



Cálculo teórico del blindaje de una sala de radiología general

Theoretical calculation of the shielding of a general radiology room

Cálculo teórico da blindagem de uma sala de radiologia geral

Miguel Ángel Sáez-Paguay^I
miguel.saez@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3192-5084>

Bruno Micciola^{II}
bruno.micciola@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4085-0072>

Segundo Fabián Siza-Moposita^{III}
fabian.siza@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8036-6974>

Jeoandy Anabel Fiallos-Godoy^{IV}
fiallosj.4bmdc@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7209-5043>

Correspondencia: miguel.saez@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de junio de 2022 * **Aceptado:** 12 de julio de 2022 * **Publicado:** 03 de agosto de 2022

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Orellana, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Orellana, Ecuador.
- IV. FG Medic, Riobamba, Ecuador.

Resumen

En este trabajo, se calculó el espesor de las barreras que constituyen el blindaje estructural de una sala de radiología general para lo cual, se empleó la metodología del Reporte 147 del NCRP para garantizar que la radiación proveniente del tubo de rayos x sea atenuada a niveles por debajo de los recomendados. Se realizó la clasificación de las barreras y zonas expuestas, en base a lo cual se determinó los niveles de radiación límite. Se obtuvo los espesores para ladrillo, concreto y plomo. En vista que se analizó una instalación preexistente, se pudo constatar que los espesores existentes superaban a los espesores calculados, por lo tanto, se garantiza que el personal que labora en dichas instalaciones no corre riesgo de efectos deterministas a causa de la radiación.

Palabras claves: Blindaje; Radiodiagnóstico; Estadística; fotones.

Abstract

In this work, the thickness of the barriers that constitute the structural shielding of a general radiology room was calculated, for which the NCRP Report 147 methodology was used to guarantee that the radiation coming from the x-ray tube is attenuated to levels below the recommended ones. The barriers and exposed areas were classified, based on which the limit radiation levels were determined. The thicknesses for brick, concrete and lead were obtained. Given that a pre-existing facility was analyzed, it was found that the existing thicknesses exceeded the calculated thicknesses, therefore, it is guaranteed that the personnel working in these facilities are not at risk of deterministic effects due to radiation.

Keywords: Shielding; Radiodiagnosis; Statistics; photons.

Resumo

Neste trabalho foi calculada a espessura das barreiras que constituem a blindagem estrutural de uma sala de radiologia geral, para a qual foi utilizada a metodologia NCRP Report 147 para garantir que a radiação proveniente do tubo de raios X seja atenuada a níveis abaixo do recomendado uns. As barreiras e áreas expostas foram classificadas, a partir das quais foram determinados os níveis de radiação limite. As espessuras para tijolo, concreto e chumbo foram obtidas. Tendo em conta que foi analisada uma instalação pré-existente, verificou-se que as espessuras existentes ultrapassaram as espessuras calculadas, pelo que se garante que o pessoal que trabalha nestas instalações não corre o risco de efeitos determinísticos devido à radiação.

Palavras-chave: Blindagem; Radiodiagnóstico; Estatísticas; fótons.

Introducción

La determinación del espesor de una barrera para aplicaciones médicas es una tarea previa a la construcción de la instalación. Debido a la naturaleza exponencial de la atenuación de la radiación ionizante, el espesor de la barrera adecuada es una función del número de exploraciones realizadas en el centro médico, la energía del equipo y la calidad de radiación. Otro factor a considerar es a que cantidad de radiación puede estar expuesto el individuo sin que esto conlleve el riesgo de efectos nocivos para la salud (SEFM, 2012).

En la actualidad existen varios documentos que proveen metodologías para obtener un espesor sobreestimado en concordancia con el criterio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), uno de ellos es el Reporte 147 del NCRP (National Council on Radiation Protection & Measurements) de Estados Unidos, el cual es usado para este estudio.

Metodología

Un cálculo de blindaje es la determinación de los espesores de las barreras que atenúan la radiación primaria procedente de la fuente de radiación denominadas barreras primarias (Bushong, 2010) (Attix, 1986), así como también la determinación de los espesores de las barreras que atenuarán la radiación dispersada y de fuga denominadas barreras secundarias (NCRP N. C., 2004) (ICRP, 2007).

En el reporte 147 del NCRP se define los objetivos de diseño de blindaje, entendidos como “Niveles de kerma en aire empleados en el cálculo y evaluación de barreras construidas para la protección de empleados y miembros del público” (NCRP N. C., 2004). Estos objetivos son específicos para áreas controladas y no controladas, para una o varias fuentes de radiación evaluadas en un punto de referencia localizado luego de que el haz atraviese el blindaje.

La protección radiológica implica que los niveles de dosis efectiva percibidos por individuos en determinadas zonas de trabajo no superen los límites permitidos (Domenech, 2017), esto se asegura teniendo en cuenta las siguientes consideraciones conservativas en favor de la salud humana extraídas de (NCRP N. C., 2004):

- La atenuación del haz primario de radiación por el paciente es despreciada.
- El cálculo del grosor de la barrera recomendado siempre asume una incidencia perpendicular de la radiación.
- El cálculo de diseño del blindaje ignora materiales a parte del blindaje que atraviesen en el camino del haz.
- Se asume que la radiación de fuga tiene el valor de kerma de 0.876 mGy/h, en la práctica clínica este valor está sobreestimado.
- La radiación dispersa se sobreestima conservativamente, de tal forma que si se usara tamaños de campo probables se reduciría la contribución de la radiación dispersa en un factor aproximadamente de 4.
- Los factores de ocupación también están sobreestimados.
- En el caso de que se haya calculado un determinado espesor de blindaje de plomo se colocará las capas de plomo de espesor estándar predefinido disponibles en el mercado que sean necesarias. Cuando no se alcance la medida precisa se permitirá el exceso de espesor.
- Como mínimo, 0.3 m será la distancia desde una pared blindada a un área no controlada.

Metodología de cálculo

Los objetivos de diseño de blindaje (P) de este reporte se muestran en unidades de kerma en aire por semana y toman los valores para el área controlada de $P = 0.1 \text{ mGy / semana}$ y para el área no controlada de $P = 0.02 \text{ mGy / semana}$ (NCRP N. C., 2004) (IAEA, 2018).

Se busca un valor de espesor de la barrera atenuadora suficiente para reducir el kerma en aire en un área no controlada a un valor P/T , donde T es el factor de ocupación (NCRP N. C., 2004).

Factor de ocupación (T). En caso de no disponer de los datos de ocupación concretos de la instalación específica que queremos analizar se puede emplear los mostrados en la Tabla 1, obtenida de (NCRP N. C., 2004).

Figura 1: Factores de ocupación (T) sugeridos para distintas áreas.

Localización	T
--------------	---

Oficinas administrativas; laboratorios, farmacias y otras áreas de trabajo totalmente ocupadas por un individuo; áreas de recepción, salas de espera asistidas, áreas de juegos interiores para niños, salas de rayos X adyacentes, áreas de lectura de películas, estaciones de enfermeras, salas de control de rayos x	1
Salas utilizadas para exámenes y tratamientos de pacientes	1/2
Pasillos, habitaciones para pacientes, salas de empleados, salas de descanso para el personal	1/5
Puertas de corredor	1/8
Baños públicos, áreas expendedoras sin atención humana, salas de almacenamiento, áreas al aire libre con asientos, salas de espera sin supervisión, áreas de espera para pacientes	1/20
Áreas al aire libre con tráfico peatonal o vehicular transitorio, estacionamientos sin atención humana, áreas para dejar vehículos (sin vigilancia), áticos, escaleras, ascensores sin atención humana, armarios de conserjería	1/40

Fuente: Reporte 147 del NCRP [NCRP04] (MERNNR, 2020)

Factor de uso (U). Es la fracción de la carga de trabajo para la cual el haz útil está dirigido hacia la barrera considerada. En la Tabla 2 se observa los valores propuestos en (NCRP N. C., 2004).

Figura 2: Valores del factor de uso (U).

Barrera	U
Piso	0.89
Mesa en posición vertical	0.09
Receptor de imagen de pecho	1

Fuente: Reporte 147 del NCRP

Carga de trabajo (W). Es la integral temporal de la corriente del tubo de rayos X durante un período de tiempo, comúnmente de una semana. La carga de trabajo normalizada W_{norm} es la carga de trabajo promedio por cada paciente, cabe aclarar que debido a que es posible que un mismo paciente sufra más de una irradiación, por ejemplo, porque se le aplique más de una técnica, no es posible establecer un valor fijo de W_{norm} , sin embargo, una buena aproximación son los valores de W_{norm} disponibles de la encuesta realizada por Asociación Americana de Físicos en Medicina (*The American Association of Physicists in Medicine*) (AAPM) (NCRP N. C., 2004).

Las propiedades de atenuación de las barreras tienen una fuerte dependencia con el voltaje, por lo que la distribución de la carga de trabajo en función de voltaje es mucho más relevante que la magnitud de la carga de trabajo. En la encuesta se determinó distribuciones de carga de trabajo a partir de datos de 14 instituciones de salud, con cerca de 2500 pacientes y siete tipos de instalaciones de radiodiagnóstico, en el reporte 147 de la NCRP se muestra los valores para la distribución de carga de trabajo en intervalos de 5 kVp para cada tipo de instalación (NCRP N. C., 2004).

Metodología general para el cálculo de blindaje

Se muestra a continuación un procedimiento general para el cálculo de espesor de barreras primarias y secundarias de una sala que alberga un equipo de rayos x convencional fijo.

Es necesario establecer las distancias que se emplearán en el cálculo. Se han rotulado las barreras como se muestra en las Figuras 1 y 2:

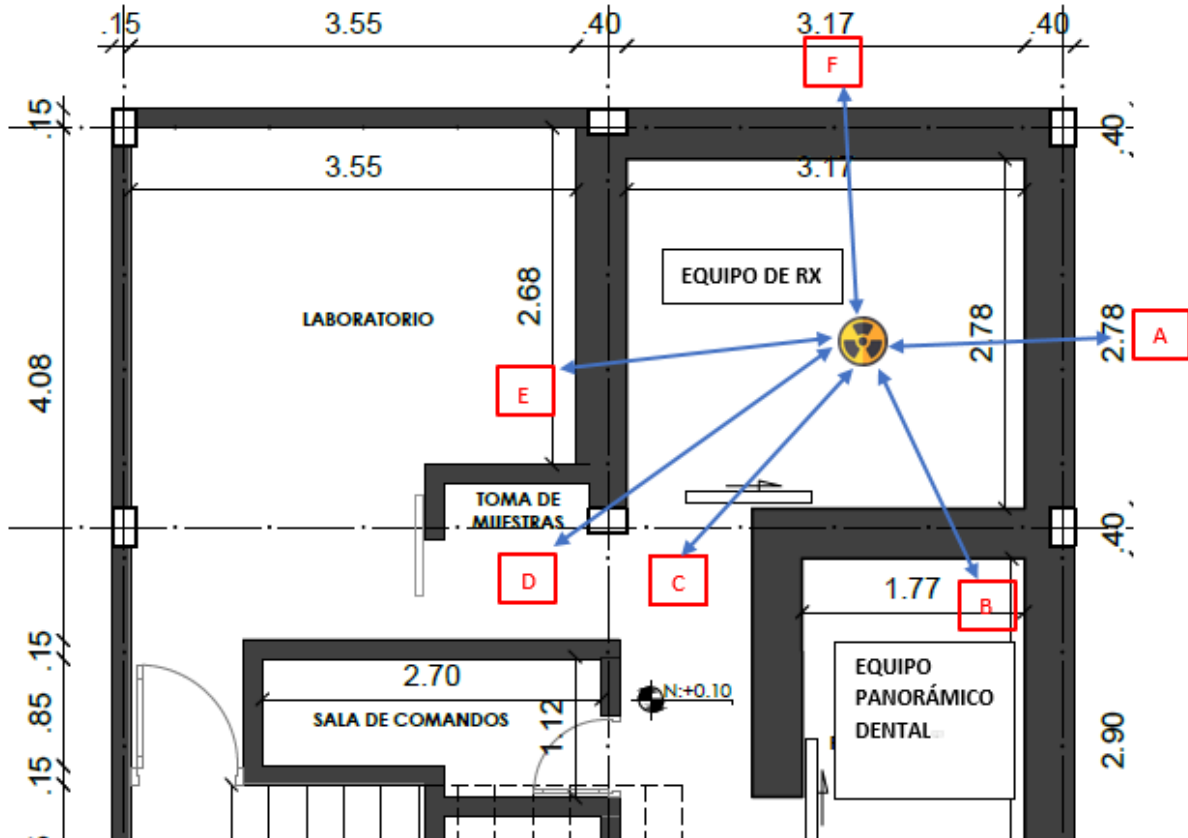


Figura 3: Clasificación de zonas y barreras. Vista superior.

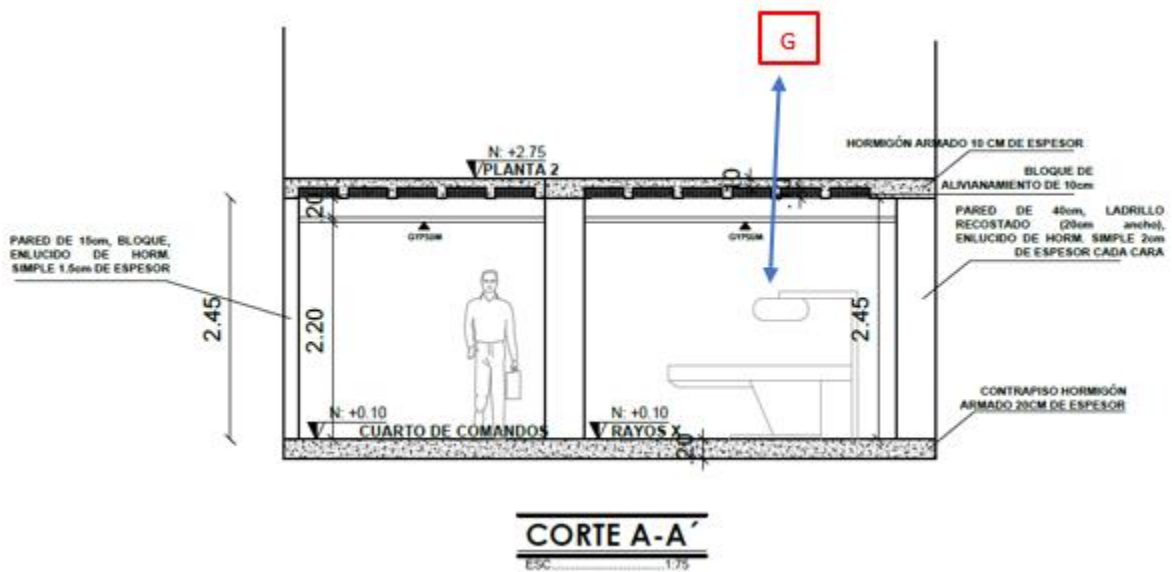


Figura 4: Clasificación de zonas y barreras. Vista lateral.

Debido a que en el nivel inferior no hay instalación alguna, el piso no se considera como una barrera primaria. La barrera A es la única barrera primaria, sobre ella incide la radiación que atraviesa el paciente y el Bucky mural. Todas las barreras han sido calculadas usando un valor sobreestimado de $120 \frac{\text{Pacientes}}{\text{semana}}$.

- Los pasos por seguir son:
- Establecer el valor de Kerma en aire $K_{\text{primaria/secundaria}}^1$ a causa del haz primario o secundario sin blindaje por cada paciente a una distancia del tubo de rayos x al área ocupada $d_p=1$ m a partir de las distribuciones de las cargas de trabajo W .
- Este resultado se multiplica por el número de pacientes y se corrige la influencia de la ley del cuadrado de la distancia para obtener el kerma en aire del área no controlada en N pacientes examinados por semana:

$$K_{\text{primaria/secundaria}}(0) = \frac{K_{\text{primaria/secundaria}}^1 * U * N}{d_p^2} \quad (1)$$

- Se calcula la función de transmisión de haz amplio para barrera primaria $B_{\text{primario/secundario}}(x)$ definida como la relación entre el kerma en aire detrás de la barrera de espesor x y el kerma en aire en el mismo lugar sin barrera.

$$B_{\text{primaria/secundaria}}(x) = \frac{\frac{P}{T}}{K_{\text{primaria/secundaria}}(0)} \quad (2)$$

- Finalmente se puede determinar el espesor de la barrera que reduce el kerma en aire sin blindaje al valor de $\frac{P}{T}$ relacionando la función de transmisión con el espesor por medio de tablas o empleando la ecuación algebraica basada en el modelo de (Archer, Thornby, & Bushong, 1983) para la transmisión del haz ancho.

$$x_{\text{barrera}} = \frac{1}{\alpha \gamma} \ln \left(\frac{\left(\frac{N T U K_{\text{primaria/secundaria}}^1}{P d_p^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right) \quad (3)$$

Donde α, β, γ son parámetros de ajuste del modelo, cuyos valores se muestran en (NCRP N. C., 2004)

El modelo de (Archer, Thornby, & Bushong, 1983) relaciona directamente la función de transmisión con el espesor de material de la barrera (NCRP N. C., 2004, pág. 117):

$$B(x_e) = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x_e} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

Donde x_e puede ser el grosor de la barrera existente. Esta relación es útil para obtener el valor estimado de Kerma al otro lado de la barrera ante un blindaje existente por medio de la ecuación:

$$P = B(x_e) T K(0) \quad (5)$$

Para barreras primarias se reduce el espesor obtenido considerando el pre-blindaje que origina el receptor de imagen y las estructuras que lo sostienen, en (NCRP N. C., 2004, pág. 44) se muestran valores que pueden ser usados.

Debido a que el ladrillo no se encuentra estudiado en el NCRP 147, en paredes construidas con este material se usa las equivalencias en plomo mostradas en la Tabla 6, tomadas de la norma alemana DIN 6812.

Figura 5: Equivalencia en plomo de diversos de acuerdo a la normativa alemana DIN 6812.

Capa protectora para diversos materiales de acuerdo a DIN 6812; 100 kV								
Espesor en mm	Materiales y equivalencia de plomo PbGW (Densidad en g/cm ³)							
	Plomo	Hierro (7,9)	Hormigon barita (3,2)	Acrilamiento doble (2,5)	Hormigon (2,3)	Ladrillo solido ¹⁾ (1,8)	Placas de yeso ²⁾ (0,84)	Hormigon Poroso (0,63)
0,10	0,6	1	9	9	14	24	33	
0,20	1,2	2	18	18	28	48	66	
0,30	1,8	2	27	26	42	69	93	
0,40	2,4	3	36	35	56	89	120	
0,50	3,2	4	45	44	70	110	145	
0,60	4,0	5	54	51	80	130	170	
0,70	4,6	6	63	58	90	148	195	
0,80	5,2	7	72	66	100	165	220	
0,90	5,8	8	81	73	110	183	245	
1,00	6,4	9	90	80	120	200	270	
1,25	8,3	11	113	95	139	244	320	
1,50	9,6	13	135	110	158	288	370	
1,75	11,5	15	158	125	176	331	420	
2,00	13,0	17	180	140	195	375	470	
2,25	14,3	19	203	153	211	419	520	
2,50	15,5	21	225	165	228	463	570	
2,75	16,8	22	248	178	244	506	620	
3,00	18,0	24	270	190	260	550	670	
3,25	19,3	26	293	203	278	594	720	
3,50	20,5	27	315	215	295	638	770	
3,75	21,8	29	338	228	313	681	820	
4,00	23,0	30	360	240	330	725	870	

1) La densidad de la piedra caliza es la misma como la densidad de los ladrillos solidos.
2) El espesor del material para las placas de yeso con una densidad diferente a la indicada, ha de ser calculada con relacion al cociente de las densidades. Para densidades desconocidas aplica el valor de 0.6 g/cm³.

Ejemplo de cálculo de barrera primaria y secundaria

Barrera primaria

Ejemplo de cálculo (Barrera A)

Más allá de esta barrera se encuentra una casa habitada (propiedad privada). Esta propiedad está considerada como un área libre (alcanzar un objetivo de blindaje de 0.02 mGy/sem), con lo cual se garantiza en base a la literatura la idoneidad del blindaje.

La carga de trabajo normalizada $W_{norm}=1.9$ mA min/paciente para la Sala Radiográfica (piso y otras barreras) tiene asociada los valores de Kerma en aire sin blindaje a causa del haz primario a un metro de la fuente $K_p^1 = 5.2 \frac{mGy}{paciente}$ (NCRP N. C., 2004, pág. 43). El factor de uso es 1 debido a que el receptor de imagen se encuentra paralelo a la barrera B (NCRP N. C., 2004, pág. 41).

Los parámetros de ajuste del modelo son:

Material	α [mm ⁻¹]	β [mm ⁻¹]	γ
plomo	2.35	1.59E+01	4.98E-01
concreto	3.63E-02	1.43E-01	4.93E-01
acero	2.16E-01	3.10	5.75E-01

Para la determinación del espesor de la barrera se realiza el siguiente cálculo:

$$x + preblindaje = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left[\frac{\left[\frac{NTUK_p^1}{Pa_p^2} \right]^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right]$$

$$x + preblindaje = \frac{1}{2.346 * 0.4982} \ln \left[\frac{\left[\frac{(120*1*5.2)}{0.02*2.3^2} \right]^{0.4982} + \frac{15.9}{2.346}}{1 + \frac{15.9}{2.346}} \right]$$

$$x + preblindaje = 1.17 \text{ mm Pb}$$

$$x = 0.32 \text{ mm Pb}$$

Barreras secundarias

La carga de trabajo normalizada $W_{\text{norm}}=2.5$ mA min/paciente para la Sala Radiográfica (todas las barreras) tiene asociada los valores de Kerma en aire sin blindaje a causa del haz secundario a un metro de la fuente $K_{\text{sec}}^1 = 4.9 \times 10^{-2} \frac{\text{mGy}}{\text{paciente}}$, el cual tiene en cuenta la radiación de fuga, dispersa hacia adelante y retro dispersada.

Ejemplo de cálculo (Barrera B)

Más allá de esta barrera se encuentra la sala que confina el equipo panorámico dental (zona controlada). Para la determinación del espesor de la barrera se realiza el siguiente cálculo:

Los parámetros de ajuste para esta situación son:

Material	α [mm ⁻¹]	β [mm ⁻¹]	γ
plomo	2.30	1.74E+01	6.19E-01
concreto	3.61E-02	1.43E-01	5.60E-01
acero	2.19E-01	3.49	7.36E-01

$$x = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left[\frac{\left[\frac{NTK_p^1}{Pd_{\text{sec}}^2} \right]^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right]$$

$$x = \frac{1}{2.298 * 0.6193} \ln \left[\frac{\left[\frac{(120 * 1 * 0.049)}{0.1 * 2.09^2} \right]^{0.6193} + \frac{17.38}{2.298}}{1 + \frac{17.38}{2.298}} \right]$$

$$x = 0.27 \text{ mm Pb}$$

Resultados y discusión

Se obtuvo los siguientes espesores bajo los parámetros a continuación:

Figura 6: Espesores teóricos

Tabla general								
Punto de cálculo	Descripción del punto de cálculo	P (mGy/sem)	Tipo de barrera	Distancia (m)	Factor de ocupación	Espesor calculado en plomo (mm)	Espesor calculado en hormigón (mm)	Espesor calculado en ladrillo (mm)
A	Propiedad privada habitada	0.02	Primaria	2.30	1	0.32	9.08	42
B	Sala panorámico	0.1	Secundaria	2.09	1	0.27	25.12	42
C	Puerta a la sala de RX	0.02	Secundaria	2.09	0.2	0.27	25.12	42
D	Toma de muestras	0.02	Secundaria	2.27	1	0.59	49.79	90
E	Laboratorio	0.02	Secundaria	2.27	1	0.59	49.79	90
F	Terreno valdío	0.02	Secundaria	2.09	0.2	0.27	25.12	42
G	Techo	0.02	Secundaria	1.45	0.5	0.64	53.84	90

Conclusiones

Se realizó el cálculo de los espesores del blindaje de la sala de radiología, con lo cual se garantiza que la instalación puede atenuar la radiación a niveles inocuos para la salud humana según la metodología del reporte 147 del NCRP, por lo que se concluye que el Kerma en aire en las zonas no controladas circundantes a esa instalación se mantendrán por debajo de los niveles recomendados en los objetivos de diseño de blindaje.

Finalmente, se realizó la comparativa con los espesores existentes de la instalación, lo cual se puede ver en la Tabla 4, con lo cual se concluye que la instalación existente es adecuada para el funcionamiento de un equipo de rayos x convencional fijo.

Figura 7: Comparativa entre espesores existentes y teóricos.

Comparativa							
Punto de cálculo	Descripción del punto de cálculo	Material existente	Espesor calculado (mm)	Espesor existente (mm)	Dosis teórica (mSv/sem)	Límite de dosis (mSv/sem)	Cumplimiento (Si/No)
A	Propiedad privada habitada	Ladrillo	42	200	0.021015	0.02	Sí
B	Sala panorámico	Ladrillo	42	200	0.000461	0.1	Sí
C	Puerta a la sala de RX	Plomo	0.27	1.5	0.000320	0.02	Sí
D	Toma de muestras	Ladrillo	90	200	0.000391	0.02	Sí
E	Laboratorio	Ladrillo	90	200	0.000391	0.02	Sí
F	Terreno valdío	Ladrillo	42	200	0.000092	0.02	Sí
G	Techo	Hormigón	90	100	0.011870	0.02	Sí

Referencias

1. Andreo, P., Burns, D., Nahum, A., Seuntjeans, J., & Attix, F. (2017). *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. Weinheim: WILEY-VCH.
2. Attix, F. (1986). *INTRODUCTION TO RADIOLOGICAL PHYSICS AND RADIATION DOSIMETRY*. Weinheim: John Wiley & sons, Inc.
3. Bushong, S. (2010). *Radiologic Science for technologists. Physics, Biology, and Protection*. Barcelona: Elsevier España.
4. Dendy, P., & Heaton, B. (2012). *Physics for diagnostic radiology*. Florida: Tylor and Francis group.
5. Domenech, H. (2017). *Radiation Safety. Managment and Programs*. Suiza: Springer.
6. IAEA, I. A. (2018). *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation*. Vienna: IAEA.
7. ICRP, I. C. (2007). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP 37*. Oxford: ICRP.
8. MERNNR, M. D. (2020). ANEXO III MANUAL DE CONTROL DE CALIDAD PARA RADIODIAGNÓSTICO Y RADIOLOGÍA INTERVENCIONISTA. QUITO: SCAN.
9. NCRP, N. C. (2004). *Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities, NCRP Report No. 147*. USA: NCRP.
10. SEFM. (2012). *Fundamentos de Física Médica*. Madrid: ADI.

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).