



DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA

**Trabajo de Fin de Grado**  
**Grado en Física**

CÁLCULO DE BLINDAJES EN UNA SALA DE TRATAMIENTO  
DE BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA

*Fernando Laliena Cantero*

*Directores: Eduardo García Abancéns y F. Javier Jiménez Albericio*

Junio de 2018



# Índice

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2. Diseño de la sala</b>	<b>3</b>
2.1. Conceptos relacionados con la sala de tratamiento . . . . .	3
2.2. Cálculo de las barreras . . . . .	5
2.3. Cálculo del laberinto . . . . .	7
2.4. Ejemplo . . . . .	9
<b>3. Programa</b>	<b>12</b>
3.1. Datos de entrada . . . . .	12
3.2. Datos de salida . . . . .	13
3.3. Algoritmo . . . . .	14
3.3.1. Programa principal . . . . .	14
3.3.2. Subalgoritmo “obtenDatos” . . . . .	14
3.3.3. Subalgoritmo “calcula” . . . . .	15
3.3.4. Subalgoritmo “creaSala” . . . . .	15
3.4. Interfaz gráfica . . . . .	16
<b>4. Caso práctico</b>	<b>18</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>22</b>

## 1. Introducción y objetivos

La braquiterapia es un tipo de tratamiento en el cual se implantan intersticial, intracavitaria o superficialmente fuentes radiactivas en un paciente para poder administrarle una dosis de radiación a corta distancia. Es ideal para el tratamiento de tumores bien localizados debido a que nos permite un gran control sobre la distribución de la dosis de radiación. En concreto nos vamos a centrar en la braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR, siglas en inglés), clasificada así por la comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU, siglas en inglés) para tasas de dosis que superen los 20 cGy/min [1]. El uso de la braquiterapia HDR está muy extendido porque permite tratamientos cortos y no siempre conlleva la hospitalización del paciente. Además los avances tecnológicos permiten administrar las fuentes de manera segura y precisa sin la necesidad de que el personal sanitario reciba la dosis directamente.

En la braquiterapia HDR se emplean diferentes tipos de isótopos radiactivos, pero los más empleados son el  $^{192}\text{Ir}$  y el  $^{60}\text{Co}$ , que emiten fotones con unas energías medias de 0,37 y 1,25 MeV, respectivamente. El tratamiento se realiza en una sala (sala de tratamiento) en la que una máquina va a liberar en determinados momentos fuentes radiactivas de uno u otro isótopo en el interior o la superficie del cuerpo de una persona. El dispositivo dispone de un alojamiento blindado, el cual ocupa la fuente en las situaciones de reposo, en el que se absorbe la mayor parte de la radiación emitida por la fuente. Sin embargo, cuando la fuente abandona este alojamiento (con motivo de tratamiento, pruebas de control de calidad,...) deja de haber blindaje y se emite radiación en todas las direcciones; durante el tratamiento, cuando las fuentes son introducidas en el paciente, su cuerpo, que a los ojos de esta radiación es principalmente agua, será lo único que frene en alguna medida la radiación que emitan. En las habitaciones adyacentes a la sala de tratamiento podría haber gente durante periodos más o menos prolongados de tiempo y, por la normativa para instalaciones radiactivas, existen unos límites de dosis que van a poder recibir. Para la determinación de estos límites la normativa vigente, el Real Decreto 783/2001 [2], establece una clasificación del personal (distinguiendo entre trabajadores expuestos y miembros del público) y de las zonas de la instalación en función del riesgo de exposición a la radiación y los límites de dosis correspondientes. Así pues cuando se construye una sala de tratamiento de braquiterapia HDR es necesario recubrir las paredes, techo y suelo de la sala con los blindajes adecuados, para asegurarse de que no se superen dichos límites.

El objetivo de este trabajo es diseñar una aplicación informática que, dada una serie de datos sobre una sala de tratamiento (dimensiones y posición de la fuente) y las adyacentes (su situación, qué personas y durante cuánto tiempo estarán en la sala), nos calcule los distintos espesores necesarios para el blindaje de la sala en función de variables como el tipo de fuente o el material empleado (hormigón, acero o plomo).

## 2. Diseño de la sala

Esta sección ha sido desarrollada siguiendo las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, siglas en inglés) [3] para una sala de braquiterapia de alta tasa de dosis.

### 2.1. Conceptos relacionados con la sala de tratamiento

La aplicación desarrollada en este trabajo se centra únicamente en salas de geometría rectangular, como la que, a modo de ejemplo, se muestra en la figura 1, rodeada de otras salas y pasillos en la misma planta y en las plantas superior e inferior.

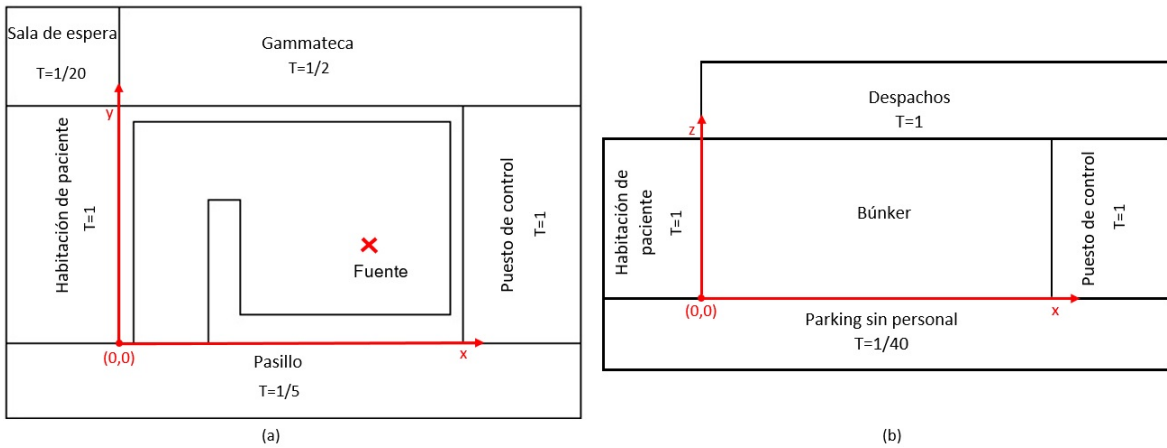


Figura 1: Ejemplo de instalación de braquiterapia HDR. (a) planta en la que se muestran las habitaciones que rodean a la sala de tratamiento (b) alzado en el que se muestran las plantas superior e inferior.

Antes de empezar con el diseño de los blindajes de la sala de tratamiento es necesario introducir una serie de conceptos:

- **Equivalente de dosis:** los límites establecidos en la legislación vigente [2] están expresados en dosis efectiva<sup>1</sup> por año, en este trabajo en particular cada vez que se presente un límite o un objetivo dosimétrico de diseño (explicado dos puntos más adelante) será en tasa de equivalente de dosis. El equivalente de dosis H se define como la dosis absorbida D multiplicada por un factor de ponderación de la radiación  $w_R$  que mide el daño biológico causado por la radiación. El valor de este factor varía según el tipo de radiación. En el sistema internacional H se mide en Sievert (Sv) y D en Greys ( $Gy=J/kg$ ). Dado que para fotones  $w_R = 1$ , en braquiterapia HDR tendremos  $1 Sv=1 Gy$ .
- **Tipo de sala:** para las salas adyacentes se distingue entre salas controladas (c), supervisadas (s) o públicas (p). Es necesario hacer esta distinción ya que en función de ella varían los límites de dosis permitida en cada sala [2]. En zonas controladas solo pueden acceder libremente los trabajadores expuestos de categoría A. El resto de trabajadores

<sup>1</sup>Definida como la suma de todas dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo.

y los miembros de público deben seguir un control de acceso. El límite de dosis efectiva en zonas controladas es de 20 mSv/año. En las zonas vigiladas cualquier trabajador expuesto puede acceder; sin embargo, los miembros de público deben seguir un control de acceso. Los límites de dosis en zona vigilada son 3/10 de los límites de dosis establecidos para zona controlada; así, para la dosis efectiva el límite se establece en 6 mSv por año. Las zonas públicas no tienen control de acceso por motivos radiológicos (aunque puede haber control de acceso por motivos organizativos). Los límites para estas zonas son los de los miembros de público, es decir, un máximo de dosis efectiva y de equivalente de dosis de 1 mSv/año.

- **Objetivo dosimétrico de diseño:** a la hora de hacer los cálculos para establecer los blindajes de la sala de tratamiento se buscan las situaciones más desfavorables. En lugar de utilizar directamente los límites que establece la legislación [2], se emplean límites menores para obtener resultados con suficiente margen de seguridad, estos son los objetivos dosimétricos de diseño. En la tabla 1 se presentan los objetivos dosimétricos de diseño  $P$  recomendados por el NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements, EE.UU), el IPEM (Institute of Physics and Engineering in Medicine, R.U.) y la IAEA, además de los que hemos decidido emplear en este trabajo para realizar los ejemplos mostrados. Las diferentes magnitudes empleadas se explican al inicio de la sección 2.2.
- **Carga de trabajo ( $W$ ):** promedio de dosis absorbida producida por una fuente en un determinado punto a lo largo de un determinado tiempo [4]; generalmente, dicho intervalo de tiempo es una semana.
- **Factor de uso ( $U$ ):** fracción de la carga de trabajo para la cual el haz útil está dirigido hacia el lugar considerado a proteger. En el caso de la braquiterapia la fuente no está colimada por lo que la radiación se propagará de manera isótropa y por lo tanto todas las paredes, el techo y el suelo reciben directamente la radiación y tendrán que ser consideradas barreras primarias; así pues, de ahora en adelante tomaremos  $U=1$  para cualquier sala.
- **Factor de ocupación ( $T$ ):** el factor de ocupación tiene en cuenta el grado de ocupación relativo de la zona considerada a proteger. Se define como la fracción promedio de tiempo en que la persona potencialmente más expuesta está presente en ese área mientras la fuente está en uso. Puede verse en la figura 1 un ejemplo de los valores asignados a distintas estancias según su finalidad.
- **Posición de cálculo:** en las salas adyacentes de la misma planta y de la superior en la que se encuentra la sala de tratamiento tomamos como referencia el punto más próximo a la fuente situado a 30 cm más allá de la barrera. En el caso de las salas de la planta inferior tomamos el punto más próximo a la fuente situado a un metro del suelo.
- **Material de blindaje:** los materiales más empleados como blindaje en las paredes, suelo y techo son el plomo, el acero y el hormigón. El plomo es un buen material por su elevada densidad y alto número másico, ideal para espacios reducidos, pero tiene el inconveniente de ser relativamente caro y difícil de trabajar. El acero tiene un precio

más asequible y es más fácil de trabajar e instalar. El hormigón es el más barato y el más fácil de instalar de los tres, pero requiere barreras bastante gruesas.

Tipo	NCRP	IPEM	IAEA	En este trabajo
c	$100 \mu Sv/sem$	$D \rightarrow 120 \mu Sv/sem$ $IDR \rightarrow 2000 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 7,5 \mu Sv/h$	$200 \mu Sv/sem$	$D \rightarrow 100 \mu Sv/sem$ $IDR \rightarrow 20 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 7,5 \mu Sv/h$
s	$20 \mu Sv/sem$ ( $20 \mu Sv/h$ )	$IDR \rightarrow 7,5 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 2,5 \mu Sv/h$	$10 \mu Sv/sem$	$D \rightarrow 20 \mu Sv/sem$ $IDR \rightarrow 10 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 0,5 \mu Sv/h$
P	$20 \mu Sv/sem$ ( $20 \mu Sv/h$ )	$IDR \rightarrow 7,5 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 0,5 \mu Sv/h$	$10 \mu Sv/sem$	$D \rightarrow 20 \mu Sv/sem$ $IDR \rightarrow 10 \mu Sv/h$ $TADR \rightarrow 0,5 \mu Sv/h$

Tabla 1: Objetivos dosimétricos de diseño  $P$  establecidos por diferentes organismos internacionales para salas controladas (c), supervisadas (s) y públicas (p). En la última columna se muestran los valores empleados para la realización de los ejemplos de este trabajo.

## 2.2. Cálculo de las barreras

Debemos determinar el espesor y material con los que blindaremos la sala. Para ello tendremos en cuenta el objetivo dosimétrico de diseño y calcularemos la tasa de equivalente de dosis en las posiciones de cálculo de cada una de las salas adyacentes. Después llevaremos a cabo el diseño de modo que no se supere ninguno de los objetivos dosimétricos establecidos. Para cada sala suelen imponerse tres objetivos dosimétricos de diseño, uno para la tasa de dosis recibida en una semana ( $D$ ), otro para la tasa de dosis instantánea ( $IDR$ , siglas en inglés) y uno más para la tasa de dosis promediada en el tiempo ( $TADR$ , siglas en inglés) habitualmente promediada a 8 horas de exposición ( $R_8$ ). Calcularemos los blindajes necesarios para no violar cada uno de los objetivos de diseño en cada habitación y nos quedaremos con aquel que los garantice todos (el de mayor espesor).

Cada isótopo tiene una tasa de kerma de referencia en aire ( $TKRA$ ) que es la dosis liberada a 1m por una fuente de actividad unidad [5]. La fuerza de kerma en aire [6], que suele expresarse en unidades de  $U = \mu Gy \cdot m^2/h$ , se calcula como  $TKRA$  multiplicada por la actividad  $A$  de la fuente en cuestión:

$$S_K = TKRA \cdot A \quad (1)$$

La carga de trabajo  $W$  se calcula como la dosis liberada por cada tratamiento multiplicada por el número de tratamientos semanales y es por tanto:

$$W = S_K \cdot n \cdot t \quad (2)$$

siendo  $n$  el número de tratamientos semanales y  $t$  el tiempo que dura cada tratamiento en promedio.

Al introducir la fuente en el paciente su cuerpo, que es fundamentalmente agua, va a atenuar ligeramente la radiación emitida. Se trata de una atenuación que dependerá del tipo de fuente, del tipo de paciente y de la localización de la fuente dentro del paciente. Es difícil de calcular con exactitud, pero en cualquier caso está por debajo del 15% por lo que, en adelante, la supondremos despreciable. Esto significa que estamos siendo conservadores en nuestros cálculos de tasas de dosis.

Los valores empleados para el  $TKRA$  de cada isótopo son los proporcionados por la IAEA en la tabla 20 de la referencia [3], valores que se pueden ver en la tabla 2.

Isótopo	E media de los $\gamma$ 's (MeV)	$T_{1/2}$	$TKRA$ (U/MBq)
$^{60}Co$	1,25	5,27 a	0,308
$^{192}Ir$	0,37	74 d	0,111

Tabla 2: Datos relevantes de las fuentes radiactivas más empleadas en braquiterapia HDR.

Es inmediato comprobar que las tasas de dosis introducidas anteriormente se pueden obtener mediante las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{W \cdot U \cdot T}{d^2} \quad (3)$$

$$IDR = \frac{S_K}{d^2} \quad (4)$$

$$R_8 = IDR \cdot \frac{t_{exp}}{8} \quad (5)$$

siendo  $d$  la distancia entre la fuente y la posición de cálculo explicada en el apartado anterior y  $t_{exp}$  el tiempo (en horas) que permanece la fuente fuera de su blindaje en una jornada laboral de 8 horas. Como el factor de ponderación  $w_R$  vale 1, estas expresiones dan el equivalente de dosis que se estaría recibiendo a una distancia  $d$  de la fuente si no se interpusiese nada que la atenuase. No obstante tenemos una pared de por medio y nuestro objetivo es que introduzca un factor de atenuación  $B$  tal que la tasa de equivalente de dosis recibida tras ella no supere nuestro objetivo dosimétrico  $P$ . De modo que  $B$  se puede obtener como el cociente entre el objetivo dosimétrico y la tasa de equivalente de dosis liberada.

Para lograr este factor de atenuación deberemos introducir nuestro espesor de material, que se suele expresar dando el número de capas decimorreductoras (TVL, siglas en inglés), definidas como el espesor de un material determinado necesario para reducir la intensidad de un haz de radiación estrecho a un décimo de la original [4], de modo que necesitaremos  $N$  TVL's siendo  $N$ :

$$N = -\log_{10}(B) \quad (6)$$

Aquí hay que tener en cuenta que, conforme el haz de fotones avanza por el material, su espectro de energías se modificará. Para tener en cuenta este hecho se utiliza un valor para la primera capa decimorreductora ( $TVL_1$ ) y para el resto se usa un valor en equilibrio ( $TVL_e$ ). Por tanto el espesor necesario será el siguiente:



$$e = TVL_1 + (N - 1)TVL_e \quad (7)$$

Los valores empleados en este trabajo para las distintas capas decimorreductoras de cada material son los facilitados por la Sociedad Española de Física Médica (SEFM) [6] y se presentan en la tabla 3. En cada habitación calcularemos el espesor necesario para cumplir con cada uno de los objetivos de dosis (para  $D$ ,  $IDR$  y  $R_8$ ) y nos quedaremos con el mayor de ellos. Repitiendo esta operación para las diferentes salas adyacentes obtendríamos los espesores necesarios para los blindajes de todas las paredes de la sala de tratamiento.

Radionucleido	Material	$TVL_1$ (mm)	$TVL_e$ (mm)
$^{192}\text{Ir}$	<i>Hormigón</i>	180	139
	<i>Aceros inoxidable</i>	48	41
	<i>Plomo</i>	11	19
$^{60}\text{Co}$	<i>Hormigón</i>	276	210
	<i>Aceros inoxidable</i>	84	65
	<i>Plomo</i>	46	40

Tabla 3: Espesores decimoreductores.

### 2.3. Cálculo del laberinto

El único punto que nos queda ahora es la puerta que, por motivos de comodidad y seguridad, no puede tener el mismo espesor y material que la pared en la que se encuentra, ya que nos quedaría una puerta excesivamente pesada. Por lo general las salas se diseñan con laberintos para que ni siquiera sea necesaria una puerta desde el punto de vista de la protección radiológica. La forma más simple de sala con laberinto, que es la que vamos a emplear (véase la figura 2), es colocar una pared entre la puerta y la fuente con un espesor tal que la tasa de equivalente de dosis en el punto donde se colocaría la puerta no supere el objetivo dosimétrico de diseño.

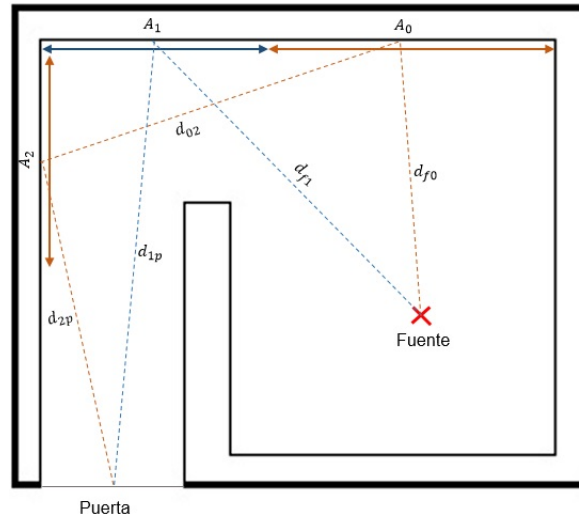


Figura 2: Esquema de la sala de tratamiento con laberinto que muestra las trayectorias de los fotones dispersados.

El espesor del laberinto se calcula de la misma forma que las paredes pero tomando como punto de referencia el centro de la puerta. Además de la radiación primaria que va a atravesar la pared del laberinto, a la puerta nos puede llegar radiación dispersada por las paredes (véase figura 2), de manera que habrá que recalcular el espesor del laberinto con un nuevo objetivo dosimétrico que será el que corresponda a la puerta restándole la tasa de equivalente de dosis que llega a la puerta debida a estas dispersiones.

La radiación que se dispersa no llegará con toda su intensidad a la puerta, sino que gran parte de ella será transmitida a la pared. Los coeficientes albedo ( $\alpha$ ) nos dan el cociente entre la radiación reflejada por una superficie y la que ha incidido. Dependerán del material que estemos empleando, de la energía con la que llegan los fotones y del ángulo con el que incidan y se reflejen. Por simplicidad hemos empleado siempre los coeficientes asociados al hormigón independientemente del material, de esta forma estamos siendo conservadores, ya que, como se puede comprobar en la fig. 4.12 del NCRP report No. 144 [7], para los rangos de energía contemplados en este trabajo los coeficientes albedo del hormigón son los más altos. Para determinar los coeficientes albedo generalmente se usan valores recogidos en gráficas o tablas, en este trabajo en particular los valores empleados (tablas 4 y 5) han sido obtenidos de los facilitados por la IAEA en las tablas 6 y 7 de la referencia [3].

Angulo reflec (°)	75	60	45	30	0
$^{192}\text{Ir}$	$7,54 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$
$^{60}\text{Co}$	$4,06 \cdot 10^{-3}$	$5,94 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$7,65 \cdot 10^{-3}$	$7,79 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4: Coeficientes  $\alpha$  para incidencias normales ( $0^\circ$ ).

Angulo reflec (°)	75	45	15	0
$^{192}\text{Ir}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-2}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$
$^{60}\text{Co}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$

Tabla 5: Coeficientes  $\alpha$  para incidencias de  $45^\circ$ .

Para estos cálculos solo se contemplan los fotones que lleguen a la puerta tras una o dos dispersiones. Comparando con los resultados obtenidos para una y dos dispersiones, la intensidad producida tras múltiples dispersiones puede considerarse despreciable. En el caso de una sola dispersión (dispersión directa), se calcula el área de la pared situada frente a la puerta desde la que se puede ver simultáneamente la fuente y la puerta (la superficie  $A_1$  de la figura 2) y se toma como valor promedio para todos los fotones que lleguen con una sola dispersión el correspondiente al punto medio de dicha superficie (véanse las trazas azules de la figura 2). La ecuación empleada para el cálculo de esta tasa de dosis por dispersión directa es la siguiente:

$$D_{sd} = \frac{W}{d_{f1}^2} \cdot \frac{\alpha_d \cdot A_1}{d_{1p}^2} \quad (8)$$

siendo  $\alpha_d$  el coeficiente de albedo para la reflexión en la superficie  $A_1$ ,  $d_{f1}$  la distancia entre la fuente y el punto medio de  $A_1$  y  $d_{1p}$  la distancia entre ese punto y el punto medio de la

puerta. En el caso de la doble dispersión (denominada dispersión indirecta) se emplea el área  $A_0$ , que es la de la pared enfrentada a la puerta desde la que puede verse directamente la fuente, pero desde la que no se ve la puerta. Su proyección en la pared del laberinto,  $A_2$ , es el área en el que se produce la segunda dispersión que alcanza la puerta; en ambas superficies de nuevo se considera que los fotones colisionan en el centro (véanse las trazas marrones de la figura 2). Para la dosis por dispersión indirecta se emplea:

$$D_{si} = \frac{W}{d_{f0}^2} \cdot \frac{\alpha_{i1} \cdot A_0 \cdot \alpha_{i2} \cdot A_2}{d_{02}^2 \cdot d_{2p}^2} \quad (9)$$

donde  $\alpha_{i1}$  y  $\alpha_{i2}$  son los coeficientes de albedo para la reflexión en las superficies  $A_0$  y  $A_2$ , respectivamente,  $d_{f0}$  es la distancia que hay entre la fuente y el punto medio de  $A_0$ ,  $d_{02}$  es la que hay entre este y el centro de  $A_2$  y  $d_{2p}$  es la distancia entre este último y el punto medio de la puerta.

## 2.4. Ejemplo

Para que quede claro todo el procedimiento a seguir la mejor opción es verlo en un ejemplo. Vamos a calcular el espesor necesario en hormigón para la pared del laberinto de la figura 2, el cálculo de la sala completa se realiza en la sección 4, empleando la aplicación desarrollada en este trabajo y explicada en el apartado 3. Teniendo en cuenta los datos presentados en el apartado 4, dimensiones (600, 520, 350) y posición de la fuente (400, 220, 0), la distancia entre el centro de la puerta y la fuente será de 337,7 cm, tendremos una fuente de  $^{192}\text{Ir}$  con una actividad de 370 GBq y se van a realizar 4 tratamientos diarios con una duración promedio de 20 minutos por tratamiento. El valor del  $TKRA$  para este isótopo según la tabla 2 es de  $0,111 \mu\text{Gy} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ , de modo que nos queda la siguiente fuerza de kerma en aire:

$$S_K = 0,111 \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{MBq} \cdot \text{h}} \cdot 370 \text{GBq} = 41070 \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \approx 41000 \text{ U}$$

quedándonos la siguiente carga semanal:

$$W = 41000 \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \cdot 4 \frac{\text{trat}}{\text{dia}} \cdot 5 \frac{\text{dia}}{\text{sem}} \cdot 20 \frac{\text{min}}{\text{trat}} \cdot \frac{1\text{h}}{60\text{min}} = 2,73 \cdot 10^5 \frac{\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{sem}} \approx 0,3 \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{sem}}$$

De acuerdo con las ecuaciones (3), (4) y (5) y con la distancia puerta-fuente que acabamos de introducir obtenemos los siguientes valores para las tasas de dosis:

$$D = 5,26 \cdot 10^3 \mu\text{Gy}/\text{sem}$$

$$IDR = 3,60 \cdot 10^3 \mu\text{Sv}/\text{h}$$

$$R_8 = 5,84 \cdot 10^2 \mu\text{Sv}/\text{h}$$

En una situación real la sala contigua, un pasillo, se consideraría como supervisada así

pues. Para no incumplir los objetivos dosimétricos mostrados en la tabla 1 serán necesarios los siguientes factores de atenuación:

$$B_D = 3,80 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{IDR} = 2,78 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{R_8} = 8,56 \cdot 10^{-4}$$

Así pues el número de capas TVL que necesitaremos en cada caso para asegurar la atenuación requerida será:

$$N_D = -\log_{10}(B_D) = 2,42$$

$$N_{IDR} = -\log_{10}(B_{IDR}) = 2,56$$

$$N_{R_8} = -\log_{10}(B_{R_8}) = 3,07$$

Como hemos decidido que el material empleado para blindar esa pared en cuestión es hormigón, de acuerdo a los datos recogidos en la tabla 3, tendremos una primera capa decimorredutora de  $TVL_1 = 18,0 \text{ cm}$  y el resto de  $TVL_e = 13,9 \text{ cm}$ . El espesor total que se necesitará para esa pared según cada tipo de dosis será, de acuerdo con la ecuación (7):

$$e_D = 37,7 \text{ cm}$$

$$e_{IDR} = 39,6 \text{ cm}$$

$$e_{R_8} = 46,7 \text{ cm}$$

Dado que tenemos que escoger un espesor que nos asegure la no violación de ninguno de los objetivos dosimétricos de diseño, en este caso elegiremos el espesor derivado de la tasa de dosis  $R_8$ :

$$e_{\text{laberinto}} = 46,7 \text{ cm}$$

Como estamos calculando el blindaje del laberinto habrá que estudiar la radiación dispersada en las paredes. En lo que respecta a los coeficientes albedo suponemos que los ángulos de incidencia y reflexión directos (con una sola dispersión) e indirectos (con dos dispersiones) son los recogidos en la tabla 6. Consultando los valores de las tablas 4 y 5 y escogiendo los ángulos más parecidos a estos se obtienen los coeficientes albedo mostrados también en la tabla 6.

dispersión	directa	1ª indirecta	2ª indirecta
ángulo incidencia (°)	35,0	15,1	21,0
ángulo reflexión (°)	8,3	69,0	72,7
$\alpha$	$2,94 \cdot 10^{-2}$	$7,54 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-3}$

Tabla 6: Ángulos promedio de incidencia y reflexión para las distintas dispersiones y coeficientes albedo correspondientes a cada una.

Todos los ángulos así como las áreas de dispersión ( $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$ ) que se calculan van a depender de la longitud del laberinto. Si el laberinto es más largo el área  $A_0$  crecerá a expensas de  $A_1$  y con ello cambiarán también los ángulos. Para facilitar los cálculos en este trabajo hemos impuesto que siempre tendrá que haber 2 m entre el final de la pared del laberinto y la pared de atrás, de manera que las camillas puedan entrar en la sala de tratamiento con facilidad.

En nuestro ejemplo las áreas y las distancias que aparecen en las ecuaciones (8) y (9) toman los valores:

$$A_0 = 6,0 \text{ m}^2 ; A_1 = 11,9 \text{ m}^2 ; A_2 = 11,5 \text{ m}^2$$

$$d_{f1} = 322,7 \text{ cm} ; d_{1p} = 489,4 \text{ cm} ; d_{f0} = 273,8 \text{ cm} ; d_{02} = 457,3 \text{ cm} ; d_{2p} = 335,6 \text{ cm}$$

de modo que obtenemos:

$$\left. \begin{array}{l} D_{sd} = 306,11 \text{ } \mu\text{Sv/sem} \\ D_{si} = 0,35 \text{ } \mu\text{Sv/sem} \end{array} \right\} D_{st} = 306,46 \text{ } \mu\text{Sv/sem}$$

siendo  $D_{st}$  la suma de las contribuciones al equivalente de dosis debidas a la radiación dispersada. Ahora tenemos que calcular la atenuación del laberinto de modo que nos llegue la diferencia entre el objetivo  $P$  y  $D_{st}$  para cada una de las tasas de dosis tenidas en cuenta antes. Con ese valor para la atenuación calculamos el espesor necesario para el laberinto con las ecuaciones (6) y (7). En este ejemplo se llega a los siguientes valores para el factor de atenuación y el espesor necesarios:

$$B_{R8} = 8,45 \cdot 10^{-4} \Rightarrow e_{\text{laberinto}} = 46,8 \text{ cm}$$

En este caso en particular la radiación dispersada supone un aumento prácticamente despreciable de la tasa de equivalente de dosis. Este hecho puede verse reflejado en que al tenerla en cuenta el espesor del laberinto sólo aumenta 1 mm con respecto a cuando la estábamos obviando. No obstante esto no siempre es así ya que puede haber casos en los que el tener en cuenta esta radiación conlleve un notable aumento en el espesor del laberinto.

### 3. Programa

Como se ha comentado antes el objetivo de este trabajo es diseñar una aplicación que calcule automáticamente todo lo que acabamos de ver en la sección anterior. Para ello el programa desarrollado, a partir de unos datos de entrada (sección 3.1), mediante un algoritmo de cálculo (sección 3.3), nos aportará como datos de salida (sección 3.2) los espesores necesarios para los blindajes de una sala de tratamiento de braquiterapia HDR.

#### 3.1. Datos de entrada

Los datos de entrada que necesita el programa se agrupan en tres ficheros de texto independientes (véase la figura 3). El programa buscará en la carpeta especificada dichos ficheros y empleará funciones de lectura para guardar dichos datos en las variables asignadas para cada uno dentro del algoritmo de cálculo. Por ello los datos deberán estar escritos en un orden y formato (por ejemplo, el tipo de fuente  $i$  es interpretada como  $^{192}Ir$ ), cuestión que abordaremos más adelante. Los 3 ficheros mencionados son:

1. Fichero “dimensiones” (figura 3(a)): El programa solo va a contemplar salas con geometría de paralelepípedo rectangular como las mostradas en las figuras 1 y 2 y en este fichero se presentarán los valores de sus tres dimensiones espaciales. Además contiene el ancho del pasillo del laberinto por el que va a pasar la camilla del paciente al entrar en la sala y el material a emplear para la fabricación del laberinto (c=hormigón, p=plomo o s=acero).
2. Fichero “fuente” (figura 3 (b)): Guarda el tipo de fuente que se utiliza ( $i=^{192}Ir$  o  $c=^{60}Co$ ) así como la terna de números que definen su posición en la sala y la carga de trabajo semanal (W).
3. Fichero “salas” (figura 3 (c)): Almacena para cada una de las salas adyacentes a la de tratamiento los datos más importantes: número de referencia, factor de ocupación (T), coordenadas espaciales de las posiciones de cálculo, tipo de sala en cuanto a la consideración del objetivo dosimétrico (c=controlada, s=supervisada o p=pública) y material de la pared en común con la sala de tratamiento. Cabe destacar que, aunque en la figura 3 se han puesto los blindajes de todas las paredes del mismo material (hormigón), cada una puede emplear materiales distintos.

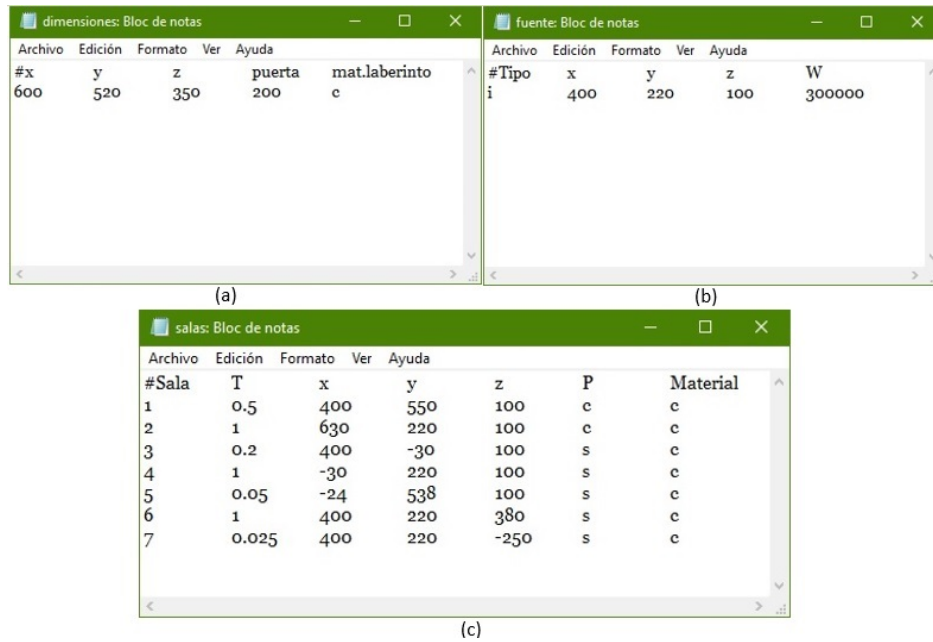


Figura 3: Ejemplo de ficheros de entrada.

El programa ha sido diseñado de manera que asigna el origen de coordenadas a la esquina inferior izquierda de la pared en la que se encuentre la puerta de entrada (el punto que se marca en rojo en la figura 1). Todos los datos espaciales requeridos en los ficheros de entrada deberán proporcionarse teniendo en cuenta esta referencia. En las figuras 3 puede apreciarse que, al inicio de cada fichero, encontramos el carácter #. Este carácter es el asignado para que el programa distinga las líneas de comentario, cuyo contenido no es pertinente para el cálculo, pero facilita la comprensión del fichero de texto.

### 3.2. Datos de salida

En lo que se refiere a los datos de salida, el programa nos proporciona un fichero denominado “Resultado” (véase la figura 4) en el que se presentan los espesores en cm que ha calculado para cada una de las paredes así como las dimensiones del laberinto.

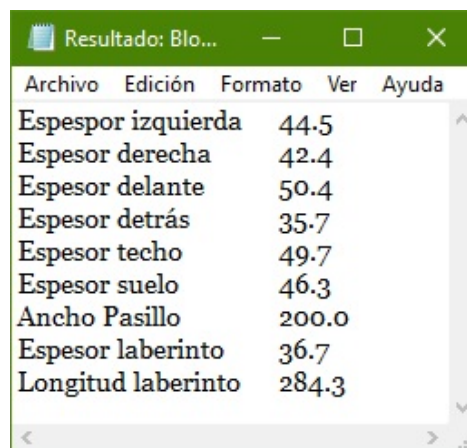


Figura 4: Ejemplo de fichero de salida.

### 3.3. Algoritmo

El algoritmo implementado consta de un programa principal y tres subalgoritmos que son: “obtendatos”, “calcula” y “creasala”. Véase el diagrama de la figura 5.

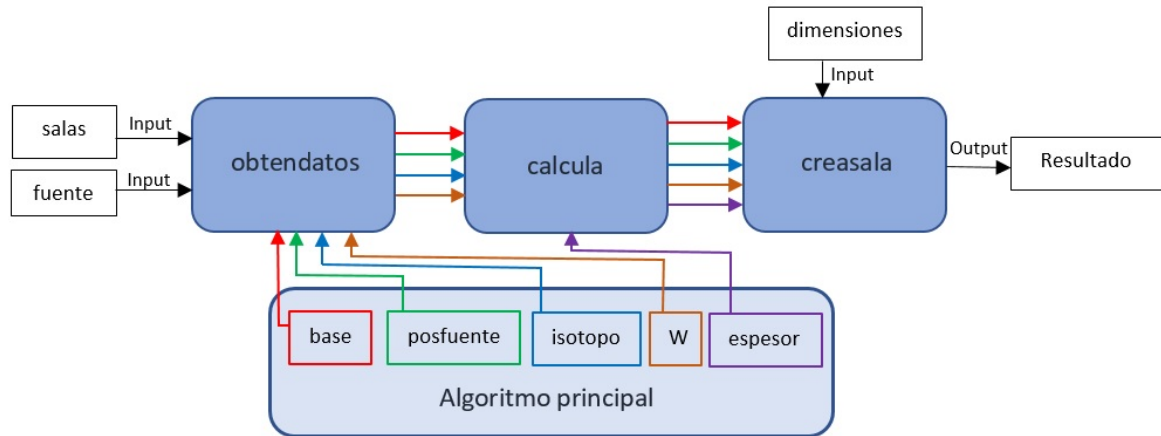


Figura 5: Diagrama de flujo del programa completo.

#### 3.3.1. Programa principal

Nada más empezar el programa se determina el número de salas  $n$  leyendo el fichero “salas” línea por línea y empleando un contador. A continuación se crean todas las variables que vamos a tener que proporcionar a las distintas funciones. Luego se lanza la función “obtendatos” para guardar los datos de las salas adyacentes y la fuente en variables del propio programa. Seguidamente se ejecuta la función “calcula” que, empleando estos datos, va a calcular los espesores necesarios para cada barrera. Finalmente se invoca la función “creasala” la cuál usará los datos obtenidos por las dos anteriores además de los de las dimensiones de la sala de tratamiento para determinar los espesores finales para cada pared y para el laberinto. Esta misma función se encargará además de proporcionar los datos de salida. En los siguientes apartados explicamos más a fondo el funcionamiento de cada uno de los subalgoritmos.

#### 3.3.2. Subalgoritmo “obtendatos”

Esta función recibe como datos de entrada un vector que designa la posición de la fuente, una variable real para almacenar la carga semanal, otra para almacenar el tipo de isótopo y un *array* (matriz) de tamaño  $n \times 7$  denominado “base”, siendo  $n$  el número de salas adyacentes a la sala de tratamiento. Se va a encargar de pasar los datos almacenados en los ficheros “salas” y “fuente” a variables propias del programa.

Para empezar el subalgoritmo declara varios *arrays* de variables de texto que servirán como comodines. A continuación abre el fichero indicado (“fuente” o “salas”) y lo va leyendo línea por línea. Si no encuentra el carácter # almacena los datos de cada columna en una de las variables comodín. Este proceso es común en la lectura de ambos ficheros.



A partir de aquí, dado que el fichero “fuente” solo tiene una línea, pasará ya los datos de las variables comodín a las variables asignadas para cada uno.

En el fichero “salas” tendremos  $n$  filas que guardar, siendo  $n$  el número de salas adyacentes a la sala de tratamiento, de modo que introducimos una variable entera  $j$  que nos sirva como contador. Lo siguiente que hace es convertir el texto guardado en las variables comodín en números reales y lo almacena en el array “base” en la fila  $j$  y la columna correspondiente, a excepción de aquel procedente de las columnas asignadas a tipo de sala y material de blindaje. Para estos dos últimos casos el programa, mediante una serie de operadores lógicos, asigna un número u otro en función del dato almacenado siguiendo un código numérico preestablecido y posteriormente los guarda en la columna de “base” que tienen asignada.

Ahora todos los datos de estos dos ficheros de entrada ya están almacenados en variables locales del programa y pueden ser empleados con mayor facilidad.

### 3.3.3. Subalgoritmo “calcula”

Los datos de entrada de esta función son los que ha procesado la función “obtentados” pero añadiendo el vector “espesor”, de tamaño  $n$  (véase la figura 5).

Para cada sala el subalgoritmo asigna el objetivo dosimétrico de diseño de acuerdo con el tipo de sala indicado (controlada, supervisada, o pública). Después calcula el  $S_K$  en función del isótopo utilizado como fuente radiactiva. Por último, teniendo en cuenta el isótopo y el material elegido para cada barrera, “calcula” determina el valor de  $TVL_1$  y  $TVL_e$  de entre los presentados en la tabla 3.

Una vez determinados estos valores comienza a calcular los espesores empleando las ecuaciones de (3) a (7). Primero calcula los tres tipos de tasas de equivalente de dosis, con ellos y los objetivos previamente seleccionados obtiene el factor de atenuación, el cual finalmente emplea para obtener el espesor aplicando la ecuación (7). Por último realiza una comparación de cada espesor obtenido para las distintas tasas de equivalente de dosis calculadas y guarda en el vector “espesor” el mayor.

Repite esto para cada sala adyacente de modo que al final el programa ya tiene almacenados los valores de los espesores necesarios para cada una.

### 3.3.4. Subalgoritmo “creasala”

Las variables que requiere esta función son exactamente las mismas que las solicitadas por “calcula”. Es aquí donde entra en juego el fichero “dimensiones”, que hasta ahora no ha sido empleado. Se procede a leer el fichero y almacenar su contenido en distintas variables locales de manera análoga a la empleada con los otros ficheros. Se crea un *array* de dimensión  $n \times 3$  denominado “posicionsalas”.

Dado que una misma sala puede afectar a varias barreras y que podemos tener más de una sala detrás de cada pared, es importante para el programa disponer de información sobre la posición de cada sala. En función de los datos almacenados en “base”, “creasala” guardará

en “posicionsalas” la posición relativa de cada sala con respecto a la de tratamiento. Por ejemplo, si la sala número 3 se encuentra en el piso de arriba y a la izquierda de la sala de tratamiento (en el eje x del sistema de coordenadas del programa, véase la figura 1), los valores asignados serán:

- Para el eje x ‘l’ (left) por que el programa identificará que estará a la izquierda de la sala en cuestión.
- Para el eje y ‘c’ (center) ya que se encontrará a la misma altura que la sala de tratamiento.
- Para el eje z ‘a’ (above) al estar en la planta de arriba.

Repíte esto para cada sala hasta completar “posicionsalas”.

Más tarde, para cada sala, se comprueba primero si está encima, debajo o en el mismo piso, después si se encuentra delante, detrás o a la misma altura en el eje y y finalmente que posición ocupa en el eje x con respecto a la de tratamiento (izquierda, derecha o centro). A continuación se compara el espesor guardado para esa pared con el calculado para esa sala con el subalgoritmo “calcula” y almacenado en el vector “espesor”, si el guardado es menor se actualiza. Se repite el proceso para cada sala.

Solo resta determinar el laberinto. Para ello se definen los ángulos de incidencia y reflexión para la radiación dispersada directa e indirectamente y las superficies de dispersión vistas en la figura 2. Para este cálculo ya se tienen en cuenta los espesores de los blindajes de cada pared que, obviamente, reducirán las dimensiones de la sala de tratamiento. Mediante cálculos trigonométricos se obtienen los ángulos de incidencia y reflexión. En función del tipo de isótopo y de los ángulos calculados el programa selecciona un valor para los coeficientes de albedo de entre los presentados en las tablas 4 y 5. Para ello escoge el correspondiente al ángulo más parecido al calculado de entre los que aparecen en las tablas.

Con esto el programa ya tiene todos los datos necesarios para calcular las tasas de equivalente de dosis debidas a la dispersión de la radiación. Una vez calculadas, las resta a cada uno de los objetivo de dosis correspondientes a la habitación que, según los datos de “posicionsalas”, hay tras la puerta. Con los valores obtenidos en esta resta calcula los espesores necesarios según cada objetivo dosimétrico de diseño para el laberinto en función del isótopo y del dato del material del laberinto obtenido del fichero “dimensiones”. Como en los cálculos anteriores guarda el espesor más grande.

Finalmente crea el fichero de texto “Resultado” y guarda en él los espesores calculados para cada pared y el espesor y la longitud del laberinto.

### **3.4. Interfaz gráfica**

Con todo lo que hemos visto tenemos ya un programa funcional escrito en lenguaje de programación C que nos calcula, dados unos datos de entrada, los espesores necesarios para una sala de tratamiento. Dichos datos de entrada son obtenidos de ficheros de texto y el

programa sólo entenderá determinados caracteres, por lo que tendremos que saber exactamente qué carácter utilizar para cada dato que queramos introducir. Este hecho dificulta la introducción de datos a un usuario que no haya participado en la escritura del código del programa, ya que será ajeno al código de caracteres empleado por el mismo.

Con el objetivo de facilitar la introducción de datos a cualquier usuario se ha realizado una interfaz gráfica en lenguaje de programación Visual Basic. Se trata de un formulario bastante intuitivo en el que podremos introducir los datos necesarios para el diseño de una sala de tratamiento (véase la figura 6). La ventana, mostrada en dicha figura, dispone de un bloque a la izquierda en el que se introducen sucesivamente las características para cada una de las salas adyacentes, un bloque central para introducir las propiedades de la sala de tratamiento y uno a la derecha para las de la fuente radiactiva.

Cada vez que rellenemos los datos de una sala deberemos darle a guardar sala, momento en el que se actualiza el fichero de texto “salas”. Cuando hayamos introducido todos los datos sobre el recinto blindado y la fuente radiactiva el formulario nos permitirá hacer click sobre el botón procesar. Es entonces cuando se actualizan los ficheros de texto “fuente” y “dimensiones” con los datos del formulario. Se lanza automáticamente el programa de cálculo de blindajes y una vez que este ha terminado de ejecutarse muestra por pantalla el fichero de texto “Resultado” que contiene, como se ha visto en el apartado 3.2, los espesores calculados para los blindajes de cada pared.

SALA CONTIGUA		RECINTO BLINDADO		FUENTE RADIATIVA			
MATERIAL DE BLINDAJE	Homigón	ANCHURA (X) (cm)	600	Isótopo	Ir-192		
TIPO DE SALA	Controlada	LONGITUD (Y) (cm)	520	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	W (muGym <sup>2</sup> /sem)
NÚMERO DE SALA	Supervisada	ALTURA (Z) (cm)	350	400	220	100	300000
FACTOR DE OCUPACIÓN	Pública	ANCHO PASILLO (cm)	200				
PUNTO DE MEDIDA:		MATERIAL LABERINTO	Homigón				
X (cm)	400						
Y (cm)	-30						
Z (cm)	0						
Guardar sala		Procesar					

Figura 6: Formulario mediante el cual se introducen los datos en el programa.

## 4. Caso práctico

En este apartado se exponen los resultados obtenidos al ejecutar el programa para una hipotética sala de tratamiento. La sala en cuestión es la que se muestra en la figura 7, donde aparecen además las dimensiones pertinentes, la posición de la fuente, el tipo de sala en cuanto a la consideración de la dosis objetivo (c=controlada, s=supervisada o p=pública) asignado a cada una de las salas adyacentes y sus factores de ocupación. Tenemos entonces una sala de tratamiento con unas dimensiones (600, 520, 350) y una fuente situada en la posición (400, 220, 0), todos estos datos expresados en centímetros.

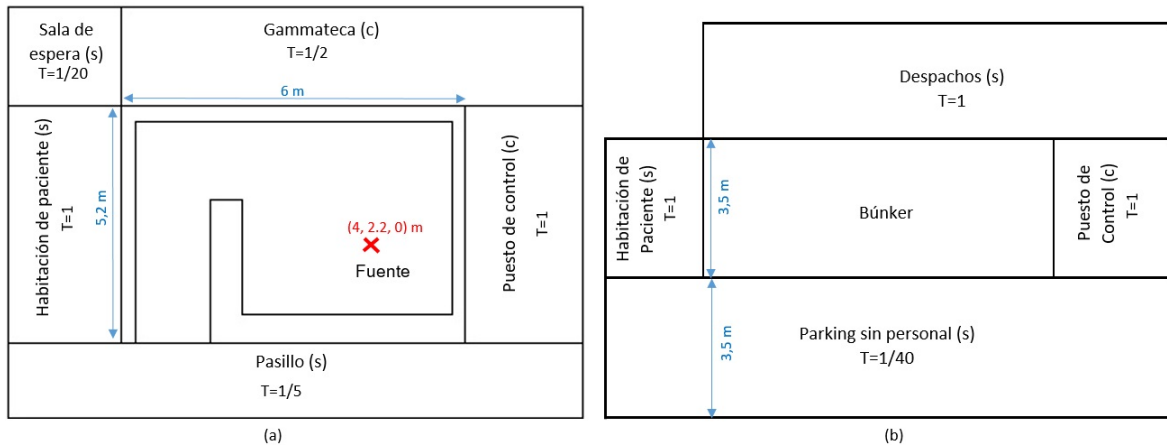


Figura 7: Sala de tratamiento sobre la que se ha realizado el ejemplo de esta sección con sus dimensiones y la posición de la fuente. (a) planta, plano x-y (b) alzado, plano x-z.

Tomamos los siguientes datos:

- Fuente:  $^{192}\text{Ir}$ .
- Actividad: 370 GBq.
- $W = 0,3 \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{sem}}$  (el cálculo de W se ha realizado ya en el apartado 2.4).
- Material de blindaje: Hormigón.
- 4 tratamientos al día de 20 minutos promedio cada uno.

En lo que respecta a las salas que rodean a la de tratamiento se pueden extraer de la figura 7 los datos mostrados en la tabla 7. Con los datos presentados arriba, los de la tabla 7 y las dimensiones que se observan en la figura 7, se generarían los ficheros de entrada que se presentan en la figura 3.

Sala	T	x	y	z	P
Gammateca	0,5	400	550	100	controlada
Puesto de control	1	630	220	100	controlada
Pasillo	0,2	400	-30	100	supervisada
Habitación de paciente	1	-30	220	100	supervisada
Sala de espera	0,05	-24	538	100	supervisada
Despachos	1	400	220	380	supervisada
Parking	0,025	400	220	-250	supervisada

Tabla 7: Datos sobre las habitaciones necesarios para el cálculo de los blindajes.

Con estos datos el programa, mediante las ecuaciones de (3) a (7), calcula todas las tasas de dosis ( $D$ ,  $IDR$  y  $R_8$ ) y los espesores necesarios para cada pared. Los resultados obtenidos, que el programa no muestra, se presentan en la tabla 8 para ejemplificar el cálculo.

Sala	$D \left( \frac{\mu Sv}{sem} \right)$	$e_D (cm)$	$IDR \left( \frac{\mu Sv}{h} \right)$	$e_{IDR} (cm)$	$R_8 \left( \frac{\mu Sv}{h} \right)$	$e_{R_8} (cm)$
Gammateca	$1,4 \cdot 10^4$	33,8	$3,8 \cdot 10^3$	35,7	$6,1 \cdot 10^2$	30,7
P. control	$5,7 \cdot 10^4$	42,4	$7,7 \cdot 10^3$	40,1	$1,3 \cdot 10^3$	35,0
Pasillo	$9,6 \cdot 10^3$	41,4	$6,6 \cdot 10^3$	43,2	$1,1 \cdot 10^3$	50,4
H. paciente	$1,6 \cdot 10^4$	44,5	$2,2 \cdot 10^3$	36,7	$3,6 \cdot 10^2$	43,8
Sala espera	$5,3 \cdot 10^2$	23,9	$1,5 \cdot 10^3$	34,2	$2,4 \cdot 10^2$	41,3
Despachos	$3,8 \cdot 10^4$	49,7	$5,2 \cdot 10^3$	41,9	$8,5 \cdot 10^2$	49,0
Parking	$6,1 \cdot 10^2$	24,7	$3,3 \cdot 10^3$	39,2	$5,4 \cdot 10^2$	46,3
Laberinto	$5,4 \cdot 10^3$	37,7	$3,6 \cdot 10^3$	39,6	$5,8 \cdot 10^2$	46,7

Tabla 8: Tasas de dosis y espesores calculados por el programa para el ejemplo realizado.

Teniendo en cuenta el espesor requerido para cada sala adyacente y sus posiciones relativas a la sala de tratamiento, el programa nos da los espesores finales para los blindajes de cada una de las paredes, techo y suelo de la sala de tratamiento, obtenidos tal y como se explica en el apartado 3.3.4. Dichos espesores son los que se presentan en la tabla 9 y se corresponden con los mostrados en el fichero de salida de la figura 4. Finalmente, el programa calcula las tasas de equivalente de dosis en el punto medio de la puerta debidas a la dispersión de fotones, obtiene el nuevo objetivo dosimétrico teniendo en cuenta esta radiación dispersada y calcula el espesor del laberinto que cumpla este criterio. En la tabla 9 se presenta también el espesor resultante para el laberinto en el eje x. Hay que tener en cuenta que este espesor no es el que se obtiene al realizar estos cálculos, sino que es la proyección del obtenido (dado para la recta que une el centro de la puerta y la fuente) en el eje x. Esta es la razón por la que el valor de la tabla 9 difiere del calculado en el apartado 2.4.

Los mismos cálculos se han realizado tomando blindajes tanto de acero como de plomo, los datos obtenidos se muestran también en la tabla 9.

Material	hormigón	acero	plomo
Espesor izquierda (cm)	44,5	12,6	4,7
Espesor derecha (cm)	42,4	12,0	4,4
Espesor delante (cm)	50,4	14,3	5,5
Espesor detrás (cm)	35,7	10,0	3,5
Espesor techo (cm)	49,7	14,2	5,4
Espesor suelo (cm)	46,3	13,1	5,0
Espesor laberinto (cm)	36,7	10,1	3,8

Tabla 9: Espesores finales para los blindajes para la sala de tratamiento mostrada en la figura 7 calculados por el programa para una fuente de  $^{192}\text{Ir}$ .

Se puede ver claramente que emplear hormigón nos va a dar unos blindajes mucho más anchos que con el acero o con el plomo. De hecho entre el plomo y el hormigón vemos que hay una diferencia de un orden de magnitud; es un factor a tener en cuenta si queremos evitar perder espacio útil dentro de la sala de tratamiento. Sin embargo, el plomo es mucho más caro que los otros dos materiales de blindaje presentados, de modo que habría que llegar a un compromiso espacio-precio.

Puede darse el caso de que tengamos una sala preparada para trabajar con fuentes de  $^{192}\text{Ir}$  y que queramos extender su uso a fuentes de  $^{60}\text{Co}$ , que emite fotones mucho más energéticos (véase la tabla 2), por lo tanto tendríamos que aumentar los espesores de los blindajes. Por ejemplo supongamos que tenemos la sala resultante de colocar los blindajes de la tabla 9 en la sala de la figura 7, para cualquiera de los 3 materiales. Para apreciar la diferencia ejecutamos el programa cambiando el isótopo a  $^{60}\text{Co}$  pero manteniendo la misma carga semanal. Los nuevos espesores obtenidos son los que se muestran en la tabla 10.

Material	hormigón	acero	plomo
Espesor izquierda (cm)	67,7	20,8	12,2
Espesor derecha (cm)	64,4	19,8	11,6
Espesor delante (cm)	71,2	21,9	12,9
Espesor detrás (cm)	51,5	15,8	9,2
Espesor techo (cm)	75,5	23,2	13,7
Espesor suelo (cm)	65,1	20,0	11,7
Espesor laberinto (cm)	43,0	13,6	8,0

Tabla 10: Espesores finales para los blindajes para la sala de tratamiento mostrada en la figura 7 calculados por el programa para una fuente de  $^{60}\text{Co}$ .

Como habíamos adelantado, basta comparar las tablas 9 y 10 para ver que los espesores necesarios para la fuente de  $^{60}\text{Co}$  son mayores que los obtenidos para la de  $^{192}\text{Ir}$ .

Un último caso de interés sería que uno o más de los blindajes de las paredes de la sala fuesen de un material diferente al resto. Supongamos que tenemos todos los blindajes de la sala contruidos en hormigón a excepción del de la pared trasera; esto modificaría los ángulos de dispersión de los fotones quedándonos una tasa de dosis debida a la dispersión diferente de la vista antes. Para ilustrar esta diferencia ejecutamos el programa para la sala de la figura 7 con la fuente de  $^{192}\text{Ir}$  y los blindajes de todas las paredes de hormigón a excepción de la

trasera, la que comparte con la gammateca, que será de plomo. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la tabla 11.

Espesor izquierda (cm)	44,5
Espesor derecha (cm)	42,4
Espesor delante (cm)	50,4
Espesor detrás (cm)	3,5
Espesor techo (cm)	49,7
Espesor suelo (cm)	46,3
Espesor laberinto (cm)	33,4

Tabla 11: Espesores finales para los blindajes para la sala de tratamiento mostrada en la figura 7 calculados por el programa para una fuente de  $^{192}\text{Ir}$  y con el blindaje de la pared trasera de plomo y el resto de hormigón.

Como es lógico los únicos espesores que cambian al comparar la columna del hormigón de la tabla 9 y la tabla 11 son los de la pared trasera y el laberinto. El espesor del blindaje del laberinto se ha reducido tan solo en un 9%, ganando poco más de 3 cm de espacio a expensas de colocar todo el blindaje de una pared de plomo, que será más estrecha (se reduce unos 33 cm), pero mucho más cara.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un estudio previo de todos los conceptos necesarios para el cálculo de blindajes en una sala de braquiterapia HDR. Dicho estudio ha permitido conocer y comprender muchos aspectos importantes sobre la dosimetría y la radioprotección. Se ha establecido también un primer contacto con la normativa legal existente a nivel nacional e internacional para instalaciones de radiaciones ionizantes. Por último este trabajo ha servido para desarrollar y pulir las habilidades existentes en programación en lenguaje C así como para iniciar las referidas al lenguaje de programación Visual Basic.

Además de todos los conocimientos y destrezas adquiridos como resultado de este trabajo hemos conseguido desarrollar una aplicación que permite, a partir de ciertos parámetros sencillos de obtener, calcular de manera fácil e intuitiva los blindajes necesarios para salas de braquiterapia HDR con forma de paralelepípedo rectangular. Esta aplicación puede ser aprovechada más allá de este trabajo, ya sea como herramienta docente, como primera aproximación para un cálculo dosimétrico más complejo o como base para la realización de un posible trabajo de fin de máster.

La aplicación desarrollada es funcional y nos permite calcular blindajes tanto para salas de braquiterapia muy básicas (como el realizado en el apartado 4) como para otras más complicadas en las que tengamos distribuciones de salas más complejas o diferentes materiales de blindaje en cada pared. Sin embargo, el programa tiene un amplio rango de mejora. Estas posibles mejoras abarcan desde aspectos básicos (formularios que nos permitan una introducción más rápida y eficiente de los datos requeridos por el programa, poder seleccionar la legislación u objetivos dosimétricos de diseño que se quiera, calcular los costes de los blindajes en función de los precios de los distintos materiales, etc.) hasta aspectos que requieren un análisis más profundo de la geometría y un nivel más avanzado de programación (ser capaces de dejar al usuario la elección del origen de coordenadas del sistema, poder introducir un plano con los datos deseados y que el programa sea capaz de obtenerlos por sí, adaptar el programa a otras geometrías más complejas, etc.).



## Referencias

- [1] FAIZ M. KHAN, JOHN P. GIBBONS, *Khan's, The Physics of Radiation Therapy*, edition 5, Walters Kluwer Health (2014).
- [2] *Real Decreto 783/2001*, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE nº 178 de 26-07-2001.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*, Safety report series No 47, IAEA, Viena (2006).
- [4] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage x- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*, NCRP report No 151, NCRP (2005).
- [5] NATH R., ANDERSON L., LUXTON G., WEAVER K., WILLIAMSON J. y MEIGOONI A., *Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43*. Med. Phys. 1995;22:209-34.
- [6] JOSÉ PEREZ-CALATAYUD, EVA CORREDOIRA SILVA, VICENTE CRISPÍN CONTRERAS, TERESA EUDALDO PUELL, JESÚS DE FRUTOS BARAJA, FRANCISCO PINO SORROCHE, MARI CARMEN PUJADES CLAUMARCHIRANT y JOSÉ RICHART SANCHO, *Protección radiológica en Braquiterapia. Informe del grupo de trabajo de Braquiterapia de la SEFM*, Rev. Fis. Med. (2015), 16(2): 11-47.
- [7] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, *Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities*, NCRP report No 144, NCRP (2003).