



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

**MODELADO CON EL CÓDIGO MONTE
CARLO DE UNA SALA DE RADIOGRAFÍA
INDUSTRIAL BLINDADA CON YESO
BARITADO PARA EL ESTUDIO DE LA DOSIS
TRIDIMENSIONAL**

AUTORA: SUÁREZ HERNÁNDEZ, JULIANA ANDREA

TUTOR: MIRÓ HERRERO, RAFAEL

COTUTORA: JUSTE VIDAL, BELEN JEANINE

Curso Académico: 2018-19

AGRADECIMIENTOS

“En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Rafael Miró Herrero y al departamento de INGENIERÍA QUÍMICA Y NUCLEAR por permitirme realizar el Trabajo de Fin de Grado con ellos.

En segundo lugar, quiero expresar mi gratitud a Belén Juste Vidal por toda la ayuda que me ha brindado, sus consejos y el tiempo que me ha dedicado para realizar este proyecto.

Por último, quiero dar las gracias a quienes son lo más importante para mí, mi familia y mi pareja, en especial a mis padres, mi abuela y mis padrinos. Gracias a su apoyo, infinita paciencia y a los valores que me han enseñado, voy poco a poco alcanzando mis metas. Son mi mayor ejemplo a seguir”.

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes en radiografía industrial es el diseño del blindaje de las instalaciones, el cual tiene como objetivo reducir el nivel de radiación al que se ven sometidos trabajadores y público general a niveles tolerables, según la legislación vigente.

En el diseño del blindaje se debe tener en cuenta los materiales que se utilizan para proteger las zonas de interés de la instalación (paredes interiores, puertas, ventanas y pisos). En general, los materiales más usados son láminas de plomo, hormigón armado, yeso y materiales cerámicos.

En esta y como en todas las áreas, el objetivo es mejorar en la efectividad de la protección, facilitar los procesos de instalación y reducir el coste económico y medioambiental. Es por ello por lo que el yeso baritado se está convirtiendo en un buen sustituto para las láminas de plomo.

Este material debido a sus características proporciona niveles similares de protección con respecto al proporcionado con las láminas de plomo. Es fácil de manipular e instalar, es más económico que el plomo y, a diferencia de este último, no es tóxico, siendo biodegradable y por lo tanto reciclable.

Este trabajo tiene como principal objetivo comprobar que el nivel de protección es equiparable al que se esperaría cuando se utilizan láminas de plomo. Por ello se llevará a cabo un estudio de dosis mediante el código Monte Carlo del blindaje de la sala de radiografía industrial de la dependencia del Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) de la Universitat Politècnica de València (UPV), la cual se encuentra blindada con dicho material. Estos resultados se compararán con los valores de dosis equivalente para radiación directa, dispersa y de fuga de esta dependencia en el caso de utilizar un blindaje de plomo, valores calculados y disponibles en la Documentación para la ampliación de la dependencia del Instituto De Seguridad Industrial, Radiofísica Y Medioambiental (ISIRYM), memoria realizada por este instituto con el objetivo de obtener el permiso para la implantación de un equipo de Rayos X para investigación y docencia en la dependencia del ISIRYM, dentro de la instalación Radiactiva Única de la Universidad Politécnica de Valencia, adscrita al Servicio de Radiaciones.

Palabras clave: Blindajes; Código Monte Carlo; Placo® X-Ray Protection; Estudio de dosis; *SpaceClaim*; Radiografía industrial; MCNP6

RESUM

Un dels aspectes més importants en radiografia industrial és el disseny del blindatge de les instal·lacions, el qual té com a objectiu reduir el nivell de radiació al qual es veuen sotmesos treballadors i públic general a nivells tolerables, segons la legislació vigent. En el disseny del blindatge s'ha de tindre en compte els materials que s'utilitzen per a protegir les zones d'interès de la instal·lació (parets interiors, portes, finestres i pisos). En general, els materials més usats són làmines de plom, formigó armat, algeps i materials ceràmics.

En aquesta i com en totes les àrees, l'objectiu és millorar en l'efectivitat de la protecció, facilitar els processos d'instal·lació i reduir el cost econòmic i mediambiental. És per això pel que l'algep baritat s'està convertint en un bon substitut per a les làmines de plom. Aquest material degut a les seues característiques proporciona nivells semblants de protecció respecte al proporcionat amb les làmines de plom. És fàcil de manipular i instal·lar, és més econòmic que el plom i, a diferència d'aquest últim, no és tòxic, sent biodegradable i per tant reciclable.

Aquest treball té com a principal objectiu comprovar que el nivell de protecció és equiparable al què s'esperaria quan s'utilitzen làmines de plom. Per això es durà a terme un estudi de dosi per mitjà del codi Mont Carlo del blindatge de la sala de radiografia industrial de la dependència de l'Institut de Seguretat Industrial, Radiofísica i Mediambiental (ISIRIM) de la UPV, la qual es troba blindada amb el dit material. Aquests resultats es compararan amb els valors de dosi equivalent per a radiació directa, dispersa i de fuga d'aquesta dependència en el cas d'utilitzar un blindatge de plom. Els valors es troben calculats i disponibles en la documentació per a l'ampliació de la dependència de l'Institut De Seguretat Industrial, Radiofísica I Mediambiental (ISIRIM), memòria realitzada per aquest institut amb l'objectiu d'obtenir el permís per a la implantació d'un equip de Rajos X per a investigació i docència en la dependència de l'ISIRIM, dins de la instal·lació Radioactiva Única de la Universitat Politècnica de València, adscrita al Servei de Radiacions.

Paraules clau: Blindatges; Codi Monte Carlo; Placo® X-Ray Protection; Estudi de dosi; *SpaceClaim*; Radiografia industrial; MCNP6

ABSTRACT

One of the most important aspects in industrial radiography is the design of the armouring of facilities, which aims to reduce the level of radiation to which workers and the public are submit to tolerable levels according to current legislation.

In the design of the shield, we must consider the materials that are used to protect the areas of interest of the installation (interior walls, doors, windows and floors). In general, the most commonly used materials are lead sheets, concrete, plaster and ceramic materials.

In this and as in all areas, the objective is to improve the effectiveness of protection, facilitate installation processes and reduce the economic and environmental cost. That is why the barite plaster is becoming a good substitute for lead sheets.

This material, due to its characteristics, provides similar levels of protection with respect to lead sheets. It is easy to handle and install, it is cheaper than lead and, unlike the latter, it is not toxic, being biodegradable and therefore recyclable.

The main objective of this dissertation is to verify that the level of protection is comparable to what would be expected when using lead sheets. For this reason, a dose study will be carried out using the Monte Carlo code for the shielding of the industrial radiography room of the Industrial, Radiophysical and Environmental Safety Institute (ISIRYM) of the UPV, which is shielded with said material. These results will be compared with the values of equivalent dose for direct, dispersed and leakage radiation of this dependence in the case of using a lead shield. These values are calculated and available in the documentation for the extension of the dependence of the ISIRYM, memory made by this institute with the objective of obtaining permission for the implementation of an X-Ray equipment for research and teaching in the ISIRYM unit, within the Sole Radiactiva installation of the UPV, attached to the Radiation Service.

Keywords: Shields; Monte Carlo Code; *Placo® X-Ray Protection*; Study of doses; *SpaceClaim*; Industrial radiography; MCNP6

ÍNDICE GENERAL

I. MEMORIA.

II. PRESUPUESTO ECONÓMICO.

III. ANEXOS.

INDICE DE FIGURAS DE LA MEMORIA

<i>Figura 1. Esquema del tubo de Rayos X (Baños 1997).</i>	4
<i>Figura 2. Tipos de equipos de Rayos X convencionales (SEPR 2015).</i>	5
<i>Figura 3. Componentes de un equipo generador de Rayos X (SEPR, 2015).</i>	6
<i>Figura 4. Esquema de la radiación de frenado (Baños, 1997).</i>	7
<i>Figura 5. Parte del espectro producido por la radiación de frenado (Baños, 1997).</i>	7
<i>Figura 6. Esquema de la radiación característica (Baños, 1997).</i>	8
<i>Figura 7. Parte del espectro producido por la radiación característica (Baños, 1997).</i>	8
<i>Figura 8. Equipo de control de proceso para medida de llenado (CSN, 2015).</i>	9
<i>Figura 9. Radiografía de una soldadura con porosidad (SEPR, 2015).</i>	9
<i>Figura 10. Cabina de radiografía fija (SEPR, 2015).</i>	10
<i>Figura 11. Colisión elástica (CSN 2012).</i>	15
<i>Figura 12. Colisión inelástica (CSN, 2012).</i>	15
<i>Figura 13. Colisión radiativa (CSN, 2012).</i>	16
<i>Figura 14. Efecto fotoeléctrico (CSN 2012a).</i>	16
<i>Figura 15. Efecto Compton (CSN, 2012a).</i>	17
<i>Figura 16. Creación de pares (CSN, 2012a).</i>	17
<i>Figura 17. Límites del Reglamento de Protección Sanitaria con las Radiaciones ionizantes CSN.</i>	19
<i>Figura 18. Clasificación y señalización de zonas. CSN.</i>	20
<i>Figura 19. Clasificación de zonas del lugar de estudio (elaboración propia).</i>	20
<i>Figura 20. Placo® X-Ray Protection (Placo Saint-Gobain, 2018).</i>	23
<i>Figura 21. Proceso instalación Placo® X-Ray Protection (Placo Saint-Gobain, 2018).</i>	24
<i>Figura 22. Dependencias de la Instalación Radiactiva y localización de la dependencia a estudiar (verde)...</i>	25
<i>Figura 23. Equipo generador de Rayos X (elaboración propia).</i>	26
<i>Figura 24. Plano de la instalación (ISIRYM).</i>	26
<i>Figura 25. Sala de ensayos (elaboración propia).</i>	27
<i>Figura 26. Procedimiento del diseño de la sala de ensayos (elaboración propia).</i>	34
<i>Figura 27. Puerta de la sala de ensayos.</i>	34
<i>Figura 28. Blindaje con Placo® X-Ray Protection en la sala de ensayos.</i>	35
<i>Figura 29. Modelización del blindaje de la sala de ensayos Placo® X-Ray Protection.</i>	35
<i>Figura 30. Sala de ensayos en 3D.</i>	35
<i>Figura 31. Procedimiento de mallado en ABAQUS/CAE.</i>	36
<i>Figura 32. Opciones de mallado.</i>	36
<i>Figura 33. Generación del mallado.</i>	37
<i>Figura 34. Definición del material y densidades.</i>	37

<i>Figura 35. Definición de los Elsets: Material y Estadística.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 36. Generación del assembly.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 37. Fragmentos del archivo .inp.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 38. Archivo inicial MCNP6.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 39. Archivo MCNP6. Zona de implementación de celdas.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 40. Archivo MCNP6. Zona de definición de superficies.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 41. Archivo MCNP6. Zona de datos. Introducción de la malla.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 42. Archivo MCNP6. Materiales.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 43. Interfaz de usuario SPEKTR 3.0.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 44. Espectro de fuente de Rayos X normalizado.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 45. Representación de la posición de la fuente.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 46. Representación de las direcciones desfavorables del haz.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 47. Representación de la geometría del haz.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 48. Archivo MCNP6. Definición de la fuente de Rayos X.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 49. Archivo MCNP6. Tarjeta de registro FMESH.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 50 Archivo MCNP6. Tarjetas de conversión flujo a dosis DE/DF.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 51 Archivo MCNP6. Conversión flujo-dosis en aire fotones.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 52 Archivo MCNP. Modelado del transporte.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 53. Programa FMESH2VTK.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 54. Sala de ensayos 3D. PARAVIEW.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 55. Geometría creada con Abaqus (izquierda) y volumen definido en MCNP6 con FMESH (derecha). 53</i>	
<i>Figura 56. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). ABAJO.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 57. Especificaciones del tubo ficha técnica.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 58. Características del espectro del tubo de Rayos X.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 59. Espectro normalizado de la fuente de Rayos X.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 60. Archivo MCNP6. Obtención de la tasa de dosis a un metro de distancia en un mm³ por partícula emitida.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 61. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). ABAJO.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 62. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). DERECHA.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 63. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). DERECHA.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 64. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). IZQUIERDA....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 65. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). IZQUIERDA.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 66. Equivalencias Placo y plomo («FICHA DE PRODUCTO PLACA XRoc»)......</i>	<i>60</i>
<i>Figura 67. Espesores de semirreducción para el plomo y el hormigón («Half-Value Layer» 2004).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 68. Barium Sulfate & Gypsum (McConn Jr et al., 2011)......</i>	<i>80</i>

INDICE DE TABLAS DE LA MEMORIA

<i>Tabla 1 Características generador de Rayos X (Spellman High Voltage Electronics, 2018).</i>	6
<i>Tabla 2 Factores de ocupación.</i>	21
<i>Tabla 3. Características Placo® X-Ray Protection (Placo Saint-Gobain, 2018).</i>	23
<i>Tabla 4. Materiales de la sala de ensayos (elaboración propia).</i>	27
<i>Tabla 5. Valores de dosis equivalente H.</i>	33
<i>Tabla 6. Materiales en Abaqus.</i>	37
<i>Tabla 7. Identificación de materiales.</i>	43
<i>Tabla 8. Composición de materiales.</i>	44
<i>Tabla 9. Descripción de tallies.</i>	47
<i>Tabla 10. Datos de ejecución haz hacia abajo.</i>	57
<i>Tabla 11. Datos de ejecución haz hacia la derecha.</i>	58
<i>Tabla 12. Datos de ejecución haz hacia la izquierda.</i>	60
<i>Tabla 13. Factores de ocupación de las salas adyacentes a las salas de ensayos.</i>	61
<i>Tabla 14. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia abajo.</i>	62
<i>Tabla 15. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia la derecha.</i>	63
<i>Tabla 16. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia la izquierda.</i>	63
<i>Tabla 17. Dosis equivalente H radiación directa.</i>	64
<i>Tabla 18. Dosis equivalente H radiación secundaria.</i>	64
<i>Tabla 19. Duración en horas de cada tarea realizada.</i>	72
<i>Tabla 20. Coste del personal.</i>	72
<i>Tabla 21. Costes de hardware.</i>	73
<i>Tabla 22. Especificaciones del equipo.</i>	73
<i>Tabla 23. Coste de software.</i>	73
<i>Tabla 24. Presupuesto total.</i>	75
<i>Tabla 25. Identificación de compuestos.</i>	80
<i>Tabla 26. Composición Placo® X-Ray Protection.</i>	80
<i>Tabla 27. Distribución de probabilidades del espectro tubo de Rayos X.</i>	81
<i>Tabla 28. Factores de conversión para el aire.</i>	82

I. MEMORIA

INDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
1.2.	MOTIVACIÓN.....	1
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4.	NORMATIVA.....	2
1.4.1.	Legislación aplicable.....	2
1.4.2.	Guías de aplicación.....	3
2.	RAYOS X EN LA INDUSTRIA.....	4
2.1.	FUNDAMENTO DEL TUBO DE RAYOS X.....	4
2.1.1.	Espectro de emisión de Rayos X.....	6
2.2.	APLICACIONES DE LOS RAYOS X EN LA INDUSTRIA.....	9
3.	MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS.....	11
3.1.	MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS.....	11
3.2.	COEFICIENTES DE INTERACCIÓN.....	12
3.3.	MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS.....	13
4.	INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE CON LA MATERIA.....	15
4.1.	INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON LA MATERIA.....	15
4.2.	INTERACCIÓN DE FOTONES CON LA MATERIA.....	16
5.	EL BLINDAJE EN LAS INSTALACIONES DE RAYOS X.....	18
5.1.	NORMATIVA DEL DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE RAYOS X.....	18
5.2.	MATERIALES TRADICIONALES USADOS EN EL BLINDAJE.....	21
5.3.	PLACO® X-RAY PROTECTION COMO ALTERNATIVA.....	22
6.	MATERIALES.....	25
6.1.	EQUIPO GENERADOR DE RAYOS X.....	25
6.2.	SALA DE ENSAYOS DE LA INSTALACIÓN RADIATIVA.....	26
6.3.	MODELADO Y MALLADO.....	27
6.3.1.	<i>SpaceClaim</i>	27
6.3.2.	<i>Abaqus</i>	28
6.3.3.	Unstructured Mesh Pre Operations (UM_PRE_OP).....	28
6.4.	EL MÉTODO MONTE CARLO.....	28

6.4.1.	MCNP.....	30
6.5.	CREACIÓN DE LOS MATERIALES PARA MCNP6.	30
6.6.	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS. CREACIÓN DEL ARCHIVO “.VTK”.....	31
6.6.1.	Unstructured Mesh Post Operations (UM_POST_OP).....	31
6.6.2.	FMESH2VTK.....	32
6.7.	PARAVIEW.....	32
6.8.	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	32
7.	MÉTODOS.....	34
7.1.	DISEÑO DE LAS INSTALACIONES.....	34
7.1.1.	<i>SpaceClaim</i>	34
7.1.2.	<i>Abaqus</i>	36
7.1.3.	Unstructured mesh pre-operations (UM_PRE_OP).....	39
7.2.	MCNP6.....	40
7.2.1.	Zona de implementación de celdas.	40
7.2.2.	Zona de definición de superficies.....	41
7.2.3.	Zona de datos.....	42
7.3.	EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.	51
7.4.	OUTPUTS.....	51
7.5.	CONVERSIÓN DE LOS RESULTADOS.	52
7.5.1.	Programa FMESH2VTK.....	52
7.5.2.	Programa UM_POST_OP.....	52
8.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	53
8.1.	PARAVIEW.....	53
8.1.1.	Haz primario que incide sobre el suelo de la sala de ensayos.....	54
8.1.2.	Haz primario que incide sobre la pared derecha de la sala de ensayos.....	57
8.1.3.	Haz primario que incide sobre la pared izquierda de la sala de ensayos.....	58
8.2.	VALIDACIÓN.....	60
9.	CONCLUSIONES.....	65
10.	LÍNEAS FUTURAS.....	66
	REFERENCIAS.....	67

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

La radiografía industrial, al igual que otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la industria, ha contribuido a mejorar de manera considerable la competitividad de las industrias ya que mediante inspección radiográfica se puede llevar a cabo un control de calidad no destructivo, lo cual ahorra tiempo y dinero. La inspección radiográfica desempeña un papel fundamental en la producción y el mantenimiento de materiales y estructuras, sin dañarlos ni dejar residuos radiactivos (Plonsky 2015).

Las instalaciones donde se llevan a cabo este tipo de procesos deben cumplir con unos requisitos de seguridad establecidos por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Para cumplir con esta normativa por lo general se recurre a las planchas de plomo como técnica de blindaje.

En la Universitat Politècnica de València (UPV), la instalación radiactiva del ISIRYM ha introducido como novedad en el diseño del blindaje de una de sus dependencias, la cual se encuentra pendiente en la concesión de la licencia, la utilización de placas de yeso baritado (*Placo® X-Ray Protection* de la marca *Placo Saint-Gobain*) como sustituto a las tradicionales planchas o láminas de plomo.

Este trabajo tiene como objetivo principal verificar que se cumplen los requisitos de seguridad establecidos con la introducción de este nuevo material. Por otro lado, también se pretende mostrar los beneficios de utilizar el material *Placo® X-Ray Protection* como alternativa al blindaje con plomo.

Para llevar a cabo la verificación de estos requisitos de seguridad será necesario realizar una serie de tareas o subobjetivos que nos permitan llevar a cabo la simulación de la interacción de las partículas con el medio y por tanto el estudio de dosis. En primer lugar, a partir del plano proporcionado por el ISIRYM se realizará el diseño en 3D de la sala mediante el programa *SpaceClaim*. En segundo lugar, se hará el mallado de la misma con *Abaqus*. Posteriormente, se procederá la simulación de la distribución de las partículas mediante MCNP6 en situaciones desfavorables para obtener el estudio de dosis en la sala de ensayos y zonas adyacentes. Finalmente, se visualizarán los resultados con PARAVIEW y comprobaremos que en los casos más desfavorables se cumplen los límites de dosis y se cumple con la normativa de seguridad establecida por el CSN.

1.2. MOTIVACIÓN.

La motivación principal para realizar el trabajo de final de grado en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear se debe a que muchas líneas de investigación en este departamento están relacionadas con la física médica. Aunque este trabajo no toca directamente la física médica, el proceso que se va a seguir se puede aplicar al estudio de dosis en bunkers de radioterapia. Para mí resulta gratificante aprender los aspectos básicos que se siguen a la hora de realizar simulaciones y estudios de dosis, para así poder hacer uso de ellos en otras ocasiones en el área médica.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

La utilización de fuentes radiactivas o generadores de radiaciones ionizantes exige el establecimiento de medidas preventivas para la protección de los trabajadores expuestos y de la población en su conjunto con el objetivo de prevenir la probabilidad de aparición de efectos biológicos deterministas y estocásticos como consecuencia de las actividades que impliquen riesgo de exposición a radiaciones ionizantes (International Atomic Energy Agency 1999).

Las medidas de protección radiológica involucran entre otras acciones la realización de una obra civil adecuada, recurriendo por lo general a la utilización de muros de hormigón, hormigón con láminas de plomo y otras barreras físicas que atenúen las radiaciones ionizantes. También accesorios personales y barreras móviles. Tradicionalmente recubrimientos y delantales para protección contra las radiaciones han sido fabricados con hojas de plomo (Pb) u hojas de polímeros cargados con partículas de plomo (McCaffrey et al., 2007). Debido a la toxicidad del plomo, su alto coste y los problemas que supone su disposición se está llevando a cabo el desarrollo de materiales atenuadores sin plomo, procesos que incorporen polvos metálicos u otros compuestos atenuadores dentro de hojas de materiales poliméricos en la cantidad suficiente para lograr una atenuación efectiva, pero a la vez suficientemente robusta para evitar que estos materiales se rompan, fisuren o sufran otras formas de deterioro (Mayorga, Plazas Jiménez y Cruz Salazar, 2016).

Compuestos como el sulfato de bario se comportan como atenuadores viables y en algunos rangos de energía son más eficientes que el plomo. Por otro lado, proporcionan otras ventajas, las cuales se comentarán en un apartado posterior, entre las cuales destaca la biodegradabilidad (Mayorga, Plazas Jiménez y Cruz Salazar, 2016).

Por tanto, con este trabajo se pretende mostrar las ventajas que tiene el usar materiales alternativos al plomo en el blindaje de instalaciones radioactivas mediante el estudio de dosis con el método Monte Carlo, el cual es mucho más preciso en los cálculos de dosis que los algoritmos deterministas que están basados en aproximaciones analíticas de la solución de la ecuación de transporte y no consideran correctamente el transporte lateral de electrones en las zonas en las que hay cambios significativos de densidad de los materiales. Además, debido al desarrollo y mejora de la velocidad y memoria de los procesadores, el tiempo de cálculo, que hasta ahora había sido un punto en contra con respecto a los otros métodos, ha disminuido y hace posible su utilización en proyectos en los cuales el tiempo es un factor importante a tener en cuenta.

1.4. NORMATIVA.

1.4.1. Legislación aplicable.

- Ley 25/1964, del 29 de abril sobre la Energía Nuclear (B.O.E 04/05/64).
- Ley 15/1980, de 22 abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (B.O.E. 25/04/80).
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (BOE 31/12/1999).

- Real Decreto 35/2008, de 18 de enero, por el que se modifica el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas, aprobado por Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre (BOE 18/02/2008).
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (BOE 26/07/2001).

1.4.2. Guías de aplicación.

- Guía 5.10 del CSN: “Documentación técnica para solicitar autorización de instalaciones de Rayos X con fines industriales”.
- Guía 5.8 del CSN: “Bases para elaborar la información relativa a la explotación de instalaciones radiactivas”.
- Guía 7.4 del CSN: “Bases para la vigilancia médica de los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes”.

2. RAYOS X EN LA INDUSTRIA.

2.1. FUNDAMENTO DEL TUBO DE RAYOS X.

El tubo de Rayos X es un dispositivo de vidrio o cerámica, en el cual se ha hecho el vacío, que transforma energía eléctrica en Rayos X y calor. Consta de dos elementos básicos: cátodo o filamento y ánodo. En él la corriente eléctrica fluye desde el cátodo al ánodo y la radiación ionizante se obtiene mediante la aceleración y colisión de electrones producidos en el filamento del cátodo contra los átomos del ánodo. En función del tipo de aplicación, el tubo de Rayos X dispone de unas u otras característica, pero en todos, el principio de funcionamiento es el mismo (Wettlaufer, 2014).

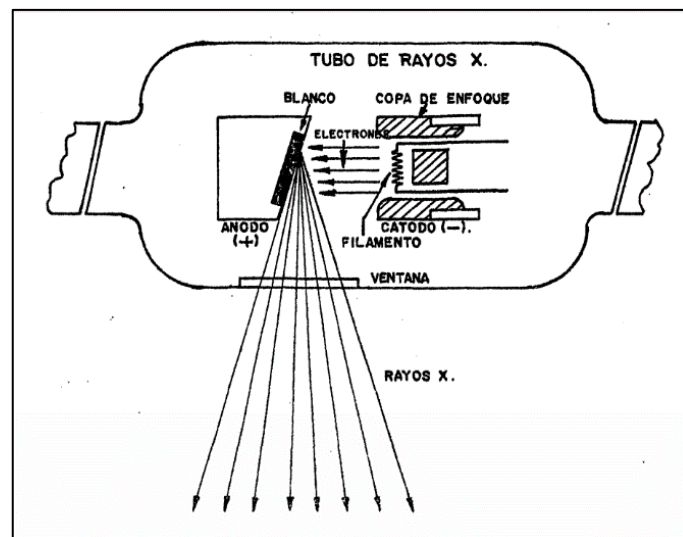


Figura 1. Esquema del tubo de Rayos X (Baños 1997).

Cátodo

El cátodo del tubo de Rayos X tiene como función la emisión de un haz de electrones bien definido hacia el ánodo. Consiste en una bobina de alambre (o filamento) empotrada dentro de una región en forma de copa.

El **filamento** es calentado por medio de la corriente eléctrica y los electrones de las últimas capas de los átomos de dicho material escapan de éste por medio del efecto de emisión termoiónica al espacio circundante. Cuanto mayor incandescencia se produzca en el cátodo o filamento del tubo, mayor será el número de electrones que saltarán por emisión termoiónica y mayor será el número de electrones dispuestos a ser acelerados. Este mecanismo se regula con el miliamperaje del aparato (Baños 1997).

La **copa de enfoque** tiene una potente carga negativa que supera a la repulsión que se establece entre los electrones, de forma que condensa el haz de electrones en un área pequeña de ánodo conocida como blanco o punto focal.

Por lo general, el material usado para el cátodo es el wolframio. Este material suele ser elegido por sus buenas propiedades desde el punto de vista de emisión termoiónica y por su punto de fusión elevado, cualidades que alargan la vida útil del tubo.

Ánodo

El ánodo es el componente en el que se producen los Rayos X y se disipa el calor. Es una pieza relativamente grande de metal que se conecta al lado positivo del circuito eléctrico. Usualmente es un bloque de cobre con su extremo cortado en bisel a 70° respecto al eje del tubo. Sobre este ánodo o anticátodo se encuentra una lámina de tungsteno que constituye el **blanco** (Baños, 1997).

La mayoría de los tubos de Rayos X usan tungsteno, que tiene un número atómico de 74, como material del ánodo. Además de un alto número atómico, el tungsteno tiene muchas otras características que lo hacen adecuado para este propósito. El tungsteno es casi único en su capacidad para mantener su resistencia a altas temperaturas, y tiene un alto punto de fusión y una tasa de evaporación relativamente baja. También se utilizan ánodos de otros materiales como por ejemplo el molibdeno.

El haz de electrones generado en el cátodo es acelerado mediante una fuente de alto voltaje hacia el ánodo. Al colisionar contra el **blanco o punto focal** del ánodo, los electrones ceden su energía cinética al material, resultando en la emisión de Rayos X debido a la producción de radiación de frenado (también llamada *Bremsstrahlung*).

Por lo general cuando hablamos de radiografía industrial, existen dos tipos de aparatos generadores convencionales de Rayos X: **direccionales y panorámicos**. Esta clasificación atiende a la geometría del haz (SEPR 2015).

Los de **tipo direccional** son aquellos en donde el haz de Rayos X sale del equipo por un único punto. El haz de radiación es cónico.

En los **panorámicos**, el haz de radiación se genera en círculo mediante el uso de un anticátodo de forma cónica. Se utilizan para la realización de radiografías panorámicas (soldaduras circunferenciales en tuberías, virolas de recipientes a presión, ...)



Figura 2. Tipos de equipos de Rayos X convencionales (SEPR 2015).

La aplicación de la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo se realiza por medio de un transformador de alta tensión (en orden de los kilovoltios). A su vez, la producción de electrones se realiza mediante un transformador de baja tensión aplicado al cátodo (en orden de los voltios).

Estos aparatos constan de un sistema de refrigeración que permite la disipación del calor producido en la generación de los Rayos X. Finalmente, el tubo de Rayos X posee una ventana la cual es transparente a este tipo de radiación elaborada en berilio, aluminio o mica (SEPR, 2015).

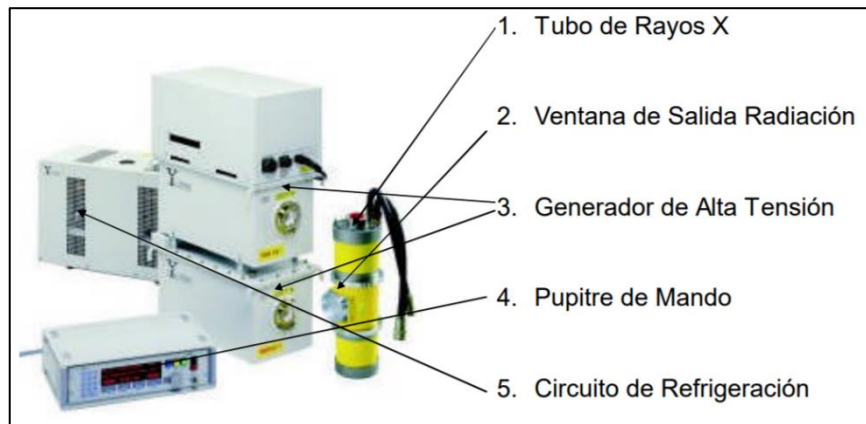


Figura 3. Componentes de un equipo generador de Rayos X (SEPR, 2015).

Con respecto a este proyecto, las características del equipo generador de Rayos X instalado en el laboratorio del ISIRYM, las cuales se han tenido en cuenta para realizar las simulaciones, son las siguientes:

Generador	Tubo
Generador Nº 1: X Monofásico con rectificación de alta frecuencia	Tubo: Integrado. Equipo monoblock
Marca: Spellman	Filtración: Ventana de Berilio, 0.2 mm de Aluminio.
Modelo: XRB160P&N192X3801	Geometría del haz: 80º x 30º
Tensión máxima: 160 kV	Dirección: Vertical hacia abajo.
Intensidad máxima: 1.2 mA	Tasa de fuga: < 5 µSv/h a 5 cm.
Fecha de fabricación: enero 2012	Sistema de imagen: XXX
Número de tubos que alimenta: 1	
Potencia: 200 W	
Rendimiento del equipo: 60 mSv·m ² / mA·min (160 kV)	

Tabla 1 Características generador de Rayos X (Spellman High Voltage Electronics, 2018).

2.1.1. Espectro de emisión de Rayos X.

El espectro de emisión de Rayos X es el número de fotones de Rayos X emitidos en función de la energía de dichos fotones.

Los Rayos X pueden originarse a través de dos mecanismos que se producen de forma simultánea: **la radiación de frenado y la radiación característica.**

Radiación de frenado

En este mecanismo de interacción, el electrón liberado por emisión termoiónica se ve atraído electrostáticamente por el conjunto de las cargas positivas del núcleo atómico del blanco, con lo cual disminuye su energía cinética y por tanto la velocidad (Baños 1997).

Esta energía perdida, se puede emitir en forma de un fotón de Rayos X. La cantidad de energía cedida por el electrón depende entre otras cosas de su energía cinética inicial, de la proximidad de su trayectoria a los núcleos de los átomos del ánodo y del número de veces que sufra interacciones con pérdida de energía. Así, puede darse una fuerte atracción que resulte en una radiación de frenado completo, con lo que el 100 % de su energía cinética daría lugar a radiación X. También puede suceder que el electrón siga su camino sin sufrir ningún tipo de modificación en su trayectoria, lo cual no provocaría emisión alguna de radiación X. Debido a esto, el fotón emitido puede tener una energía muy variable.

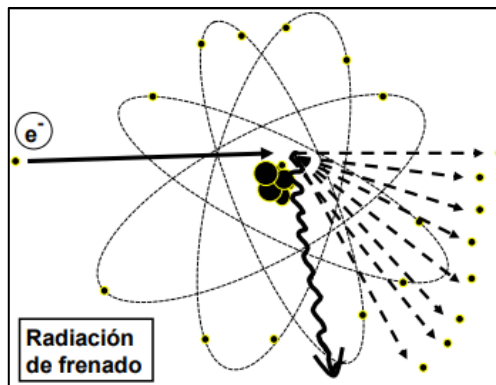


Figura 4. Esquema de la radiación de frenado (Baños, 1997).

Cuando se produce un haz continuo de electrones, la colisión de estos contra el blanco del ánodo da lugar a un haz de fotones muy con valores de energía muy heterogéneos.

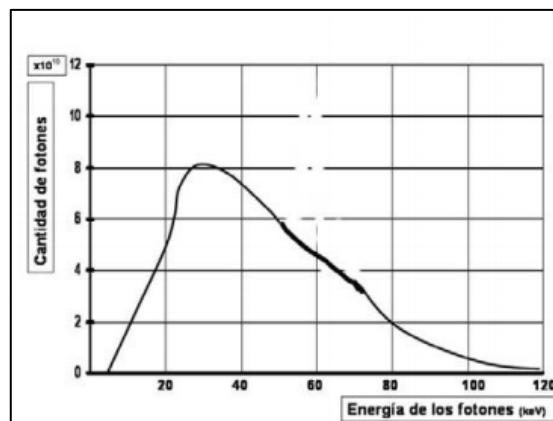


Figura 5. Parte del espectro producido por la radiación de frenado (Baños, 1997).

Esto da lugar a un espectro continuo de energías en el que observamos el número de fotones que se producen por radiación de frenado, y la energía que poseen. La energía de los fotones de frenado tiene valores comprendidos entre cero, y la energía cinética máxima que transporta el electrón al producirse la colisión.

El kV seleccionado en el aparato da la energía máxima con la que se aceleran los electrones. Una diferencia de potencial de 100 kV nos da una energía de los electrones de 100 keV con lo cual obtendremos fotones de frenado con energías comprendidas entre 0 y 100 keV.

La radiación de frenado supone entre el 70 - 85 % de la totalidad de radiación ionizante producida.

Radiación característica

En esta interacción, la energía cinética de un electrón es tan elevada que puede ionizar o excitar a los electrones corticales de los átomos del blanco del ánodo. Se produce un hueco en una órbita interna, el cual tiende a ser ocupado espontáneamente por otro electrón de una órbita cercana, emitiéndose la diferencia de energía existente como radiación electromagnética (fotón).

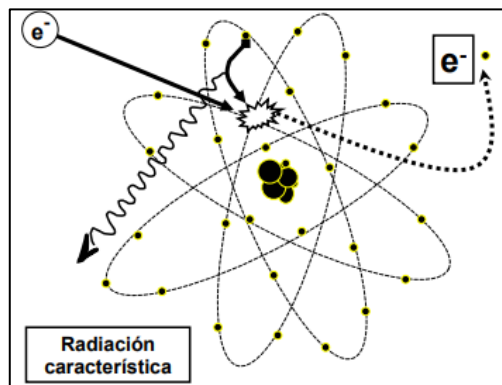


Figura 6. Esquema de la radiación característica (Baños, 1997).

Recibe el nombre de radiación característica porque según el valor de Z de los átomos del blanco, esta energía tiene un valor determinado. Para Rayos X de diagnóstico, la radiación característica puede suponer aproximadamente un 15-25 % del total de la radiación ionizante producida.

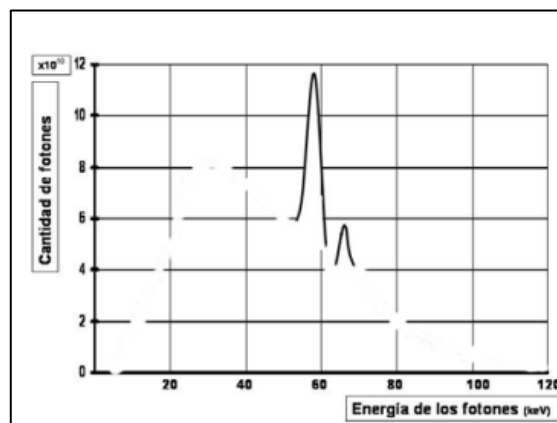


Figura 7. Parte del espectro producido por la radiación característica (Baños, 1997).

En este proyecto, para simular la interacción de los Rayos X y realizar el estudio de dosis, debemos indicar el tipo de fuente y sus valores de energía. El material escogido como blanco del ánodo es el tungsteno y el voltaje máximo aplicado 150kV.

2.2. APLICACIONES DE LOS RAYOS X EN LA INDUSTRIA.

Aunque el uso de las radiaciones ionizantes siempre ha tenido mayor enfoque en el área de la salud, éstas también son de gran utilidad y cada vez más, en el ámbito industrial por las diferentes cualidades que poseen (y por el desarrollo de nuevos detectores digitales de imagen), entre la cuales se destacan (CSN):

- Capacidad de atravesar o penetrar la materia.
- Facilidad y precisión de detección. Es posible medir cantidades insignificantes de radiación ionizante de manera rápida y precisa, proporcionando información exacta de su distribución espacial y temporal.

Algunas de las aplicaciones más destacadas de las radiaciones ionizantes en la actividad industrial son la esterilización, higienización y conservación de productos médicos-quirúrgicos, farmacéuticos, de laboratorio y cosmética, así como, conservación de alimentos, mejora de las propiedades térmicas y mecánicas de plásticos, corchos y coloración de vidrios. Por otro lado, en el control de procesos industriales destacan por su uso en la medición de espesores y densidades o de niveles de llenado de depósitos o envases (CSN, 2015). También se destaca el uso de detectores de seguridad y vigilancia mediante Rayos X en aeropuertos y edificios oficiales.



Figura 8. Equipo de control de proceso para medida de llenado (CSN, 2015).

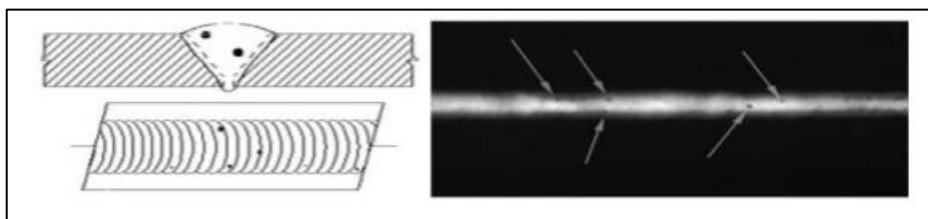


Figura 9. Radiografía de una soldadura con porosidad (SEPR, 2015).

En cuanto a la radiografía industrial, esta técnica se realiza con la finalidad de verificar la estructura interna de los productos y desechar las unidades defectuosas (figura 9). Se puede hacer uso de las sustancias radiactivas (gammagrafía) o de los generadores artificiales (equipos de Rayos X y aceleradores). También se puede disponer de equipamiento fijo (cabinas) como se puede observar en la figura 10 o equipamiento portátil (SEPR, 2015).

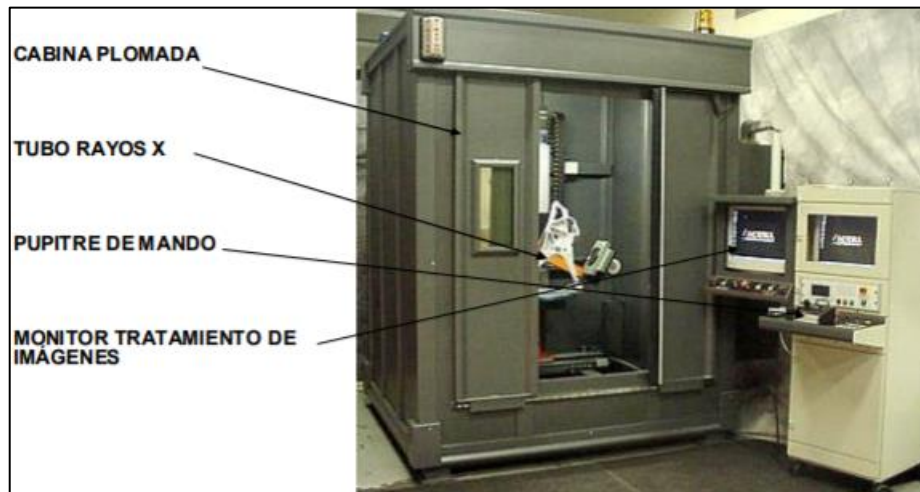


Figura 10. Cabina de radiografía fija (SEPR, 2015).

3. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS.

La Comisión Internacional de Unidades y medidas de Radiación (ICRU) se encarga de definir formalmente las magnitudes y sus unidades. Elabora recomendaciones sobre estas magnitudes y los métodos más adecuados de medida. Necesitamos conocer de forma cuantitativa y precisa los efectos biológicos que estas puedan tener. Disponemos de un gran número de magnitudes para caracterizar la dosimetría de las radiaciones y protección radiológica las cuales se clasifican en las siguientes categorías (CSN, 2012):

- Magnitudes radiométricas. Indican el número y energía de las partículas ionizantes, así como al producto de estas magnitudes junto con sus distribuciones espaciales y temporales.
- Coefficientes de interacción. Son el elemento de enlace entre las magnitudes radiométricas y las magnitudes dosimétricas. Son útiles cuando queremos determinar otra magnitud diferente a la cual se ha medido.
- Magnitudes dosimétricas. Nos proporcionan una medida física de los efectos de la radiación. Son en general el producto de magnitudes radiométricas y coeficientes de interacción. Si bien se calculan de este modo, no se definen de la misma manera porque lo usual es que se midan directamente.
- Radiactividad. Magnitudes asociadas con el campo de radiación producido por las sustancias radiactivas.
- Radioprotección. Magnitudes que son específicas de esta área de aplicación.

Comentaremos algunas de las magnitudes de las cuales se hará uso a lo largo de este trabajo y que nos servirán para realizar el estudio de dosis en la sala de ensayos.

3.1. MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS.

Estas magnitudes nos informan del número o de la energía de las partículas. Tenemos:

- Flujo de partículas, N

Es el cociente de dN por dt , donde dN es el incremento del número de partículas en el intervalo de tiempo dt . Su unidad es: s^{-1} .

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

- Fluencia de partículas, Φ

Es el cociente de dN por da , donde dN es el número de partículas incidentes sobre una esfera de sección recta da . Unidad: m^{-2} .

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2)$$

- Tasa de Fluencia de partículas, $\dot{\Phi}$

Es el cociente de $d\Phi$ por dt , donde $d\Phi$ es el incremento de fluencia de partículas en el intervalo de tiempo dt . Unidad: $m^{-2}s^{-1}$. Esta magnitud recibe también el nombre de densidad de flujo de partículas.

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da dt} \quad (3)$$

3.2. COEFICIENTES DE INTERACCIÓN.

- Sección eficaz, σ

Es el cociente entre P y Φ , donde P es la probabilidad de interacción para el blanco de que se trate cuando está sometido a una fluencia de partículas Φ . Unidad m^2 .

$$\sigma = \frac{P}{\Phi} \quad (4)$$

- Coeficiente másico de atenuación, μ/ρ

El coeficiente para partículas ionizantes no cargadas es el cociente entre dN/N y dl donde dN/N es la fracción de partículas que sufren alguna interacción al atravesar una distancia dl en un material de densidad ρ . Unidad: m^2kg^{-1} .

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho \cdot N} \frac{dN}{dl} \quad (5)$$

- Coeficiente másico de transferencia de energía μ_{tr}/ρ

El coeficiente para partículas cargadas no ionizantes es el cociente entre la energía de cada partícula E , el número de partículas N y la fracción de energía de las partículas incidentes que se transfiere como energía cinética inicial a las partículas cargadas producidas en las interacciones que ocurren cuando la radiación atraviesa una distancia dl en un material de densidad ρ . Es una constante del material para radiación de un tipo y una energía dada. Unidad: m^2kg^{-1} .

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho \cdot E \cdot N} \frac{dE_{tr}}{dl} \quad (6)$$

- Coeficiente másico de absorción de energía μ_{en}/ρ

Este coeficiente para partículas cargadas no ionizantes es el producto del coeficiente másico de transferencia de energía y de $(1 - g)$ donde g es la fracción de la energía de las partículas cargadas secundarias que se disipa en el material por efecto de la radiación de frenado. Unidad: m^2kg^{-1} .

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) \quad (7)$$

- Poder de frenado másico S/ρ

Es el cociente entre la energía disipada por una partícula cargada dE al atravesar una distancia dl en un material de densidad ρ . Unidad: $J m^2kg^{-1}$.

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (8)$$

Se puede expresar E en eV en lugar de J . S es el poder de frenado lineal.

- Transferencia lineal de energía L_{Δ}

Se define la transferencia lineal de energía de un material para partículas cargadas como el cociente entre la energía dE disipada por una partícula cargada al atravesar una longitud dl a causa de aquellas colisiones con electrones en las que la pérdida de energía es menor que Δ . Unidad: Jm^{-1} .

$$L_{\Delta} = \frac{dE}{dl} \quad (9)$$

E se puede expresar en eV

3.3. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS.

- Exposición, X

Define la interacción electromagnética en el aire. Es el valor absoluto de la carga total de los iones de un solo signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por los fotones por unidad de masa de aire son completamente parados en aire (IAEA, 2013). Unidad: $C kg^{-1}$.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (10)$$

- Kerma, K

Indica la energía cinética liberada por unidad de masa. Es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, que han sido liberadas por partículas no cargadas (fotones, neutrones), dividida por la masa del material. Unidad: Gy .

$$K = \frac{dE_{trans}}{dm} \quad (11)$$

- Dosis absorbida, D

Indica la energía absorbida por unidad de masa. Se usa para cualquier tipo de radiación ionizante y material. Unidad: $Gy = J kg^{-1}$.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (12)$$

- Equivalente de Dosis H

El equivalente en dosis nos indica la eficacia relativa de los diferentes tipos de radiación ionizante en los órganos o tejidos. Es el producto entre la dosis absorbida D y el factor de calidad de la radiación Q . Su unidad es el Sievert Sv .

$$H = Q \cdot D \quad (13)$$

- Dosis equivalente en un órgano H_T

Es una magnitud limitadora que se establece con el objetivo de establecer límites máximos con objeto de proteger a los seres humanos de los posibles efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. La dosis equivalente en un órgano o tejido T debida a la radiación R se define como:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (14)$$

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media para la radiación R en el órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación para la radiación R . Unidad Sv.

- Dosis efectiva E

Esta magnitud limitadora tiene en cuenta la radiosensibilidad de los tejidos u órganos como consecuencia de una irradiación del cuerpo entero. Se define a partir del equivalente de dosis como:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_{T,R} w_T w_R D_{T,R} \quad (15)$$

Donde H_T es la equivalente de dosis en el órgano o tejido T y w_T es el factor de ponderación para dicho órgano con la condición:

$$\sum_T w_T = 1 \quad (16)$$

Unidad sievert Sv.

4. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE CON LA MATERIA.

Se define radiación ionizante como aquellas partículas que pueden penetrar la materia y producir ionización en los átomos que la constituyen. Dichas partículas se clasifican en partículas cargadas (electrones, protones y partículas α), radiación electromagnética (fotones) y partículas neutras (neutrones) (CSN, 2012b).

4.1. INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS CON LA MATERIA.

Estas partículas al penetrar en la materia se ven sometidas a fuerzas electrostáticas de núcleos y de electrones, lo que supone un frenado progresivo de la partícula. Principalmente pierden su energía al interactuar con la materia a través de los siguientes tipos de colisiones:

Colisión elástica: La partícula choca con los átomos del medio y cede una parte de su energía en forma de energía cinética. No se produce alteración atómica ni nuclear en el medio.

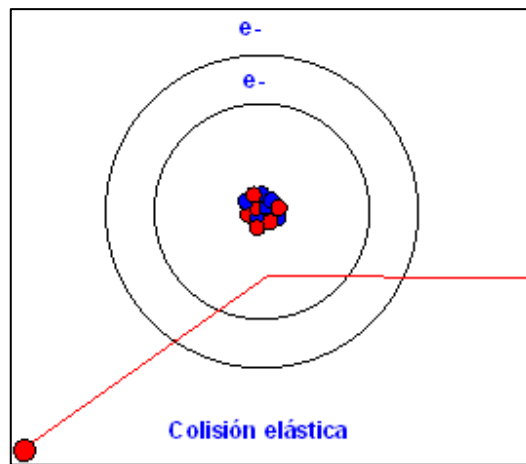


Figura 11. Colisión elástica (CSN 2012).

Colisión inelástica: La partícula choca con los átomos del medio y modifica la estructura electrónica mediante las excitaciones e ionizaciones de los electrones menos ligados.

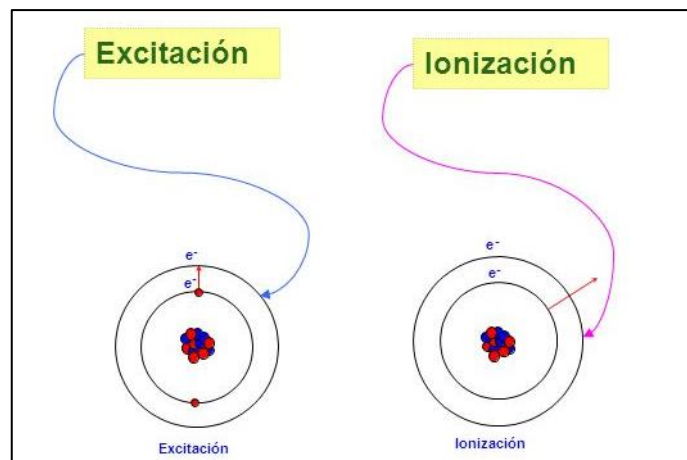


Figura 12. Colisión inelástica (CSN, 2012).

Colisión radiativa: La partícula se frena o desvía cuando interacciona con los átomos del medio y en consecuencia emite radiación electromagnética, pero sin modificar la estructura del átomo. Se produce con mayor frecuencia en las proximidades del núcleo y se le conoce como radiación de frenado o *Bremsstrahlung*.

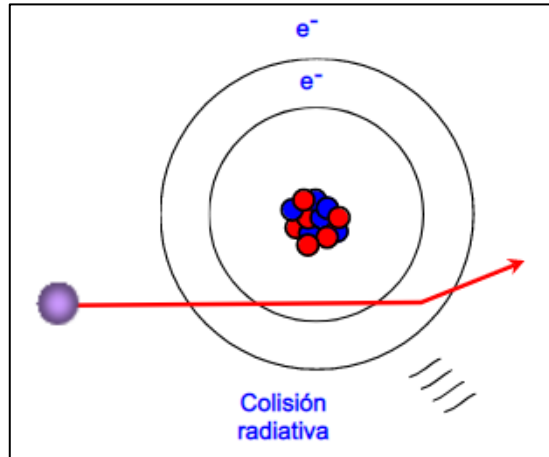


Figura 13. Colisión radiativa (CSN, 2012).

El predominio de un tipo de interacción u otra depende de la naturaleza y energía de la partícula cargada incidente y de la naturaleza del medio natural atravesado.

4.2. INTERACCIÓN DE FOTONES CON LA MATERIA.

La radiación X y gamma son indirectamente ionizantes ya que su interacción con la materia producirá electrones secundarios capaces de producir ionizaciones y excitaciones. Esta interacción y producción de electrones secundarios puede tener lugar mediante los siguientes procesos (CSN, 2012b):

Efecto fotoeléctrico: el fotón es completamente absorbido y su energía se transfiere totalmente al electrón, este escapa del átomo al cual estaba ligado con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente y la de ligadura del átomo. Se produce una emisión de radiación electromagnética característica al ocupar la vacante un electrón del mismo átomo de un nivel superior.

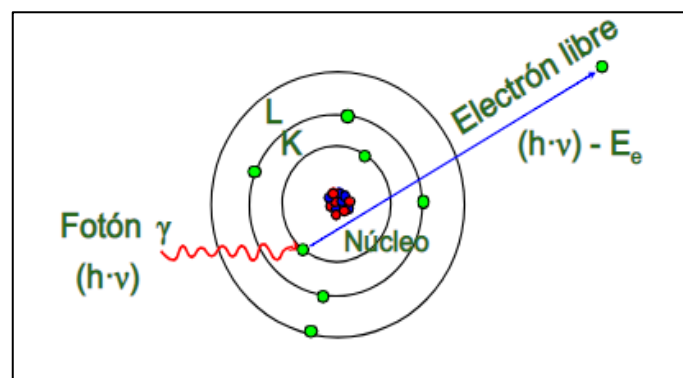


Figura 14. Efecto fotoeléctrico (CSN 2012a).

Efecto Compton: El fotón cede parte de su energía al electrón, se convierte en otro de menos energía y se desvía de su trayectoria.

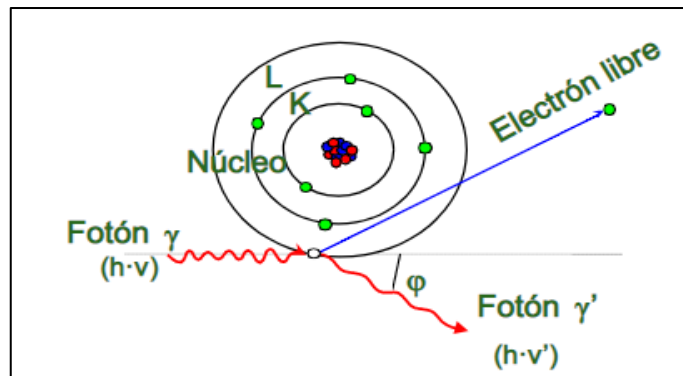


Figura 15. Efecto Compton (CSN, 2012a).

Creación de pares: el fotón gamma al acercarse al núcleo se materializa en electrón y positrón. La energía mínima del fotón incidente debe ser de 1.02 MeV

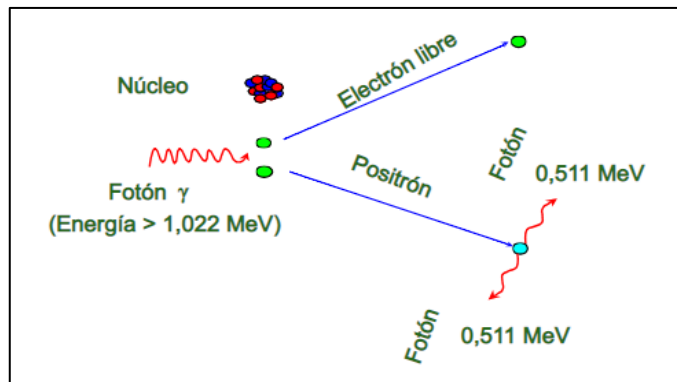


Figura 16. Creación de pares (CSN, 2012a).

La probabilidad de uno u otro depende de la energía de los fotones y de la naturaleza de la sustancia atravesada.

5. EL BLINDAJE EN LAS INSTALACIONES DE RAYOS X.

Como se ha comentado anteriormente, en las aplicaciones industriales se utilizan emisores radiactivos que pueden ser fuentes radiactivas (encapsuladas o no), o bien equipos generadores de Rayos X o aceleradores de partículas (SEPR, 2015). En nuestro caso, la actividad a desarrollar en la dependencia es la investigación y docencia con un equipo de Rayos X industrial con tensión máxima de 160 kV para mantenimiento predictivo no destructivo.

La Radiografía Industrial es un tipo de ensayo no destructivo que utiliza radiaciones ionizantes tales como Rayos X o gamma (en nuestro caso Rayos X) para obtener imágenes radiográficas de objetos. Pueden ser de tipo móvil o bien de tipo fijo. Para este tipo de instalaciones únicamente puede existir riesgo de irradiación externa, que sólo se presenta mientras el tubo de Rayos X se encuentra en funcionamiento (SEPR, 2015).

Debido a esto deben fijarse requisitos específicos de seguridad y protección para garantizar que las dosis y riesgos se mantengan dentro de un nivel apropiado, en concordancia con las regulaciones legales vigentes. Esto incluye por supuesto, un diseño adecuado de la instalación en la cual se va a localizar el equipo generador de Rayos X para que actúe como blindaje y atenúe los efectos de la radiación hacia el exterior del recinto (STUK, 2011).

En el diseño de las instalaciones es importante tener en cuenta la ubicación de la unidad generadora de radiación ionizante, la dirección del haz primario, la ubicación del operador y las áreas circundantes.

5.1. NORMATIVA DEL DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE RAYOS X.

Una instalación radiactiva industrial, según el CSN, se clasifica como una instalación de 2ª o 3ª categoría cuando se trata de un recinto que contiene una fuente de radiación ionizante que funciona a una diferencia potencial superior a 5 kV (CSN, 2015). En concreto, se trata de una instalación de segunda categoría ya que el sistema generador de radiación funciona a una diferencia de potencial inferior a 200 kV.

El consejo de seguridad nuclear es el único órgano regulador competente de la Seguridad Nuclear y de la Protección Radiológica en el territorio nacional español y se encarga de la emisión del informe de seguridad previo a la Autorización de Funcionamiento, de la vigilancia y del control del funcionamiento y la concesión de Licencias de operación (CSN, 2015).

El propósito de los blindajes es el de bajar las exposiciones radiantes de los empleados y público en general a niveles tolerables según la legislación vigente.

Existen distintos documentos en la bibliografía que desarrollan este tema. Organismos como el *National Council Radiation Protection* (NCRP) de EE. UU. emiten recomendaciones y prestan asesoramiento sobre todos los aspectos relacionados con la protección contra las radiaciones ionizantes.

Para realizar una correcta y efectiva planificación del diseño del blindaje de una instalación radiactiva se debe conocer la disposición de las fuentes de rayos, la ocupación de las salas adyacentes a los cuartos de rayos, el uso de las fuentes de rayos y así como también el poder clasificar a las distintas paredes, techos, pisos como barreras primarias o secundarias (STUK 2011).

En primer lugar, se debe clasificar la zona de trabajo y lugares adyacentes en zonas vigiladas o controladas para que al realizar el diseño de blindaje se tenga presente cuáles son las dosis limitantes dependiendo del tipo de zona. Según el CSN tenemos los siguientes valores:

- **Áreas controladas:** Es aquella en la que existe la probabilidad de recibir una dosis efectiva superior a 6mSv/año oficial o una dosis equivalente superior a 3/10 de alguno de los límites para el cristalino, la piel y extremidades.
- **Áreas no controladas o vigiladas:** Es que aquella zona en la que existe la probabilidad de recibir dosis efectivas superiores a 1 mSv por año oficial o una dosis equivalente superior a 1/10 de los límites de dosis equivalentes para el cristalino, la piel y las extremidades.

	DOSIS EFECTIVA	DOSIS EQUIVALENTE
TE	100 mSv/5 años máximo: 50 mSv/año	- Cristalino: 150 mSv/año - Piel: 500 mSv/año /1 cm ² - Manos, antebrazos, pies y tobillos: 500 mSv/año
PÚBLICO	1 mSv/año	- Cristalino: 15 mSv/año - Piel: 50 mSv/ año
ESTUDIANTES	Mayores de 18 años: Límites de los TE	
	Entre 16 y 18 años: 6 mSv/año Cristalino: 50 mSv/año; piel, manos, etc.: 150 mSv/año Otros: Límite del público	

En su cómputo NO se incluyen: dosis fondo natural ni dosis exposiciones médicas

Figura 17. Límites del Reglamento de Protección Sanitaria con las Radiaciones ionizantes CSN(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha])(«Material Didáctico Csn - Ciemat» [sin fecha]).

Las **áreas controladas** son aquellas zonas que se encuentran bajo la supervisión de un oficial de radioprotección. Ejemplo: sala de Rayos X, consola, cambiadores, etc. Los trabajadores aquí están en todo momento monitoreados y son generalmente los técnicos radiólogos.

Las **áreas no controladas o vigiladas** son aquellas otras zonas que lindan o están cercanas a las áreas controladas. Estas pueden ser aparcamiento, almacenes u otras salas.

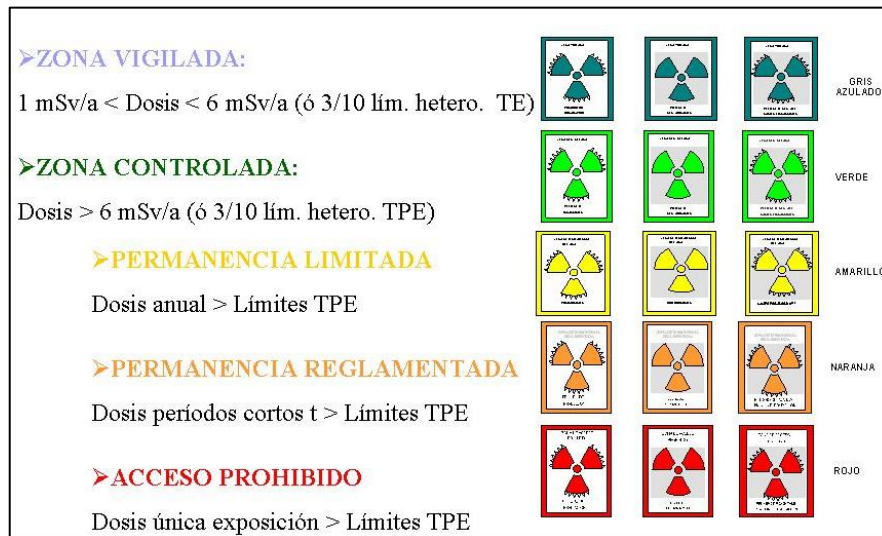


Figura 18. Clasificación y señalización de zonas. CSN.

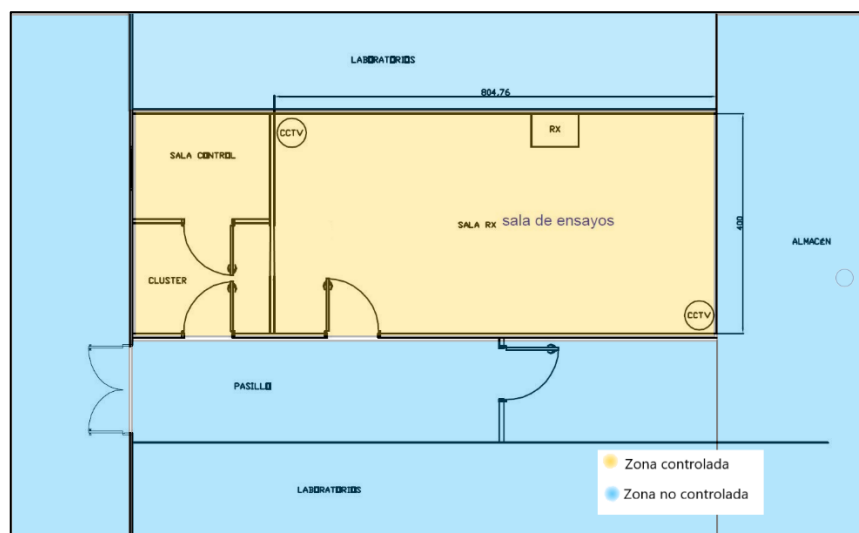


Figura 19. Clasificación de zonas del lugar de estudio (elaboración propia).

El segundo paso consiste en considerar el **tipo de radiación** para determinar cuáles serán o dónde se ubicarán las **barreras primarias y secundarias**. La **radiación primaria** o haz útil hace referencia a la radiación que es emitida directamente desde el tubo de Rayos X y que es usada para obtener la imagen del objeto en cuestión. Por lo tanto, la **barrera primaria** es la pared, el techo o cualquier estructura que atenuará al haz primario a valores aceptables. La **radiación secundaria** hace referencia la radiación dispersada por el objeto y la radiación de fuga emitida por el tubo. Con lo cual, la **barrera secundaria** será toda estructura que atenúe esta radiación a valores aceptables. En nuestro proyecto, el equipo dirige el haz de Rayos X únicamente hacia abajo, por lo que la radiación directa se dirigirá hacia el suelo, y el resto de las paredes recibirán radiación dispersa y de fuga (NCRP, 2004).

A continuación, se obtienen o se designan **los factores de ocupación de las zonas, la carga de trabajo y otras características** del equipo generador de Rayos X que permitirán calcular el espesor requerido de los materiales usados en el diseño del blindaje.

El **factor de ocupación U** se define como la fracción promedio de tiempo que el individuo máximamente expuesto está presente mientras el haz está irradiando. Asumiendo que un equipo de rayos es usado aleatoriamente en una semana, el factor de ocupación es la fracción de horas de trabajo en la semana que una dada persona ocuparía el área promediada durante el año (NCRP, 2004).

Dependencia	Factor de ocupación
Control	1
Clúster	1
Pasillo norte	0.25
Pasillo este	0.25
Laboratorio sur	1
Almacén	0.0625
Piso superior	1
Aparcamiento	0.0625

Tabla 2 Factores de ocupación.

La **carga de trabajo W** es el tiempo integrado de corriente de un tubo de Rayos X en un periodo de tiempo dado en mA·min. Se ha considerado que esta dependencia del ISIRYM tendrá una carga semanal de 5h.

El **factor de uso T** es la fracción de carga del haz primario que es dirigida hacia una determinada barrera.

En nuestro caso tenemos:

- Factor de uso del 100% para el aparcamiento donde puede incidir la radiación primaria, y el 100% para el resto de las salas donde puede incidir la radiación dispersa y de fuga.
- Características del equipo: 80 ~ 160 kV; 0.1 ~ 1.2 mA.
- Distancia foco-muestra: 1 m.
- Filtración del tubo: 0.2 mm Al.
- Carga de trabajo: 5 horas a la semana.

Con estos valores se procede a realizar el cálculo del espesor de las barreras primarias y secundarias en términos de capas de semirreducción o decirreducción. En el apartado de análisis de los resultados se tratará con más detalle estos conceptos con el objetivo de obtener valores que permitan verificar el trabajo realizado.

5.2. MATERIALES TRADICIONALES USADOS EN EL BLINDAJE.

Las estructuras para considerar, y por tanto los materiales con los que se realizan, en el blindaje de instalaciones de Rayos X son las paredes interiores, puertas, ventanas y suelos (STUK, 2011).

Paredes interiores

Los materiales más usados en el blindaje de estos componentes son las placas de yeso, bloques de hormigón, ladrillos o algunos cerámicos. Si los cálculos lo requieren, se usan planchas de plomo para atenuar la radiación. Las planchas son pegadas entre dos placas de yeso las cuales son atornilladas luego para soportarlas a alguna estructura. Los tornillos metálicos compensan el

agujero que podría suponer alguna fuga. Especial cuidado debe procurarse en las uniones entre placas (Dea y Escobar).

Puertas

Los materiales de las puertas pueden variar mucho en su composición. Se debe analizar si hace falta agregar protección adicional. Muchas veces es necesario colocar placas de plomo a la puerta y el marco de ésta para evitar fugas por la unión (Dea y Escobar).

Ventanas

Existen distintos tipos de materiales adecuados para instalaciones de Rayos X. Es deseable que los materiales sean duraderos y que conserven su transparencia óptica con el tiempo. Los materiales más utilizados son el vidrio plomado y el acrílico plomado (Dea y Escobar).

Suelos

El material más usado es el hormigón. Aunque existe una gran variedad de estos, los más utilizados son el hormigón común y hormigón ligero. El hormigón común es el normalmente usado en construcciones y su densidad, aunque varía es de aproximadamente $2.4 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. El hormigón ligero tiene una densidad de aprox. $1.8 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Otras consideraciones

- Altura piso a piso. Estas pueden variar entre los 3 y 5 m. En estos casos, la altura del blindaje no supera los 2,1 m desde el piso. Si se requiriese protección encima del cuarto de Rayos X, entonces debe agregarse protección adicional hasta el techo inclusive.
- Penetraciones en las barreras. Se debe tener especial atención en los conductos de ventilación, cañerías en general, uniones entre placas de plomo, las cuales debe tener una superposición no menor a 1 cm. El mismo concepto debe ser aplicado a las uniones de plomo con alguna pared de hormigón.

5.3. PLACO® X-RAY PROTECTION COMO ALTERNATIVA.

Por su poder de atenuación de la radiación, el plomo es un material tradicionalmente usado en el blindaje de instalaciones, fabricación de accesorios personales y barreras móviles como medida de protección frente a las radiaciones ionizantes. Sin embargo, debido a su toxicidad y dificultad en la disposición, se está trabajando en el desarrollo de materiales atenuadores libres de plomo (Mayorga, Plazas Jiménez y Cruz Salazar, 2016).

En esta línea, han surgido compuestos como el sulfato de bario que presentan alta viabilidad económica siempre y cuando se haga uso de él de manera adecuada con el objetivo de aumentar la eficiencia del blindaje.

Existen casas comercializadoras de este producto, como *KNAUF* y *Placo Saint-Gobain*, que están intentando abrir un nuevo mercado en nuestro país y proponer una alternativa innovadora al blindaje con plomo que satisfaga la creciente demanda de eficiencia energética y protección medioambiental. En esa línea, el ISIRYM ha apostado por este producto y ha utilizado el producto *Placo® X-Ray Protection* de la marca *Placo Saint-Gobain* para realizar el blindaje de la dependencia radiactiva.

Placo® X-Ray Protection se trata de una placa de yeso laminado con cartón a doble cara, compuesta principalmente por mezclas naturales de sulfatos de bario (CAS N.º 7727-43-7) y sulfatos de calcio (CAS N.º 10034-76-1), fibra de vidrio y aditivos especiales en el núcleo. Para su instalación es necesario el uso de la pasta de juntas *Promix Placo® X-Ray Protection*, que también contiene sulfato de bario. *Placo® X-Ray Protection* proporciona protección radiológica en edificios del sector sanitario e industrial que lo requieran, mediante sistemas de tabiques y techos (*Placo Saint-Gobain, 2018*).

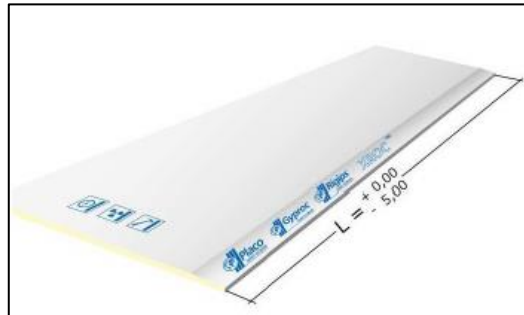


Figura 20. *Placo® X-Ray Protection* (*Placo Saint-Gobain, 2018*).

A continuación, proporcionamos las características del material:

Espesor (mm)	12.5
Ancho (mm)	600
Longitud (mm)	1800/2400
Peso por placa (kg)	19.4/25.9
Densidad de la placa	1440 kg/m ³
Coef. conductividad térmica	0,25 W/mK
Resistencia al vapor de agua (μ)	10 (EN 12524)
Reacción al fuego	A2 - s1 - d0
Aislamiento acústico a ruido aéreo	hasta 57 dB (Rw)

Tabla 3. Características *Placo® X-Ray Protection* (*Placo Saint-Gobain, 2018*).

Este producto proporciona niveles de protección contra Rayos X ensayados y certificados por organismos independientes como el *Radiation Metrology Group* del Reino Unido para probar su rendimiento equivalente al plomo, conforme con la normativa IEC 61331-1:2014 (*Placo Saint-Gobain, 2018*).

Es una placa de alta densidad y resistencia al impacto. Sencilla de cortar y fijar, lo que permite una instalación más rápida que con placas de plomo. Proporciona un aislamiento acústico elevado ya que los minerales de alta densidad que conforman el núcleo permiten que mejore el aislamiento acústico respecto a una placa estándar. Por otro lado, presenta un buen comportamiento ante el fuego debido al material no combustible del que está formado el núcleo y la fibra de vidrio.

Se trata de un producto cuya función de protección frente a los Rayos X no se degrada en toda su vida útil además de que puede reciclarse en su totalidad. Así pues, *Placo® X-Ray Protection* es un material sumamente eficiente a la hora de proteger contra los Rayos X cuyo precio es estable en comparación con los precios variables del plomo.



Figura 21. Proceso instalación Placo® X-Ray Protection (Placo Saint-Gobain, 2018).

6. MATERIALES.

El Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM) ha proporcionado la información necesaria sobre los planos y componentes de la dependencia de la Instalación Radiactiva (IRA) única de la Universitat Politècnica de València (UPV), la cual se encuentra en proceso de obtención del permiso para la implantación de un equipo de Rayos X para investigación y docencia. Se localiza en la planta semisótano de la Ciudad Politécnica de la Innovación (CPI), accediendo por el área de aportación (ISIRYM). Estos documentos se encuentran en el apartado de anexos.

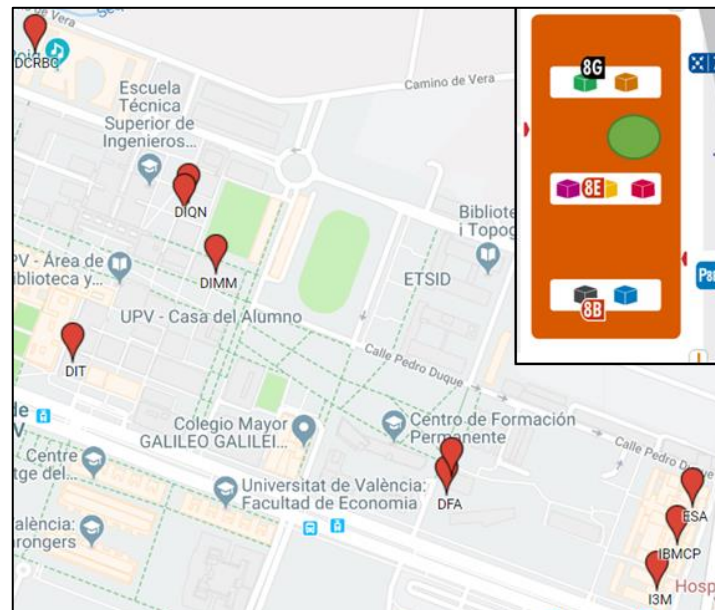


Figura 22. Dependencias de la Instalación Radiactiva y localización de la dependencia a estudiar (verde) («IRA-UPV - Google My Maps» 2015).

6.1. EQUIPO GENERADOR DE RAYOS X.

El equipo generador de radiaciones ionizantes es monofásico y con rectificación de alta frecuencia, de la marca Spellman. Alcanza una tensión máxima de 160 kV y una intensidad máxima de 1.2 mA. Se trata de un monobloque generador de Rayos X, que incluye en un bloque único el generador, tubo de Rayos X, sistema de refrigeración y blindaje para limitar la radiación de fuga a los niveles indicados por el fabricante (Spellman High Voltage Electronics, 2018).



Figura 23. Equipo generador de Rayos X (elaboración propia).

6.2. SALA DE ENSAYOS DE LA INSTALACIÓN RADIATIVA.

En el plano proporcionado, el cual se adjunta en el apartado de anexos de este trabajo, se encuentra la información de las medidas del recinto. La composición y medidas de los materiales de las estructuras que componen la sala, la altura de la sala y la posición del tubo vienen indicados en la memoria. En la figura siguiente se observa la disposición de la sala.

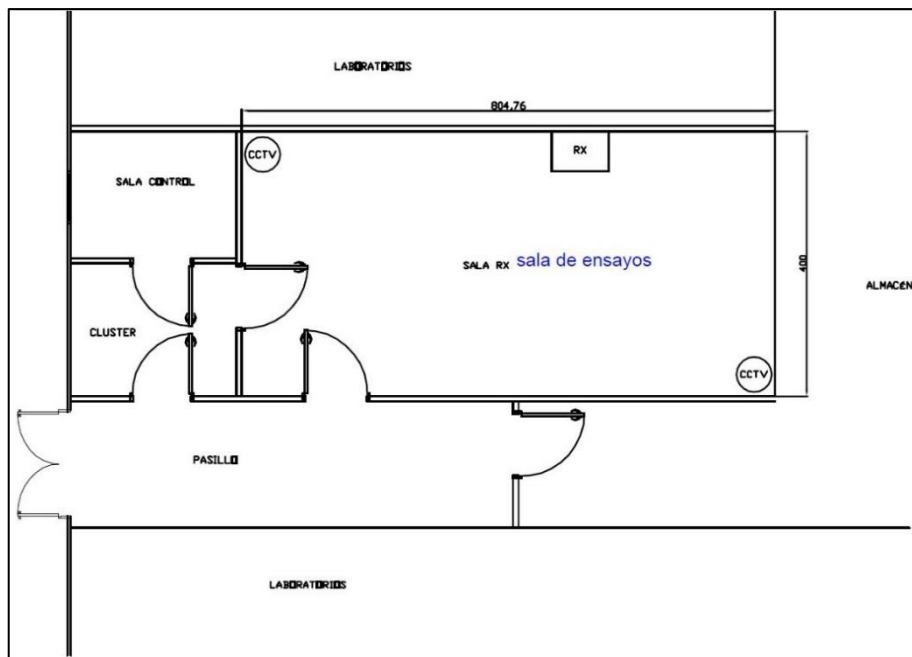


Figura 24. Plano de la instalación (ISIRYM).



Figura 25. Sala de ensayos (elaboración propia).

A continuación, se observa una tabla resumen de los materiales utilizados en la construcción de la sala de ensayos con la densidad de cada uno de ellos.

Partes	Material	Densidad (g/cm ³)	Espesor(cm)
Techo y suelo	Hormigón normal	2.30	25
Blindaje	5 Placo® X-Ray Protection	1.44	6.25
Paredes	Ladrillo hueco del 8	1.2	3.5
Puerta	Plomo	11.30	0.2
	Resina Fenólica	1.25	3

Tabla 4. Materiales de la sala de ensayos (elaboración propia).

6.3. MODELADO Y MALLADO.

Para realizar este trabajo ha sido necesario el uso de programas que permitieran modelar y mallar la sala de ensayos.

6.3.1. SpaceClaim.

Se trata de un software CAD que permite el modelado de sólidos en 3D. Con este programa se ha realizado el modelado de la sala de ensayos.

SpaceClaim es una corporación que se funda en el 2005 con el objetivo de desarrollar un software de modelado de sólidos 3D para ingeniería mecánica. En 2014, la empresa es adquirida por ANSYS. La versión utilizada en este trabajo es la *SpaceClaim19.1*.

Se ha utilizado este software porque permite guardar la geometría creada en distintos formatos tales como *.igs*, *.sat* o *.stp*, los cuales utiliza *Abaqus*. Por tanto, se puede exportar cualquier geometría que se haya creado en *SpaceClaim* a *Abaqus*.

6.3.2. Abaqus.

Abaqus es un software de modelado por elementos finitos utilizado en el cálculo de deformaciones y tensiones en resistencia de materiales. Este software es uno de los productos que ofrece el servicio Simulia de la compañía de software *Dassault Systemes*.

Este programa tiene 5 productos de software: *Abaqus/CAE*, *Abaqus/Standard*, *Abaqus/Explicit*, *Abaqus/CFD*, *Abaqus/Electromagnetic*. Para la realización de este trabajo únicamente interesa *Abaqus/ CAE (Complete Abaqus Environment)*). Este producto tiene dos utilidades fundamentales. En primer lugar, se utiliza para modelar y analizar los componentes mecánicos y montajes (preprocesamiento). En segundo lugar, se utiliza para visualizar los resultados del análisis de elementos finitos. Nos permite exportar los resultados en formato *.inp*, el cual es usado por el programa UM_PRE_OP para obtener el esqueleto del código que usa MCNP6.

6.3.3. Unstructured Mesh Pre Operations (UM_PRE_OP).

El programa de operaciones previas de malla no estructurada es un programa que crea la estructura básica en el input de MCNP6 que hace referencia a la malla.

Este programa está escrito en Fortran y está diseñado para ejecutarse desde la línea de comandos. Permite obtener a partir de un archivo *.inp* creado en *Abaqus*, la estructura de un archivo de MCNP6.

El programa *um_pre_op* puede leer el archivo *.inp* de *Abaqus* y con la información que se tiene del modelo de malla global se crean las tarjetas de pseudo-celdas apropiadas y la celda de *background*.

La estructura y opciones que se han utilizado en este programa es la siguiente:

um_pre_op_old - m - o archivo salida (MCNP) archivo .inp (Abaqus)

- *m* genera el archivo que tiene el esqueleto de MCNP.

- *o* hace referencia al nombre del archivo de salida que se escribe a continuación de esta opción.

6.4. EL MÉTODO MONTE CARLO

Conocer la distribución de la dosis en un volumen o un maniquí permite evaluar los efectos de la radiación en la materia y tomar las medidas pertinentes para proteger al colectivo expuesto a dicha actividad. En general, para determinar dicha dosis se hace uso de programas de cálculo que están basados en modelos de transporte de radiación. Estos métodos plantean ecuaciones matemáticas que describen los mecanismos que gobiernan el transporte de partículas y su interacción con la materia. Existen dos principales alternativas que permiten dicho cálculo: el **método determinista** basado en la **ecuación de Boltzmann**, el cual mediante un sistema de ecuaciones lineales (leyes de Boltzmann) describe el balance entre flujos de partículas entrantes y salientes en un medio determinado. Esta técnica funciona bien en medios macroscópicos homogéneos, pero presenta

ciertos problemas cuando se trata de un medio heterogéneo; y el **método Monte Carlo**, una alternativa a la resolución de problemas de transporte de la radiación en la materia cuando se trata de geometrías complejas y naturaleza probabilística o en los que por medio de análisis se convierten en problemas probabilísticos (Parreño y Páucar). Este método hace referencia al conjunto de procedimientos matemáticos empleados para modelar problemas complejos basándose en un conocimiento a priori de las probabilidades de ocurrencia de los diferentes procesos involucrados en los mismos. Este método es más preciso que el determinista, pero presenta una importante limitación: el tiempo de ejecución. Sin embargo, en los últimos años ha adquirido peso debido a los procesos de computación en paralelo que disminuyen el tiempo de cálculo notablemente.

El desarrollo de las técnicas basadas en el **método Monte Carlo** deben su origen a los trabajos realizados en los laboratorios de Los Álamos y se remonta alrededor del año 1944. El nombre de dicho código proviene de las simulaciones de la difusión de neutrones realizadas en dichos laboratorios durante la Segunda Guerra Mundial como parte del trabajo para realizar armas nucleares.

En el campo de la protección radiológica, los números aleatorios se utilizan para simular la historia de un fotón o electrón y de todas las partículas secundarias generadas por estos al incidir en cualquier medio material. Dicha historia o simulación viene determinada por la geometría y composición del medio, el estado inicial de la partícula (tipo, posición y ángulos de incidencia y energía) y la selección de diferentes tipos de procesos físicos que esa partícula pueda sufrir en función de la distribución de probabilidad que gobierna cada uno de esos procesos.

Si la partícula incidente es un fotón la simulación se realiza paso a paso y se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

1. Distancia hasta la próxima interacción. En cada paso el fotón es transportado en su dirección incidente hasta una distancia aleatoria donde sufrirá la siguiente interacción. La probabilidad de elegir una u otra distancia viene determinada por el recorrido libre medio de ese fotón en el medio en cuestión.
2. Tipo de interacción. También en cada paso se decide qué tipo de interacción sufrirá el fotón (dispersión (Rayleigh) coherente, dispersión (Compton) incoherente, efecto fotoeléctrico, producción de pares y tripletes) en función de sus distribuciones de probabilidad que son función de la energía del fotón y de la naturaleza del medio.
3. Nuevo ángulo y energía. En función de la interacción decidida se elige el nuevo ángulo y energía a partir de las distribuciones de probabilidad, función de la interacción, la energía y el medio.
4. Nuevas partículas. Si el suceso genera o pone en movimiento una o más partículas, éstas se añadirán junto con sus datos de energía inicial, posición y ángulo al conjunto de la simulación

El método Monte Carlo requiere generar una gran cantidad de números aleatorios que reproduzcan probabilidades de cada tipo de interacción con el medio para simular el transporte de cada partícula, con lo que, sin la ayuda de los ordenadores esta tarea sería demasiado extensa e inviable.

Actualmente, existe una variedad de códigos específicos basados en Monte Carlo cada uno con sus peculiaridades. Algunos de estos códigos se pueden obtener de manera gratuita a través del *Radiation Safety Information Computational Center (RSICC)* o *Nuclear Energy Agency (NEA)*.

Se ha hecho uso del código MCNP6 debido a que emplea una definición de fuente en general mucho más sofisticada que otros códigos Monte Carlo y es mucho más flexible en lo que se refiere a la especificación de la geometría simulada, en especial en esta nueva versión se permite el uso de mallas para la definición de la geometría. Por otro lado, la experiencia acumulada por el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV con el código MCNP; el cual, durante varios años de trabajo, se ha optimizado, paralelizado y estudiado a fondo, permitiendo así optimizar las simulaciones.

6.4.1. MCNP

El programa MCNP6 (*Monte Carlo N-Particle*) se desarrolló en el Laboratorio Nacional de los Álamos y es usado en las áreas de protección radiológica y dosimetría, radiografía, física médica, seguridad nuclear, diseño y análisis de detectores. Se utiliza para simular el transporte y la interacción de la radiación electromagnética con la materia (Pelowitz et al., 2013).

Para la realización de este trabajo se ha utilizado el código MCNP6. Este código simula el transporte de N-partículas, es decir, se realiza el seguimiento de muchos tipos de partículas como electrones, fotones y neutrones en diferentes rangos de energía. Simula la historia de la partícula y también de las partículas secundarias que esta pueda crear al interaccionar con el material. Por eso es muy importante conocer la composición y geometría del medio, el tipo de partícula, las energías y posición inicial de la fuente, y los procesos físicos que puedan ocasionarse según sus distribuciones de probabilidad (Pelowitz et al., 2013).

MCNP6 es una fusión de las versiones anteriores MCNP5 y MCNPX. Esta nueva versión de MCNP tiene nuevas características no encontradas en ningún código anterior. Por ejemplo, MCNP6 permite importar geometrías de malla no estructuradas a partir del código de elementos finitos *Abaqus*.

Es una buena elección para resolver problemas de transporte de la radiación en la materia en geometrías complejas. Con este programa se obtiene el flujo de la partícula en cada instante y en cada punto del espacio para una geometría y fuente de radiación concreta. A partir de esto se pueden obtener otros parámetros como pueden ser la dosis absorbida.

Debido a la cantidad de números que se requieren para reproducir las probabilidades de cada tipo de interacción con el medio se hace necesario la ayuda de muchos ordenadores en paralelo, ya que de lo contrario esta tarea sería demasiado larga y costosa.

En el apartado de metodología se comentará el código con más detalles.

6.5. CREACIÓN DE LOS MATERIALES PARA MCNP6.

Para realizar las simulaciones en MCNP6 ha sido necesario conocer la composición de los materiales de la sala de ensayos.

Una vez obtenida la composición de los materiales, se ha consultado el siguiente documento: “*Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modelling*” (McConn Jr et al., 2011). Este documento tiene dos objetivos principales. Por un lado, proporcionar una referencia rápida de composiciones de material para analistas. Por otro lado, proporcionar una referencia estandarizada para reducir las diferencias entre los resultados de dos analistas independientes. El documento proporciona la definición de los materiales de acuerdo con el formato requerido por el código MCNP6.

Todos los materiales que se necesitan para la realización del trabajo no aparecen en el documento, es el caso del material de las placas *Placo® X-Ray Protection*. Por tanto, se han tenido que crear nuevos materiales de forma manual conociendo de qué elementos estaban formados los materiales y la fracción atómica de cada elemento, proceso que se explicará con mayor detalle en el apartado de metodología.

6.6. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS. CREACIÓN DEL ARCHIVO “.VTK”.

Cuando termina la simulación de MCNP6 se generan muchos archivos. Los archivos que interesan para poder visualizar los resultados son los archivos *meshtal* y *.eeout*.

6.6.1. Unstructured Mesh Post Operations (UM_POST_OP).

Se trata de un programa que realiza varias manipulaciones en uno de los archivos de salida de MCNP6, el archivo “.*eeout*”. Este archivo recoge los resultados de flujo o dosis en cada una de las celdas o elementos definidos por la malla creada en *Abaqus*.

Es importante decir que se ha escrito en Fortran y utiliza varias rutinas y estructuras de datos para mantener la coherencia con MCNP6. Además, está diseñado para ejecutarse desde la línea de comandos.

Las funciones principales de este programa son: agregar y fusionar distintos archivos *.eeout* en uno, realizar una conversión de archivos binarios a ASCII o generar un archivo *.vtk* para posteriormente poder analizar de forma visual los resultados.

La función que se va a utilizar en este trabajo genera un archivo *.vtk* a partir del archivo *.eeout* de MCNP6. Con este archivo *.vtk* se analizará la dosis que reciben las paredes de la sala de ensayos.

La estructura que se ha utilizado de este programa es la siguiente.

```
um_post_op_old - vtk -o archivo salida archivo .eeout
```

-*vtk* genera el archivo de visualización en formato ASCII.

-o hace referencia al nombre del archivo de salida que se escribe a continuación de esta opción.

6.6.2. FMESH2VTK.

Se trata de un código realizado en entorno MatLab. Con este programa se realiza la conversión del formato del archivo *meshtal* generado en MCNP6 al formato adecuado para su posterior visualización con extensión “.vtk”. Este archivo se genera cuando en la simulación se asigna un *tally* o registro de resultados. Se encuentran almacenados los resultados de flujo o dosis en cada vóxel definido por el *tally*.

6.7. PARAVIEW.

Este programa es una aplicación de código abierto utilizada para la visualización científica de bases de datos y para el análisis de datos multiplataforma.

El objetivo principal es analizar datos extremadamente grandes utilizando recursos informáticos de memoria distribuida. Nos ofrece la posibilidad de explorar dichos datos de forma interactiva en 3D. Gracias a esta característica se ha convertido en una herramienta fundamental en muchos laboratorios, universidades e industrias nacionales.

Trabaja con archivos que tienen una extensión “.vtk” (*Visualization Toolkit*). Por tanto, se utilizará este programa para visualizar los archivos “.vtk” que se han generado en las simulaciones de nuestro problema y analizar y visualizar la dosis recibida en la sala de ensayos.

6.8. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.

El objetivo en este apartado es comprobar que los resultados obtenidos se ajustan a la normativa vigente. Se realizará el cálculo de la dosis equivalente **H** (directa y secundaria) y se compararan los resultados con los valores que se encuentran disponibles en la documentación para la ampliación de la dependencia del Instituto De Seguridad Industrial, Radiofísica Y Medioambiental (ISIRYM). Esta memoria proporcionada por el ISIRYM se ha realizado con el fin de obtener el permiso para la implantación de un equipo de Rayos X para investigación y docencia en la dependencia del Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), dentro de la instalación Radiactiva Única de la Universidad Politècnica de Valencia, adscrita al Servicio de Radiaciones. Este documento realiza una descripción de la instalación y un estudio de seguridad basándose en la normativa y las guías comentadas en el apartado correspondiente de este trabajo. Haciendo uso de la guía del CSN N.º 5.11” *Aspectos técnicos de seguridad y protección radiológica de instalaciones médicas de Rayos X*”, y de las siguientes fórmulas semiempíricas proporcionadas por la Sociedad Española de Física Médica (SEFM)

$$\text{Radiación directa:} \quad H = \frac{\Gamma \cdot W \cdot T}{d^2 \cdot 2^n} \quad (17)$$

$$\text{Radiación dispersa:} \quad H = \frac{\Gamma \cdot W \cdot a}{d^2 \cdot 2^n} \quad (18)$$

$$\text{Radiación de fuga:} \quad H = \frac{f \cdot W \cdot T}{Q \cdot d^2 \cdot 2^n} \quad (19)$$

Siendo:

- I : rendimiento del equipo en $mSv\cdot m^2/mA\cdot min$ a 1 m de distancia. Para un voltaje de 130 kV y filtración de 0.2 mm de Al se obtiene $50 mSv\cdot m^2/mA\cdot min$
- W : carga de trabajo anual en $mA\cdot min$.
- T : factor de ocupación
- d : distancia del punto de emisión a la barrera considerada en metros.
- n : número de veces que el espesor del blindaje de plomo contiene al espesor de semirreducción. Se toma de blindajes: 2 mm de Pb para las paredes, y 25 cm de hormigón para suelo y techo.
- a : factor de dispersión. Para el tamaño de campo que origina la dispersión sobre la muestra radiografiada ($\sim 100 cm^2$) se ha tomado 0.001.
- f : Factor de corrección para un tubo de tensión nominal 150 kV y 125 kV de tensión máxima: 0.68.
- Q : Valor de carga en $mA\cdot min$. Se toma un máximo de 1 mGy/h a 1 m de distancia para la radiación de fuga funcionando el equipo en las condiciones máximas de 150 kV y 1,2 mA. Esto supone un valor de carga de 72 $mA\cdot min$.

Se han calculado los valores de dosis equivalentes en las zonas adyacentes de la sala de ensayos para cada tipo de radiación (directa, dispersa y de fuga) con un blindaje de 2 mm de plomo, que es el equivalente a usar 5 placas de *Placo® X-Ray Protection* en condiciones desfavorables, es decir, cuando el equipo de utiliza a un voltaje superior a 100 kV y a una intensidad máxima de 1.2 mA.

Con lo cual se han obtenido los siguientes resultados y con estos se compararán los resultados obtenidos de la simulación con MCNP6:

RADIACIÓN DIRECTA (haz de rayos x incidiendo hacia abajo):			
Zona	Ocupación (T)	d (m)	H ($\mu Sv/año$)
Aparcamiento	0.0625	6	237
RADIACIÓN SECUNDARIA (dispersa más fuga):			
Zona	Ocupación (T)	d (m)	H ($\mu Sv/año$)
Control	1	5	227
Clúster	1	5	227
Pasillo norte	0.25	4	82
Pasillo este	0.25	7.5	28
Laboratorio sur	1	2	947
Almacén	0.0625	2.5	43
Piso superior	1	4.5	271

Tabla 5. Valores de dosis equivalente H.

7. MÉTODOS.

7.1. DISEÑO DE LAS INSTALACIONES.

En la siguiente figura se observa el esquema del procedimiento a seguir:

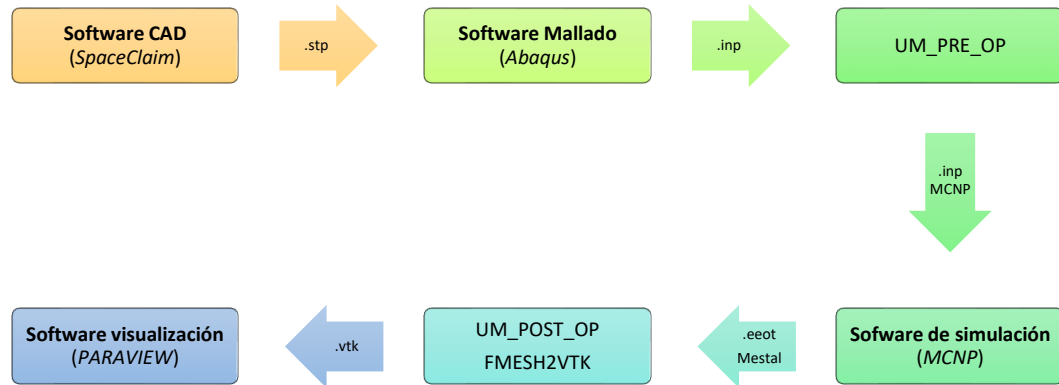


Figura 26. Procedimiento del diseño de la sala de ensayos (elaboración propia).

7.1.1. SpaceClaim.

El primer paso consistió en la utilización del software CAD para modelar la sala de ensayos en tres dimensiones. Es muy importante tener claro la disposición de la sala de ensayos en el sistema de coordenadas para que se ajuste a la disposición que utiliza MCNP6 y evitar así problemas en la simulación.

En la siguiente figura se observa la estructura y composición de la puerta de acceso a la sala de ensayos. Esta puerta está formada por una plancha de resina fenólica y una plancha de plomo con grosores de 3 cm y 2 mm respectivamente.

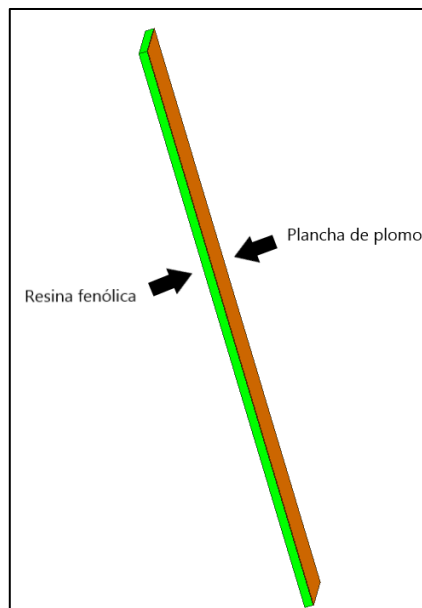


Figura 27. Puerta de la sala de ensayos.

Por otro lado, como se puede observar en la *figura 28*, el blindaje de la sala está formado por 5 placas de *Placo® X-Ray Protection* con una altura de 2m desde el suelo. Para su modelización se ha considerado a las 5 placas del material como una sola tal y como se observa en la *figura 29*.



Figura 28. Blindaje con Placo® X-Ray Protection en la sala de ensayos.

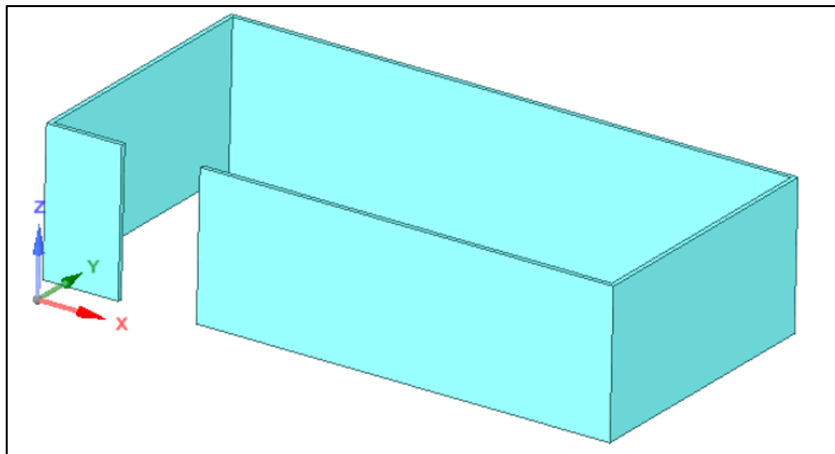


Figura 29. Modelización del blindaje de la sala de ensayos Placo® X-Ray Protection.

A continuación, se observa la sala de ensayos creada en 3D con la distribución apropiada de los materiales.

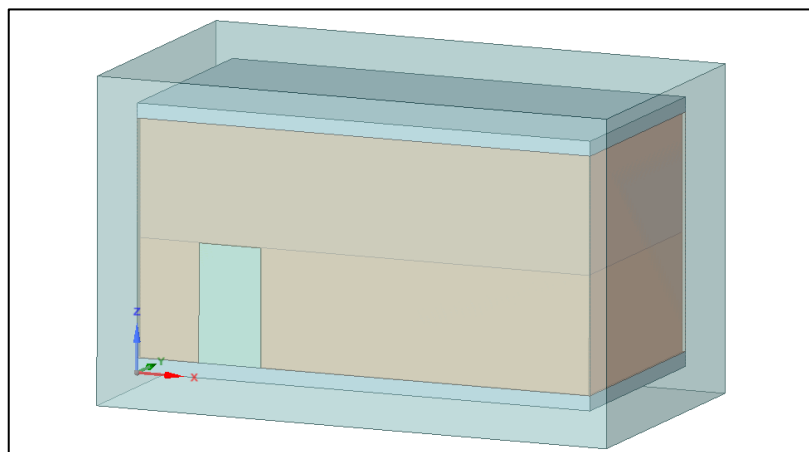


Figura 30. Sala de ensayos en 3D.

Una vez obtenida la sala de ensayos, el archivo se guardó en formato *.stp*, el cual se puede exportar a *Abaqus* para realizar el siguiente paso, que es el mallado de la sala.

7.1.2. Abaqus.

Este programa genera un mallado de la estructura realizada en *SpaceClaim* en el formato *.inp*, el cual es aceptado por el software en el que se simula el transporte de la radiación (MCNP6). *Abaqus* crea un archivo *.txt* donde se recoge la información o la posición de cada uno de los nodos que forman parte de la malla, así como los elementos (tetraedros) asociando varios nodos. A partir de este archivo *.txt* con el programa *um_pre_op* comentado anteriormente, se crea el esqueleto del input MCNP6. A continuación, se observa en la *figura 31* el procedimiento a seguir:



Figura 31. Procedimiento de mallado en ABAQUS/CAE.

El primer paso para realizar el mallado no estructurado de la sala de ensayos consiste en **importar la geometría** en formato *.stp*.

El siguiente paso consiste en **generar las mallas**. El tipo de malla utilizada en este trabajo es el de malla no estructurada. Este tipo de malla hace uso de elementos de distinto clase o diferente tamaño para modelar geometrías difíciles y usar el número óptimo y necesario de elementos. En concreto, el tipo de malla elegida fue el de FIRST-ORDER TETRAHEDRA C3D4 ya que puede ajustarse a la geometría sin necesidad de realizar costosos cálculos.

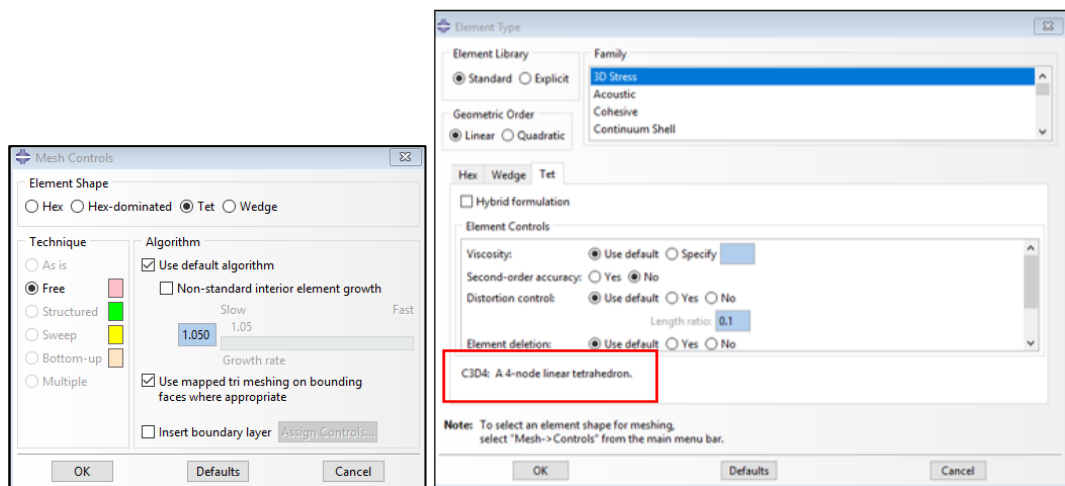


Figura 32. Opciones de mallado.

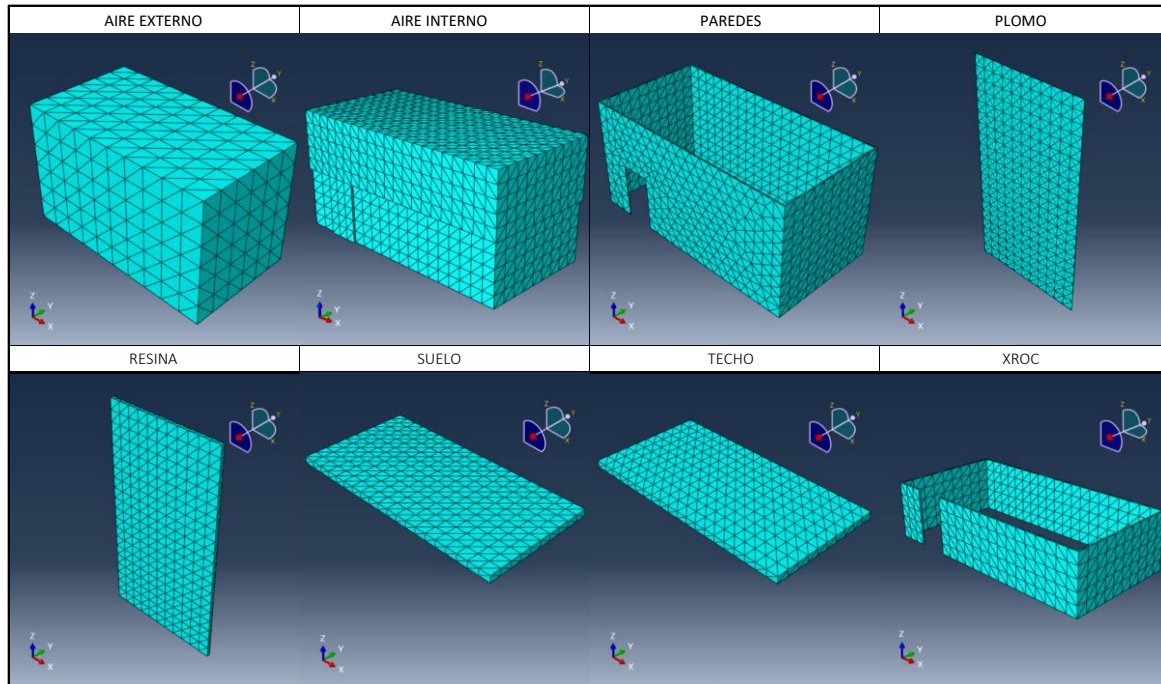


Figura 33. Generación del mallado.

Para la **generación de los materiales** se debe indicar la densidad de cada uno en g/cm^3 para que concuerde con la estructura requerida por el programa MCNP6 tal y como se observa en la *figura 34*.

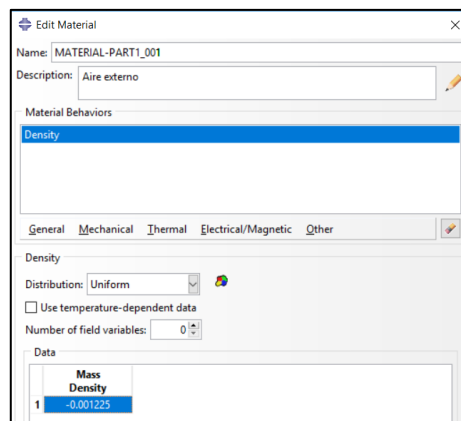


Figura 34. Definición del material y densidades.

Nombre	Material	Densidad g/cm^3
MATERIAL-PART1_001	Aire	-0.001225
MATERIAL-PART2_002	Aire	-0.001225
MATERIAL-PART3_003	Ladrillo	-1.2
MATERIAL-PART4_004	Plomo	-11.3
MATERIAL-PART5_005	Resina	-1.28
MATERIAL-PART6_006	Hormigón	-2.3
MATERIAL-PART7_007	Hormigón	-2.3
MATERIAL-PART8_008	XROC	-1.44

Tabla 6. Materiales en Abaqus.

A continuación, se deben **especificar los “elsets” (*element sets*)**. Para cada parte que conforma la sala de ensayos se deben crear dos *elsets* como mínimo, uno para el material y otro para la estadística.

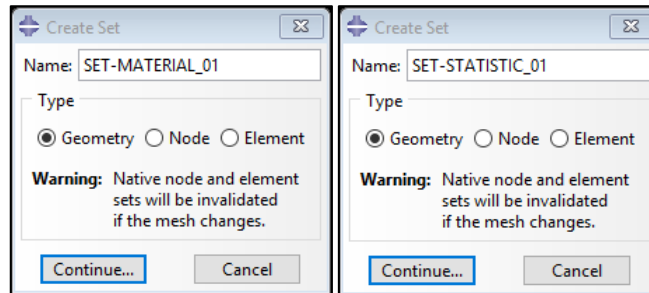


Figura 35. Definición de los Elsets: Material y Estadística.

Una vez generado el mallado de la geometría, **se genera el *assembly*** el cual consiste en la creación de *instances*, las cuales se unen en una misma geometría para que pueden ser vistas como un objeto compuesto.

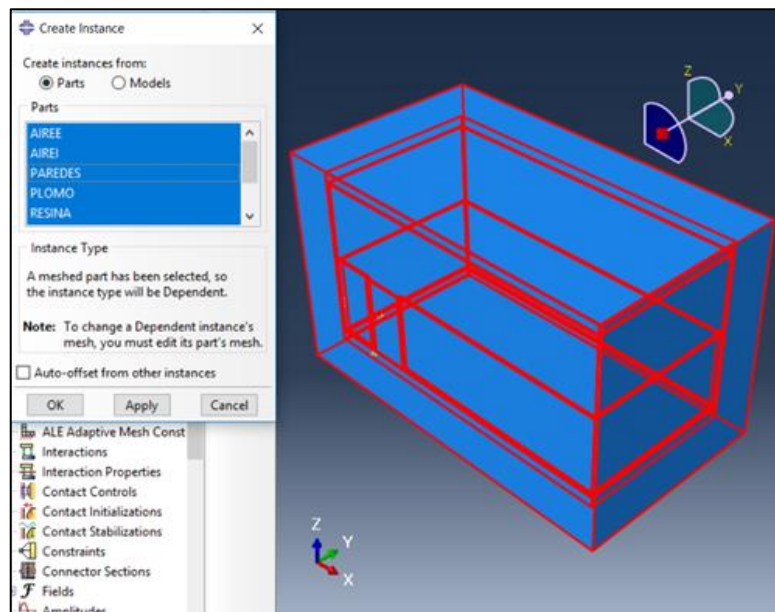


Figura 36. Generación del *assembly*.

Finalmente **se genera el archivo *ensayos.inp*** el cual se guarda toda la información de la geometría de la sala. La estructura del archivo es la siguiente:

```
*Heading
Sala de ensayos
** Job name: ensayos Model name: Model-1
** generated by: Abaqus/CAE 6.14-1
**Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=AIREE
*Node
1, 8.54759979, -0.5, -0.5
2, -0.5, -0.5, -0.5
3, -0.5, 4.5, -0.5
4, 8.54759979, 4.5, -0.5
5, -0.5, -0.5, 5.
6, -0.5, 4.5, 5.
7, 8.54759979, 4.5, 5.
8, 8.54759979, -0.5, 5.
9, 8.04759979, 0., 0.
10, 0., 0., 0.
11, 0., 0., 4.5
12, 8.04759979, 0., 4.5
13, 0., 4., 4.
14, 0., 4., 4.5
15, 8.04759979, 4., 4.5
16, 8.04759979, 4., 0.
17, 7.64283991, -0.5, -0.5
18, 6.73808002, -0.5, -0.5
19, 5.83331966, -0.5, -0.5
20, 4.92859978, -0.5, -0.5
21, 4.02379999, -0.5, -0.5

*Element, type=C3D4
1, 511, 503, 123, 226
2, 142, 510, 518, 266
3, 510, 266, 142, 265
4, 510, 502, 265, 143
5, 517, 256, 261, 509
6, 517, 510, 509, 261
7, 510, 509, 260, 502
8, 509, 508, 256, 255
9, 508, 501, 500, 255
10, 508, 250, 507, 251
11, 507, 506, 245, 499
12, 507, 250, 500, 499
13, 507, 245, 506, 246
14, 506, 505, 240, 498
15, 506, 505, 241, 240
16, 338, 427, 348, 339
17, 516, 515, 251, 508
18, 505, 504, 235, 497

** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=AIREE-1, part=AIREE
*End Instance
**
*Instance, name=AIREI-1, part=AIREI
*End Instance
**
*Instance, name=PAREDES-1, part=PAREDES
*End Instance
**
*Instance, name=PLOMO-1, part=PLOMO
*End Instance
**
*Instance, name=RESINA-1, part=RESINA
*End Instance
**
*Instance, name=SUELO-1, part=SUELO
*End Instance
**
*Instance, name=TECHO-1, part=TECHO
*End Instance
**
*Instance, name=XROC-1, part=XROC
*End Instance
**
*End Assembly
**

** MATERIALS
**
** Aire
*Material, name=MATERIAL-PART1_001
*Density
-0.001225,
**
** Aire
*Material, name=MATERIAL-PART2_002
*Density
-0.001225,
**
** Ladrillo
*Material, name=MATERIAL-PART2_003
*Density
1.2,
**
** Plomo
*Material, name=MATERIAL-PART2_004
*Density
-11.3,
**
** Resina
*Material, name=MATERIAL-PART2_005
*Density
-1.28,
**
** Hormigon
*Material, name=MATERIAL-PART2_006
*Density
-2.3,
**
** Hormigon
*Material, name=MATERIAL-PART2_007
*Density
2.3,
**
** XROC
*Material, name=MATERIAL-PART2_008
*Density
-1.44,

1531, 187, 479, 197, 188
1532, 402, 315, 314, 305
*nset, nset=SET-MATERIAL_01, generate
1, 518, 1
*Eset, elset=SET-MATERIAL_01, generate
1, 1532, 1
*nset, nset=SET-STATISTIC_01, generate
1, 518, 1
*Eset, elset=SET-STATISTIC_01, generate
1, 1532, 1
*Part, name=AIREI
**
*Node
1, 0.0399999991, 3.96000004, 4.25
2, 8.00759983, 3.96000004, 4.25
3, 8.00759983, 3.96000004, 2.25
4, 0.0399999991, 3.96000004, 2.25
5, 0.102499999, 0.102499999, 2.25
6, 0.102499999, 3.89750004, 2.25
7, 0.102499999, 3.89750004, 0.25
8, 0.102499999, 0.102499999, 0.25
9, 7.94509983, 3.89750004, 2.25
10, 7.94509983, 0.102499999, 2.25
11, 7.94509983, 0.102499999, 0.25
12, 7.94509983, 3.89750004, 0.25
13, 1.10000002, 0.102499999, 2.25
14, 1.10000002, 0.102499999, 0.25
15, 8.00759983, 0.0399999991, 4.25
16, 8.00759983, 0.0399999991, 2.25
17, 0.0399999991, 0.0399999991, 4.25
```

Figura 37. Fragmentos del archivo .inp.

En el archivo se encuentran todos los parámetros que definen la malla creada:

- Nombre de las partes definidas en *Abaqus/Cae*.
- Numeración y coordenadas de los nodos de cada parte.
- Tipo de elemento utilizado en cada parte: C3D4 y numeración de cada elemento junto con los nodos que forman cada uno de ellos.
- Los *elsets* creados para cada parte.
- Los “*Assembly*” y las “*Instance*”.
- Los materiales.

7.1.3. Unstructured mesh pre-operations (UM_PRE_OP).

Este programa, el cual está escrito en FORTRAN y está pensado para ser lanzado desde la línea de comandos, crea el esqueleto de la parte del input para MCNP6 correspondiente a la definición de la geometría.

A partir del archivo .inp de *Abaqus* se genera otro archivo con la estructura de un input de MCNP6, en el que la información completa del mallado queda resumida en una tarjeta de pseudo-celdas. La línea de comandos a introducir para realizar esta función es la siguiente:

um_pre_op_old – m – o archivo input archivo .inp

A continuación, se presenta un ejemplo del archivo generado:

```

Sala de ensayos
C
C Created from file   : ensayos.inp
C Created on        : 5-24-2019 @ 15:39: 7
C
C
C PSEUDO CELLS
1      1      -1.225000E-03  0  u=1
2      2      -1.225000E-03  0  u=1
3      3      -1.20000      0  u=1
4      4      -11.3000      0  u=1
5      5      -1.28000      0  u=1
6      6      -2.30000      0  u=1
7      7      -2.30000      0  u=1
8      8      -1.44000      0  u=1
9      0
C
C LEGACY CELLS
10     0          -99  fill=1
11     0           99
C
C SURFACES
99  sph  4.02380E+00  2.00000E+00  2.25000E+00  7.02561E+00
C
C DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=ensayos.eeout
      length= 1.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
C
C
C

```

Figura 38. Archivo inicial MCNP6.

En el siguiente apartado, se explicará la estructura que deben tener los parámetros del archivo input de MCNP6 para realizar la simulación.

7.2. MCNP6.

En el apartado anterior se ha conseguido diseñar y mallar en tres dimensiones la sala de ensayos de la dependencia de la IRA del ISYRIM. El programa *um_pre_op* nos ha proporcionado la base del archivo input de MCNP. El siguiente paso consiste en completar el archivo para simular el transporte y la interacción de la radiación electromagnética (fotones y electrones) con la materia. En concreto, para la realización de este trabajo se ha utilizado el código MCNP6.1.

El input de MCNP6 debe contener tres partes separadas por una línea en blanco: zona de implementación de celdas, zona de definición de superficies y zona de datos.

7.2.1. Zona de implementación de celdas.

En esta zona, se encuentra, en primer lugar, el nombre del título y algunos comentarios referentes al archivo *.inp* a partir del cual esta creado y la fecha. A continuación, se observa la definición de celdas (*pseudo y legacy cells*). En esta zona se definen las regiones del espacio y el material que contiene cada región.

```

Sala de ensayos
c
c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0      0 u=1 $ BACKGROUND
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0      0 u=1 $

```

Figura 39. Archivo MCNP6. Zona de implementación de celdas.

Las *pseudo cells* hacen referencia a cada una de las partes malladas con *Abaqus*. En este bloque se indica con el primer número, el número de celda asignado, en el siguiente el número de material que contiene la celda (este material está especificado en la tarjeta de material) y a continuación la densidad (escrita en negativo para indicar que la unidad es g/cm^3). Por otro lado, el valor 0 indica que las *pseudo cells* están constituidas por una superficie de valor 0 debido a que ya están definidas en el archivo *.inp*. El valor de U indica el universo al cual pertenecen las celdas o regiones, en este caso el valor es 1. En la celda *background* se especifica el material en donde se encuentra la geometría, el cual es el aire.

Las *legacy cells* hacen referencia a las celdas que contienen la geometría. En el input de este trabajo se definen dos celdas de este tipo, la 10 y la 11. Ambas celdas están definidas por la misma superficie (la 99, que se trata de una esfera). La 10 es la celda del interior de la esfera (por eso se escribe el signo negativo -99), cuyo material es el aire, y la celda 11 es el exterior de la esfera, sin ningún material, es decir, el vacío. Además, en la celda 10 se indica que esta debe llenarse con el universo 1, que son las celdas anteriores, de la 1 a la 9.

7.2.2. Zona de definición de superficies.

En este apartado indicamos el valor de las superficies creadas en la parte de *legacy cells*. Como se ha hecho uso de una esfera, se indican las coordenadas de su centro y el radio.

```

c SURFACES
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00

```

Figura 40. Archivo MCNP6. Zona de definición de superficies.

7.2.3. Zona de datos.

En este bloque se incluye todo lo relacionado con el tipo de partículas, la posición y las características de la fuente de radiación, descripción de materiales, el nivel de detalle de los modelos físicos de interacción de la radiación con la materia, las técnicas de reducción de varianza, la selección de las librerías de secciones eficaces, el tipo de resultado que se desea obtener y la condición de final de simulación. Para llevar a cabo esto, se utilizan diferentes funciones o líneas de comandos conocidas como tarjetas de entrada o *cards*.

El primer paso consiste en la **introducción de la malla**. La primera tarjeta o *data card* a introducir, la cual es obligatoria, es la tarjeta *EMBEDn* (*embedded geometry specification*). El valor que se da a la letra *n* hace referencia al universo en el cual se encuentra embebida la malla, en este caso el valor es 1. Esta tarjeta consta de cinco palabras clave y una opcional.

```
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=ensayos.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
```

Figura 41. Archivo MCNP6. Zona de datos. Introducción de la malla.

- Meshgeo: Indica el software en el que se ha creado la malla. Las dos posibles opciones son *Abaqus* o *Ink3dnt*.
- Mgeoin: nombre del archivo con extensión ("*.inp*").
- Meeout: Nombre del archivo de salida con extensión ("*.eeout*").
- Length (opcional): factor de conversión para modificar las dimensiones de la malla. En este caso se ha puesto el valor de 100 ya que en *Abaqus* el modelo es cien veces más pequeño que en la realidad.
- Background: Número de "*pseudo cell*" que sirve como "*background*".
- Matcell: $m_1 c_1 m_2 c_2 m_3 c_3 \dots m_i c_i$. Parejas de números enteros donde m_i son los números de "*pseudo-cell*" y c_i los números de "*pseudo-cell*" en MCNP6.

A continuación, se introducen otras *data cards*.

Definición de materiales

En este paso se especifican los materiales de los que está hecha la sala de ensayos de la siguiente forma:

```

c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000
c Xroc
m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985
c
    
```

Figura 42. Archivo MCNP6. Materiales.

En primer lugar, indicamos el material con m_i , donde i es el número que le identifica en el apartado de *pseudo cells*. A continuación, indicamos el número de los elementos químicos que lo componen y su fracción de peso. Gracias al documento “*Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modelling*” que proporciona el estándar de algunos materiales para el código MCNP6 se ha podido introducir fácilmente la estructura para el aire, ladrillo, plomo resina y hormigón (McConn Jr et al., 2011). En cuanto al material *Placo® X-Ray Protection*, no se dispone de los datos acerca de su composición exacta y el porcentaje que aporta cada componente. Debido a esto se ha decidido que los dos componentes mayoritarios aporten el 50% cada uno y sumar la parte correspondiente para cada elemento de la tabla periódica aportada por cada componente (Ver anexo 2.1).

Material	Nº en el <i>Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modelling</i>
Aire (<i>Air, Dry, Near Sea Level</i>)	4
Ladrillo (<i>Brick, Common Silica</i>)	46
Plomo (<i>Lead</i>)	171
Resina-Baquelita (<i>Bakelite</i>)	20
Hormigón (<i>Concrete, Portland</i>)	98
<i>Placo® X-Ray Protection (50% Barium Sulfate +50% Gypsum)</i>	22 y 149

Tabla 7. Identificación de materiales.

En la siguiente tabla se muestra la composición de cada material empleado:

	H(1)	C(6)	N(7)	O(8)	Na(11)	Mg(12)	Al(13)	Si(14)	S(16)	Ar(18)	K(19)	Ca(20)	Fe(26)	Ba(56)	Pb(82)
Ladrillo	X	X	X	0.525000	X	X	0.005000	0.449000	X	X	X	0.014000	0.007000	X	X
Plomo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1
Resina	0.057444	0.774589	0.167968	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hormigón	0.010000	0.001000	X	0.529107	0.016000	0.002000	0.033872	0.337021	X	X	0.013000	X	X	X	X
Xroc	0.011708	X	X	0.415892	X	X	X	X	0.1616605	X	X	0.1163985	X	0.29421	X
Aire	X	0.000124	0.75526	0.23178	X	X	X	X		0.012827	X	X	X	X	X

Tabla 8. Composición de materiales.

Especificación de la fuente

El siguiente apartado consiste en la **definición de la fuente**. Se trata de una fuente de fotones de energía de 150 kV. Para obtener la distribución del espectro de energía se recurre al uso del programa *Spektr3.0*, código que se puede ejecutar en *MatLab* y con el cual se puede realizar una simulación y obtener los valores que describen la física de radiación de un sistema de Rayos X.

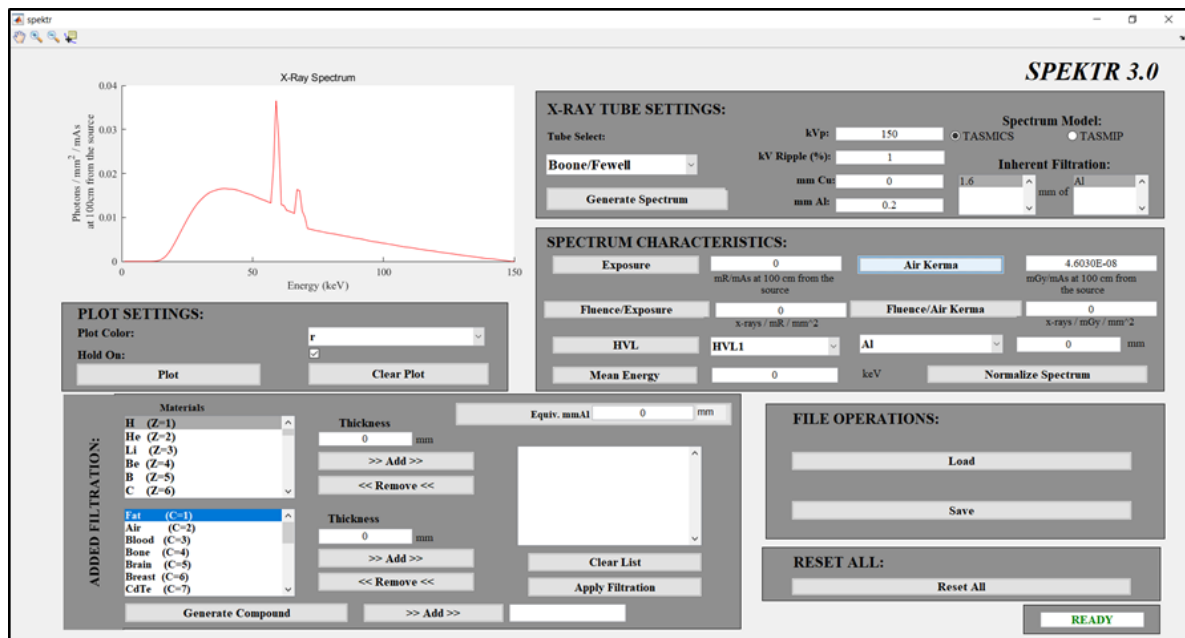


Figura 43. Interfaz de usuario SPEKTR 3.0.

Este programa permite obtener el espectro en valores de fluencia o normalizado (función de distribución de probabilidad). Se hará uso de los datos normalizados ya que son los que utiliza el código MCNP6. En el anexo 2.2 se encuentra la tabla de valores y las características de la simulación.

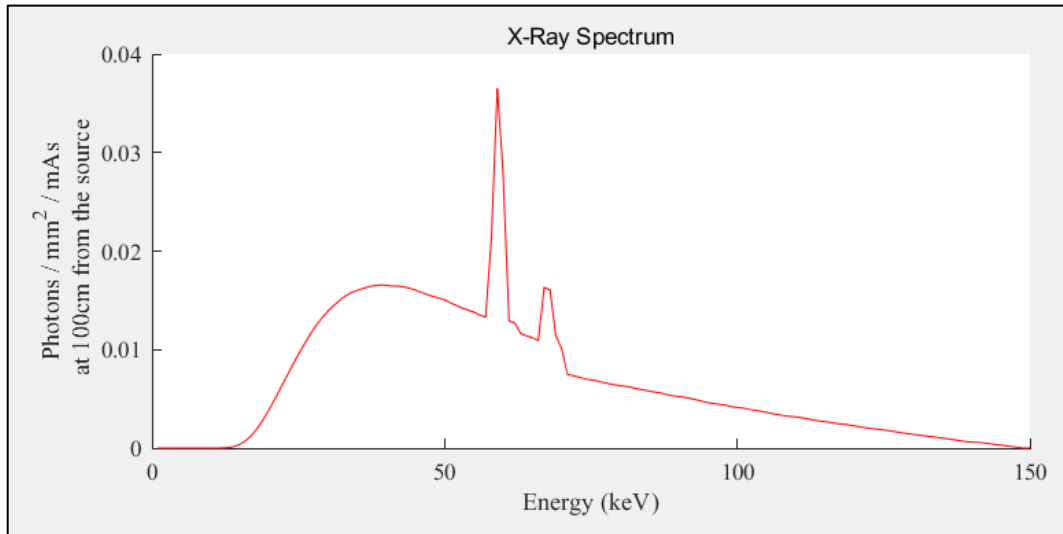


Figura 44. Espectro de fuente de Rayos X normalizado.

Una vez obtenido el archivo, se hace uso de la *card* SDEF para definir la fuente y sus características en el input MCNP6. En esta *card* se deben indicar los valores de las siguientes palabras clave:

- POS: La posición en la cual se localiza la fuente ($x z y$). En este proyecto se trata del lugar que ocupa el aparato de Rayos X en la sala de ensayos (unidades en cm): pos=402.38, 390, 225

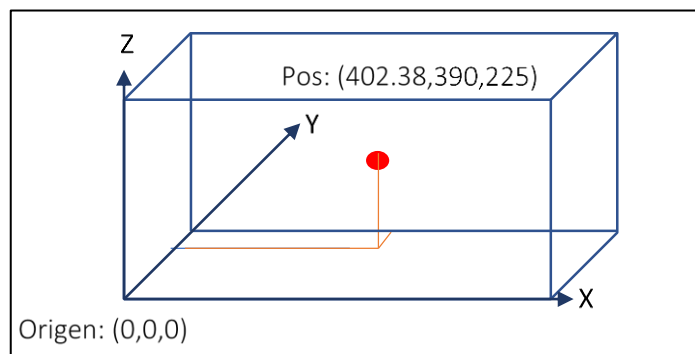


Figura 45. Representación de la posición de la fuente.

- PAR: Tipo de partícula que la fuente emite (2= fotones).
- ERG: Energía de la fuente. El parámetro d1 indica que se va a definir una distribución de probabilidades del espectro de la fuente que se ha obtenido anteriormente.
- SI1 (*Source Information*): Indica el valor de energía en MeV. Ponemos la letra L para indicar que son valores discretos de energía.
- SP1 (*Source Probability*): Indica la probabilidad para cada valor de energía. Con la letra D indicamos que se trata de probabilidades.
- VEC: Indica la dirección hacia la cual apunta la fuente. El objetivo es comprobar que los límites de dosis se cumplen, por lo tanto, es necesario simular situaciones desfavorables. Para ello se deben simular las tres situaciones desfavorables, las tres direcciones en las cuales puede dirigirse la fuente): abajo, derecha e izquierda.

- Abajo: (0,0,-1)
- Derecha: (-1,0,0)
- Izquierda: (1,0,0)

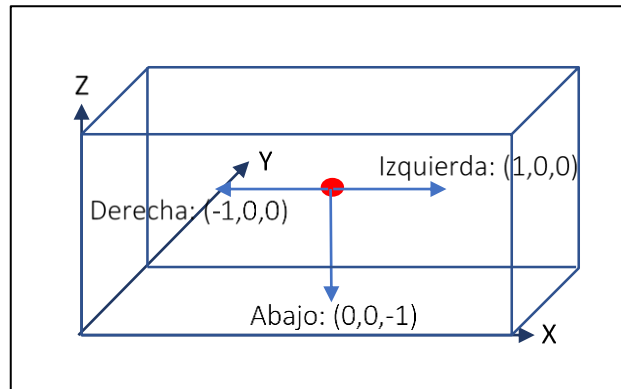


Figura 46. Representación de las direcciones desfavorables del haz.

- DIR: se refiere a la forma en la cual se dirigirá la fuente hacia la dirección indicada. En este caso no se dirige de forma constante sino en forma de pirámide rectangular, con lo cual haciendo uso de d2 se indica que sigue una distribución. Con SI2 indicamos el valor del coseno del ángulo que forma el haz con el eje principal.

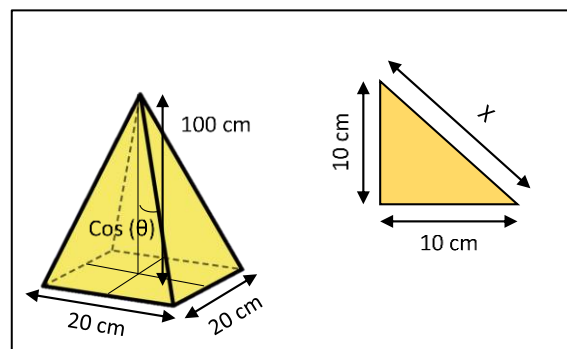


Figura 47. Representación de la geometría del haz.

$$x^2 = 10^2 + 10^2 \rightarrow x = \sqrt{100 + 100} = 10\sqrt{2} \quad (20)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{10\sqrt{2}}{100}\right) = 8.05 \rightarrow \cos(\theta) = 0.99 \quad (21)$$

```

c          <<<FUENTE>>>
SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=0 0 -1 dir=d2
SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
.....
SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
.....
5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
7.86E-05 4.54E-06 0
SI2 0.99 1
SP2 0 1
    
```

Figura 48. Archivo MCNP6. Definición de la fuente de Rayos X.

Definición de los *tallies*

En el siguiente apartado se indica el tipo de resultado que se quiere obtener de la simulación. Existen 8 tipos de *tally* o tarjetas de registro. Cada tarjeta se encarga de contar las contribuciones de cada historia o partícula producida durante la simulación ya que contribuyen al registro de ciertas magnitudes dosimétricas relacionadas con la corriente de partículas, el flujo y deposición de energía. A continuación, se presenta una tabla con los principales *tallies*. (El * significa que el resultado se multiplica por la energía de la partícula):

Nombre	Descripción del <i>tally</i>	Unidad Fn	Unidad *Fn
F1:N F1:P F1:E	Corriente integrada sobre una superficie	Partículas	MeV
F2:N F2:P F2:E	Flujo promediado en una superficie	Partículas/cm ²	MeV/cm ²
F4:N F4:P F4:E	Flujo promediado en una celda	Partículas/cm ²	MeV/cm ²
F5:N F5:P	Flujo en un punto o en un anillo detector	Partículas/cm ²	MeV/cm ²
F6:N F6:N,P F6:P	Energía media depositada en una celda	MeV/g	jerks/g
F7:N	Energía de fisión media depositada en una celda	MeV/g	jerks/g
F8:P F8:E F8:P,E	Distribución de pulsos de energía creados en un detector	Pulsos	MeV

Tabla 9. Descripción de *tallies*.

En este trabajo se hará uso del *tally* F4 con el objetivo de obtener el flujo y, con los correspondientes factores de conversión, la dosis promediada de partículas en una celda. Los resultados se recogerán mediante dos formas similares, las cuales se van a explicar a continuación:

Tarjeta FMESH

Esta tarjeta permite recoger la información en diversos puntos de la geometría a estudiar definiendo una malla superpuesta e indicando los puntos donde se realizará el recuento de partículas. Proporciona un archivo de salida independiente con nombre MESHTAL. Se obtendrá el flujo de partículas en un volumen **por partícula emitida** en unidades de partículas/cm²s.

```
c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)
FMESH14:p  GEOM=xyz      ORIGIN= -50 -50 -50
            IMESH= 855      IINTS= 181
            JMESH= 450      JINTS= 100
            KMESH= 500      KINTS= 110 out ij
FMESH24:e  GEOM=xyz      ORIGIN= -50 -50 -50
            IMESH= 855      IINTS= 181
            JMESH= 450      JINTS= 100
            KMESH= 500      KINTS= 110 out ij
```

Figura 49. Archivo MCNP6. Tarjeta de registro FMESH.

Se han utilizado dos tarjetas FMESH para registrar el flujo de partículas. Una para protones (FMESH14: p) y otra para electrones (FMESH14: e). El valor **GEOM** indica el tipo de geometría a utilizar para definir la malla, en este caso (X Y Z). El valor **ORIGIN** indica el origen en coordenadas x, y, z de la malla. Con **IMESH**, **JMESH**, **KMESH** se indica el valor final de la malla en cada eje de coordenadas y, con **IINTS**, **JINTS**, **KINTS** se especifica el número de puntos en los cuales se dividirá la malla. Finalmente, con **OUT** se indica el plano de salida de los datos. Para cada caso el plano de salida de los datos es el *ij*.

Se obtendrá como *output* o resultado un archivo *mest* en el cual la información está expresada en forma de matrices: una con los resultados del registro, es decir, los valores de dosis en cada celda y la segunda matriz con los errores relativos.

Conversión de flujo a dosis DE/DF

Interesa obtener la dosis por grupo de energía en lugar de fluencia. Debido a esto se hace necesario introducir la tarjeta de energía DE y la tarjeta de función de dosis DF que permiten la conversión de flujo a dosis en función de la energía.

```
de14 0.001      0.0015      0.002      0.003      0.003203 &
0.0032031     0.004      0.005      0.006      0.008 &
df14 3.606     1.7865     1.056     0.4875     0.4285614 &
0.47501973   0.31152   0.20135   0.14046   0.07936 &
           •     •     •
de24 0.01      0.0125     0.015     0.0175 &
0.02         0.025     0.03      0.035 &
df24 19.75935451 16.63858618 14.45263753 12.83226563 &
11.57586084  9.757385975 8.496080241 7.566546788 &
```

Figura 50 Archivo MCNP6. Tarjetas de conversión flujo a dosis DE/DF.

- Tarjeta de Energía (DE): con *den* indicamos en *n* el número de tally en el que se encuentra la tarjeta y luego los valores de energía en MeV. Por defecto, utiliza la interpolación logarítmica.

- Tarjeta de Función (DF): con dfn indicamos en n el número de tally en el que se encuentra la tarjeta. A continuación, indicamos los factores de conversión de flujo a dosis ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}/\text{g}$):
 - En el caso de fotones ($df14$) se hace uso de los coeficientes másicos de absorción lineal multiplicador por su energía.
 - En el caso de electrones ($df24$) se hace uso de los poderes de frenado.

Como resultado se obtiene dosis específica absorbida normalizada por segundo y por partícula emitida:

$$\frac{\text{partícula}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} (\text{partícula emitida}) \cdot \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} = \frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{s}} (\text{partícula emitida}) \quad (22)$$

Sin embargo, interesa obtener los resultados en unidades de Gy (J/kg). Para ello los coeficientes másicos de absorción lineal se multiplican por el factor de conversión de MeV/g a J/kg para obtener el valor del registro de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\text{partícula}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} (\text{partícula emitida}) \cdot \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 1,60218 \cdot 10^{-10} \frac{\text{J} \cdot \text{g}}{\text{MeV} \cdot \text{kg}} = \\ = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{s}} (\text{partícula emitida}) = \frac{\text{Gy}}{\text{s}} (\text{partícula emitida}) \end{aligned} \quad (23)$$

Para obtener estos valores se ha utilizado el programa *radiological Toolbox*, el cual nos permite obtener los coeficientes másicos de absorción para fotones y el poder de frenado para electrones en diferentes compuestos o tejidos. En este caso se han obtenido para el aire. Los valores y su conversión a Gy se encuentran adjuntados en el apartado de anexos (*Ver anexo 2.3*).

Conversión de flujo a dosis EMBEB/EMBEM

Las siguientes tarjetas son opcionales y sirven para realizar la conversión de flujo a dosis en caso de tratarse los resultados de malla de manera que los resultados de MCNP6 estén directamente en unidades de dosis ($\text{partícula}\cdot\text{MeV}/\text{g}$) en lugar de fluencia ($\#/ \text{cm}^2$).

<<<CONVERSION DE FLUJO A DOSIS (AIRE-FOTONES)>>>					
embec14:p embed=1					
embec14	0.001	0.0015	0.002	0.003	0.003203 &
	0.0032031	0.004	0.005	0.006	0.008 &
	0.01	0.015	0.02	0.03	0.04 &
embem14 3.606					
	1.7865	1.056	0.4875	0.4285614 &	
	0.47501973	0.31152	0.20135	0.14046	0.07936 &
	0.0512	0.02421	0.015562	0.010614	0.00994 &
	0.0104	0.011244	0.013304	0.01541	0.02034 &
	0.02468	0.03204	0.038196	0.043555	0.04833 &
	0.056592	0.06359	0.06430424	0.0710875	0.077625 &
	0.08896	0.08891226	0.10742	0.1222	0.12755 &

Figura 51 Archivo MCNP6. Conversión flujo-dosis en aire fotones.

La tarjeta *EMBEEn : p* (*embedded elemental edits control card*), indica con “n” el número de registro. El segundo número indica el tipo de *tally*, que puede ser 4,6 o 7. Se emplea el *tally* 4 que proporciona el flujo medio sobre cada elemento de la malla de la parte que se indique, en unidades

de $\#/cm^2$. Esta tarjeta tiene como palabra clave obligatoria “*embed*” para señalar el número de universo en el que está en embebida la malla. El término “*p*” define el tipo de partícula, en este caso, fotones.

Las dos siguientes tarjetas utilizan el mismo número de registro que EMBEE y luego son seguidas por una serie de números. En la tarjeta EMBEB los números son energías monótonamente crecientes en unidades de MeV, y en la tarjeta EMBEM se trata de factores multiplicadores para cada energía, que en el caso de los fotones son los coeficientes másicos de absorción lineal de energía cuyas unidades son cm^2/g multiplicados por su energía y expresados en $(J\ cm^2/kg)$.

Modelado de la física del transporte

En este apartado se indican las características relativas a la simulación:

- Mode P E: Con esta opción se indica qué se quiere registrar. En este caso el valor P E indica que se quiere registrar la trayectoria de fotones (P) y electrones (E).
- Para las reacciones con fotones se hace necesario el modelo de la física fotonuclear cuya descripción se hace con la instrucción PHYS:P, que lleva implícito el transporte detallado de fotones.

La instrucción se detalla según la siguiente estructura:

PHYS:P EMCPF IDES NOCOH PNINT NOPOD

El valor EMCPF indica el límite superior de energía para el cual se utilizará un modelo detallado, en este caso 0.2 MeV. Valores de energía superiores seguirán un tratamiento más simple.

El valor IDES controla la generación de electrones por fotones en simulaciones con MODE E

El valor NOCOH indica si se controla la dispersión coherente (0) o no (1).

El valor PNINT controla la producción fotonuclear por partícula. Con los valores -1/0/1 se indica si las interacciones fotonucleares son usadas de manera análoga y si son o no utilizadas.

El valor NOPOD permite la inclusión del ensanchamiento Doppler en energías debido a la velocidad de los electrones ligados

Con lo cual la física elegida ha sido la siguiente:

PHYS:P 0.2 0 0

Donde se indica que se cortará a partir de la energía 0.2 MeV, se controlará la generación de electrones por fotones y se tendrá en cuenta la dispersión coherente.

- CUTe: Con este valor se tiene en cuenta un corte para electrones. Esta entrada tiene la siguiente forma: (1j y 3j introduce los valores por defecto, y 0,01 hace referencia a 10keV). Con esto se indica que no se tendrá en cuenta los electrones que lleven una energía inferior a 10 keV.
- Cuando en el código se introducen *tallies*, es necesario utilizar el parámetro PRDMP en el cual especifica que cada $1E+06$ historias se imprimen los recuentos, por si hubiera un fallo en la ejecución y así no perder toda la información generada. El valor -1 que cada *dump* o volcado de información se realiza en un archivo RUNTPE cada minuto de tiempo de computación. El valor 1 indica que se escribirá el archivo MCTAL al finalizar la simulación. El valor 2 controla el tamaño del archivo RUNTPE, con el valor indicamos que solo queremos los 2 últimos *dumps* en dicho archivo.
- IMP:p,e. Finalmente se establece la importancia de los fotones y electrones en cada parte, señalando que en la primera parte tienen una importancia 10, al igual que en las 7 siguientes

partes. Pero, en la última parte, que es la zona fuera de la esfera, las partículas pasan a tener una importancia 0, de forma que no es necesario saber lo que lo que ocurre con ellas.

- La tarjeta NPS establece el intervalo de historias de partículas para las que se mostrarán los eventos. Un valor único produce eventos filtrados sólo para el historial especificado. En nuestro caso NPS 10E+06, por tanto, se escriben 10E+06 eventos.

```

c                                <<<DATA CARDS>>>
MODE p e
PHYS:P 0.2 0 0
CUT:E 1J 0.01 3J
c
PRDMP 1E+6 -1 1 2 0
c
imp:p 10 9r 0          $ 1,5f
imp:e 10 9r 0
NPS 10E+06

```

Figura 52 Archivo MCNP. Modelado del transporte.

7.3. EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.

Para llevar a cabo la simulación se ha hecho uso del servidor *Quasar* que dispone el grupo de investigación ISIRYM, el cual consta de 5 nodos, con 150 CPUs y tiene instalado el código MCNP6. Esto ha permitido realizar los cálculos mediante protocolos que emplean varios procesadores en paralelo, lo cual supone una disminución del tiempo de cálculo.

Una vez se ha completado el input de MCNP6, este se ejecuta introduciendo la siguiente función en la ventana de comandos:

```
Nohup mpirun -np 15 mcnp61_100_000_upv.mpi inp=archivoinp out=archivosalida
```

Con esto indicamos que se van a utilizar 15 procesadores, el nombre del archivo de entrada es *archivoinp* y el nombre del archivo de salida es *archivosalida*.

7.4. OUTPUTS.

Cuando finaliza una simulación con MCNP6.1 se obtienen una serie de archivos. De esto archivos los más destacados y de los cuales se hará uso son:

- *Out:* (por defecto) en este archivo se produce el volcado de información y errores, respecto a cómo ha evolucionado la simulación.
- *Meshtal:* en este archivo se encuentran almacenados los resultados de flujo o dosis si se han usado factores de conversión en cada voxel definido por el tally. Este archivo puede tratarse posteriormente mediante el programa FMESH2VTK para convertirlo en formato *.vtk* y ser visualizado con PARAVIEW.
- *eeout:* en este archivo se recogen los resultados correspondientes a los elementos de malla. De igual manera que el meshtal almacena los resultados de flujo o dosis en cada una de las celdas o elementos definidos por la malla. Este archivo puede tratarse posteriormente mediante el programa UM_POST_OP para convertirlo en formato *.vtk* y ser visualizado con PARAVIEW.

Cabe destacar que para cada simulación (abajo, derecha e izquierda) se obtendrán 2 archivos de interés: *meshtal* y *eeout*.

7.5. CONVERSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Para poder visualizar los resultados y hacer una correcta interpretación de los mismo se ha hecho uso de programas que preparan los ficheros obtenidos para ser visualizados en PARAVIEW.

7.5.1. Programa FMESH2VTK.

El código FMESH2VTK programado en entorno MATLAB permite la conversión del archivo *meshtal* al formato adecuado para su posterior visualización con extensión (.vtk). Este paso se realiza en la ventana de comandos donde en primer lugar se indica el plano de salida de los datos (*ij*), el nombre del archivo *meshtal*, el número de *tallys* a convertir y si se desea sumarlos, en caso de tener más de uno definido. Se ha indicado que sí, ya que se quiere tener en cuenta la contribución de los dos *tallys* definidos para fotones y electrones. Este proceso se realizará para cada archivo *meshtal* obtenido en cada dirección.

```
[cursos@quasar abajo]$ FMESH2VTK
INDICA EL MODO "OUT" DEL TALLY A TRANSFORMAR (Ej: ij, ik, jk o sin):
ij
Indique el nombre del archivo meshtal a convertir:
mes_abajo
Indique el numero de tallys en el archivo meshtal a convertir:
2
REALIZANDO CONVERSION
(Para sumar los tallys todos deben tener las mismas fronteras)
Quieres sumar los tallys?:
si
>> FIN
Author: Sergio Morato Rafet
Email: smorato@iqn.upv.es
Universitat Politècnica de Valencia
ISIRYM (INSTITUTO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL RADIOFISICA Y MEDIOAMBIENTAL)
Cami de Vera s/n. 46022. Valencia
2016
```

Figura 53. Programa FMESH2VTK.

7.5.2. Programa UM_POST_OP.

El programa *um_post_op* (*unstructured mesh post operations*) permite la manipulación del archivo *.eeout*. Está escrito en FORTRAN y entre sus funciones, la que utilizamos es aquella que se encarga de juntar múltiples archivos *.eeout* en uno y generar el archivo de visualización ".vtk". La línea de comandos a introducir para esta función es la siguiente:

um_post_op -vtk -o visual.vtk archivo.eeout

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

8.1. PARAVIEW.

Este programa permite analizar de forma visual los resultados. En una primera aproximación se tiene la sala de ensayos mallada (*figura 54*) y la distribución de la dosis por partícula emitida tanto en la geometría creada con *SpaceClaim* y mallada con *Abaqus* como el volumen definido en MCNP6 para el registro de los *tallies* *figura (55)*.

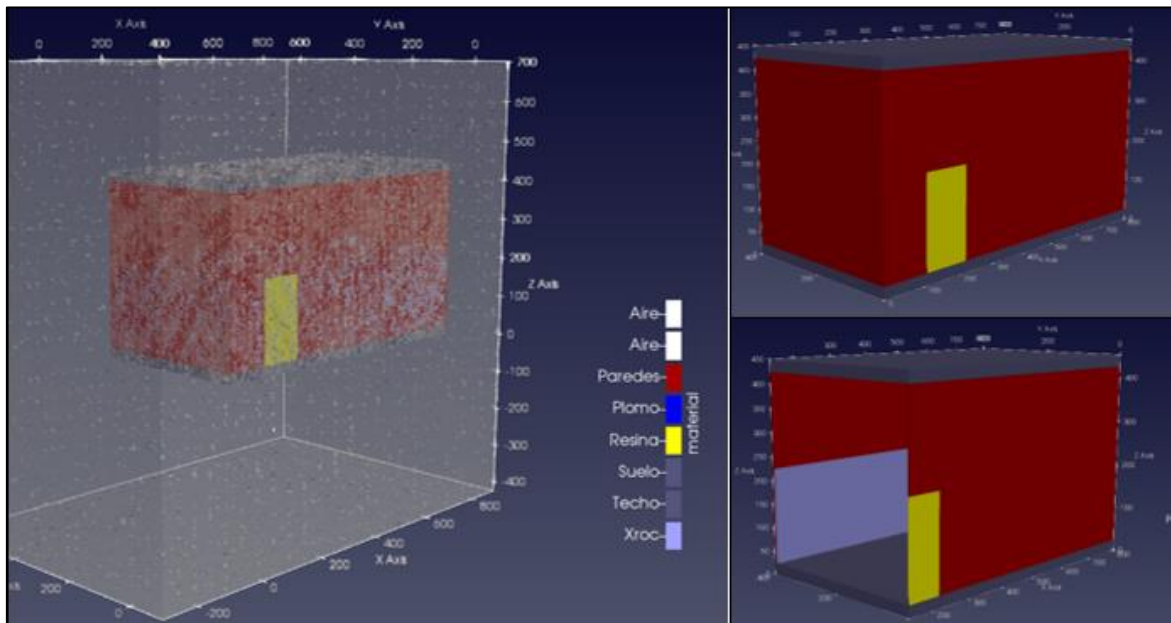


Figura 54. Sala de ensayos 3D. PARAVIEW.

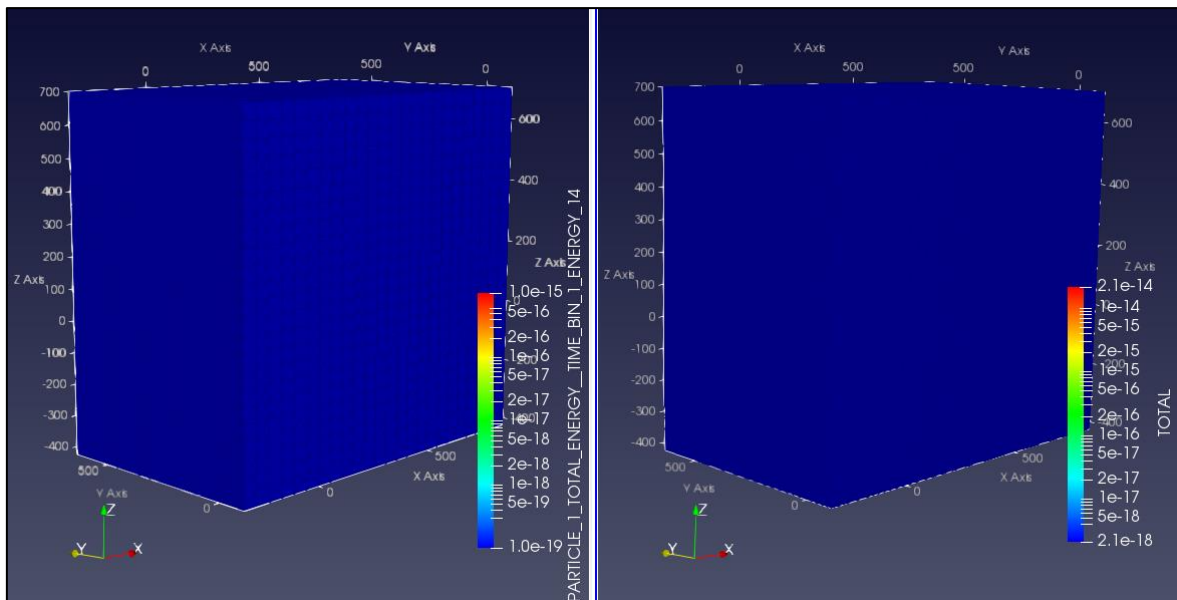


Figura 55. Geometría creada con Abaqus (izquierda) y volumen definido en MCNP6 con FMESH (derecha).

Para una mejor interpretación de estos, se compararán cortes de los resultados de los dos archivos tratados (*meshtal* y *eeout*) para analizar la dosis que recibe la estructura de la sala de ensayos y la dosis que hay dispersa en el aire.

Analizaremos los resultados que se han obtenido en las distintas orientaciones simuladas.

8.1.1. Haz primario que incide sobre el suelo de la sala de ensayos.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la finalidad de este trabajo es ver que los blindajes de la sala de ensayos cumplen correctamente con su función.

En la *figura 56* se puede observar la distribución de la dosis de fotones y electrones en el aire de la sala y en las estructuras de esta. **Es necesario tener en cuenta que este resultado se corresponde con la tasa de dosis por partícula emitida**, lo que hace necesario un tratamiento de la información posterior para obtener resultados que se puedan comparar con los expuestos en la normativa.

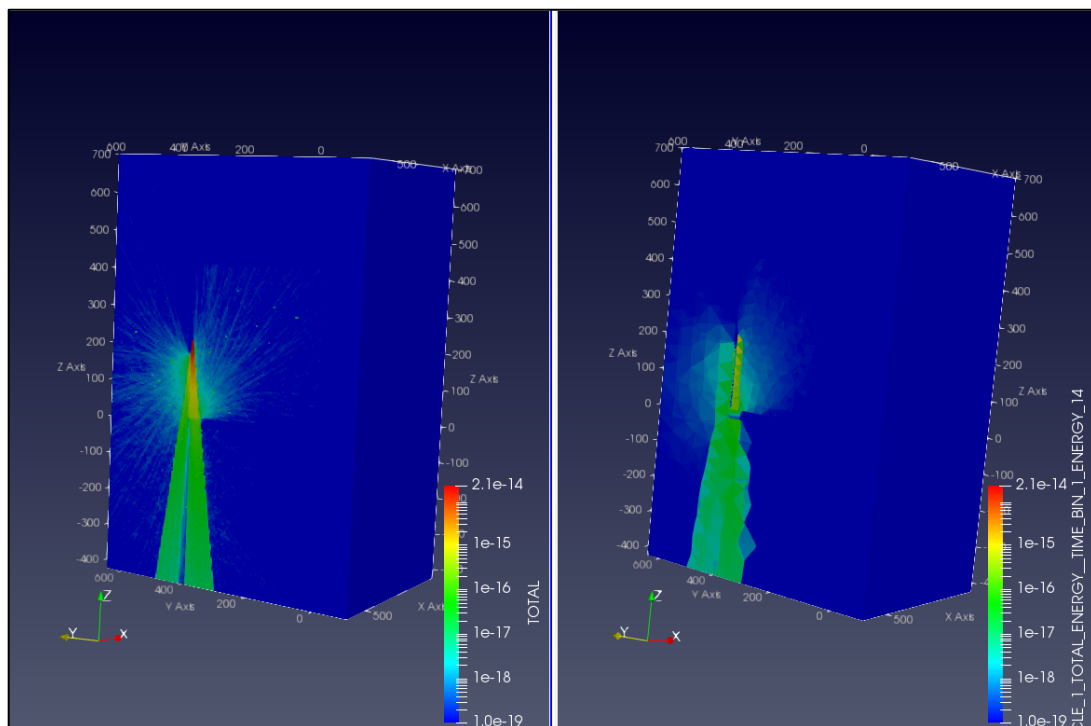


Figura 56. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). ABAJO.

Como se puede observar la distribución de la tasa de dosis por partícula emitida es similar en ambos archivos. La diferencia en los resultados se debe al tamaño de malla escogido durante el proceso de mallado y a que el MCNP6 presenta problemas en la simulación de la contribución de electrones en geometría mallada y por lo tanto no se ha tenido en cuenta su contribución a la dosis (archivo *.eeout*).

El siguiente paso consiste en obtener el número de partículas totales emitidas para obtener la tasa de dosis absoluta. Para obtener este valor es necesario tener todos los datos normalizados y referidos a un metro de distancia. Si se hace uso de los valores aportados por el simulador de espectros y los datos aportados por la ficha técnica del tubo de Rayos X se puede saber la **dosis**

absoluta que existe a un metro de distancia a máxima intensidad en un segundo (interesa situación desfavorable).

X-Ray Tube Current:
0.1mA to 1.2mA, 192W maximum over specified tube voltage range

Figura 57. Especificaciones del tubo ficha técnica.

X-RAY TUBE SETTINGS:			
Tube Select:	kVp: 150	Spectrum Model: <input checked="" type="radio"/> TASMICS <input type="radio"/> TASMIP	
Boone/Fewell	kV Ripple (%): 1	Inherent Filtration:	
Generate Spectrum	mm Cu: 0	1.6	mm of Al
	mm Al: 0.2		
SPECTRUM CHARACTERISTICS:			
Exposure	0	Air Kerma	2.2775E-01
	mR/mAs at 100 cm from the source		mGy/mAs at 100 cm from the source
Fluence/Exposure	0	Fluence/Air Kerma	26103548
	x-rays / mR / mm ²		x-rays / mGy / mm ²
HVL	HVL1	Al	0
			mm
Mean Energy	59.3943	keV	Normalize Spectrum

Figura 58. Características del espectro del tubo de Rayos X.

$$\frac{2.2775 \cdot 10^{-1} \text{ mGy}}{\text{mA} \cdot \text{s}} \cdot 1.2 \text{ mA} \cdot 1 \text{ s} = 0.2733 \text{ mGy} \cdot \frac{1 \text{ Gy}}{1000 \text{ mGy}} = 2.733 \cdot 10^{-4} \text{ Gy} \quad (24)$$

Por otro lado, con MCNP6 es posible conseguir la tasa de dosis por partícula emitida, en cualquier volumen y a cualquier distancia. Haciendo el cociente entre estos dos valores se podrá conseguir el número de partículas totales y modificar el primer resultado con el objetivo de conseguir la tasa de dosis absoluta. Para conseguir el valor de la tasa de dosis por partícula emitida a un metro de distancia y en un volumen de 1mm³, se ha realizado otro input en el cual se han modificado las tarjetas FMESH indicando que el volumen de interés se encuentra a 1 metro de la fuente y es de 1 mm³ (figura 60). Esto se ha hecho así ya que la distribución de probabilidades del espectro tiene las unidades que se pueden observar en la figura 59. Las modificaciones para la dirección derecha e izquierda se pueden consultar en el apartado de anexos.

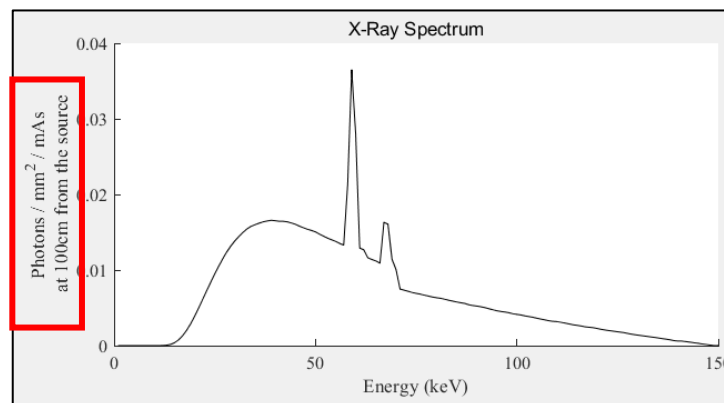


Figura 59. Espectro normalizado de la fuente de Rayos X.

```

c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)
FMESH14:p   GEOM=xyz      ORIGIN= 402.38 390 125
            IMESH= 402.48    IINTS= 1
            JMESH= 390.1     JINTS= 1
            KMESH= 125.1     KINTS= 1 out ij
FMESH24:e   GEOM=xyz      ORIGIN= 402.38 390 125
            IMESH= 402.48    IINTS= 1
            JMESH= 390.1     JINTS= 1
            KMESH= 125.1     KINTS= 1 out ij
    
```

Figura 60. Archivo MCNP6. Obtención de la tasa de dosis a un metro de distancia en un mm³ por partícula emitida.

En esta simulación no es importante obtener archivos *.eeout* ni archivos *.vtk* sino conocer el valor en el archivo *meshtal*. Para esta simulación, el valor obtenido a 1 m de distancia en un volumen de 1 mm³ es 3.35194E-15 Gy/s por partícula emitida.

Por lo tanto, se tiene que el número de partículas total emitidas es:

$$\frac{2.773 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}}{3.35194 \cdot 10^{-15} \text{ Gy}} = 8.153487234 \cdot 10^{10} \text{ particulas} \quad (25)$$

Una vez obtenido el número de partículas totales modificamos los archivos *.vtk* para obtener la tasa de dosis total.

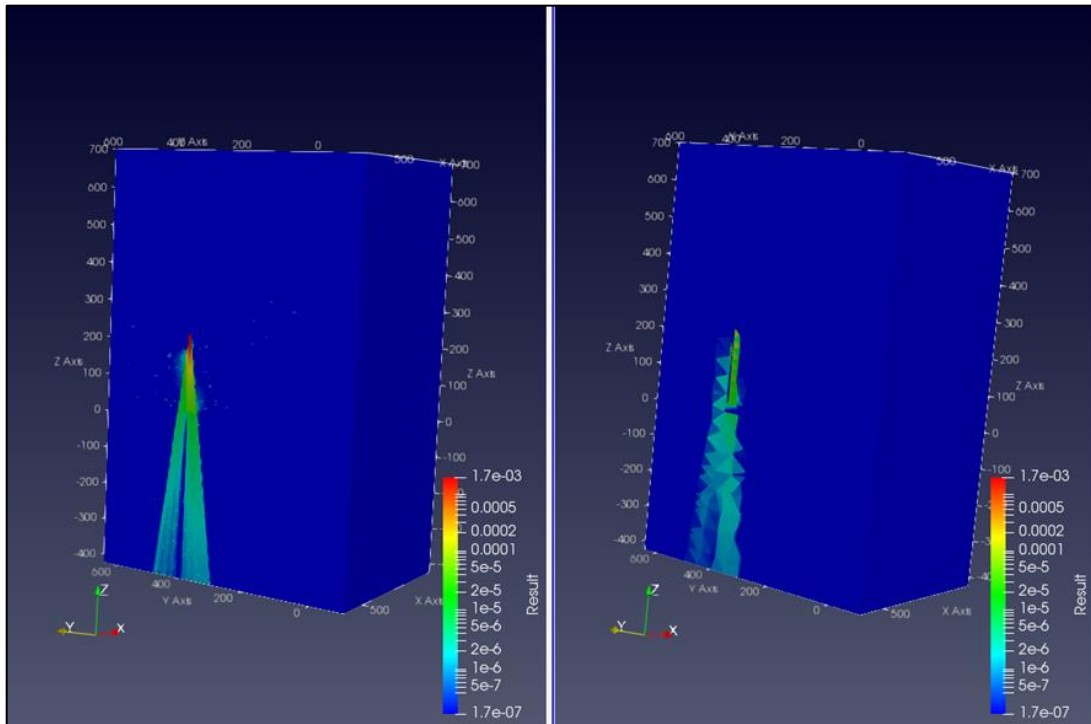


Figura 61. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y *.eeout* (derecha). ABAJO.

En la siguiente tabla figuran los datos más relevantes de la ejecución:

Datos ejecución	
Versión	MCNP6.1
Tiempo de ejecución total	93.38 min
Nº Procesadores	21
Tiempo de ejecución por procesador	4.45 min
Nº Partículas	10·10 ⁶

Tabla 10. Datos de ejecución haz hacia abajo.

8.1.2. Haz primario que incide sobre la pared derecha de la sala de ensayos.

En esta simulación, la dirección del haz del tubo se ha orientado hacia la derecha con el fin de obtener la distribución de dosis en esta parte de la sala. Siguiendo el mismo razonamiento anterior se han obtenido los siguientes resultados:

Distribuciones de tasa de dosis por partícula emitida:

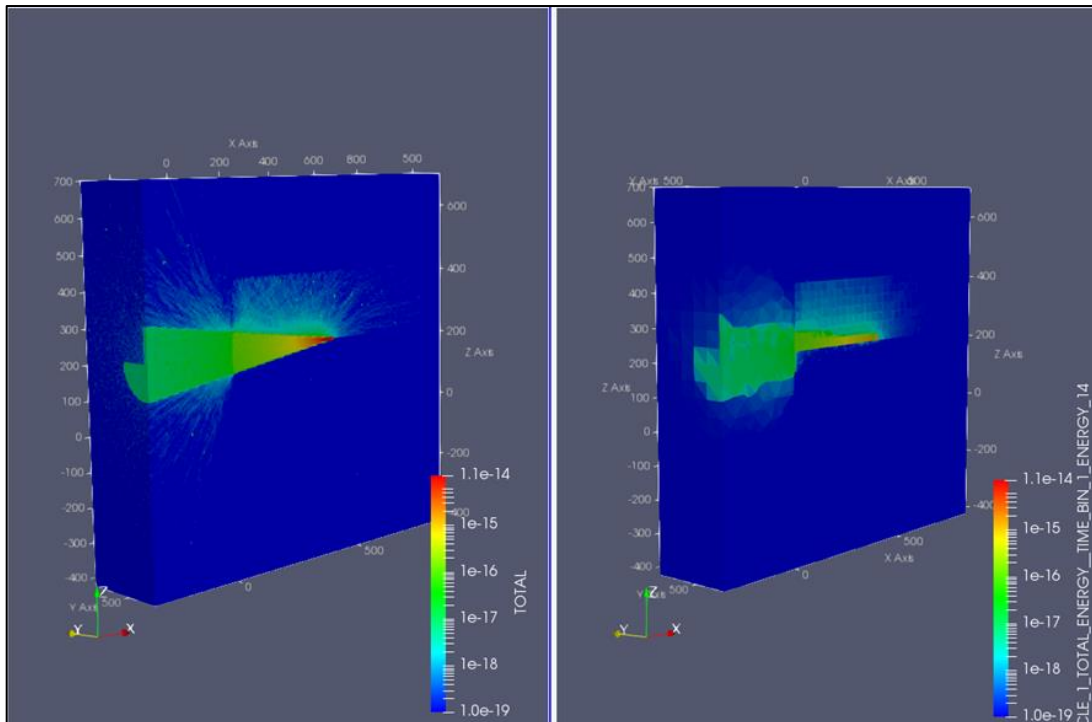


Figura 62. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). DERECHA.

Cálculo del total de partículas emitidas:

$$\frac{2.773 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}}{3.32116 \cdot 10^{-15} \text{ Gy}} = 8.349492346 \cdot 10^{10} \text{ particulas} \quad (26)$$

Distribuciones de tasa de dosis total:

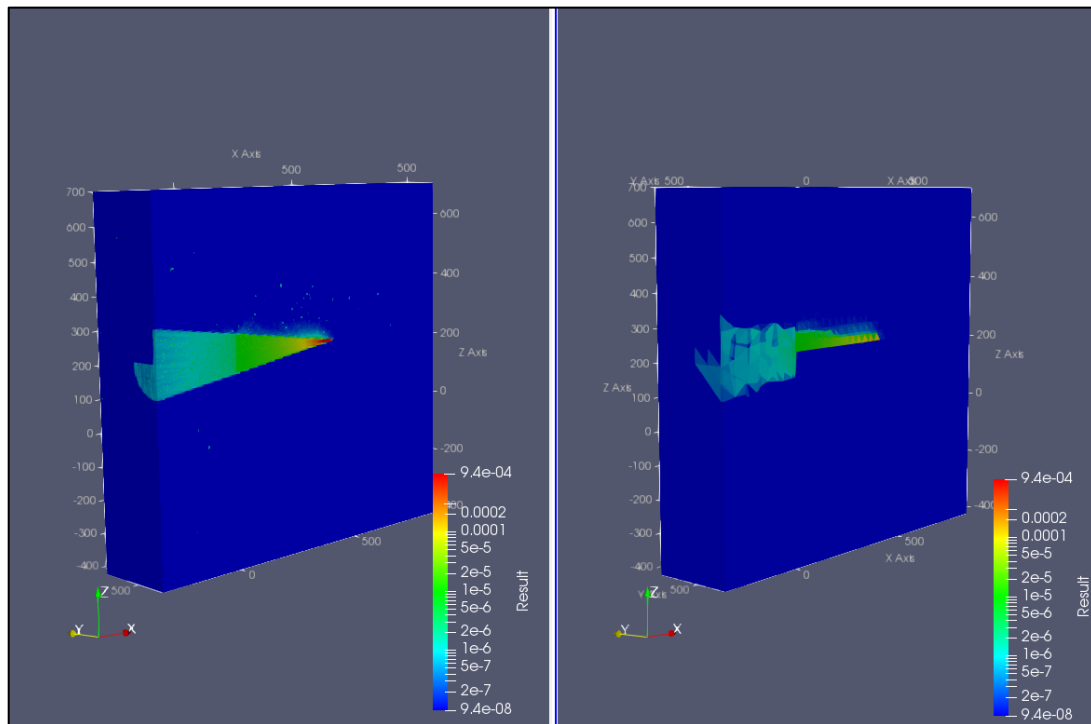


Figura 63. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). DERECHA.

En la siguiente tabla recogemos los datos más importantes de esta simulación:

Datos ejecución	
Versión	MCNP6.1
Tiempo de ejecución total	109.17 min
Nº Procesadores	21
Tiempo de ejecución por procesador	5.19 min
Nº Partículas	$10 \cdot 10^6$

Tabla 11. Datos de ejecución haz hacia la derecha.

8.1.3. Haz primario que incide sobre la pared izquierda de la sala de ensayos.

En esta simulación, la dirección del haz del tubo se ha orientado hacia la izquierda con el fin de obtener la distribución de dosis en esta parte de la sala. Siguiendo el mismo razonamiento anterior se han obtenido los siguientes resultados:

Distribuciones de tasa de dosis por partícula emitida:

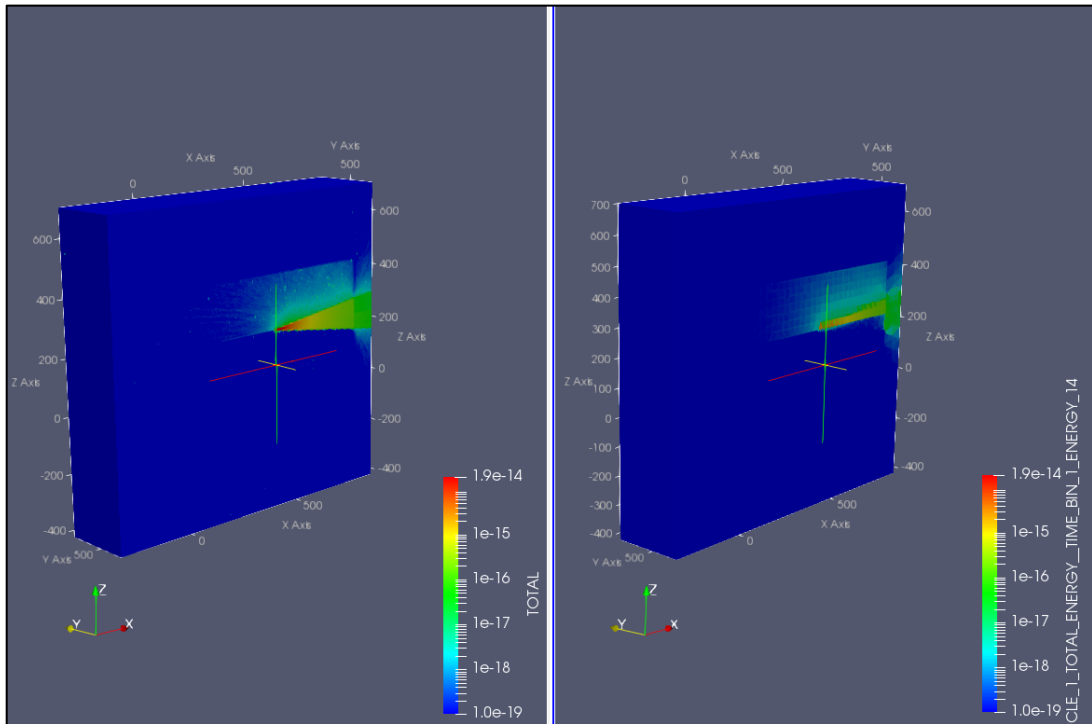


Figura 64. Distribución de dosis por partícula emitida FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). IZQUIERDA.

Cálculo del total de partículas emitidas:

$$\frac{2.773 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}}{2.80029 \cdot 10^{-15} \text{ Gy}} = 9.902545808 \cdot 10^{10} \text{ particulas} \quad (27)$$

Distribuciones de tasa de dosis total:

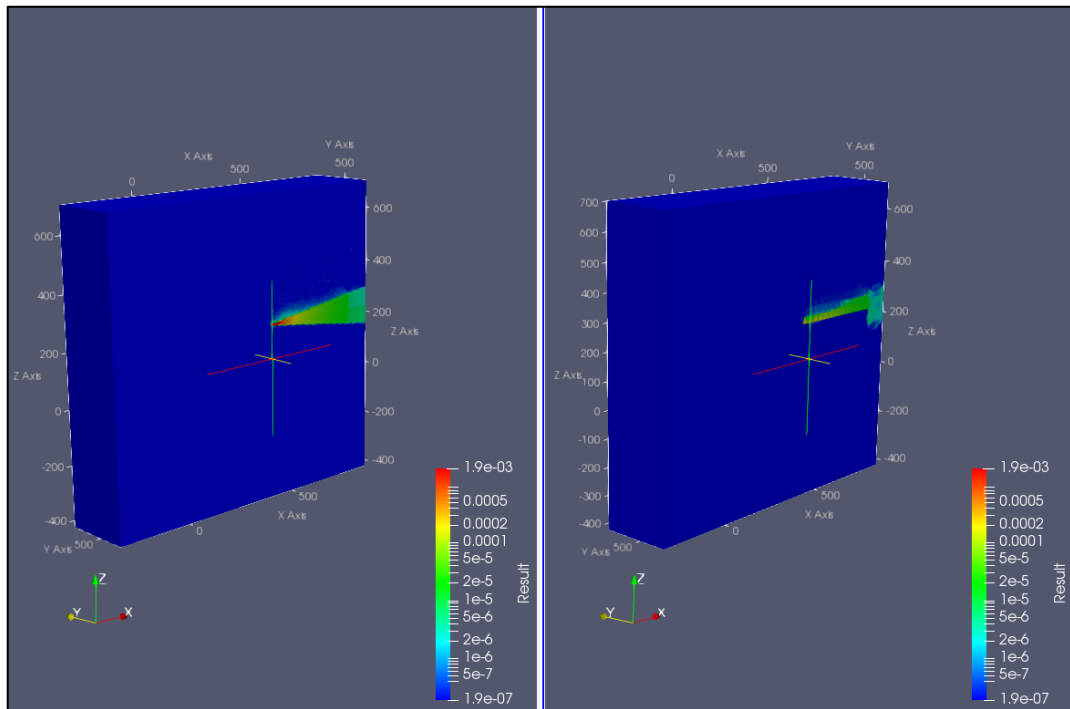


Figura 65. Tasa de dosis absoluta FMESH (izquierda) y .eeout (derecha). IZQUIERDA

En la siguiente tabla recogemos los datos más importantes de esta simulación:

Datos ejecución	
Versión	MCNP6.1
Tiempo de ejecución total	389.28 min
Nº Procesadores	21
Tiempo de ejecución por procesador	18.53in
Nº Partículas	10·10 ⁶

Tabla 12. Datos de ejecución haz hacia la izquierda.

8.2. VALIDACIÓN.

En el anterior apartado se ha conseguido obtener los resultados en valores de tasa de dosis absoluta. En el apartado de validación se debe obtener resultados que se puedan comparar con la normativa existente. Es necesario obtener los valores de dosis equivalentes **H** y compararlos con los existentes en la memoria de la dependencia proporcionada por el ISIRYM en la cual se encuentran los valores de dosis equivalente para un blindaje de 2 mm de plomo y 25 cm de hormigón, ya que este era el material de blindaje que se tenía pensado usar en un principio.

Los valores de dosis equivalentes se calcularán según el tipo de radiación: dispersa directa y de fuga. En este sentido es necesario conocer la carga de trabajo de la instalación, el factor de ocupación, los espesores de semirreducción para el *Placo*[®] y el hormigón y, las distancias dónde se quieren obtener los valores de dosis equivalente, tal y como se ha comentado en apartados anteriores.

Para obtener los espesores de semirreducción del *Placo*[®] se ha hecho uso de la ficha técnica del producto donde indica a cuanto equivale una plancha de este material en mm de plomo y en función del voltaje aplicado. Con esto obtenemos que para 62.5 mm de placo que son 5 placas de 12.5 mm el espesor de plomo equivalente para un voltaje de 150 kV es 2.25 mm *figura 66*.

PROTECCION FRENTE A LOS RAYOS-X							
La placa XRoc ha sido ensayada en base al Estándar Internacional y certificada por el Radiation Metrology Group of Public Health England para su comportamiento en equivalencia al plomo de acuerdo a la IEC 61331-1:2014.							
La equivalencia de una placa en cuanto a su comportamiento comparado con el plomo se detalla en la tabla siguiente:							
Potencia de la máquina de rayos-X (kV)	60	70	80	90	100	125	150
Equivalencia de grosor en plomo (mm)	0.46	0.63	0.75	0.76	0.71	0.54	0.45

Figura 66. Equivalencias Placo y plomo («FICHA DE PRODUCTO PLACA XRoc»).

Por otro lado, tenemos los factores de semirreducción del plomo y del hormigón en función de voltaje aplicado para una fuente de Rayos X.

Approximate Half-Value Layer for Various Materials when Radiation is from an X-ray Source

Peak Voltage (kVp)	Half-Value Layer, mm (inch)	
	Lead	Concrete
50	0.06 (0.002)	4.32 (0.170)
100	0.27 (0.010)	15.10 (0.595)
150	0.30 (0.012)	22.32 (0.879)
200	0.52 (0.021)	25.0 (0.984)
250	0.88 (0.035)	28.0 (1.102)
300	1.47 (0.055)	31.21 (1.229)
400	2.5 (0.098)	33.0 (1.299)
1000	7.9 (0.311)	44.45 (1.75)

Note: The values presented on this page are intended for educational purposes. Other sources of information should be consulted when designing shielding for radiation sources.

Figura 67. Espesores de semirreducción para el plomo y el hormigón («Half-Value Layer» 2004).

Por tanto, se tiene que el número de veces que los espesores de Placo® y hormigón contienen el espesor de semirreducción es:

$$n_{placo} = \frac{2.25 \text{ mm} \cdot 1 \text{ capa HLV}}{0.30 \text{ mm}} = 7.5 \text{ HLV} \quad (28)$$

$$n_{hormigón} = \frac{250 \text{ mm} \cdot 1 \text{ capa HLV}}{22.32 \text{ mm}} = 11.20 \text{ HLV} \quad (29)$$

A continuación, se presenta el cálculo de la carga de trabajo en segundos por año y los factores de ocupación de las distintas zonas adyacentes a la sala de ensayos, datos que se obtienen de la memoria del ISIRYM.

$$W = \frac{5 \text{ h}}{\text{semana}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \cdot \frac{52,1429 \text{ semanas}}{\text{año}} = \frac{938572.2 \text{ s}}{\text{año}} \quad (30)$$

Dependencia	Factor de ocupación
Control	1
Clúster	1
Pasillo norte	0.25
Pasillo este	0.25
Laboratorio sur	1
Almacén	0.0625
Piso superior	1
Aparcamiento	0.0625

Tabla 13. Factores de ocupación de las salas adyacentes a las salas de ensayos.

Por otro lado, se tiene que el factor de uso es del 100% para el aparcamiento donde puede incidir la radiación primaria, y del 100% para el resto de las salas donde puede incidir la radiación dispersa y de fuga.

Por lo que haciendo uso de la siguiente expresión y obteniendo el valor de tasa de dosis en los volúmenes y distancia indicada, se puede obtener un valor de dosis equivalente (ISIRYM).

$$H = \frac{\Gamma \cdot W \cdot T}{d^2 \cdot 2^n} \quad (31)$$

Donde Γ es la tasa de dosis absoluta obtenida de las simulaciones y a la distancia indicada, W es la carga de trabajo, T es el factor de ocupación para cada dependencia, d es la distancia en m desde la fuente hasta la barrera próxima a dicha dependencia y n es el número de veces que está contenido el espesor de semirreducción en el espesor de la barrera (*Placo*® u hormigón según la zona a analizar que corresponda).

Para la realización de la siguiente tabla se han tenido en cuenta los valores proporcionados por el archivo meshtal ya que incluye la contribución de electrones y fotones a la dosis y por lo tanto es más completo que el archivo *.eeout*. Para tener un valor estadísticamente significativo se ha obtenido un valor medio alrededor de un pequeño volumen a la distancia d indicada. Por otro lado, para la zona de control, clúster, pasillo norte, pasillo este, lab sur y almacén se ha hecho uso del HLV del *Placo*®, y para el piso superior y el aparcamiento se ha hecho uso del HLV del hormigón.

Dependencia	TASA DE DOSIS	d	n HLV		H FMESH	
	Γ Gy/s FMESH		Placo®	Hormigón®	μ Sv/año	mSv/ año
Control	0.00E+00	4	7.5	-	0.00	0.00
Clúster	7.20E-09	4	7.5	-	2.33	0.00
Pasillo norte	0.00E+00	4	7.5	-	0.00	0.00
Pasillo este	0.00E+00	6.5	7.5	-	0.00	0.00
Lab sur	2.22E-08	2	7.5	-	28.79	0.00
Almacén	2.05E-09	3.5	7.5	-	0.05	0.0
Piso superior	0.00E+00	4.5	-	11.2	0.00	0.00
Aparcamiento	1.96E-06	6	-	11.2	0.68	0.00

Tabla 14. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia abajo.

Como se puede observar en la *tabla 14* en los resultados del volumen creado con FMESH no se sobrepasa el valor de 1mSv/año en ninguna de las zonas analizadas.

En un principio no está pensado que la fuente Rayos X se utilice en otra dirección que no sea la de enfocando hacia abajo. Sin embargo, sí que es posible realizar el enfoque en dirección izquierda y derecha. Debido a esto se ha realizado el anterior procedimiento en el caso de que la fuente de Rayos X esté dirigida hacia dichas direcciones con el objetivo de asegurar que se cumple la normativa en cualquier posible situación desfavorable.

Cuando el haz se dirige hacia la derecha se tienen los siguientes valores de dosis equivalentes (*tabla 15*):

Dependencia	TASA DE DOSIS	d	n HLV		H FMESH	
	Γ Gy/s FMESH		Placo®	Hormigón®	μ Sv/año	mSv/año
Control	1.75E-06	4	7.5	-	566.18	0.57
Clúster	2.09E-08	4	7.5	-	6.78	0.01
Pasillo norte	5.93E-09	4	7.5	-	0.48	0.00
Pasillo este	8.36E-07	6.5	7.5	-	25.64	0.03
Lab sur	2.70E-08	2	7.5	-	35.00	0.03
Almacén	1.19E-08	3.5	7.5	-	0.31	0.00
Piso superior	0.00E+00	4.5	-	11.2	0.00	0.00
Aparcamiento	3.64E-10	6	-	11.2	0.00	0.00

Tabla 15. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia la derecha.

Cuando el haz se dirige hacia la izquierda se tienen los siguientes valores de dosis equivalentes (*tabla 16*):

Dependencia	TASA DE DOSIS	d	n HLV		H FMESH	
	Γ Gy/s FMESH		Placo®	Hormigón®	μ Sv/año	mSv/año
Control	6.60E-09	4	7.5	-	2.14	0.00
Clúster	9.32E-09	4	7.5	-	3.02	0.00
Pasillo norte	5.57E-09	4	7.5	-	0.45	0.00
Pasillo este	1.25E-09	6.5	7.5	-	0.04	0.00
Lab sur	3.94E-08	2	7.5	-	51.11	0.05
Almacén	2.50E-05	3.5	7.5	-	661.72	0.66
Piso superior	5.64E-10	4.5	-	11.2	0.01	0.00
Aparcamiento	6.58E-10	6	-	11.2	0.00	0.00

Tabla 16. Dosis equivalente H dirección desfavorable hacia la izquierda.

Al igual que antes, se puede observar en las tablas 15 y 16 que no se sobrepasa el valor de 1mSv/año en ninguna de las zonas adyacentes y que por lo tanto se cumple con la normativa existente.

A continuación, se comparan los datos obtenidos con los disponibles en la memoria proporcionada (ISIRYM). Solo se compara el resultado cuando el haz o la fuente está dirigida hacia abajo ya que es la única situación que se ha tenido en cuenta en dicha documentación.

Cabe destacar que las diferencias notables en valores de **H** entre los resultados obtenidos con los disponibles en la memoria se deben a que en realidad la fuente esta desplazada un metro hacia la derecha, lo que se ha tenido en cuenta y ha influenciado en el resultado.

RADIACIÓN DIRECTA (haz de Rayos X incidiendo hacia abajo):

Opción	Zona	Ocupación (T)	d (m)	H ($\mu\text{Sv/año}$)
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Aparcamiento	0.0625	6	237
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)	Aparcamiento	0.0625	6	0.68

Tabla 17. Dosis equivalente H radiación directa.

RADIACIÓN SECUNDARIA (dispersa más fuga):

Opción	Zona	Ocupación (T)	d(m)	H ($\mu\text{Sv/año}$)
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Control	1	5	227
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			4	0
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Clúster	1	5	227
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			4	2.33
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Pasillo norte	0.25	4	82
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			4	0
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Pasillo este	0.25	7.5	28
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			6.5	0
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Lab. sur	1	2	947
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			2	28.79
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Almacén	0.0625	2.5	43
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			3.5	0.05
Plomo (2mm) y hormigón (25cm)	Piso superior	1	4.5	271
Placo® (62,5mm) y hormigón (25cm)			4.5	0

Tabla 18. Dosis equivalente H radiación secundaria.

Con lo cual se puede observar en las tablas 17 y 18 que, aunque en algunas dependencias el valor de H difiere en caso de hacer uso de un blindaje u otro, se cumplen con la normativa establecida por el CSN, es decir, la dosis equivalente H se mantiene por debajo de 1mSv/año.

9. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se puede concluir en primer lugar que se ha conseguido demostrar la validez del método Monte Carlo para la simulación y estudios de dosis en instalaciones con finalidades de uso radiactivo. Los resultados obtenidos de la simulación con MCNP6 ha permitido comprobar que el tipo de blindaje utilizado en el diseño del búnker se ajusta a la normativa del CSN. Se han comparado los resultados con los obtenidos en el caso de que el blindaje fuera plomo y hormigón obteniendo tasas de dosis equivalente similares y en algunos casos, inferiores.

El principal objetivo de este proyecto ha sido el de verificar que se cumplen los requisitos de seguridad establecidos con la introducción de *Placo*[®] como material de blindaje. Para ello se ha realizado un estudio de dosis de la sala de ensayos mediante el uso del código MCNP6.

Para el desarrollo del proyecto ha sido necesario y útil el aprendizaje de distintos softwares como *SpaceClaim* y *Abaqus*. El primero ha permitido la creación en 3D de la sala de ensayos y de sus estructuras, el segundo ha servido para realizar el mallado de la geometría de la sala. Otro programa que ha resultado fundamental para llevar a cabo este proyecto ha sido *Spektr3.0*, el cual ha permitido llevar a cabo la modelización del espectro de la fuente de Rayos X y obtener valores normalizados a un metro de distancia lo que ha facilitado una comparación rápida de resultados con los valores proporcionados por la memoria del ISIRYM. También cabe destacar que el código MCNP es una herramienta potente que permite simular distintas situaciones y gran parte del tiempo invertido en este trabajo ha sido empleado en comprender la forma en la cual se deben indicar los parámetros que permiten modelar la situación deseada.

El uso de grandes equipos como el clúster de computación en paralelo *Quasar* del grupo ISRYM ha permitido que los tiempos de simulación hayan sido aceptables dada la gran cantidad de partículas y situaciones que se han intentado simular.

Otro aspecto que destacar, es el uso del software PARAVIEW, el cual permite la visualización de los resultados de dosis en modelos tridimensionales y ha facilitado su interpretación y análisis de resultados.

Finalmente, este trabajo se ha realizado con la intención de verificar que el material utilizado como blindaje en sustitución del plomo proporciona niveles de protección aceptables a los trabajadores y público en general. Además de esto se debe poner en valor que la *Universitat Politècnica de València* es una de las instituciones españolas pionera en utilizar este producto en sus dependencias radiactivas, promoviendo así el uso de materiales no tóxicos y no peligrosos para el medio ambiente como alternativa al plomo.

10. LÍNEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos con el método Monte Carlo se han comparado con los resultados obtenidos con el blindaje con plomo. Con este se destaca que el uso de materiales atenuadores de radiación libres de plomo cumple la misma función y aportan nuevas ventajas. Como propuesta de mejora para obtener unas tasas de dosis relativas y absolutas más precisas se ha pensado en disminuir el tamaño de la malla en los volúmenes de aire creados siempre y cuando se utilice un método de simulación que reduzca el tiempo de computación ya que debido a esto no ha sido posible realizarlo en este proyecto y hacer por otro lado también hacer uso de tarjetas en MCNP6 que tengan en cuenta la contribución de electrones para poder comparar los resultados obtenidos en el archivo *.eout* con los proporcionados por la opción FMESH.

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, la UPV es pionera en utilizar este tipo de material como blindaje por no ser peligroso con el medio ambiente, es decir, una alternativa ecológica. Debido a la importancia de esto, el grupo *Placo Saint- Gobain* quiere realizar en esta dependencia las medidas experimentales de dosis correspondientes con el objetivo de certificar este material a nivel europeo y dar a conocer este mercado en más lugares. Por ello sería interesante, comparar los resultados obtenidos en este proyecto con los obtenidos por este grupo para observar la fiabilidad de este método y el hecho de haber utilizado unos valores subjetivos en la composición del material de blindaje.

REFERENCIAS

- BAÑOS, M.A., 1997. El equipo de rayos x. , pp. 1-19.
- CSN, 2012a. Interacción de la radiación con la materia. Curso de operador de instalaciones de radiodiagnóstico. *Consejo de seguridad nuclearejo de seguridad nuclear* [en línea]. Disponible en: <http://csn.ciemat.es/MDCSN/cargarListadoFichero.do?idcurso=36&tipo=m>.
- CSN, 2012b. Introducción a las Radiaciones ionizantes. Naturaleza y Tipos de Radiación. Interacción de la Radiación con la Materia. [en línea]. [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1838994721_1672013134047.pdf.
- CSN, 2015. Instalaciones radiactivas Categorías. *Monografías* [en línea], pp. 1-8. [Consulta: 30 mayo 2019]. Disponible en: [https://www.csn.es/documents/10182/928567/Instalaciones radiactivas \(Monografía\)](https://www.csn.es/documents/10182/928567/Instalaciones+radiactivas+(Monografía)).
- CSN, [sin fecha]. TEMA 2 MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS. [en línea]. S.l.: [Consulta: 31 mayo 2019 a]. Disponible en: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/506863262_167201313401.pdf.
- CSN, [sin fecha]. Usos de las radiaciones - CSN. *Consejo de seguridad nuclear* [en línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/ usos-de-las-radiaciones>.
- DEA, B. y ESCOBAR, B.J., [sin fecha]. Cálculo de blindajes en salas de Rayos X de diagnóstico. [en línea]. S.l.: [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: http://dea.unsj.edu.ar/ihospitalarias/Blindajes_salas_RayosX.pdf.
- FICHA DE PRODUCTO PLACA XRoc. [en línea], [sin fecha]. S.l.: [Consulta: 3 junio 2019]. Disponible en: www.placo.es.
- Half-Value Layer. *Encyclopedic Dictionary of Genetics, Genomics and Proteomics* [en línea], 2004. S.l.: s.n., [Consulta: 3 junio 2019]. Disponible en: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/HalfValueLayer.htm>.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1999. Safety Report Series No.13: Radiation Protection and Safet in Industrial Radiography. ,
- IRA-UPV - Google My Maps. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1jCrj_HIM9MLZAcxXF0ceyoNdo3M&ll=39.48080523805%2C-0.33913985000003777&z=16.
- ISIRYM, [sin fecha]. Documentación para la ampliación de la dependencia del Instituto De Seguridad Industrial, Radiofísica Y Medioambiental. (Universitat Politècnica de Valencia). [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.upv.es/isiryml/>.
- Material Didáctico Csn - Ciemat. [en línea], [sin fecha]. Disponible en: <http://csn.ciemat.es/MDCSN/>.
- MAYORGA, M.A., PLAZAS JIMÉNEZ, S.E. y CRUZ SALAZAR, E., 2016. Materiales libres de plomo para atenuación de radiaciones ionizantes en protección. *Ingenium Revista de la facultad de ingeniería*, vol. 15, no. 30, pp. 39. ISSN 0124-7492. DOI 10.21500/01247492.1357.
- MCCAFFREY, J.P., SHEN, H., DOWNTON, B. y MAINEGRA-HING, E., 2007. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics* [en línea], vol. 34, no. 2, pp. 530-537. [Consulta: 30 mayo 2019]. ISSN 00942405. DOI 10.1118/1.2426404. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1118/1.2426404>.
- MCCONN JR, R.J., GESH, C.J., PAGH, R.T., RUCKER, R.A. y WILLIAMS III, R.G., 2011. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling - Revision 1, PIET-43741-TM963, PNNL-15870 Rev. 1. [en línea], [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15870Rev1.pdf.
- NCRP, 2004. *Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities* [en línea]. S.l.: National Council on Radiation Protection and Measurements. ISBN 0929600835. Disponible en: http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSSDMXR17/viewerType:toc/root_slug:structural-shielding.

- PARREÑO, F. y PÁUCAR, R., [sin fecha]. Introducción a La Simulación Sus Aplicaciones En Física Médica. [en línea], [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/050/30050740.pdf?r=1&r=1.
- PELOWITZ, D.B., GOORLEY, J.T., JAMES, M.R., BOOTH, T.E., BROWN, F.B., BULL, J.S., COX, L.J., DURKEE, J.W., ELSON, J.S., FENSIN, M.L., FORSTER, R.A., HENDRICKS, J.S., HUGHES, H.G., JOHNS, R.C., KIEDROWSKI, B.C. y MASHNIK, S.G., 2013. *Tm User ' S Manual*. S.l.: s.n.
- PLACO SAINT-GOBAIN, 2018. Placo® X-Ray Protection | Placo®. *Placo Saint-Gobain* [en línea]. [Consulta: 31 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.placo.es/products/placa-de-yeso/placa-proteccion-rayos-x/x-ray-protection>.
- PLONSKY, B., 2015. Rayos X para la industria: los ensayos no destructivos contribuyen a aumentar la competitividad de Malasia. *OIEA* [en línea], [Consulta: 30 junio 2018]. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/5632021_es.pdf.
- SEPR, 2015. Equipos de radiografía y accesorios. [en línea], vol. 3, pp. 1-27. [Consulta: 30 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/953019/Curso+de+gammagrafia+y+radiografia+industrial+-+TEMA+03+-+Equipos+de+radiografia+y+accesorios+PARTE+I>.
- SPELLMAN HIGH VOLTAGE ELECTRONICS, 2018. XRB160PN192 Monoblock® Industrial X-Ray Generators | Spellman High Voltage Power Supplies. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.spellmanhv.com/en/About/Typical-Applications/Medical-CT-Imaging>.
- STUK, 2011. Design of rooms for radiation sources. , no. 09.
- WETTLAUFER, J., 2014. Physical Principles of Medical Imaging. 2nd ed. En: C. ORMES (ed.), *Radiology* [en línea], vol. 200, no. 2, pp. 504-504. ISSN 0033-8419. DOI 10.1148/radiology.200.2.504. Disponible en: <http://www.sprawls.org/ppmi2/XRAYPRO/#Tungsten Spectrum>.

II. PRESUPUESTO ECONÓMICO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	PRESUPUESTO DESGLOSADO.	72
1.1.	COSTES PERSONAL.	72
1.2.	COSTES HARDWARE.	73
1.3.	COSTES SOFTWARE.	73
2.	PRESUPUESTO TOTAL DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.	75

1. PRESUPUESTO DESGLOSADO.

1.1. COSTES PERSONAL.

En la siguiente tabla se muestran las tareas realizadas en orden cronológico junto con las horas invertidas en cada una para llevarla a cabo.

Tarea	Duración (h)
Búsqueda de información	54
<ul style="list-style-type: none"> Búsqueda de información y normativa CSN Aprendizaje Software <i>SpaceClaim</i> Aprendizaje Software <i>Abaqus</i> Aprendizaje Software MCNP Aprendizaje Software PARAVIEW 	25 5 5 15 4
Modelado y mallado de la geometría	6
<ul style="list-style-type: none"> Definición de la geometría de la sala de ensayos en <i>SpaceClaim</i>. Mallado de la geometría con <i>Abaqus/CAE</i> 	2 4
Simulación MCNP6	30
<ul style="list-style-type: none"> Implementación del código a simular Modelización del espectro de la fuente y composición de material Placo® Simulaciones de prueba de cada input creado- Clúster Simulación final de cada uno de los inputs creados- Clúster 	4 1 23 2
Obtención y comparación de resultados	20
<ul style="list-style-type: none"> Obtención de la tasa de dosis absoluta y análisis de los resultados 	20
Redacción de la memoria	150
<ul style="list-style-type: none"> Visita a la sala de ensayos Redacción 	5 145
Supervisión y resolución de dudas	40

Tabla 19. Duración en horas de cada tarea realizada.

Ingeniero biomédico: Se encargará de realizar todo el trabajo. Llevará a cabo la modelización del objeto a estudiar, la simulación e interpretación de resultados.

Perfil	Número de horas	Coste unitario	Coste imputable (Sin cuota patronal)	Cuota patronal (37,5%)	Coste imputable (Con cuota patronal)
Ingeniero Biomédico	300	40 €/hora	12.000 €	4.500 €	16.500 €
				Total	16.500 €

Tabla 20. Coste del personal.

1.2. COSTES HARDWARE.

Equipo	Coste del equipo	Periodo de amortización	IVA (21 %)	Coste imputable total
Portátil	593 €	1 año	124 €	717 €
			Total	717 €

Tabla 21. Costes de hardware.

Propiedades del equipo	
Marca	Lenovo
Sistema Operativo	Windows 10 Home
Procesador	Intel® Core™ i7-7700HQ (2,80 GHz)
Memoria RAM	8 GM
Disco duro	1 TB HDD
Controlador gráfico	Tarjeta integrada: Intel® HD Graphics 630 Tarjeta dedicada : NVIDIA Geforce GTX 1050
Display	15,6" LED HD (1366x768)

Tabla 22. Especificaciones del equipo.

1.3. COSTES SOFTWARE.

Programas	Coste total de la licencia (€/mes)	Número de licencias	Duración de la licencia (meses)	Periodo de uso (meses)	Coste imputable (sin IVA)	Coste imputable total (con IVA 21%)
Microsoft Office 365	7,00	1	12	4	28,00 €	33,88 €
SpaceClaim	49,95	1	12	4	16,65 €	241,76 €
Abaqus	25,49	1	12	4	8.346,70 €	123,37 €
MatLab	2000,00	1	12	4	666,70 €	9.680,00 €
					Total	10.079,01 €

Tabla 23. Coste de software.

- Consideraciones:
- El resto de los programas que no se han mencionado en este apartado como por ejemplo *PARAVIEW*, *WinSCP*, *Putty* y *Spektr3.0* son programas libres. Por lo tanto, no hace falta incluirlos en el presupuesto económico.
- Paquete *Microsoft Office*: Dentro del paquete de *Microsoft Office*, ha sido necesario únicamente el *Microsoft Word* para la redacción del trabajo y *Microsoft Excel* para los cálculos, creación de las tablas para el informe y el análisis de los datos y resultados.
- *SpaceClaim* ha sido necesario para llevar a cabo la modelización en 3D de la sala de ensayos y *Abaqus* ha permitido mallar este modelo para su posterior análisis en MCNP.
- *MatLab* ha permitido la ejecución del programa gratuito *Spektr3.0* el cual proporcionaba los datos sobre el espectro de la fuente de Rayos X.

2. PRESUPUESTO TOTAL DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.

Costes	Importe (€)
Costes de personal	16.500 €
Costes hardware	717 €
Costes software	10.079,01 €
Total:	27.296,01 €

Tabla 24. Presupuesto total.

Suma el presente presupuesto la cantidad de:

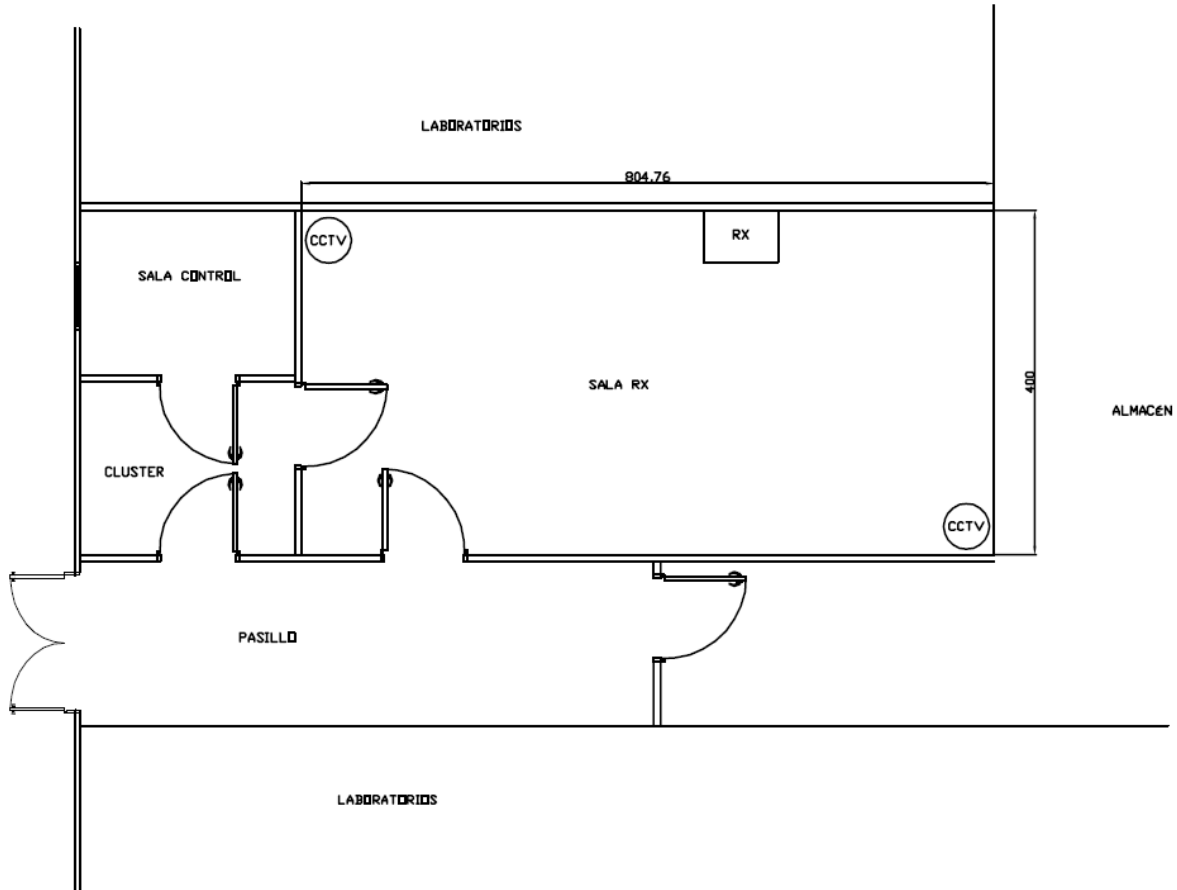
VEINTISIETE MIL DOSCIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON UN CÉNTIMO.

III. ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

1. PLANO DE LA DEPENDENCIA.....	79
2. SIMULACIÓN.....	80
2.1. MATERIALES. CÁLCULO DEL % DE PLACO® X-RAY PROTECTION.....	80
2.2. ESPECTRO FUENTE RAYOS X. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES.....	81
2.3. FACTORES DE CONVERSION FLUJO -DOSIS.	82
3. INPUTS.....	83
3.1. ABAJO.....	83
3.1.1. Código principal.....	83
3.1.2. Código secundario.....	86
3.2. DERECHA.	89
3.2.1. Código principal.....	89
3.2.2. Código secundario.....	92
3.3. IZQUIERDA.....	95
3.3.1. Código principal.....	95
3.3.2. Código secundario.....	98

1. PLANO DE LA DEPENDENCIA.



UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
CIUDAD POLITÈCNICA DE LA INNOVACION
PLANTA SEMISOTANO

2. SIMULACIÓN.

2.1. MATERIALES. CÁLCULO DEL % DE PLACO® X-RAY PROTECTION

En primer lugar, localizamos en internet la fórmula correspondiente para los dos compuestos mayoritarios del Placo® X-Ray Protection.

- Sulfatos de bario (CAS N.º 7727-43-7):
- Sulfatos de calcio (CAS N.º 10034-76-1):

Compuesto	Nombre	Sinónimo	Fórmula
Cas N.º 7727-43-7	Sulfato de Bario	Barite	BaSO4
Cas N.º 10034-76-1	Sulfato de Calcio dihidratado	Gypsum-Plaster of Paris	CaSO4-2(H2O)

Tabla 25. Identificación de compuestos

Una vez obtenidos los nombres correspondientes buscamos en el *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modelling* los materiales para conocer la estructura en la que se deben utilizar.

22 Barium Sulfate			149 Gypsum (Plaster of Paris)		
Formula = BaSO4			Formula = CaSO4-2(H2O)		
Density (g/cm3) = 4.500000			Density (g/cm3) = 2.320000		
The above density is estimated to be accurate			The above density is estimated to be accurate		
The following data were calculated from the inp			The following data were calculated from the inp		
Element	Neutron ZA	Photon ZA	Element	Neutron ZA	Photon ZA
O	8016	8000	H	1001	1000
S	16000	16000	O	8016	8000
Ba	-	56000	S	16000	16000
			Ca	20000	20000
Total			Total		
MCNP Form	Weight Fractions		MCNP Form	Weight Fractions	
Neutrons	8016	-0.274212	1001	-0.023416	
	16000	-0.137368	8016	-0.557572	
	-	-0.588420	16000	-0.186215	
			20000	-0.232797	
Photons	8000	-0.274212	1000	-0.023416	
	16000	-0.137368	8000	-0.557572	
	56000	-0.588420	16000	-0.186215	
			20000	-0.232797	

Figura 68. Barium Sulfate & Gypsum (McConn Jr et al., 2011).

Debido a que no el fabricante no proporciona de forma exacta el % de cada uno de los componentes del material, con el objetivo de simplificar el estudio se ha decidido que al ser componentes mayoritarios cada uno tenga un peso del 50 %. Por tanto, se tiene que:

Compuestos	Elementos				
	H (1)	O (8)	S (16)	Ca (20)	Ba (56)
BaSO4	-----	-0.137106	-0.068684	-----	-0.29421
CaSO4-2(H2O)	-0.011708	-0.278786	-0.0931075	-0.1163985	-----
Total	-0.011708	-0.415892	-0.1617915	-0.1163985	-0.29421

Tabla 26. Composición Placo® X-Ray Protection.

2.2. ESPECTRO FUENTE RAYOS X. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES.

Características de la simulación del espectro :									
Tube name		Model used		kVp		kV Ripple %		mm Al	
Boone/Fewell		TASMICS		150		1		0.2	
E (MeV)	P	E (MeV)	P	E (MeV)	P	E (MeV)	P	E (MeV)	P
0.001	0	0.039	1.66E-02	0.077	6.68E-03	0.115	2.69E-03		
0.002	4.1E-276	0.04	1.65E-02	0.078	6.56E-03	0.116	2.60E-03		
0.003	3.3E-113	0.041	1.64E-02	0.079	6.43E-03	0.117	2.49E-03		
0.004	5.36E-58	0.042	1.64E-02	0.08	6.34E-03	0.118	2.43E-03		
0.005	5.07E-34	0.043	1.64E-02	0.081	6.27E-03	0.119	2.37E-03		
0.006	5.04E-22	0.044	1.62E-02	0.082	6.15E-03	0.12	2.26E-03		
0.007	2.38E-15	0.045	1.61E-02	0.083	6.02E-03	0.121	2.15E-03		
0.008	3.75E-11	0.046	1.58E-02	0.084	5.91E-03	0.122	2.07E-03		
0.009	1.31E-08	0.047	1.56E-02	0.085	5.78E-03	0.123	1.99E-03		
0.01	3.57E-07	0.048	1.54E-02	0.086	5.68E-03	0.124	1.92E-03		
0.011	3.05E-06	0.049	1.52E-02	0.087	5.59E-03	0.125	1.84E-03		
0.012	1.52E-05	0.05	1.50E-02	0.088	5.43E-03	0.126	1.77E-03		
0.013	5.47E-05	0.051	1.47E-02	0.089	5.30E-03	0.127	1.67E-03		
0.014	1.63E-04	0.052	1.45E-02	0.09	5.24E-03	0.128	1.57E-03		
0.015	3.84E-04	0.053	1.42E-02	0.091	5.15E-03	0.129	1.48E-03		
0.016	7.54E-04	0.054	1.40E-02	0.092	5.03E-03	0.13	1.40E-03		
0.017	1.30E-03	0.055	1.38E-02	0.093	4.89E-03	0.131	1.32E-03		
0.018	2.02E-03	0.056	1.35E-02	0.094	4.75E-03	0.132	1.26E-03		
0.019	2.90E-03	0.057	1.33E-02	0.095	4.61E-03	0.133	1.18E-03		
0.02	3.90E-03	0.058	2.14E-02	0.096	4.51E-03	0.134	1.10E-03		
0.021	4.98E-03	0.059	3.65E-02	0.097	4.45E-03	0.135	1.02E-03		
0.022	6.13E-03	0.06	2.78E-02	0.098	4.36E-03	0.136	9.43E-04		
0.023	7.28E-03	0.061	1.29E-02	0.099	4.22E-03	0.137	8.61E-04		
0.024	8.40E-03	0.062	1.27E-02	0.1	4.13E-03	0.138	7.66E-04		
0.025	9.51E-03	0.063	1.16E-02	0.101	4.06E-03	0.139	6.59E-04		
0.026	1.05E-02	0.064	1.14E-02	0.102	3.93E-03	0.14	6.11E-04		
0.027	1.15E-02	0.065	1.12E-02	0.103	3.84E-03	0.141	5.98E-04		
0.028	1.24E-02	0.066	1.09E-02	0.104	3.75E-03	0.142	5.38E-04		
0.029	1.32E-02	0.067	1.63E-02	0.105	3.63E-03	0.143	4.54E-04		
0.03	1.39E-02	0.068	1.61E-02	0.106	3.51E-03	0.144	3.76E-04		
0.031	1.44E-02	0.069	1.14E-02	0.107	3.40E-03	0.145	3.06E-04		
0.032	1.50E-02	0.07	1.01E-02	0.108	3.28E-03	0.146	2.27E-04		
0.033	1.54E-02	0.071	7.48E-03	0.109	3.22E-03	0.147	1.57E-04		
0.034	1.58E-02	0.072	7.34E-03	0.11	3.17E-03	0.148	7.86E-05		
0.035	1.60E-02	0.073	7.19E-03	0.111	3.08E-03	0.149	4.54E-06		
0.036	1.62E-02	0.074	7.03E-03	0.112	2.97E-03	0.150	0		
0.037	1.64E-02	0.075	6.92E-03	0.113	2.86E-03				
0.038	1.65E-02	0.076	6.82E-03	0.114	2.79E-03				

Tabla 27. Distribución de probabilidades del espectro tubo de Rayos X

2.3. FACTORES DE CONVERSION FLUJO - DOSIS.

Photon absorber data for AIR, DRY (NEAR SEA LEVEL)			Electron absorber data for AIR, DRY (NEAR SEA LEVEL)	
Photon Energy (MeV)	Total Attenuation with Coherent Scattering (cm ² /g)	(J cm ² /Kg)	Kinetic Energy (MeV)	Stopping Power – Total (J cm ² /Kg)
0.001	3606	5.78E-10	0.01	3.17E-09
0.0015	1191	2.86E-10	0.0125	2.67E-09
0.002	528	1.69E-10	0.015	2.32E-09
0.003	162.5	7.81E-11	0.0175	2.06E-09
0.003203	133.8	6.87E-11	0.02	1.85E-09
0.0032031	148.3	7.61E-11	0.025	1.56E-09
0.004	77.88	4.99E-11	0.03	1.36E-09
0.005	40.27	3.23E-11	0.035	1.21E-09
0.006	23.41	2.25E-11	0.04	1.10E-09
0.008	9.92	1.27E-11	0.045	1.01E-09
0.01	5.12	8.20E-12	0.05	9.33E-10
0.015	1.614	3.88E-12	0.055	8.71E-10
0.02	0.7781	2.49E-12	0.06	8.19E-10
0.03	0.3538	1.70E-12	0.07	7.37E-10
0.04	0.2485	1.59E-12	0.08	6.73E-10
0.05	0.208	1.67E-12	0.09	6.23E-10
0.06	0.1874	1.80E-12	0.1	5.83E-10
0.08	0.1663	2.13E-12	0.125	5.09E-10
0.1	0.1541	2.47E-12	0.15	4.59E-10
0.15	0.1356	3.26E-12	0.175	4.23E-10
0.2	0.1234	3.95E-12	0.2	3.96E-10

Tabla 28. Factores de conversión para el aire.

3. INPUTS.

3.1. ABAJO.

3.1.1. Código principal.

Sala de ensayos

```

c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=abajo.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
c <<<CONVERSION DE FLUJO A DOSIS (AIRE-FOTONES)>>>
embed14:p embed=1
embed14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
0.2
embem14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
3.95E-12
c

```

```

c
c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000
c Xroc
m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985
c
c <<<FUENTE>>>
SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=0 0 -1 dir=d2
SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15
SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &
4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &

```


2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
7.86E-05 4.54E-06 0

SI2 0.99 1
SP2 0 1

<<<DATA CARDS>>>

c
MODE p e
PHYS:P 0.2 0 0
CUT:E 1J 0.01 3J
PRDMP 1E+6 -1 1 2 0
imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f
imp:e 10 9r 0
NPS 10E+06
dbcn 48J 1

<<<TALLY CARDS>>>

c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)

FMesh14:p GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
IMESH= 900 IINTS= 240
JMESH= 650 JINTS= 150
KMESH= 700 KINTS= 225 out ij

de14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
0.2

df14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
3.95E-12

FMesh24:e GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
IMESH= 900 IINTS= 240
JMESH= 650 JINTS= 150
KMESH= 700 KINTS= 225 out ij

de24 0.01 0.0125 0.015 0.0175 &
0.02 0.025 0.03 0.035 &
0.04 0.045 0.05 0.055 &
0.06 0.07 0.08 0.09 &
0.1 0.125 0.15 0.175 &
0.2

df24 3.17E-09 2.67E-09 2.32E-09 2.06E-09 &
1.85E-09 1.56E-09 1.36E-09 1.21E-09 &
1.10E-09 1.01E-09 9.33E-10 8.71E-10 &
8.19E-10 7.37E-10 6.73E-10 6.23E-10 &
5.83E-10 5.09E-10 4.59E-10 4.23E-10 &
3.96E-10

C

3.1.2. Código secundario.

Sala de ensayos

```

c
c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0      0      0 u=1 $ BACKGROUND
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0      0      99
c
c SURFACES
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00
c
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=abajo2.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000
c Xroc

```

m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985

c

<<<FUENTE>>>

SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=0 0 -1 dir=d2
 SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
 0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
 0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
 0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
 0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
 0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
 0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
 0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
 0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
 0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
 0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
 0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
 0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
 0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15
 SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
 3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
 3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
 6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
 1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
 1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
 1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
 1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
 1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
 1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
 7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
 6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
 5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
 5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &
 4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
 3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
 2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &
 2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
 1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
 1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
 5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
 7.86E-05 4.54E-06 0
 SI2 0.99 1
 SP2 0 1

c

<<<DATA CARDS>>>

MODE p e
 PHYS:P 0.2 0 0
 CUT:E 1J 0.01 3J
 PRDMP 1E+07 -1 1 2 0
 imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f
 imp:e 10 9r 0
 NPS 10E+07
 dbcn 48J 1

```

c                                     <<<TALLY CARDS>>>
c <<<abajo>>>
c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)
FMESH14:p  GEOM=xyz      ORIGIN= 402.38 390 125
            IMESH= 402.48      IINTS= 1
            JMESH= 390.1       JINTS= 1
            KMESH= 125.1       KINTS= 1 out ij
de14 0.001      0.0015  0.002      0.003      0.003203 &
0.0032031      0.004   0.005      0.006      0.008 &
0.01           0.015   0.02      0.03      0.04 &
0.05           0.06    0.08      0.1       0.15 &
0.2
df14 5.78E-10  2.86E-10  1.69E-10  7.81E-11  6.87E-11 &
7.61E-11      4.99E-11  3.23E-11  2.25E-11  1.27E-11 &
8.20E-12      3.88E-12  2.49E-12  1.70E-12  1.59E-12 &
1.67E-12      1.80E-12  2.13E-12  2.47E-12  3.26E-12 &
3.95E-12
FMESH24:e  GEOM=xyz      ORIGIN= 402.38 390 125
            IMESH= 402.48      IINTS= 1
            JMESH= 390.1       JINTS= 1
            KMESH= 125.1       KINTS= 1 out ij
de24 0.01      0.0125   0.015     0.0175 &
0.02          0.025    0.03      0.035 &
0.04          0.045    0.05      0.055 &
0.06          0.07     0.08      0.09 &
0.1           0.125    0.15      0.175 &
0.2
df24 3.17E-09  2.67E-09  2.32E-09  2.06E-09 &
1.85E-09      1.56E-09  1.36E-09  1.21E-09 &
1.10E-09      1.01E-09  9.33E-10  8.71E-10 &
8.19E-10      7.37E-10  6.73E-10  6.23E-10 &
5.83E-10      5.09E-10  4.59E-10  4.23E-10 &
3.96E-10
c

```

3.2. DERECHA.

3.2.1. Código principal.

Sala de ensayos

```

c Simulacion del haz hacia la derecha
c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0
c
c SURFACES
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00

C
c
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=derecha.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8

c          <<<CONVERSION DE FLUJO A DOSIS (AIRE-FOTONES)>>>
c
embee14:p embed=1
embeb14 0.001      0.0015      0.002      0.003      0.003203 &
0.0032031      0.004      0.005      0.006      0.008 &
0.01      0.015      0.02      0.03      0.04 &
0.05      0.06      0.08      0.1      0.15 &
0.2
embem14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &

```

```

1.67E-12          1.80E-12   2.13E-12   2.47E-12          3.26E-12 &
3.95E-12
c
c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000
c Xroc
m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985
c
c <<<FUENTE>>>
SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=-1 0 0 dir=d2
SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15
SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &

```

4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
 3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
 2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &
 2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
 1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
 1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
 5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
 7.86E-05 4.54E-06 0

SI2 0.99 1
 SP2 0 1

c <<<DATA CARDS>>>

MODE p e
 PHYS:P 0.2 0 0
 CUT:E 1J 0.01 3J
 PRDMP 1E+06 -1 1 2 0
 imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f
 imp:e 10 9r 0
 NPS 10E+06
 dbcn 48J 1

c <<<TALLY CARDS>>>

c
 c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)

FMESH14:p GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
 IMESH= 900 IINTS= 240
 JMESH= 650 JINTS= 150
 KMESH= 700 KINTS= 225 out ij

de14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
 0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
 0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
 0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
 0.2

df14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
 7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
 8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
 1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
 3.95E-12

FMESH24:e GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
 IMESH= 900 IINTS= 240
 JMESH= 650 JINTS= 150
 KMESH= 700 KINTS= 225 out ij

de24 0.01 0.0125 0.015 0.0175 &
 0.02 0.025 0.03 0.035 &
 0.04 0.045 0.05 0.055 &
 0.06 0.07 0.08 0.09 &
 0.1 0.125 0.15 0.175 &
 0.2

df24 3.17E-09 2.67E-09 2.32E-09 2.06E-09 &
 1.85E-09 1.56E-09 1.36E-09 1.21E-09 &
 1.10E-09 1.01E-09 9.33E-10 8.71E-10 &
 8.19E-10 7.37E-10 6.73E-10 6.23E-10 &
 5.83E-10 5.09E-10 4.59E-10 4.23E-10 &
 3.96E-10

3.2.2. Código secundario.

Sala de ensayos

```

c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0      0      0 u=1 $ BACKGROUND
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0      0      99
c
C
c
c SURFACES
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00
c
C
c
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeo=ensayos.inp
      meeout=derecha2.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &

```


13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000

c Xroc

m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985

c

c <<<FUENTE>>>

SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=-1 0 0 dir=d2

SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15

SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &
4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &
2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
7.86E-05 4.54E-06 0

SI2 0.99 1

SP2 0 1

c

<<<DATA CARDS>>>

MODE p e

PHYS:P 0.2 0 0

CUT:E 1J 0.01 3J

PRDMP 1E+06 -1 1 2 0

imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f

```

imp:e 10 9r 0
NPS 10E+06
dbcn 48J 1
c
c
c <<<TALLY CARDS>>>
c <<<derecha>>>
c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)
FMESH14:p  GEOM=xyz  ORIGIN= 302.38 390 225
            IMESH= 302.48  IINTS= 1
            JMESH= 390.1  JINTS= 1
            KMESH= 225.1  KINTS= 1 out ij
de14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
0.2
df14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
3.95E-12
FMESH24:e  GEOM=xyz  ORIGIN= 302.38 390 225
            IMESH= 302.48  IINTS= 1
            JMESH= 390.1  JINTS= 1
            KMESH= 225.1  KINTS= 1 out ij
de24 0.01 0.0125 0.015 0.0175 &
0.02 0.025 0.03 0.035 &
0.04 0.045 0.05 0.055 &
0.06 0.07 0.08 0.09 &
0.1 0.125 0.15 0.175 &
0.2
df24 3.17E-09 2.67E-09 2.32E-09 2.06E-09 &
1.85E-09 1.56E-09 1.36E-09 1.21E-09 &
1.10E-09 1.01E-09 9.33E-10 8.71E-10 &
8.19E-10 7.37E-10 6.73E-10 6.23E-10 &
5.83E-10 5.09E-10 4.59E-10 4.23E-10 &
3.96E-10
c
c

```

3.3. IZQUIERDA.

3.3.1. Código principal.

Sala de ensayos

```

c Simulación del haz hacia la izquierda
c Created from file      : ensayos.inp
c Created on             : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0
c
c SURFACES
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00
c
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=izquierda.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
c <<<CONVERSION DE FLUJO A DOSIS (AIRE-FOTONES)>>>
embee14:p embed=1
embeb14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
0.2
embem14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
3.95E-12

```

c <<<MATERIALES>>>

c Aire

m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827

c Ladrillo

m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000

c Plomo

m3 82000 -1.000000

c Resina-baquelita

m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968

c Hormigon

m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000

c Xroc

m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985

c

c <<<FUENTE>>>

SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=1 0 0 dir=d2

SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15

SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &
4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &

2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
 1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
 1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
 5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
 7.86E-05 4.54E-06 0
 SI2 0.99 1
 SP2 0 1

<<<DATA CARDS>>>

c
 MODE p e
 PHYS:P 0.2 0 0
 CUT:E 1J 0.01 3J
 PRDMP 1E+06 -1 1 2 0
 imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f
 imp:e 10 9r 0
 NPS 10E+06
 dbcn 48J 1

<<<TALLY CARDS>>>

c
 c FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm^2)
 FMESH14:p GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
 IMESH= 900 IINTS= 240
 JMESH= 650 JINTS= 150
 KMESH= 700 KINTS= 225 out ij
 de14 0.001 0.0015 0.002 0.003 0.003203 &
 0.0032031 0.004 0.005 0.006 0.008 &
 0.01 0.015 0.02 0.03 0.04 &
 0.05 0.06 0.08 0.1 0.15 &
 0.2
 df14 5.78E-10 2.86E-10 1.69E-10 7.81E-11 6.87E-11 &
 7.61E-11 4.99E-11 3.23E-11 2.25E-11 1.27E-11 &
 8.20E-12 3.88E-12 2.49E-12 1.70E-12 1.59E-12 &
 1.67E-12 1.80E-12 2.13E-12 2.47E-12 3.26E-12 &
 3.95E-12
 FMESH24:e GEOM=xyz ORIGIN= -300 -100 -425
 IMESH= 900 IINTS= 240
 JMESH= 650 JINTS= 150
 KMESH= 700 KINTS= 225 out ij
 de24 0.01 0.0125 0.015 0.0175 &
 0.02 0.025 0.03 0.035 &
 0.04 0.045 0.05 0.055 &
 0.06 0.07 0.08 0.09 &
 0.1 0.125 0.15 0.175 &
 0.2
 df24 3.17E-09 2.67E-09 2.32E-09 2.06E-09 &
 1.85E-09 1.56E-09 1.36E-09 1.21E-09 &
 1.10E-09 1.01E-09 9.33E-10 8.71E-10 &
 8.19E-10 7.37E-10 6.73E-10 6.23E-10 &
 5.83E-10 5.09E-10 4.59E-10 4.23E-10 &
 3.96E-10
 c

3.3.2. Código secundario.

Sala de ensayos

```

c Created from file      : ensayos.inp
c Created on            : 5-24-2019 @ 15:39: 7
c
c
c PSEUDO CELLS
1      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREE
2      1      -0.001225      0 u=1 $ AIREI
3      2      -1.20000      0 u=1 $ PAREDES
4      3      -11.3000      0 u=1 $ PUERTA PLOMO
5      4      -1.28000      0 u=1 $ PUERTA RESINA
6      5      -2.30000      0 u=1 $ SUELO
7      5      -2.30000      0 u=1 $ TECHO
8      6      -1.44000      0 u=1 $ XROC
9      0      0      0 u=1 $ BACKGROUND
c
c LEGACY CELLS
10     1      -0.001225      -99 fill=1
11     0      0      99
c
c SURFACES $ Coordenadas y radio de la esfera (99)medidas en
cm(x,y,z,r)
99 sph 402.38E+00 390.000E+00 225.000E+00 1000E+00
c
c DATA CARDS
embed1 meshgeo=abaqus
      mgeoin=ensayos.inp
      meeout=izquierda2.eeout
      length= 100.00000E+00
      background= 9
      matcell= 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8
c
c <<<MATERIALES>>>
c Aire
m1 8000 -0.23178 7000 -0.75526 6000 -0.000124 18000 -0.012827
c Ladrillo
m2 8000 -0.525000 13000 -0.005000 14000 -0.449000 20000 -0.014000 &
26000 -0.007000
c Plomo
m3 82000 -1.000000
c Resina-baquelita
m4 1000 -0.057444 6000 -0.774589 8000 -0.167968
c Hormigon
m5 1000 -0.010000 6000 -0.001000 8000 -0.529107 11000 -0.016000 12000 &
-0.002000 &
13000 -0.033872 14000 -0.337021 19000 -0.013000 20000 -0.044000 26000 &
-0.014000

```

c Xroc

m6 8000 -0.137106 16000 -0.068553 56000 -0.29421 1000 -0.011708 8000 &
-0.278786 16000 -0.0931075 20000 -0.1163985

c

c

<<<FUENTE>>>

SDEF pos=402.38 390 225 par=2 erg=d1 vec=1 0 0 dir=d2

SI1 L 0.001 0.002 0.003 0.004 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.01 &
0.011 0.012 0.013 0.014 0.015 0.016 0.017 0.018 0.019 0.02 0.021 &
0.022 0.023 0.024 0.025 0.026 0.027 0.028 0.029 0.03 0.031 0.032 &
0.033 0.034 0.035 0.036 0.037 0.038 0.039 0.04 0.041 0.042 0.043 &
0.044 0.045 0.046 0.047 0.048 0.049 0.05 0.051 0.052 0.053 0.054 &
0.055 0.056 0.057 0.058 0.059 0.06 0.061 0.062 0.063 0.064 0.065 &
0.066 0.067 0.068 0.069 0.07 0.071 0.072 0.073 0.074 0.075 0.076 &
0.077 0.078 0.079 0.08 0.081 0.082 0.083 0.084 0.085 0.086 0.087 &
0.088 0.089 0.09 0.091 0.092 0.093 0.094 0.095 0.096 0.097 0.098 &
0.099 0.1 0.101 0.102 0.103 0.104 0.105 0.106 0.107 0.108 0.109 &
0.11 0.111 0.112 0.113 0.114 0.115 0.116 0.117 0.118 0.119 0.12 &
0.121 0.122 0.123 0.124 0.125 0.126 0.127 0.128 0.129 0.13 0.131 &
0.132 0.133 0.134 0.135 0.136 0.137 0.138 0.139 0.14 0.141 0.142 &
0.143 0.144 0.145 0.146 0.147 0.148 0.149 0.15

SP1 D 0 4.10E-276 3.29E-113 5.36E-58 5.07E-34 5.04E-22 2.38E-15 &
3.75E-11 1.31E-08 3.57E-07 3.05E-06 1.52E-05 5.47E-05 1.63E-04 &
3.84E-04 7.54E-04 1.30E-03 2.02E-03 2.90E-03 3.90E-03 4.98E-03 &
6.13E-03 7.28E-03 8.40E-03 9.51E-03 1.05E-02 1.15E-02 1.24E-02 &
1.32E-02 1.39E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.54E-02 1.58E-02 1.60E-02 &
1.62E-02 1.64E-02 1.65E-02 1.66E-02 1.65E-02 1.64E-02 1.64E-02 &
1.64E-02 1.62E-02 1.61E-02 1.58E-02 1.56E-02 1.54E-02 1.52E-02 &
1.50E-02 1.47E-02 1.45E-02 1.42E-02 1.40E-02 1.38E-02 1.35E-02 &
1.33E-02 2.14E-02 3.65E-02 2.78E-02 1.29E-02 1.27E-02 1.16E-02 &
1.14E-02 1.12E-02 1.09E-02 1.63E-02 1.61E-02 1.14E-02 1.01E-02 &
7.48E-03 7.34E-03 7.19E-03 7.03E-03 6.92E-03 6.82E-03 6.68E-03 &
6.56E-03 6.43E-03 6.34E-03 6.27E-03 6.15E-03 6.02E-03 5.91E-03 &
5.78E-03 5.68E-03 5.59E-03 5.43E-03 5.30E-03 5.24E-03 5.15E-03 &
5.03E-03 4.89E-03 4.75E-03 4.61E-03 4.51E-03 4.45E-03 4.36E-03 &
4.22E-03 4.13E-03 4.06E-03 3.93E-03 3.84E-03 3.75E-03 3.63E-03 &
3.51E-03 3.40E-03 3.28E-03 3.22E-03 3.17E-03 3.08E-03 2.97E-03 &
2.86E-03 2.76E-03 2.69E-03 2.60E-03 2.49E-03 2.43E-03 2.37E-03 &
2.26E-03 2.15E-03 2.07E-03 1.99E-03 1.92E-03 1.84E-03 1.77E-03 &
1.67E-03 1.57E-03 1.48E-03 1.40E-03 1.32E-03 1.26E-03 1.18E-03 &
1.10E-03 1.02E-03 9.43E-04 8.61E-04 7.66E-04 6.59E-04 6.11E-04 &
5.98E-04 5.38E-04 4.54E-04 3.76E-04 3.06E-04 2.27E-04 1.57E-04 &
7.86E-05 4.54E-06 0

SI2 0.99 1

SP2 0 1

c

<<<DATA CARDS>>>

MODE p e

PHYS:P 0.2 0 0

CUT:E 1J 0.01 3J

PRDMP 1E+09 -1 1 2 0

imp:p 10 9r 0 \$ 1,5f

imp:e 10 9r 0

NPS 10E+09

dbcn 48J 1

C

C

<<<TALLY CARDS>>>

C <<<izquierda>>>

C FC4 Recoge las tasas de dosis depositadas en el tally (part/cm²)

FMesh14:p GEOM=xyz ORIGIN=502.38 390 225

IMESH= 502.48 IINTS= 1

JMESH= 390.1 JINTS= 1

KMESH= 225.1 KINTS= 1 out ij

de14 0.001	0.0015	0.002	0.003	0.003203 &
0.0032031	0.004	0.005	0.006	0.008 &
0.01	0.015	0.02	0.03	0.04 &
0.05	0.06	0.08	0.1	0.15 &
0.2				

df14 5.78E-10	2.86E-10	1.69E-10	7.81E-11	6.87E-11 &
---------------	----------	----------	----------	------------

7.61E-11	4.99E-11	3.23E-11	2.25E-11	1.27E-11 &
----------	----------	----------	----------	------------

8.20E-12	3.88E-12	2.49E-12	1.70E-12	1.59E-12 &
----------	----------	----------	----------	------------

1.67E-12	1.80E-12	2.13E-12	2.47E-12	3.26E-12 &
----------	----------	----------	----------	------------

3.95E-12

FMesh24:e GEOM=xyz ORIGIN=502.38 390 225

IMESH= 502.48 IINTS= 1

JMESH= 390.1 JINTS= 1

KMESH= 225.1 KINTS= 1 out ij

de24 0.01	0.0125	0.015	0.0175 &
0.02	0.025	0.03	0.035 &
0.04	0.045	0.05	0.055 &
0.06	0.07	0.08	0.09 &
0.1	0.125	0.15	0.175 &
0.2			

df24 3.17E-09	2.67E-09	2.32E-09	2.06E-09 &
---------------	----------	----------	------------

1.85E-09	1.56E-09	1.36E-09	1.21E-09 &
----------	----------	----------	------------

1.10E-09	1.01E-09	9.33E-10	8.71E-10 &
----------	----------	----------	------------

8.19E-10	7.37E-10	6.73E-10	6.23E-10 &
----------	----------	----------	------------

5.83E-10	5.09E-10	4.59E-10	4.23E-10 &
----------	----------	----------	------------

3.96E-10

C