

CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN DEL BLINDAJE ESTRUCTURAL POR REPOSICIÓN DE UN LINAC DE 6 MV POR UNO DE 10 MV

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF STRUCTURAL SHIELDING BY REPLACING A 6 MV LINAC WITH A 10 MV

M.Z. Carrasco^{*1}, H.O. Novoa², A. López¹ y M.F. Vásquez²

¹Departamento de Ciencias Físicas – Universidad de la Frontera – UFRO
Av. Francisco Salazar 01145 – Temuco – Chile

²Unidad de Radioterapia - Centro Oncológico del Norte (CON)
Los Pumas 10255 - Antofagasta – Chile

Recibido: 22/03/2025 ; Aceptado: 12/08/2025

El búnker original fue diseñado para un acelerador lineal de 6 MV; sin embargo, la reposición de un nuevo acelerador de 10 MV implicó la reubicación del isocentro, lo que invalidó el cálculo de blindaje existente. Por tanto, se requirió un rediseño constructivo optimizado en el tiempo que cumplan con las normas de Protección Radiológica, incluyendo la evaluación de materiales y geometrías de bloques ahuecados, mediante simulaciones Monte Carlo en el software EGSncr, para el espectro de 10 MV. El cálculo de blindaje se realizó según la metodología del reporte NCRP N°151, teniendo en cuenta los espesores existentes de las barreras primarias y secundarias, proyectado a una carga de trabajo de 16 horas al día y tasa de dosis de 2400 UM/min (10 MV FFF). El rediseño de la instalación incluyó el ancho de las barreras primarias de 20 cm en dirección al desplazamiento del isocentro, así como la adición de 1 HVL en las barreras secundarias que colindan con la oficina de física médica y la sala de comando. Entre los materiales estudiados, se eligió utilizar bloques de concreto serpentina ahuecados con relleno de concreto NBS 04, reforzados con varillas de hierro. En conclusión, la optimización del diseño del búnker para el equipo de 10 MV cumple con los estándares de protección radiológica nacional, lo que se corroboró mediante el levantamiento radiométrico, garantizando así la seguridad del personal y de los pacientes.

Palabras Clave: acelerador lineal, rediseño constructivo, simulaciones Monte Carlo, Protección Radiológica.

The original bunker was designed for a 6 MV linear accelerator; however, the replacement of a new 10 MV accelerator involved the relocation of the isocenter, which invalidated the existing shielding calculation. Therefore, a time-optimized constructive redesign was required to comply with Radiological Protection standards, including the evaluation of materials and geometries of hollowed blocks, by means of Monte Carlo simulations in EGSncr software, for 10 MV spectrum. The shielding calculation was performed according to the methodology of NCRP report N°151, taking into account the existing thicknesses of the primary and secondary barriers, projected at a workload of 16 hours per day and dose rate of 2400 UM/min (10 MV FFF). The redesign of the facility included the width of the primary barriers of 20 cm in the direction of isocenter displacement, as well as the addition of 1 HVL in the secondary barriers abutting the medical physics office and the command room. Among the materials studied, it was chosen to use hollowed serpentine concrete blocks with NBS 04 concrete infill, reinforced with iron rods. In conclusion, the optimization of the bunker design for the 10 MV equipment complies with the national radiological protection standards, which was corroborated by the radiometric survey, thus ensuring the safety of personnel and patients.

Keywords: linear accelerator, constructive redesign, Monte Carlo simulations, Radiation Protection.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2026.37.1.13-20>
Line)



ISSN - 1850-1168 (on-

I. INTRODUCCIÓN

La radioterapia y especialmente la teleterapia es un campo en constante evolución, en el cual se ha logrado avances tecnológicos significativos en las últimas décadas que permiten una administración precisa de la radiación, contribuyendo a la reducción de la toxicidad del tratamiento, la mejora de la morbilidad asociada y el aumento de la calidad de vida de los pacientes [1]. Los aceleradores lineales (LINAC) son los dispositivos más utilizados en radioterapia y con más amplia versatilidad, pues emplean campos eléctricos y magnéticos para acelerar electrones, generando

así rayos X de altas energías o haces de electrones para la irradiación precisa de los tejidos tumorales [2]. Los búnkers donde se instalan los LINAC están contruidos con materiales que atenuan la radiación. Esto asegura que la dosis efectiva fuera del búnker se encuentren dentro de los límites que indica la normativa, protegiendo así la salud de los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE), pacientes, público y medio ambiente [3]. La reposición de los LINACs por la vida útil o por causas de mejora tecnológica es una problemática que se presenta cada vez con mayor frecuencia, situación que constituye en la mayoría de los casos un desafío en ámbito de diseño, optimización de espacios y

mariasulec@gmail.com

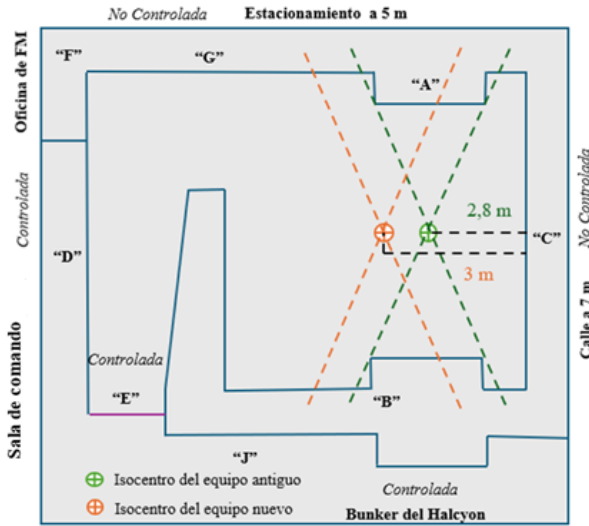


FIG. 1: Reubicación del isocentro en el búnker

recursos económicos. En este caso se va a reemplazar un LINAC 6 MV con una tasa de dosis de 600 UM/min, por un Truebeam dual de 6 MV y 10 MV de fotones con filtro (WFF) y sin filtro aplanador (FFF), cuya tasa de dosis en 6 FFF es de 1400 UM/min y en 10 FFF de 2400 UM/min. Además, tiene energías de 6, 9, 12, 15, 18 y 22 MeV de electrones. Este trabajo tuvo como objetivo principal, estudiar, evaluar y desarrollar una propuesta optimizada del rediseño del blindaje estructural en el que se cumplan los requisitos de seguridad radiológica emitido por la Autoridad Radiológica de Chile, en la Norma de Seguridad NB-20[4], establece que en el borde de las barreras no controladas no se puede superar la tasa de dosis promediada de 7.5 μ Sv en cualquier hora, y a nivel internacional en el NCRP N°151 [5] define los límites de dosis en las zonas no controladas de 20 μ Sv en cualquier hora y en las zonas controladas hasta 100 μ Sv en cualquier hora. Los resultados obtenidos a partir de simulaciones Monte Carlo y cálculos dosimétricos de distintas configuraciones de blindaje permitieron seleccionar la alternativa más eficaz para asegurar el cumplimiento de estos límites.

II. MÉTODOS

Rediseño del búnker

Desde la perspectiva del espacio geométrico y físico del búnker existente, así como de los requerimientos del fabricante del nuevo equipo, se determinó que la distancia mínima necesaria desde la pared posterior hasta el isocentro es de 3 m [6], ubicación que no coincide con el isocentro del LINAC antiguo, que se encontraba a 2.65 m. Esto implicó, retirar el recubrimiento de la pared posterior para obtener 0.15 m y desplazar el isocentro 0.20 m en dirección a la camilla, Fig. 1.

Cálculo de blindaje

El rediseño del búnker implicó la evaluación de los espesores reales existentes de las barreras primarias y secundarias bajo la metodología del NCRP N°151.

TABLA 1: Carga de trabajo $B_{pri,sp}$

Parámetros	Valores
Horas diarias de trabajo	16
Días a la semana de trabajo	5
Número de pacientes atendidos por hora	5
Dosis promedio en el isocentro [Gy]	2.4
W [Gy/semana]	960
W_{FM} [Gy/semana]	70
$W_{prim,sp}$ [Gy/semana]	1030

Cálculo de las barreras primarias

En primer lugar, se determinó la transmisión en función de los espesores existentes t de las barreras primarias, según la Ec. (1). Para este cálculo, se emplearon los valores del primer valor de la capa décimo reductora TVL_1 y el valor de equilibrio de la capa décimo reductora TVL_e del concreto correspondiente a la energía de 10 MV, los cuales fueron obtenidos de la Tabla B.2 del informe NCRP N°151 [5]. Esta tabla proporciona los valores de TVL para materiales como plomo, concreto y hierro, en función de la energía de radiación.

$$B_{pri} = 10^{-\left(1 + \frac{t - TVL_1}{TVL_e}\right)} \quad (1)$$

Luego, en función de la transmisión, se determinó la tasa de dosis instantánea (IDR) en el exterior de la barrera primaria mediante la siguiente expresión;

$$IDR = \frac{\dot{D}_0 \cdot B_{pri}}{d_{pri}^2} \quad (2)$$

Debido a que el IDR se calcula en la máxima potencia del equipo, no refleja adecuadamente las condiciones operativas reales[5]. Por tanto, se estima la tasa de dosis equivalente promediada en una semana (TADR), que depende del IDR, la carga de trabajo (W) y del factor de uso (U) [5, 7].

$$R_w = \frac{IDR \cdot W_{pri} \cdot U}{\dot{D}_0} \quad (3)$$

La carga de trabajo para el cálculo de las barreras primarias y la componente de la radiación dispersa del paciente en las barreras secundarias se resolvió utilizando los parámetros de la Tabla 1. El factor U para las barreras primarias se asignó el valor de 0.25, ya que representa la fracción de W del haz primario que incide en cada barrera primaria. En cambio, para las barreras secundarias el valor de U es 1, dado que considera la contribución tanto de la radiación dispersa generada por el paciente como la radiación de fuga del cabezal del equipo[5]. La tasa de dosis promediada en cualquier hora (R_h) se calculó utilizando la Ec. (4), donde 40 representan las horas laborales en una semana y M es el cociente entre el número máximo y el promedio de pacientes tratados en una hora. Así, su unidad es [μ Sv en cualquier hora][5].

$$R_h = \frac{M}{40} \cdot R_w, \quad M = \frac{N_{max}}{N_h} \quad (4)$$

Ancho del anillo primario

El ancho del anillo primario sobresale en el interior de la sala de tratamiento y se calcula mediante proyección geométrica del tamaño de campo en el isocentro de $40 \times 40 \text{ cm}^2$, con el colimador rotado a 45° , donde la diagonal del haz es más amplia. Se añade un margen de 30 cm a cada lado [5]. De esta manera, el ancho se expresa como $w = 0.4\sqrt{2}d_N + 0.6m$, donde d_N es la distancia desde el isocentro hasta la barrera secundaria.

Cálculo de las barreras secundarias

Estas barreras deben proporcionar protección contra la radiación secundaria que se dispersa del haz útil y de fuga del cabezal del equipo [7]. En consecuencia, se calculan por separado, ya que tienen diferentes energías y componentes.

a. Componente de la radiación dispersa del paciente, ps

La transmisión de las barreras por la radiación dispersa del paciente (B_{ps}) se detalla en la Ec. (5), donde se selecciona los TVL_s (Tabla B.5a del NCRP N°151) en función del ángulo de dispersión proyectado desde el isocentro a las barreras secundarias.

$$B_{ps} = 10^{-\left(\frac{t_{sec}}{TVL_s}\right)} \quad (5)$$

El IDR de esta componente se determina con la siguiente ecuación:

$$IDR_{ps} = \frac{\dot{D}_0 \cdot \alpha \cdot B_{ps} \cdot F}{400 \cdot d_{sec}^2} \quad (6)$$

Donde: α es la fracción de dosis absorbida del haz primario que se dispersa en el paciente en un ángulo particular (Tabla B.4 del NCRP N°151), F es el área de campo incidente sobre el paciente y 400 asume que las fracciones de dispersión están normalizadas a un tamaño de campo de $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

b. Componente de la radiación de fuga, L

La transmisión de fuga (B_L) para reducir el campo de radiación de fuga en función de los espesores existentes se determina con la Ec.(7), los TVL utilizados fueron de la Tabla B.7 del NCRP N°151.

$$B_L = 10^{-\left(1 + \frac{t_L - TVL_e}{TVL_e}\right)} \quad (7)$$

El IDR de esta componente considera el valor de 10^{-3} que corresponde al radiación de fuga del cabezal del equipo de 0.1 % del haz útil [5].

$$IDR_L = \frac{10^{-3} \cdot \dot{D}_0 \cdot B_L}{d_L^2} \quad (8)$$

Para determinar el TADR, es necesario calcular la carga de trabajo de fuga (W_L), que a diferencia de la carga de trabajo detallada en la Tabla 1, debe considerarse el factor de modulación (C) asociado a la técnicas de tratamiento [7]. El factor C se calculó a partir de los protocolos clínicos aplicados en un día en el Centro Oncológico del Norte, Fig. 2, donde el 30% de los tratamientos corresponde a Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) y el 70% a Radioterapia Volumétrica de Arco (VMAT). Para calcular el factor

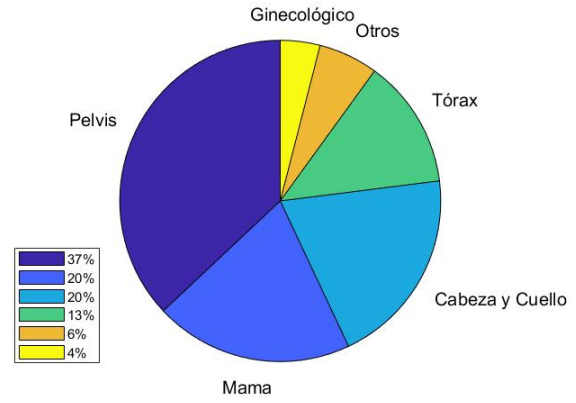


FIG. 2: Casos clínicos de los tratamientos en jornada completa de trabajo desde 9h00 a 20h00

C, primero se determina las unidades monitoras (UM) de las dosis absorbida promedio en tratamientos de IMRT y VMAT Ec. (9 y 10).

$$UM_{IMRT} = \sum_i \frac{UM_i}{(D_{pre})_i} \quad (9)$$

$$UM_{VMAT} = \sum_i \frac{UM_i}{(D_{pre})_i} \quad (10)$$

Luego, se relaciona las UM_{IMRT} y UM_{VMAT} con la dosis promedio prescrita para radioterapia convencional UM_{CONV} en condiciones de referencia [8], según la siguiente expresión;

$$C = \frac{UM_{IMRT}}{UM_{CONV}} \quad \text{y} \quad \frac{UM_{VMAT}}{UM_{CONV}} \quad (11)$$

A partir del análisis de los planes clínicos evaluados, se determinó el factor de corrección C de 4 para la técnica de IMRT y de 3 para VMAT. Para efectos del cálculo de blindaje, se adoptó un valor conservador de $C = 4$. Este valor se aplicó a $W_{prim,sp}$, lo que resultó una W_L de 4120 Gy/semana.

El IDR y el TADR de las barreras secundarias se obtienen sumando las contribuciones de la radiación dispersa del paciente y fuga del cabezal.

$$IDR = IDR_{ps} + IDR_L \quad (12)$$

$$R_w = \left(IDR_L \cdot \frac{W_L}{\dot{D}_0} \right) + \left(IDR_{ps} \cdot \frac{W_{ps} \cdot U_{ps}}{\dot{D}_0} \right) \quad (13)$$

c. Cálculo del laberinto-puerta

La barrera secundaria E, que corresponde a la entrada del búnker, está compuesta por la puerta y el laberinto. La puerta existente es de tipo sándwich (6 mm Fe - 6 mm Pb 6 mm Fe) y el laberinto de espesor de 1.14 m de concreto ordinario. La metodología del cálculo considera varias componentes de radiación: la radiación dispersa del haz primario (H_S), la radiación de fuga y dispersa de las superficies (H_{SL}), la dispersión del haz primario desde el paciente (H_{ps}) y la radiación de fuga a través del laberinto (H_{LT}) [5]. La dosis total en la puerta del laberinto (H_G) se calcula mediante la Ec. (14), la que suma las componentes previamente descritas,

con el equipo orientado hacia la pared G. En esta ecuación, f representa la fracción del haz primario transmitido a través del paciente en un tamaño de $40 \times 40 \text{ cm}^2$, y toma el valor de 0.25 para la energías desde 6 a 10 MV [7].

$$H_G = f \cdot H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT} \quad (14)$$

La dosis más allá de la barrera se determina con la Ec. (15), donde el 2.6 es el factor de uso estimado en el trabajo de McGinley por simulaciones Monte Carlo [9]. En este mismo estudio, reportaron que la transmisión del haz ancho de fotones para el blindaje de la puerta es de 0.2 MV para LINACs de energías menores o iguales a 10 MV [9].

$$H_{\text{Tot}} = 2.6 \cdot H_G \quad (15)$$

La transmisión de la radiación a través de las láminas que conforman la puerta (Fe-Pb-Fe), se determinan multiplicando la transmisión de cada material, utilizando la ecuación de atenuación exponencial [10]. Para ello, se consideraron los coeficientes de atenuación lineal del Pb (μ_{Pb}) y del Fe (μ_{Fe}) correspondientes a las energías de 0.2 MV y 10 MV, junto con los espesores reales.

$$B_{Pb} = H_{\text{Total}} \cdot e^{-\mu_{Pb} t_{Pb}} \quad (16)$$

$$B_{Fe} = B_{Pb} \cdot e^{-\mu_{Fe} t_{Fe}} \quad (17)$$

Por tanto, la dosis equivalente que atraviesa la puerta se obtiene de la multiplicación de las dos ecuaciones anteriores; y con ello se calculó el TADR de manera similar a la de las barreras secundarias.

$$B_{\text{door}} = B_{Pb} \cdot B_{Fe} \quad (18)$$

Coefficiente de atenuación de los materiales

Para construir los muros de refuerzo, la empresa constructora propuso utilizar materiales comunes como ladrillo refractario y bloque de concreto serpentina, con una densidad de $\rho = 2.1 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, no se encontraron en la literatura valores del coeficiente de atenuación lineal (μ) para estos materiales a 10 MV. Por esta razón, fue necesario realizar simulaciones Monte Carlo en el software EGSnrc[11], que se encuentra bajo licencia no comercial GNU Affero General Public License v3.0 otorgada por el National Research Council Canada (NCR). Las simulaciones se realizaron en el código DOSYZnrc[12], empleando el archivo de espacio de fase correspondiente al acelerador Elekta Precise de 10 MV, disponible en página web de la IAEA[13]. Las composiciones de los materiales se tomaron del "Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling" [14], en función del peso atómico molecular de cada elemento constituyente. Las simulaciones fueron realizadas en geometría de haz angosto con un tamaño de campo equivalente a $\sim 0.9 \times 0.9 \text{ cm}^2$ y haz ancho de $\sim 26.5 \times 26.5 \text{ cm}^2$. Cada simulación se corrió con 5×10^7 historias, la máxima energía de los fotones del espacio de fase fue de 9.4 MeV, con un error estadístico de 1.07%. Los coeficientes de atenuación lineal para el haz angosto (n) y haz ancho (b) de forma teórica se calcula con las

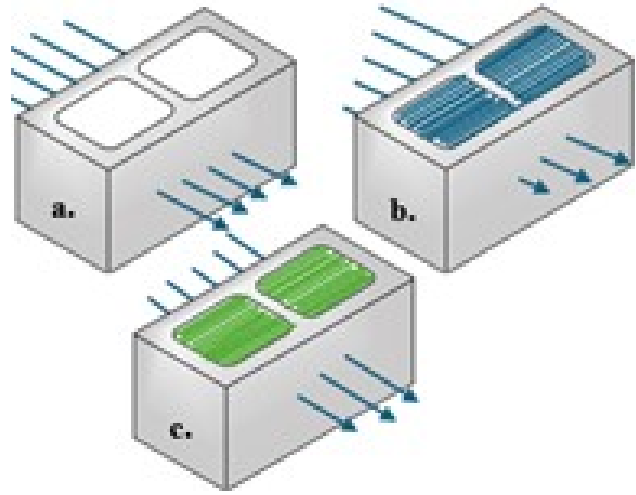


FIG. 3: Geometrías simuladas de bloques serpentina; a. sin relleno, b. con relleno de concreto NBS 04 y c. relleno con concreto de alta densidad

siguientes expresiones;

$$\left(\frac{I_t}{I_0}\right)^n = e^{-\mu t} \quad (19)$$

$$\left(\frac{I_t}{I_0}\right)^b = B(E, t) \cdot e^{-\mu t} \quad (20)$$

El factor de Buildup $B(E, t)$ permite estimar la atenuación de la radiación al atravesar un espesor de material t , en función de la energía E de la radiación incidente, las propiedades del medio atenuante y la geometría del haz[10]. Este factor se define como el cociente entre la transmisión de configuración de haz ancho (b) sobre el haz angosto (n), tal como se expresa en la siguiente ecuación.

$$B(E, t) = \frac{\left(\frac{I_t}{I_0}\right)^b}{\left(\frac{I_t}{I_0}\right)^n} \quad (21)$$

Por facilidad constructiva, ahorro de tiempo y seguridad estructural en la construcción de los muros de refuerzo, la empresa de construcción sugirió utilizar bloque hueco de concreto serpentina Graublock Estándar GST-20 de $39 \times 19 \times 19 \text{ cm}^3$ [15]. Para determinar el número de unidades de bloques que corresponden a 1 TVL (Fig. 3), se simuló los bloques huecos de concreto serpentina GST-20 con y sin relleno de concreto NBS 04 ($\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$) y concreto del alta densidad "Liminate-Portland-colemanite-baryte" de densidad ($\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$) [14].

Levantamiento radiométrico

Se realizó de inmediato cuando el LINAC entró en funcionamiento, con el objetivo de verificar que los niveles de radiación no excedieran los valores calculados en la memoria del cálculo de blindaje. Esto asegura la seguridad radiológica tanto de los ingenieros encargados de la instalación y calibración del equipo como del personal cercano a la instalación. Para la evaluación, se empleó el máximo nivel de radiación: 10 MV FFF, con una tasa de dosis de 2400 UM/min

TABLA 2: IDR y R_h de las barreras primarias

Punto	T	$t_{real}[m]$	IDR $\mu Sv/h$	$R_h \mu Sv/h$
*A	0.025	1.80	678 ± 17.01	4.24 ± 0.11
B	0.5	2.15	53 ± 1.33	0.43 ± 0.11
*H	0.025	2	202 ± 5.07	1.26 ± 0.13
*C	0.025	0.95	95.4 ± 1.89	9.5 ± 0.19
D	0.5	0.9	38.2 ± 0.76	3.8 ± 0.08
F	1	1.37	0.91 ± 0.02	0.29 ± 0.1
*G	0.025	0.98	439 ± 0.82	14.08 ± 0.86
J	0.5	1.3	130 ± 0.7	3.53 ± 0.29
*I	0.025	1.3	17.5 ± 0.35	7.14 ± 0.59

TABLA 3: Dosis equivalente en la entrada del búnker

Energía	0.2 MeV	10 MeV
H_{pb} [$\mu Sv/semana$]	0.69	525.61
H_{Fe} [$\mu Sv/semana$]	0.18	394.08
R_h [$\mu Sv/h$]	54.36	1434

y el tamaño de campo máximo de $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Se midió el IDR $\mu Sv/h$ a 30 cm desde de las barreras, utilizando el detector de radiación Atomtex, modelo AT1123, configurado para leer haces pulsados con el filtro de Al, lo que le permite medir en el rango energético de 0.06 a 10 MV[16]. El factor de calibración del detector es de 1.04. La metodología del levantamiento radiométrico también siguió las directrices del NCRP N°151. En las barreras primarias, se evaluó sin fantoma y con el gantry en 90° , 180° y 270° . Para las barreras secundarias se utilizó un fantoma de agua de 20 litros como medio dispersor. El NCRP N°151 establece que se debe reportar el (R_h) para compararlo con el calculado en la memoria de cálculo de blindaje. Por tanto, al medir la IDR con el detector, se multiplica la lectura obtenida por el factor de calibración del dispositivo. Posteriormente, se determina (R_w) empleando la Ec (3) y (R_h) con la Ec (4).

III. RESULTADOS

Cálculo de blindaje

Los resultados del cálculo de blindaje tanto de las barreras primarias y secundarias se presentan en la Tabla 2. El ancho del anillo primario fue de 3m.

La entrada del búnker es una zona controlada y sus resultados se aprecian a continuación;

Coefficientes de atenuación exponencial por simulaciones Monte Carlo

En la Fig. 4, se muestran los resultados de las simulaciones de los materiales en las geometrías del haz angosto y ancho. Los coeficientes de atenuación lineal para cada material se obtuvieron mediante un ajuste exponencial de las curvas, considerando por separado la geometría del haz angosto y ancho en una escala semilogarítmica. La tendencia del haz angosto es lineal, con pendiente igual a μ y $B(E,t) = 1$ ya que solo considera la radiación primaria no dispersa. En contraste, en geometría del haz ancho, esta relación es más compleja, pues la interacción de la radiación dispersa posee una fuerte dependencia de la composición polienergética del haz y el material dispersor, que cambia con la profundidad dando lugar a un incremento en la transmisión y, por lo tanto, $B(E,t) > 1$. Para representar el comportamiento del factor $B(E,t)$ (Fig. 5) con respecto al es-

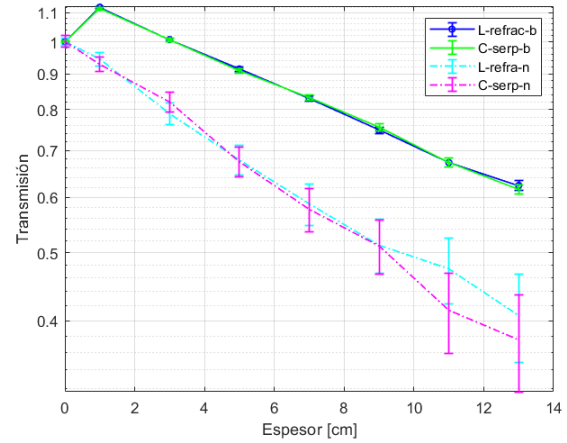


FIG. 4: Coeficientes de atenuación lineal y la transmisión del haz angosto (narrow “n”) y ancho (broad “b”) de los materiales simulados.

pesor, se utilizó un ajuste polinómico de segundo orden, el cual mostró una alta correlación R^2 con los datos obtenidos por simulaciones Monte Carlo[17]. Si bien existen modelos más complejos como los de Berger o funciones exponenciales modificadas, el polinomio se consideró adecuado dentro del rango de espesores analizado, dada a su simplicidad y fidelidad en la predicción local del efecto de acumulación de radiación dispersa. Las ecuaciones del ajuste de $B(E,t)$

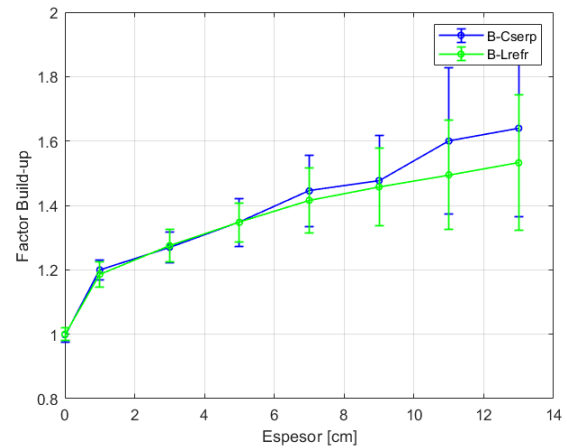


FIG. 5: Factor $B(E,t)$ en dependencia con el espesor de los materiales simulados.

se presentan a continuación;

$$B(10MV,t)_{Lrefrac} = -0.003t^2 + 0.07t + 1.06 \quad (22)$$

$$B(10MV,t)_{Cserp} = -0.002t^2 + 0.06t + 1.05 \quad (23)$$

Operando la Ec.(20) con las ecuaciones de los factores de corrección $B(E,t)$, Ec.(22) y Ec.(23) de los TVL de los materiales, obtenidos por soluciones numéricas en Wolfram Alpha [18]. Los resultados se muestran en la Tabla 4, junto con los de la transmisión de las geometrías de bloques propuestas.

TABLA 4: Resultados de la caracterización de los materiales y de las geometrías en Monte Carlo

Materiales	μ [cm ⁻¹]	TVL [cm]
Ladrillo refractario	0.0813±0.008	28.32±2.78
Concreto serpentina	0.067±0.005	34.36±2.56
Geometrías simuladas	Porcentaje de transmisión	Unidades equivalentes a 1 TVL
Bloque sin relleno	60 %	1TVL ~ 4.2
Bloque con relleno concreto NBS04	23 %	1TVL ~ 2
Bloque con relleno concreto de alta densidad	14 %	1TVL ~ 1.3

TABLA 5: Evaluación de las barreras primarias

Punto	Gantry [°]	IDR	R_h
*A	90	280.80±0.03	1.76±0.02
*A(10m)	90	7.90±0.03	0.05±0.02
B	270	7.17±0.05	0.04±0.03
*H	180	93.91±0.02	0.59±0.01

TABLA 6: Evaluación de las barreras secundarias

Punto	Gantry [°]	IDR	R_h
*C	0	0.37±0.22	0.05±0.02
*C(7m)	0	0.21±0.14	0.03±0.02
D	0	1.04±0.15	0.13±0.01
**E	270	8.94±0.09	1.12±0.01
F	0	0.10±0.09	0.01±0.01
*G	90	0.20±0.18	0.03±0.02
*G(10m)	90	0.17±0.15	0.02±0.01
J	270	7.28±0.05	0.91±0.02
*I	180	17.37±0.02	2.17±0.01

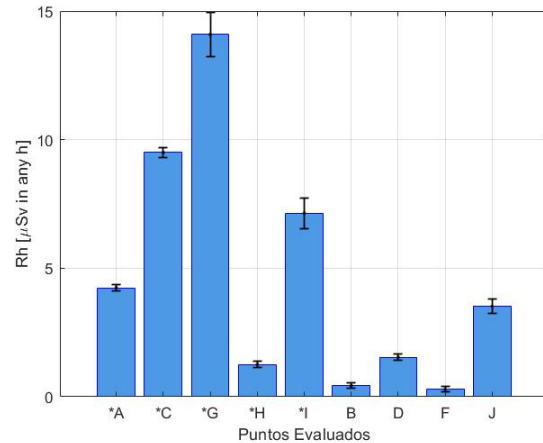


FIG. 6: Valores de R_h correspondientes a las barreras primarias y secundarias en el cálculo de blindaje y su incertidumbre.

Levantamiento radiométrico

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados del levantamiento radiométrico del IDR y R_h en [$\mu\text{Sv/h}$].

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cálculo de blindaje

La tasa de dosis (R_h) calculada en las barreras primarias, mostrada en la Tabla 2 y Fig. 6, cumplió con las restricciones de dosis establecidas. Para alcanzar el ancho de las barreras, fue necesario alargar 0.20 m, lo que conllevó un aumento en el grosor de las barreras secundarias hasta el bordes de las primarias. Específicamente, en la barrera A, el aumento fue de 43 cm; en la barrera B, 85 cm; y en la barrera H, 80 cm de concreto ordinario. En cuanto a las barreras secundarias, C, G e I (Tabla 2), sobrepasan la restricción de la dosis de 7.5 μSv en cualquier hora en las zonas no controladas, conforme a lo estipulado por el reglamento de Chile. Para mitigar este problema, se proponen dos soluciones; i) considerar la distancia entre el muro y el paso habitual de las personas, y ii) agregar muros adicionales de 1 TVL de concreto ordinario en el exterior del búnker. Las barreras C y G son muros de contención de difícil acceso; en el caso de C, las personas transitan a una distancia de 7 m, mientras que, en G, a 10 m. Los resultados de R_h de las soluciones propuestas fueron calculadas y los resultados arrojaron valores menores a la restricción, pero se optó por por la primera solución, ya que segunda implicaría aumento en tiempo, material y recursos económicos. En lo que respecta a la barrera I (Fig. 6), se aproximó al valor límite de dosis en zonas no controladas. Por tanto, se decidió limitar el acceso a la azotea durante la operación activa del equipo

como medida de precaución adicional. En el análisis de las barreras controladas, F, D y J cumplen las restricciones de dosis especificadas en el NCRP N°151. Sin embargo, para garantizar que los niveles de radiación en las cercanías de las barreras F y D sean los más bajos posibles, se decidió agregar 1 HVL adicional de concreto ordinario hacia el interior del búnker, ya que estas barreras colindan con la oficina de la física médica y con la sala de comando, donde los trabajadores permanecen durante toda la jornada. La tasa de dosis de equivalente total H_{total} antes de la puerta es de 761 $\mu\text{Sv/h}$ (Tabla 3). Al evaluar el paso de H_{total} a través de 1/3 de Pb y los 2/3 de Fe, se encontró que; si se considera un escenario ficticio, que la mayoría de los fotones que llegan a la puerta son de 10 MeV, no cumple con la restricción de dosis de 100 $\mu\text{Sv/h}$. Sin embargo, siguiendo las sugerencias de McGinley [19], que indican que los fotones que llegan a la puerta, debido a interacciones múltiples tienen una energía promedio de 0.2 MeV para aceleradores lineales de 10 MV, con esta sugerencia la dosis se reduce a 54.3 $\mu\text{Sv/h}$, cumpliendo con las restricciones de dosis. Estos hallazgos son similares a los reportados por otro autores en las remodelaciones de las instalaciones por cambios de equipo[20-22].

Coefficientes de atenuación exponencial por simulaciones

Los valores de TVL y HVL obtenidos en este estudio tienen en cuenta el factor de corrección B. Según J. Harima [23] y G. Hernández y cols. [24], el factor B ajusta el modelo de atenuación lineal de fotones, mejorando la precisión de las estimaciones sobre la cantidad de radiación que atraviesan los materiales. Este factor es esencial en los estudios de

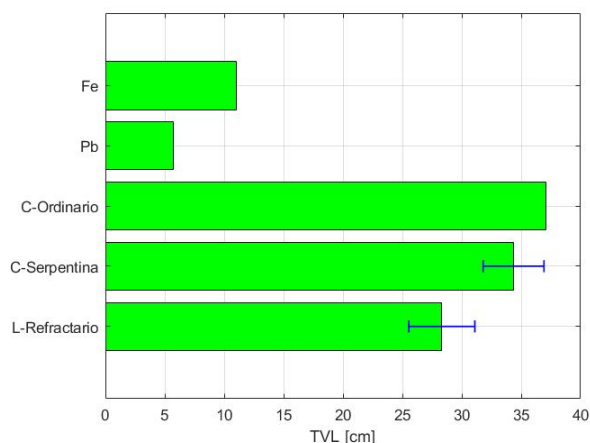


FIG. 7: TVL de los materiales modelados y su incertidumbre, se muestran adicionalmente los valores utilizados en este trabajo (Pb, Fe y C-ordinario del NCRP N°151)

materiales destinados a blindaje en las instalaciones radiológicas. De acuerdo de con K. Mann y cols. [25], el ladrillo refractario es una de la opciones para las aplicaciones de protección de blindaje en los búnker y esto se afirma con el TVL encontrado en este trabajo es de TVL es de 28.32 cm. El concreto serpentina demostró ser eficaz en la atenuación de la radiación, como se evidencia en el estudio de R. Abrefah y cols.[26], quienes concluyen que este material es adecuado para la construcción de búnkers destinados a LINACs de alta energía, ya que presentan una atenuación efectiva tanto de la radiación gamma como de los fotoneutrones (Fig. 7). Parte de la optimización es el tiempo en la construcción de los muros de refuerzo, se utilizó bloques de concreto serpentina ahuecados, que dieron un soporte estructural adecuado al incorporar varillas de hierro en los huecos, algo que no es posible con bloques sólidos. Para evaluar la atenuación de estos bloques, se centró en los resultados de las simulaciones de geometrías de bloques, donde; para atenuar el 10% de la radiación, se requirieron 4.2 unidades de bloques de concreto serpentina sin relleno, 2 unidades de bloques con relleno de concreto NBS 04 y 1.3 unidades de bloques rellenos con concreto de alta densidad. Finalmente, se optó por los bloques serpentina rellenos concreto ordinario NBS 04 para la construcción de los muros de refuerzo. Gono y cols[20], al igual que Quintero y cols[21], confirmaron recientemente el valor del concreto ordinario en el nuevo escenario de la radioterapia. Así mismo, Juste y cols. validaron la correspondencia de los resultados experimentales y los de Monte Carlo, para los fotoneutrones producidos para energías mayores de 8 MV[27].

Levantamiento radiométrico

Al comparar los IDR calculados de forma analítica con los medidos en campo en las condiciones máximas del equipo, se observó que los valores calculados son consistentemente más altos que los valores medidos en todos los puntos evaluados. En particular, las barreras C y G, que presentaron valores elevados en los cálculos, mostraron en las mediciones niveles equivalentes a la dosis de fondo. El IDR no refleja adecuadamente las condiciones operativas reales del equipo ni el entorno de radiación de la instalación. Por lo

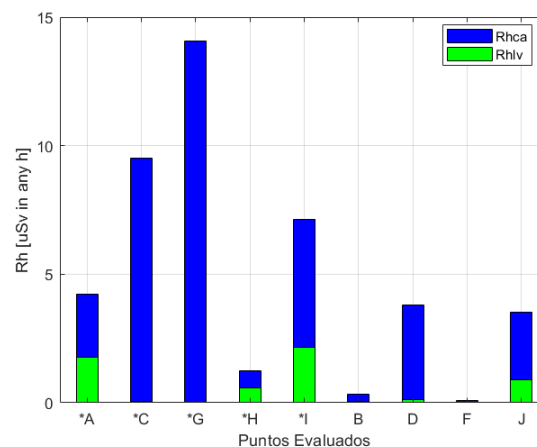


FIG. 8: R_h de color azul del cálculo de blindaje y R_h de color verde del levantamiento radiométrico

tanto, los resultados del levantamiento radiométrico se presenta en términos de TADR se matienen por debajo de las restricciones de dosis (Fig. 8), este amplio margen de seguridad confirma que el enfoque conservador propuesto por el NCRP N°151 debería ser revisado y optimizado, en función de garantizar la seguridad sin elevar los costes de forma desmedida. Por tanto, el blindaje rediseñado cumple con los requisitos de protección bajo las condiciones evaluadas, ya que los cálculos se realizaron asumiendo escenarios extremos del uso del equipo. Este enfoque resultaría beneficioso en caso de que, en el futuro, los espacios colindantes se conviertan en áreas de ocupación permanente o si las horas de trabajo se incrementen más allá de lo habitual.

V. CONCLUSIONES

En conclusión, el recálculo y rediseño de la instalación no solo permitió una remodelación rápida y viable, sino que también garantizó el cumplimiento de los criterios de seguridad de Protección Radiológica. Las simulaciones realizadas demostraron que tanto el ladrillo refractario como el concreto serpentina son materiales altamente efectivos para la atenuación de la radiación de 10 MV, logrando una reducción significativa en la exposición a la radiación. Estos resultados subrayan la importancia de un diseño adecuado y el uso de materiales efectivos en la protección radiológica dentro de las instalaciones de Radioterapia. Además se sugiere que el enfoque adoptado en este estudio podría servir como modelo para futuros proyectos de rediseño de instalaciones, asegurando así un nivel óptimo de seguridad en el manejo de la radiación.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Devi. en *Futuristic Trends in Medical Sciences* cap. 4 (IIP Series, 2024). <https://iipseries.org/assets/docupload/rs1202458BE258FEACE706.pdf>.
- [2] F. Chu. The Latest Developments and Applications in Radiation Therapy Equipment and Technology. *Interntional Jpurnal of Public Health and Medical Research* 2 (2024). <https://doi.org/10.62051/ijphmr.v2n1.03>.
- [3] IAEA. *NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA N°SSG-46. PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICAS EN LOS*

USOS MÉDICOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE 2022. www.iaea.org/es/recursos/normas-de-seguridad.

- [4] Comisión Chilena de Energía Nuclear. *Norma de Seguridad NS-02.0: Criterios Básicos de Protección Radiológica* Santiago, Chile, 2018. https://www.cchen.cl/pdf/resoluciones_dsnr/2018/NS-020-Criterios-Basicos-de-Proteccion-Radiologica.pdf.
- [5] H. Morgan. *Journal of Radiological Protection* **26**, 349-349 (sep. de 2006). ISSN: 1361-6498. <http://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/26/3/B01>.
- [6] Varian Medical Systems. *TrueBeam 2.7 Image Guidance: Feature Sheet* inf. téc. RAD10466 (Varian Medical Systems, ago. de 2017). https://varian.widen.net/view/pdf/ehfud20bff/TrueBeam2.7ImageGuidance_FeaturesSheet_RAD10466_August2017.pdf.
- [7] P. y. E. Horton. *Diseño y blindaje de instalaciones de tratamiento de radioterapia* 2nd. <https://iopscience.iop.org/book/mono/978-0-7503-1440-4.pdf> (IOP Publishing, Bristol, UK, 2017).
- [8] IAEA. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy Technical Reports Series 398 (Rev. 1)*. ISBN: 978-92-0-146022-6. <https://www.iaea.org/publications/15048/absorbed-dose-determination-in-external-beam-radiotherapy> (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 2024).
- [9] P. McGinley. *Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities* ISBN: 9781930524071 (Medical Physics Pub., 2002).
- [10] P. Andreo, D. T. Burns, A. E. Nahum, J. Seuntjens y F. H. Attix. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry* ISBN: 9783527409211. <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Ionizing+Radiation+Dosimetry-p-9783527409211> (Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2017).
- [11] I. Kawrakow. The EGSnrc Code System: Montecarlo Simulation of Electron and Photon Transport. Report NRCC Pirs-701 (2023). <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=94997adc-2141-4ffb-b28e-c409d202bbda>.
- [12] I. Walters BRBI y Kawrakow y D. y. o. Rogers. DOSXYZnrc Users Manual. Report NRCC Pirs 794 (2023). <https://nrc-cnrc.github.io/EGSnrc/doc/pirs794-dosxyznrc.pdf>.
- [13] IAEA. *Phase-space database for external beam radiotherapy* 2024. https://www.nds.iaea.org/phsp/photon/ELEKTA_Precise_10MV/.
- [14] R. J. McConn, C. J. Gesh, R. T. Pagh, R. A. Rucker y R. Williams III. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling* inf. téc. (Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2011). <https://doi.org/10.2172/1023125>.
- [15] Graublock. *Graublock estandar GST-20* Accessed: Jul, 25 2024. 2024. <http://www.phg.cl/fichas/Graublock-Estandar-GST-20.pdf>.
- [16] ATOMTEX. *AT1121, AT1123 X-ray and gamma radiation dosimeters* Accessed: Oct, 31 2024. 2024. <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at11211123.pdf>.
- [17] D. Chicco, M. J. Warrens y G. Jurman. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science* **7**, e623 (2021).
- [18] W. Alpha. *Mathematica* Accessed: Oct. 19, 2024. 2024. <https://www.wolframalpha.com/>.
- [19] P. H. McGinley y M. Martin. *Shielding techniques for radiation oncology facilities* (Medical Physics Publishing, 1998).
- [20] P. Gono, S. Nahida, R. Abdur, S. Sarmin, H. Abul y A. Monjur. Evaluate the Slab Thickness of the New LINAC Bunker as Shielding at the INMP, AERE, BAEC, Bangladesh. *World Journal of Nuclear Medicine* **22** (2023). <https://doi.org/10.1055/s-0043-1769957>.
- [21] M. Quintero, C. Hernández, P. Chávez y J. Rojas-López. Considerations for MR-linac bunker shielding design. *Bio-medical Physics Engineering Express* **9** (2023). <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ad04e9>.
- [22] R. Ravichandran, B. Barman, T. Mondal, S. Kale, R. Kinhi-kar y R. Kannan. Shielding conformity issues in concrete bunker of a high-energy linear accelerator. *Journal of Medical Physics* **48** (2023). https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_46_23.
- [23] Y. Harima. An historical review and current status of build-up factor calculations and applications. *Radiation Physics and Chemistry* **41**, 631-672 (abr. de 1993). ISSN: 0969-806X. [http://dx.doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90317-N](http://dx.doi.org/10.1016/0969-806X(93)90317-N).
- [24] G. Hernández, A. Canas-Junquera y F. Fernández. The differential build-up factor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **935**, 69-74 (2019).
- [25] K. S. Mann, M. S. Heer y A. Rani. Investigation of clay bricks for storage facilities of radioactive-wastage. *Applied Clay Science* **119**, 249-256 (ene. de 2016). ISSN: 0169-1317. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.10.022>.
- [26] R. G. Abrefah, K. Tuffour-Achampong y P. Amoah. Effectiveness of Serpentine Concrete as Shielding Material for Neutron Source Facility Using Monte Carlo Code. *Science and Technology of Nuclear Installations* **2023** (ed. Zakaly, H.) 1-7 (feb. de 2023). ISSN: 1687-6075. <http://dx.doi.org/10.1155/2023/8986638>.
- [27] B. Juste, S. Garcia, R. Miro y G. Verdú. Monte Carlo code application to the study of 3D neutrons distribution in a radiotherapy bunker and validation with experimental measurements. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* **954** (2020). <https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2018.09.083>.