales</u></b>		
<i>Hormigón barritado de 32 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		4,46
<i>Hormigón de 2,3 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		24,42
<i>Ladrillo macizo de 1,8 g/cm3 DIM 6812 (cm)</i>		33,57

## HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO IESS-GUAYAQUIL

**Sala:** SPECT-CT

**Barrera:** Primaria

**Área colindante:** Área libre

**Pared:** Piso

DATOS GENERALES	SÍMBOLO	VALORES
Factor de uso	<i>U</i>	0,06
Factor de ocupación	<i>T</i>	1
Clasificación de zona		
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,02
<b>DATOS DE CARGA SEMANAL</b>		
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	5000
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130
Rendimiento (mSv.m <sup>2</sup> /mA.min)		50
<b>DISTANCIA DE CÁLCULO</b>		
Distancia Foco-Barrea (m)	<i>d</i>	2,5
<b>FACTOR DE ATENUACIÓN</b>		
	<i>A</i>	120000
<i>ESPESOR PLOMO (DIN 6812) (mm)</i>		3,54
<b><u>Espesor equivalente en otros materiales</u></b>		
<i>Hormigón barritado de 32 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		4,67
<i>Hormigón de 2,3 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		25,32
<i>Ladrillo macizo de 1,8 g/cm<sup>3</sup> DIM 6812 (cm)</i>		34,93

**Anexo E:** Cálculo de blindaje a barreras secundarias para la Tomografía Computarizada

<b>HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO IESS-GUAYAQUIL</b>			
<b>Sala:</b> SPECT-CT		<b>Área colindante:</b> Tableros	
<b>Barrera:</b> Secundaria	eléctricos		
<b>Pared:</b> B			
<b>DATOS GENERALES</b>	<b>Símbolo</b>	Valores Dispersa	Valores de Fuga
Factor de uso	<i>U</i>	1	
Factor de ocupación	<i>T</i>	0,5	
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,02	
<b>DATOS DE CARGA SEMANAL</b>			
	<i>Q<sub>h</sub></i>		
Carga máxima de fuga (mA.min)			228
		228	
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	500	
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130	
Rendimiento (mSv.m2/mA.min)		50	
Factor de corrección de radiación	<i>F</i>	0,3	
Capa hemirreductora fuga	<i>CHR</i>	0,274	
<b>DISTANCIA DE CÁLCULO</b>			
Distancia foco-paciente (m)		0,5	
Distancia paciente-barrera (m)		4,2	
Distancia Foco-barrera (m)	<i>d</i>	4	
<b>PARÁMETROS DE DISPERSIÓN</b>			
Tamaño de campo Cm2	<i>S</i>	1500	
Factor de dispersión	<i>A</i>	0,002	
<b>FACTOR DE ATENUACIÓN</b>	<i>A</i>	10629,2517	10,2796053
<b>ESPESOR PLOMO (DIN 6812) (mm)</b>		2,65289966	1,00851389
<b>Espesor total (mm Pb):</b>		2,65	
<b><u>Espesor equivalente en otros materiales</u></b>			
Hormigón baritado de 32 g/cm3 DIM 6812 (cm)	-	3,55	
Hormigón de 2,3 g/cm3 DIM 6812 (cm)		20,45	
Ladrillo macizo de 1,8 g/cm3 DIM 6812 (cm)		28,23	

## HOSPITAL TEODORO MALDONADO CARBO

Sala: SPECT-CT

Barrera: Secundaria

Área  
colindante:

Sala de control

Pared: D

FECHA:

### DATOS GENERALES

Símbolo

Valores  
Dispersa

Valores de  
Fuga

Factor de uso	<i>U</i>	1	
Factor de ocupación	<i>T</i>	0,5	
Límite semanal (mSv)	<i>Hw</i>	0,02	

### DATOS DE CARGA SEMANAL

Carga máxima de fuga (mA.min)			228
Carga semanal (mA.min)	<i>W</i>	5000	
Tensión máxima (50-200)	<i>KVp</i>	130	
Rendimiento (mSv.m2/mA.min)		50	
Factor de corrección de radiación	<i>F</i>	0,3	
Capa hemirreductora fuga	<i>CHR</i>	0,274	

### DISTANCIA DE CÁLCULO

Distancia foco-paciente (m)		0,5
Distancia paciente-barrera (m)		2
Distancia Foco-barrera (m)	<i>d</i>	1,8

### PARÁMETROS DE DISPERSIÓN

Tamaño de campo Cm2	<i>S</i>	1500
Factor de dispersión	<i>a</i>	0,002

### FACTOR DE ATENUACIÓN

<i>A</i>	46875	50,7634828
----------	-------	------------

ESPESOR PLOMO (DIN 6812)  
(mm)

3,2609375	1,69971574
-----------	------------

**Espesor total (mm Pb):**

3,26

### Espesor equivalente en otros materiales

Hormigón baritado de 32 g/cm3 DIM 6812 (cm)	4,33
Hormigón de 2,3 g/cm3 DIM 6812 (cm)	23,9
Ladrillo macizo de 1,8 g/cm3 DIM 6812 (cm)	32,78