



**VNiVERSiDAD  
DSALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

## **Trabajo Fin de Máster**

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

**Autor:** Álvaro Antolín Montero

**Tutor:** Esteban Sánchez Hernández (USAL)

**Tutor:** José Manuel Álvarez Pastor (CLPU)

**Septiembre 2017**







## Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract .....	12
Objetivos del Trabajo. ....	13
PARTE 1: LA RADIACIÓN IONIZANTE: EFECTOS Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA. ....	14
1. La radiación y sus efectos.....	16
1.1. La radiactividad. ....	19
1.2. Las radiaciones ionizantes.....	21
1.3. Usos y efectos de la radiación ionizante en la industria .....	27
1.4. Aplicaciones industriales de las radiaciones ionizantes.....	27
1.5. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.....	33
2. Protección radiológica frente a radiaciones ionizantes. ....	37
2.1. Exposición y dosis recibidas de radiación. ....	39
2.2. Acciones básicas de protección radiológica .....	43
2.3. Organismos encargados de la Protección Radiológica.....	44
2.4. El Consejo de Seguridad Nuclear.....	47
3. Sistemas de detección radiológica .....	53
PARTE 2: SISTEMAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN LA INDUSTRIA LÁSER. ....	56
4. La Industria Láser: El Centro de Láseres Pulsados.....	58
4.1. Aplicaciones Industriales de los sistemas láser .....	61
4.2. Funcionamiento de un sistema láser .....	67
5. Protección Radiológica en instalaciones láser .....	71
5.1. Radiaciones ionizantes generadas con sistemas láser .....	71
5.2. Riesgos radiológicos en sistemas láser.....	72
5.3. Riesgos radiológicos en el CLPU. ....	73
5.4. Vigilancia y monitorización de la radiación en el CLPU.....	77
6. Retos de los sistemas de detección radiológica en el CLPU.....	84
PARTE 3: DESARROLLO DE UN ELEMENTO DETECTOR PARA UN SISTEMA LÁSER DE ALTA INTENSIDAD.....	86
7. Módulo detector de X-ZLAB .....	88
8. Elementos detectores de centelleo .....	93
8.1. Centelladores orgánicos.....	95
8.2. Centelladores inorgánicos.....	99
8.3. Centelladores orgánicos frente a inorgánicos.....	103
9. Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM).....	105

9.1.	Tiempo de recuperación de un SiPM .....	110
9.2.	Sobretensión en la alimentación (Overvoltage).....	111
9.3.	Fuentes del ruido en los SiPM .....	112
10.	Desarrollo de un sistema de adquisición para el módulo X-ZLAB.....	114
10.1.	Utilización de una tarjeta NI-6008. ....	116
10.2.	Utilización de una tarjeta MyRIO. ....	129
10.3.	Uso del osciloscopio como tarjeta de adquisición. ....	135
10.4.	Utilización del MCA PX5 de AMPTEK.....	140
11.	Desarrollo mecánico del prototipo. ....	161
12.	Líneas de trabajo futuras.....	164
12.1.	Plan de medidas en el láser VEGA.....	164
12.2.	Estudios de compatibilidad electromagnética. ....	169
12.3.	Aplicación de centelladores para la medición de radiaciones NORM en ambientes de construcción. ....	178
12.4.	Desarrollo de un detector de centelleo “Made in CLPU”. ....	181
Conclusiones del Trabajo .....		184
ANEXO I: PLANOS .....		186
Bibliografía .....		196

## **Tabla de Figuras**

Figura 1. Distribución en la tabla periódica de los elementos radiactivos.....	19
Figura 2. Característica de los Isótopos del Uranio.....	20
Figura 3. Alcance - Energía de partículas alfa lentas en el aire .....	22
Figura 4. Representación de una desintegración beta negativa.....	23
Figura 5. Representación de una desintegración beta positiva .....	24
Figura 6. Atenuación de Rayos Gamma de 667 keV en Aluminio y Plomo .....	25
Figura 7. Posibles transiciones entre las capas de un átomo .....	26
Figura 8. Funcionamiento Tubo de Rayos X.....	26
Figura 9. Representación del funcionamiento de un sistema de radiodiagnóstico.....	29
Figura 10. Equipo escáner de Tomografía Computarizada.....	30
Figura 11. Detector de rayos gamma (gammógrafo).....	31
Figura 12. Detector de incendio iónico. ....	33
Figura 13. Representación gráfica de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el ADN .....	34
Figura 14. Tipos de efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. ....	35
Figura 15. Efectos de las radiaciones ionizantes en el embarazo .....	36
Figura 16. Representación gráfica de la región de radiación aceptable .....	39
Figura 17. Radiación absorbida por distintos órganos del cuerpo humano .....	40
Figura 18. Valores límite de la dosis equivalente y efectiva de radiaciones ionizantes	41
Figura 19. Comparación de dosis naturales y artificiales.....	42
Figura 20. Representación gráfica del poder de penetración de las distintas radiaciones ionizantes .....	44
Figura 21. Registro de Instalaciones Radiactivas del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.....	46
Figura 22. Construcción clásica de un espectro radiológico de energías. ....	54
Figura 23. Edificio del Centro de Láseres Pulsados Ultraintensos y Ultracortos (CLPU). .....	58
Figura 24. Parámetros de funcionamiento del sistema láser VEGA. ....	59
Figura 25. Distribución de las líneas del sistema láser VEGA. ....	59
Figura 26. Parámetros de funcionamiento de los sistemas láser de alta tasas de repetición del CLPU .....	60
Figura 27. Esquema habitual de los componentes de un equipo láser de operación industrial.....	62
Figura 28. Sistema de corte por láser. ....	63
Figura 29. Soldadura láser: limitada a la conducción (a) y penetración (b).....	64
Figura 30. Perforador láser <sup>6</sup> . ....	64
Figura 31. Marcado láser por puntos (a) y marcado láser por máscara (b).....	65
Figura 32. Aplicaciones de los distintos tipos de láser.....	66
Figura 33. Emisión espontánea de un fotón por un átomo que se desexcita.....	67
Figura 34. Absorción de un fotón en un átomo que pasa a estar excitado.....	68
Figura 35. Emisión estimulada de radiación. <sup>9</sup> .....	68
Figura 36. Elementos de un láser: medio activo (barra de rubí de color rosa), bombeo (lámpara de flash) y cavidad.....	69
Figura 37. Régimen de funcionamiento de distintos tipos de láser.....	70
Figura 38. Distribución del sistema láser VEGA en las instalaciones del CLPU. ....	71
Figura 39. Esquema de un sistema acelerador de partículas por láser. ....	72
Figura 40. Zona de compresores del sistema láser VEGA.....	74

Figura 41. Dosis ambiental en Sv por cada pulso de VEGA-2 .....	75
Figura 42. Dosis ambiental en Sv por cada pulso de VEGA-3 .....	76
Figura 43. Estimación del número de pulsos del sistema láser VEGA y dosis generada. .....	76
Figura 44. Detector de neutrones FHT 762 wendy-2 .....	77
Figura 45. Cámara de ionización FHT 190 .....	78
Figura 46. Cámara de ionización FHT 192-10.....	79
Figura 47. Estación de monitorización FHT 6020-A .....	80
Figura 48. Sonda de monitorización FHZ-621 G-L4.....	80
Figura 49.. Distribución de los detectores de radiación en la zona de experimentación del sistema láser VEGA. ....	81
Figura 50. Distribución de los detectores de radiación en la zona de trabajo del sistema láser VEGA.....	82
Figura 51. Distribución de los detectores de radiación en la zona de despachos de científicos y técnicos del CLPU.....	82
Figura 52. Distribución de los detectores de radiación en la en la cubierta de instalaciones del CLPU. ....	83
Figura 53. Módulo detector de X-ZLAB .....	88
Figura 54. Cristal centellador YSO montado en el Módulo de X-ZLAB.....	89
Figura 55. Características de trabajo del cristal YSO instalado en el módulo X-ZLAB.....	89
Figura 56. Señal de salida del módulo X-ZLAB obtenida en modo continuo con el osciloscopio.....	90
Figura 57. Señal de salida del módulo X-ZLAB obtenida en modo "single" con el osciloscopio.....	91
Figura 58. Circuito lectura y alimentación del módulo X-ZLAB (anverso).....	91
Figura 59. Circuito lectura y alimentación del módulo X-ZLAB (reverso).....	92
Figura 60. Página web X-ZLAB - sistema de adquisición.....	93
Figura 61. Esquema tradicional de los detectores de centelleo. ....	94
Figura 62. Transiciones energéticas entre los distintos niveles electrónicos atómicos.....	95
Figura 63. Distribución de las longitudes de onda absorbidas y emitidas por los centelladores.....	96
Figura 64. Sistemas de guiado de la luz del centellador.....	98
Figura 65. Tipos y características de centelladores orgánicos. ....	98
Figura 66. Longitudes de onda de trabajo de los centelladores inorgánicos y fotomultiplicadores clásicos .....	99
Figura 67. Características de gases inorgánicos centelladores <sup>12</sup> .....	100
Figura 68. Bandas de conducción y valencia. ....	100
Figura 69. Distribución de las bandas de energía en los centelladores inorgánicos... ..	101
Figura 70. Tipos y características de los centelladores inorgánicos.....	102
Figura 71. Comparativa de centelladores orgánicos e inorgánicos más utilizados. ....	103
Figura 72. Comparativa de longitudes de onda y emisión lumínica entre centelladores orgánicos e inorgánicos. ....	104
Figura 73. Respuesta temporal de los centelladores orgánicos ante distintas radiaciones. <sup>15</sup> .....	104
Figura 74. Esquema de una célula fotomultiplicadora semiconductor. ....	105
Figura 75. Variación de la Ganancia del SiPM a distintas temperaturas y tensiones de alimentación. ....	106

Figura 76. Diagrama Tensión - Intensidad de funcionamiento de un SiPM.....	107
Figura 77. Esquema de conexión de un SiPM. ....	107
Figura 78. Microcélula de un SiPM.....	108
Figura 79. Vista microscópica de un SiPM.....	108
Figura 80. Factor de llenado de un SiPM de 3x3 mm <sup>2</sup> .....	109
Figura 81. Señal de salida de un SiPM.....	110
Figura 82. Diagrama Overvoltage - Eficiencia de detección del módulo X-ZLAB.....	112
Figura 83. Diagrama Overvoltage – Cuentas oscuras del módulo X-ZLAB.....	113
Figura 84. Representación Entradas y Salidas del módulo X-ZLAB.....	115
Figura 85. Sobreimpresión de pulsos de salida del módulo X-ZLAB (1).....	115
Figura 86. Sobreimpresión de pulsos de salida del módulo X-ZLAB (2).....	116
Figura 87 Tarjeta NI-6008.....	116
Figura 88. Configuración de trabajo de la tarjeta NI-6008.....	117
Figura 89. Fuente radiactiva Ba-133.....	118
Figura 90. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 y el asistente DAQ Assistant (1).....	118
Figura 91. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 y el asistente DAQ Assistant (2).....	119
Figura 92. Código LabVIEW para adquisición de datos con NI-6008.....	119
Figura 93. Panel de trabajo de LabVIEW para adquisición de datos con NI-6008.....	120
Figura 94. Imagen del montaje para la adquisición de datos con la tarjeta NI-6008...	120
Figura 95. Histograma obtenido con la tarjeta NI-6008.....	121
Figura 96. Circuito de muestreo y retención diseñado para conectar con la tarjeta NI-6008.....	121
Figura 97. Señal adquirida con el circuito de muestreo y retención con la tarjeta NI-6008.....	122
Figura 98. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 conectado al circuito S&H y el asistente DAQ Assistant (1).....	123
Figura 99. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 conectado al circuito S&H y el asistente DAQ Assistant (2).....	123
Figura 100. Histograma obtenido con NI-6008 y el circuito de muestreo y retención.	124
Figura 101. Diseño de doble circuito de muestreo y retención.....	124
Figura 102. Señal obtenida con el doble circuito de muestreo y retención.....	125
Figura 103. Señal obtenida con el doble circuito de muestreo y retención (2).....	125
Figura 104. Diagrama obtenido con el DAQ Assistant en tiempo real con la tarjeta NI-6008 y el doble circuito S&H.....	126
Figura 105. Imagen del montaje del doble circuito S&H con NI-6008.....	126
Figura 106. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala logarítmica.....	127
Figura 107. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala logarítmica y filtrado a 50 mV.....	127
Figura 108. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala decimal y filtrado a 50 mV.....	128
Figura 109. Arquitectura tarjeta myRIO.....	129
Figura 110. Tarjeta NI myRIO.....	130
Figura 111. Árbol de proyecto FPGA LabVIEW para tarjeta myRIO.....	131
Figura 112. Código de programa FPGA myRIO.....	131
Figura 113. Programa de Lectura de FPGA de MyRIO.....	132

Figura 114. Código de programa de Lectura de FPGA de MyRIO.....	133
Figura 115. Panel de visualización de datos de myRIO. ....	133
Figura 116. Espectro de Ba-133 obtenido con myRIO y una alimentación de X-ZLAB de 5 voltios. ....	134
Figura 117. Osciloscopio DSO5052A de Agilent.....	135
Figura 118. Drivers Agilent para LabVIEW. ....	136
Figura 119. Programación LabVIEW para configuración de osciloscopio. ....	136
Figura 120. Programación LabVIEW para lectura de osciloscopio. ....	136
Figura 121. Programación LabVIEW para visualización de los valores leídos desde osciloscopio.....	137
Figura 122. Panel de trabajo para sistema de lectura con osciloscopio. ....	138
Figura 123. Panel de trabajo para sistema de lectura con osciloscopio - Histograma en tiempo real.....	138
Figura 124. Pulso del módulo X-ZLAB en panel LabVIEW adquirido con osciloscopio. ....	138
Figura 125. Histograma obtenido con el osciloscopio para una fuente de Ba-133 y alimentación del módulo X-ZLAB de 5 V.....	139
Figura 126. Procesador Digital de Pulso PX5.....	140
Figura 127. Arquitectura del Procesador Digital de Pulso PX5. ....	141
Figura 128. Procesado de la señal con el DPP PX5. ....	141
Figura 129. Señales procesadas por el PX5 con un detector XR100.....	142
Figura 130. Señal muestreada con el PX5.....	143
Figura 131. Tabla de características técnicas del Procesador de Pulsos PX5. ....	143
Figura 132. Tabla de características técnicas del PX5 en modo multicanal.....	144
Figura 133. Pantalla de inicio al abrir el software DppMCA de AMPTEK. ....	145
Figura 134. Menú de conexión de dispositivos del DppMCA.....	145
Figura 135. Barra de herramientas DppMCA: Configuración y adquisición. ....	146
Figura 136. Menú configuración DppMCA: General. ....	146
Figura 137. Menú configuración DppMCA: Multicanal. ....	147
Figura 138. Menú configuración DppMCA: Shaping. ....	147
Figura 139. Señal del PX5 tras el shaping con un 'peaking time' de 1 ms y flat de 0,37 $\mu$ s. ....	148
Figura 140. Señal del PX5 tras el shaping con un 'peaking time' de 0,05 $\mu$ s y flat de 0,2 $\mu$ s. ....	148
Figura 141. Menú configuración DppMCA: Ganancia.....	149
Figura 142. Barra de herramientas DppMCA: Delta Mode y Configuración de la ganancia. ....	149
Figura 143. Menú configuración DppMCA: Señales auxiliares.....	150
Figura 144. Visualización señal auxiliar de detección de shaping e incremento de cuentas.....	151
Figura 145. Barra de herramientas DppMCA: Crear ROI.....	151
Figura 146. Menú de creación de ROI DppMCA.....	151
Figura 147. Barra de herramientas DppMCA: Configuración y activación de la calibración.....	152
Figura 148. Menú de Calibración DppMCA. ....	152
Figura 149. Parámetros de configuración del DppMCA.....	153
Figura 150. Espectro energético del Ba-133.....	154

Figura 151. Espectro obtenido con alimentación de 5V, 25° C y fuente de Ba-133....	154
Figura 152. Espectro obtenido con alimentación de 5V, 25° C y sin fuente. ....	155
Figura 153. Espectro obtenido con alimentación de 5V, baja temperatura y sin fuente. .....	156
Figura 154. Espectro obtenido con alimentación de 6.5V, 25° C y sin fuente. ....	156
Figura 155. Espectro obtenido con alimentación de 6V, 25° C y sin fuente. ....	157
Figura 156. Espectro obtenido con alimentación de 5.5V, 25° C y sin fuente. ....	157
Figura 157. Espectro obtenido con alimentación de 4.5V, 25° C y sin fuente. ....	157
Figura 158. Espectro obtenido con alimentación de 4V, 25° C y sin fuente. ....	158
Figura 159. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y sin fuente. ....	158
Figura 160. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y fuente de Ba-133.	159
Figura 161. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y fuente de Sr-90....	159
Figura 162. Diseño en SolidWorks de la caja del elemento detector. ....	162
Figura 163. Diseño en SolidWorks de la tapadera del elemento detector. ....	162
Figura 164. Diseño en SolidWorks del ensamblaje de la carcasa del elemento detector. .....	163
Figura 165. Vista del diseño de carcasa del elemento detector. ....	163
Figura 166. Recorte de prensa del anuncio de puesta en marcha de VEGA-2. ....	165
Figura 167. Llamada a usuarios para el sistema VEGA-2.....	165
Figura 168. Cámara de experimentación sistema VEGA. ....	166
Figura 169. Feedthrough vista frontal.    Figura 170. Feedthrough vista lateral .....	167
Figura 171. Propuesta de línea de experimentación con el prototipo detector. ....	168
Figura 172. Generación de Pulso Electromagnético en targets sólidos.....	169
Figura 173. Señal del controlador de entrada de gas en cámara de experimentación en condiciones normales. ....	169
Figura 174. Señal del controlador de entrada de gas en cámara de experimentación tras disparo de VEGA láser. ....	170
Figura 175. Magnitud del PEM en una instalación láser de nanosegundo (rojo) y picosegundo (azul).....	170
Figura 176. D-dot PROLYN AD-55    Figura 177. Dispositivos B-dot PROLYN RB ..	172
Figura 178. Publicación presentada para el 13 <sup>rd</sup> Workshop Direct-Drive & Fast Ignition .....	175
Figura 179. Publicación presentada para el V Congreso Conjunto de la SEFM - SEPR .....	176
Figura 180. Publicación Presentada al Targ3 - Targetry for High Repetition Rate Laser- Driven Sources. ....	177
Figura 181. Cristales centelladores compañía Epic-Crystal.....	182
Figura 182. Gama de SiPM de hamamatsu.....	182
Figura 183. Ruido en los dispositivos Hamamatsu.....	183

## Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster aporta una visión general de las radiaciones ionizantes, sus efectos y los sistemas de protección frente a la misma, mostrando distintas aplicaciones y entornos industriales en las que este tipo de radiaciones están presentes. Entre dichos entornos se encuentran los sistemas láser ultraintensos, como es el sistema VEGA del Centro de Láseres Pulsados Ultraintensos y Ultracortos (CLPU). VEGA es un sistema láser pulsado que alcanza potencias de petawatio y pulsos de disparo del orden de femtosegundos, siendo una poderosa fuente de radiaciones ionizantes cuyos parámetros de funcionamiento hacen que los sistemas tradicionales de protección radiológica sean insuficientes.

Ante las singulares necesidades de protección radiológica que plantea el sistema VEGA, el presente trabajo persigue estudiar la implantación de sistemas detectores basados en cristales centelladores acoplados a fotomultiplicadores de silicio. Para ello se realizará un estudio del estado del arte de los elementos de centelleo, así como de los fotomultiplicadores de silicio, siendo estos últimos una tecnología reciente y en proceso de crecimiento que aún no ha sido validada en numerosos entornos de trabajo.

Con todo ello, se plantea la construcción de un prototipo de detector a partir de un módulo detector comercial compuesto por un centellador y un fotomultiplicador de silicio, estudiándose distintas herramientas de adquisición hasta obtener un sistema que pueda ser probado en el sistema láser VEGA, así como en otros entornos radiactivos industriales.

## **Abstract**

This Post Degree Final Project (PDFP) provides a general overview around the ionizing radiation, his effects and their protection systems. The document shows different applications and industrial environments with these types of radiations. Ultraintense laser facilities, like VEGA system at Spanish Pulsed Laser Center (CLPU), are one of these environments. VEGA system is a pulsed laser system with petawatt peak power and femtosecond pulses. VEGA system generates powerful ionizing radiations and VEGA operating parameters make that the traditional radioprotection systems have been insufficient.

This document proposes a solution to the radioprotection needs of VEGA system, studying the development of a detector system based on scintillator crystals connected with silicon photomultipliers (SiPM). This PDFP makes a study around the state of the art of scintillator and SiPM. In the last years the use of SiPM have been grown in radiation detectors devices, but it is a technology that hasn't been tested in many environments.

Finally, this report shows the development of detector device from a commercial radiation detector formed by a scintillator and a SiPM. The dossier presents different ways to develop the prototype, using some acquisition tools.

## Objetivos del Trabajo.

El principal objetivo del presente Trabajo Final de Máster es el de **construir un dispositivo capaz de detectar un espectro energético de radiaciones ionizantes y visualizarlo con una herramienta software, de tal manera que pueda estudiarse la respuesta del dispositivo en un sistema láser ultraintenso**. Dicho sistema generará altos niveles de energía en espacios temporales muy cortos, existiendo un riesgo de saturación del elemento detector con la consiguiente pérdida de información.

Para la consecución de dicho objetivo resulta necesario **adquirir una visión de la radiación, sus efectos y los requerimientos legales y administrativos que deben cumplirse en los entornos radiactivos industriales**, de tal manera que nos aseguremos que dicho dispositivo se encuentra dentro del marco normativo en vigor.

La construcción del elemento detector se realizará a partir de un módulo comercial basado en un cristal centellador acoplado a un fotomultiplicador de silicio, una tecnología relativamente nueva, dado que hasta la fecha los elementos centelladores se acoplaban a tubos fotomultiplicadores. Es por ello, que resultará necesario **realizar un estudio del estado del arte tanto de los elementos centelladores, como de los fotomultiplicadores de silicio**, de tal manera que nos aporten una visión profunda del funcionamiento y respuesta de dichos dispositivos.

**PARTE 1: LA RADIACIÓN IONIZANTE: EFECTOS Y  
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.**

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

## 1. La radiación y sus efectos

Para tener una primera aproximación que ayude a comprender que es eso de la radiación puede realizarse una búsqueda rápida en cualquier diccionario de la lengua, en el que se encuentra lo siguiente:

### Radiación:

Del lat. radiatio, -ōnis 'resplandor'.

1. f. Fís. Acción y efecto de irradiar.
2. f. Fís. Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.
3. f. Fís. Forma de propagarse la energía o las partículas.

Partiendo de esta idea puede concluirse que el término radiación hace referencia a una emisión de materia y/o energía.

Por otro lado, de manera instintiva al pensar en cualquier tipo de actividad radiactiva una de las primeras imágenes que viene a la mente es la de la energía nuclear. Desde la óptica de la Ingeniería Industrial una central nuclear es el ambiente radiactivo por antonomasia, pero en la práctica es el tipo de instalación radiactiva menos numerosa, siendo las más comunes pequeñas instalaciones del sector industrial y servicios.

Precisamente, esa asociación instintiva realizada entre “la radiación” y “lo nuclear”, ligada a la conclusión inicial obtenida a través de la definición de radiación, sirve como punto de partida para conocer y entender qué es la radiación, que de manera muy simplificada sería una emisión de materia y/o energía cuyo origen se encuentra en el núcleo y corteza de los átomos que componen la materia, y se explica a través de la física de partículas.

La materia está compuesta por partículas indivisibles conocidas como átomos, que al combinarse entre sí y con otros átomos distintos, da lugar a los compuestos químicos cuyas propiedades difieren de las que inicialmente tienen los átomos.

El átomo está compuesto por un núcleo de  $10^{-14}$  metros de radio formado por protones y neutrones, y una corteza formada por electrones que se distribuyen en distintas capas, cada una correspondiente a un determinado nivel energético. La carga del núcleo es igual, pero de signo opuesto, a la de la corteza.

En lo que al núcleo respecta, los protones que lo conforman son elementos de carga positiva, y los neutrones disponen de mayor masa que los protones, pero son de carga eléctrica neutra. A simple vista podemos pensar que el núcleo es una estructura difícilmente asumible, dado que está compuesto únicamente por cargas positivas que al ser del mismo signo deberían repelerse, pero al estar confinados en un volumen de unos  $10^{-24} \text{ m}^3$  predominan las fuerzas nucleares que contrarrestan la repulsión de los protones.

La estructura del núcleo devuelve dos números clave para poder comprender el origen de la radiación:

- El número atómico,  $Z$ , que define el número de protones que conforman el núcleo.
- El número másico,  $A$ , que identifica el número total de elementos que componen el núcleo, tanto protones como neutrones.

De manera simple se obtiene el número de neutrones  $N$ , a través de restar al número másico el número atómico.

Los átomos tienen a buscar el equilibrio en las cargas, por lo que cualquier inestabilidad tanto en la corteza con los electrones, como en el núcleo con los protones y neutrones, generará una reacción en el conjunto del elemento.

Desde el punto de vista del núcleo, para un determinado número atómico existe un número mínimo y máximo de neutrones para que se forme un conjunto nucleido estable, ese rango de valores se conoce como banda isotópica de estabilidad. Todos aquellos núcleos que estén fuera de dicha banda tenderán a la emisión de partículas y radiaciones hasta llegar a la estabilidad. Dicha emisión se conoce como radiactividad, llamándose radionucleidos a los nucleidos inestables en los que ocurre.

Del mismo modo, y desde el punto de vista de la corteza, los electrones que se ordenan en las distintas capas pueden separarse de la misma si se les suministra la energía suficiente, conocida como energía de enlace. Dicha energía es mayor en las capas cercanas al núcleo.

Cuando los átomos están excitados porque sus electrones se han desplazado a capas externas, aunque se siga en el equilibrio de cargas, estos tienen a desexcitarse, ocupando los huecos con electrones de niveles energéticos más alto, lo que hace que la energía sobrante se libere en forma de fotón, sin llegar a producir iones. Este proceso

emite una radiación que puede abarcar desde el rango energético del infrarrojo, la luz visible, los ultravioletas o incluso los Rayos X cuando el salto energético es muy grande.

Esta emisión energética en forma de fotón no necesita de un medio material para su propagación, transmitiéndose en forma de ondas electromagnéticas compuestas por un campo eléctrico y uno magnético con plano de propagación perpendiculares. Este tipo de radiación de carácter electromagnético abarca un amplio rango en el valor de la longitud de onda.

Con lo expuesto hasta ahora puede afirmarse que existen dos formas o tipos de radiación:

- **Radiación no ionizante:** la cual no es capaz de producir iones durante las interacciones que se suceden en el átomo.
- **Radiación ionizante:** en la que el átomo queda cargado eléctricamente, ya sea positiva o negativamente, al emitir electrones o protones. Esta radiación puede emitir partículas u ondas electromagnéticas, generando reacciones y cambios químicos en el entorno con los materiales con los que entre en reacción, siendo capaces de romper los enlaces químicos de las moléculas. Dentro de este tipo de radiación se encuentran los rayos alfa, beta, gamma, así como los Rayos X.

Toda esta energía que se libera a causa de las inestabilidades que sufre el átomo se cuantifica a través de la unidad del electronvoltio (eV), dado que las unidades del Sistema Internacional, el Julio en este caso, tienen valores excesivamente altos:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Lo más habitual es encontrar los niveles de radiación en algún múltiplo del electronvoltio, ya sean keV o MeV.

El presente proyecto se centrará en las radiaciones ionizantes en el entorno industrial, analizando los distintos tipos y orígenes, así como sus efectos, los métodos de detección y los sistemas de protección existentes.

## 1.1. La radiactividad.

Como ya se ha introducido la actividad radiológica de los elementos depende de la estabilidad de sus átomos, la cual no está siempre garantizada, existiendo elementos de la tabla periódica con núcleos inestables que se modifican a lo largo del tiempo emitiendo de manera espontánea partículas. Los elementos que sufren estas modificaciones se denominan radionucleidos, siendo esa emisión espontánea lo que conocemos como radiactividad.

De manera general, los elementos con un número atómico mayor al del plomo ( $Z=82$ ) son los elementos que más inestabilidad presentan.

La imagen muestra una tabla periódica de los elementos con los elementos radiactivos resaltados en colores. Los elementos radiactivos incluyen: Tc (43), Rn (86), Po (84), At (85), Fr (87), Ra (88), Ac (89), Th (90), Pa (91), U (92), Np (93), Pu (94), Am (95), Cm (96), Bk (97), Cf (98), Es (99), Fm (100), Md (101), No (102), Lr (103), y todos los elementos con número atómico mayor que 103 (104-118). Los elementos de la serie de actínidos (89-103) están etiquetados como actínidos (\*\*). Los elementos de la serie de lantánidos (57-71) están etiquetados como lantánidos (\*).

Figura 1. Distribución en la tabla periódica de los elementos radiactivos

Debe considerarse que cada elemento puede tener distintas formaciones atómicas, encontrando distintas clasificaciones:

- **Isótopos:** los elementos caracterizados por el mismo número de atómico  $Z$ .
- **Isóbaros:** los núcleos que tienen el mismo número másico  $A$ .
- **Isótonos:** los elementos que disponen del mismo número de neutrones  $N$ .
- **Isómeros:** cuando el núcleo de un elemento está energéticamente excitado de manera que su vida es lo suficientemente larga, dicho nivel de excitación se conoce como metaestable, denominándose ese núcleo como un isómero del núcleo original.

Este hecho hace que deban considerarse además de los elementos que aparecen en la tabla periódica, sus distintos nucleidos. Por ejemplo, en el elemento radiactivo por antonomasia, el Uranio, dispone de dieciséis isótopos, tres de los cuales se encuentran en la naturaleza, siendo habitual hablar de ellos:

Isótopos del Uranio	N.º Protones	N.º Neutrones	N.º Electrones	% del isótopo en cada gramo de Uranio
<b>U-234</b>	92	142	92	0,01 %
<b>U-235</b>	92	143	92	0,71 %
<b>U-238</b>	92	146	92	99,28%

Figura 2. Característica de los Isótopos del Uranio.

El elemento diferencial de la radiactividad es el tiempo. Cada elemento realiza la emisión espontánea a un ritmo distinto y este viene determinado por la constante desintegración, que es característica de cada material, existiendo elementos cuya actividad radiactiva son decenas de años y otros, sin embargo, un par de años.

La constante de desintegración  $\lambda$  tiene dimensión inversa a la del tiempo, normalmente  $s^{-1}$ , aunque resulta habitual verla expresada en  $año^{-1}$ . Relacionada con esta constante, también puede encontrarse el período de semidesintegración  $T$ , que muestra el periodo de tiempo necesario en el que el número inicial de átomos radiactivos se reduce a la mitad:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La radiactividad depende únicamente de la estabilidad o inestabilidad de los núcleos de los elementos, asentándose en la energía de enlace dentro del núcleo. Cuanto mayor sea la energía de los enlaces, más estables son los mismos, y por tanto es más difícil que se produzca actividad radiactiva.

Sin embargo, cuando la energía de los enlaces es pequeña, los núcleos son más inestables y se tiene a una desintegración nuclear en la que se emiten partículas, radiación tipo alfa y beta, obteniendo un núcleo de especie distinta al original.

Asociada a la radiación alfa y beta emitida durante la desintegración del núcleo puede generarse la emisión de radiación electromagnética del tipo gamma.

## 1.2. Las radiaciones ionizantes.

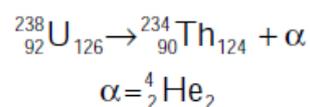
Como ya se ha visto, las radiaciones ionizantes son aquellas en las que un átomo queda convertido en un ion al perder un protón de su núcleo o un electrón de su corteza. Este tipo de radiación puede ser en forma de partículas, de tipo alfa o beta, o bien, la radiación ionizante puede emitirse en forma de ondas electromagnéticas y ser del tipo gamma o rayos X.

Dentro de las radiaciones ionizantes puede encontrarse un quinto tipo de radiación, la proveniente de los neutrones, pero en general estos no son emitidos de forma natural, si no que provienen de algún tipo de reacción nuclear, siendo elementos de gran importancia dentro de las reacciones de fisión nuclear ya que mantienen la reacción en el reactor.

### *Radiación alfa.*

Este tipo de emisión surge de la emisión de dos protones y dos neutrones de manera conjunta, similar a la estructura del núcleo del helio. El resultado es que el número atómico Z disminuye en dos unidades y el número másico A disminuye en cuatro unidades.

Por ejemplo, en una emisión alfa que sucede con el U-238 con un número atómico Z igual 92, el elemento resultante pasa a tener un número atómico Z igual 90 y un número másico igual a 234, transformándose el Uranio en Torio:



El motivo de la emisión alfa está en la inestabilidad nuclear que se produce por las repulsiones eléctricas entre los protones la cuál es mayor cuanto mayor es el número másico.

La expulsión de dos protones del elemento deja un ion con carga eléctrica negativa, generándose una inestabilidad en la que el elemento tiende a expulsar los dos electrones en busca de la neutralidad eléctrica. Esos dos electrones que tiende a expulsar el ion tiende a recogerlos la partícula alfa, para así convertirse en un átomo neutro de Helio, de manera que todo sucede como si los electrones sobrantes formasen parte de la propia partícula alfa.

Desde el punto de vista energético las partículas alfa se mueven en el orden de los MeV, encontrándose entre los 1,8 MeV hasta los 8,75 MeV. Las emisiones corrientes suelen encontrarse entre los 4 – 5,5 MeV, las cuales no sobrepasan los 5 cm de propagación en el aire, necesitándose radiaciones superiores a 7,5 MeV para poder penetrar en la piel, por lo que la radiación tipo alfa no plantea peligro más allá de si esta se deposita en el interior del cuerpo, por ejemplo, a través de una ingesta con radiofármacos.

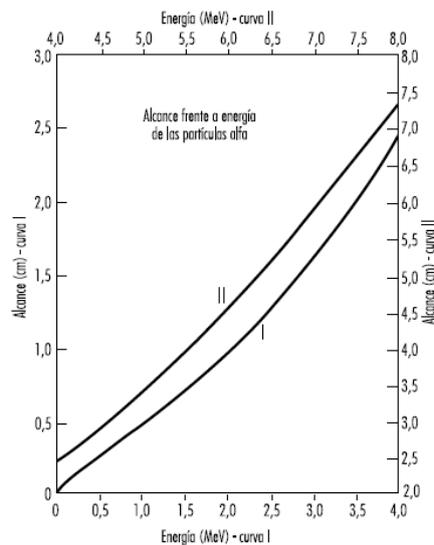


Figura 3. Alcance - Energía de partículas alfa lentas en el aire<sup>1</sup>

### Radiación beta.

La radiación beta puede ser positiva o negativa, y en ambos casos solo desciende el número atómico Z, teniendo el elemento resultante el mismo número másico A que el elemento originario, por lo que el resultado es un isobaro del elemento inicial.

En la **desintegración beta negativa** se produce la emisión de electrones que van acompañados de una nueva partícula conocida como neutrino, la cual no tiene carga y tampoco masa, pero si está compuesta por energía, la cual se distribuye aleatoriamente entre el electrón y el neutrino, de manera que la energía de la partícula beta es inversamente proporcional a la energía del neutrino. Así, si la partícula beta se lleva toda la energía, el neutrino tendrá energía tendiente a cero.

En la práctica, la transformación que se genera en el núcleo es la de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino. De esta forma, el electrón en forma de partícula beta junto con un antineutrino y obtenemos un nuevo producto.

<sup>1</sup> Imagen obtenida de la Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (Vol. II, Parte VI, Cap. 48)

El átomo resultante tiene el mismo número másico pero un número atómico una unidad mayor.

Los elementos que suelen realizar este tipo de emisiones son los radionucleidos con un elevado número de neutrones, buscando que la relación entre los neutrones y los protones sea menor en busca de la estabilidad del átomo.

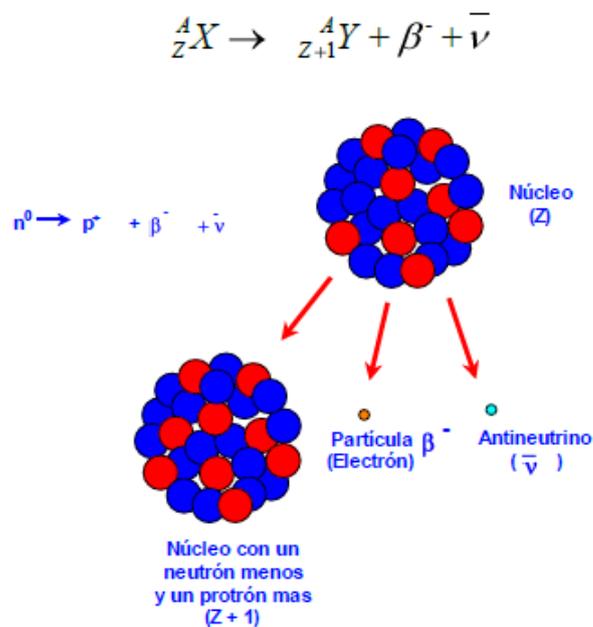


Figura 4. Representación de una desintegración beta negativa

En el caso de la **desintegración beta positiva** se produce una emisión de positrones. Este tipo de partículas son de igual masa a la del electrón, pero de carga eléctrica positiva, siendo así el positrón la antipartícula del electrón.

La transformación que se produce en el núcleo es la de un protón en un neutrón, un positrón y un neutrino, de manera que se libera un positrón en forma de radiación beta y un neutrino. Al transformarse un protón el número atómico  $Z$  desciende en una unidad, pero el número másico se mantiene ya que de la transformación se obtiene un neutrón.

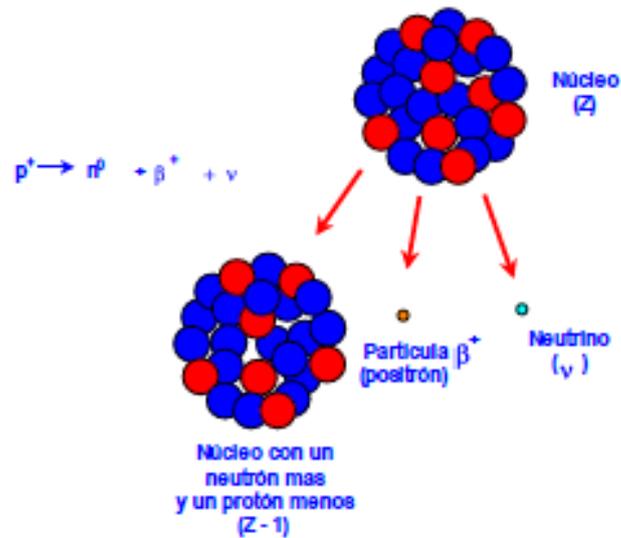


Figura 5. Representación de una desintegración beta positiva

### **Radiación gamma.**

El origen de la radiación gamma está ligado a la radiación alfa y beta, generándose cuando un núcleo excitado pasa a un nivel de energía menor, emitiendo energía en forma de ondas electromagnéticas, sin la emisión de ninguna partícula, como si ocurre con las radiaciones alfa y beta.

De manera práctica, puede entenderse que este tipo de radiación surge tras la emisión de una partícula alfa o beta, tras la cual el núcleo queda con un exceso de energía que elimina mediante la radiación gamma en busca de la estabilidad nuclear, compensando así las otras emisiones. Esta radiación no lleva asociados cambios de estructura.

Aún a pesar de lo expuesto hasta ahora, existen elementos en los que se producen emisiones alfa y beta puras sin emisiones de radiación gamma, y al contrario, también se conocen algunos elementos que emiten rayos gamma de manera pura.

La emisión de radiación gamma pura ocurre cuando el isótopo de un elemento existe en dos formas diferentes, conocidos como isómeros nucleares, en los que hay un mismo núcleo atómico, con igual número másico, pero con distintos niveles de energía, transformándose el isómero de mayor energía en uno de menor energía.

Desde un punto de vista práctico, no existen radionucleidos emisores de gamma puros al cien por cien, aunque algunos como el Tecnecio 99 o Cesio 137 son casi emisores puros.

La energía de los rayos gamma suele encontrarse entre rangos de keV y MeV, siendo los rayos cósmicos el tipo gamma más energético que se conoce. Las energías generan un espectro discreto compuesto por líneas monoenergéticas que son específicas para cada radionucleido.

La radiación gamma tiene un gran poder de penetración, la cual va mermando a medida que colisionan con las capas electrónicas de los átomos que encuentran a su paso. En el aire pueden propagarse cientos de metros, siendo detenidas por grandes capas de hormigón, plomo o agua.

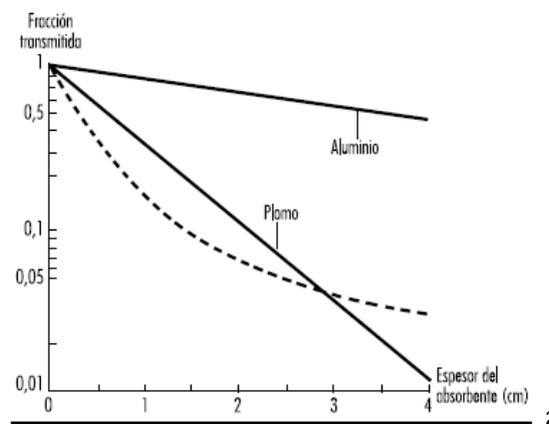


Figura 6. Atenuación de Rayos Gamma de 667 keV en Aluminio y Plomo

## Rayos X

Como ya se ha introducido la emisión de Rayos X se produce cuando hay un salto de electrones de una capa superior a una capa inferior, emitiéndose energía en forma de fotones y generando radiación en forma de onda electromagnética. Además de ser una consecuencia del ordenamiento de los electrones, el frenado de partículas cargadas puede dar lugar a la emisión de esta radiación.

Cuando la radiación es emitida como consecuencia de la transición de electrones se produce un espectro discreto de cada especie atómica, constituyéndose un *espectro de Rayos X característicos*. Cada una de las transiciones de una capa superior a una inferior emite unos Rayos X característicos de la capa que acoge el electrón, tal y como se presenta en la siguiente figura.

<sup>2</sup> Imagen obtenida de la Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (Vol. II, Parte VI, Cap. 48).

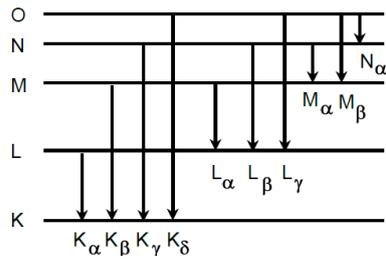


Figura 7. Posibles transiciones entre las capas de un átomo

La radiación emitida a consecuencia del frenado tiene su origen en el frenado que sufre una partícula cargada al pasar junto a un núcleo, emitiéndose un fotón debido a la energía de la partícula incidente. A esta radiación se la conoce como radiación de frenado, constituyendo un *espectro de Rayos X de frenado* de carácter continuo.

La producción artificial de Rayos X se basa en este efecto, utilizando un tubo de vidrio en alto vacío con dos electrodos, un ánodo y un cátodo. Al circular corriente por el cátodo por efecto termoiónico emite electrones, los cuales se aceleran hacia el ánodo mediante una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial marca la energía que alcanzan los electrones en el ánodo. Los electrones acelerados chocan con el metal que forma el ánodo haciéndole perder electrones de los niveles profundos, generando un reordenamiento de los mismos que lleva asociada la emisión de Rayos X característicos. Sumado a este proceso, el frenado en esas colisiones genera la emisión de Rayos X de frenado. Como resultado, el espectro de los Rayos X es una superposición de ambas emisiones.

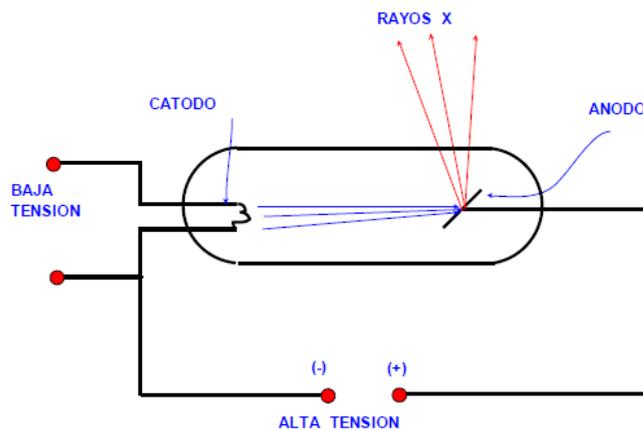


Figura 8. Funcionamiento Tubo de Rayos X

### **1.3. Usos y efectos de la radiación ionizante en la industria**

Una vez comprendido cómo se genera y en qué consiste la radiación, cabe preguntarse cuáles son sus usos e importancia en el entorno industrial. Esta pregunta cobra aún más sentido cuando se piensa en los efectos de la radiación sobre los equipos y las personas, planteándose si realmente compensa su utilización sabiendo lo que puede llegar a ocasionar.

En la sociedad existen grandes reticencias entorno a todo lo relacionado con la radiación, percibiéndose como algo nocivo para la salud. Esta imagen se ha construido a raíz de distintos accidentes radiológicos que han costado la vida a miles de personas y que han dejado efectos secundarios a otros tantos. Además de los accidentes, los nuevos hallazgos científicos en los que se muestra a la radiación como el origen de algunas enfermedades de este nuevo tiempo, tales como el cáncer, hace que toda actividad radiológica sea mal aceptada.

Desde un punto de vista técnico deben comprenderse los riesgos que conllevan las operaciones en las que existen radiaciones ionizantes, poniéndose en marcha cuantas medidas de seguridad sean necesarias para minimizar los riesgos, pero hay que ser conscientes de la cantidad de oportunidades que ha aportado la radiación y distintos instrumentos radiológicos, abarcando desde aplicaciones médicas hasta aplicaciones industriales.

### **1.4. Aplicaciones industriales de las radiaciones ionizantes.**

#### ***Energía nuclear***

En el ámbito de la industria y la ingeniería la utilización más importante de la radiación y los radionucleidos es la asociada a la generación de energía eléctrica en las Centrales Nucleares. Como veremos más adelante, este tipo de instalaciones son las más controladas y que más riesgos plantean desde el punto de vista radiológico.

En dichas centrales se utiliza la energía calorífica que se desprende en las emisiones de radiación para convertir agua en vapor que a través del movimiento por una turbina se encargará de la generación de electricidad. Esta energía basada en la emisión de radiación es conocida como energía de emisión, en la que un radionucleido hace las veces de combustible.

La generación de calor en este tipo de reacciones se debe a la pérdida de masa que se produce durante las emisiones, parte de la cual se convierte en energía siguiendo la relación energía masa propuesta por Einstein fórmula  $E = mc^2$ .

Las cantidades de radionucleidos utilizadas en un reactor de este tipo de centrales es significativa lo cual explica la gran liberación de energía que se produce. El combustible que generalmente se utiliza es el Uranio-235. De media, el consumo anual que suele tener una instalación estándar es de 25 toneladas de uranio.

Una de las características técnicas de esta energía es el alto rendimiento que ofrece el combustible, produciendo una gran cantidad de energía por unidad de masa. Pero frente a este rendimiento, está la poca eficiencia del proceso, en el cual puede llegar a desaprovecharse hasta el 90 % de la energía que se libera.

Aún a pesar de la poca eficiencia del proceso, si hacemos comparativas con otras centrales térmicas de generación de electricidad, para producir la misma cantidad de energía que genera una nuclear con 25 toneladas de consumo, una térmica de carbón necesitaría 2,5 millones de toneladas de carbón y una central de ciclo combinado necesitaría 1.700 millones de metros cúbicos de gas natural. Cabe destacar que en las Centrales Nucleares de generación de electricidad no se libera  $CO_2$ .

Uno de los grandes problemas que plantea la industria nuclear es la generación de los residuos, los cuales siguen teniendo una actividad radiológica pasados varios años después de su utilización como combustible. El almacenamiento y la disposición de los mismos es competencia del Ministerio de Energía, desarrollado en los planes generales de residuos radiactivos.

En la línea de finalizar con el problema de los residuos y aumentar la capacidad energética, en la actualidad se trabaja en explotar la Energía Nuclear de fusión, siguiendo un mecanismo similar al que realiza el Sol en la liberación de energía.

### ***Industria médica***

El uso de la radiación en la industria médica está muy extendido, tanto en el desarrollo de equipamientos, como en la aplicación de tratamientos y distintos procesos radiológicos. El principal objetivo es usar la radiación en distintos sistemas de diagnóstico, obteniendo un sistema de observación del interior de organismos de manera no invasiva.

Desde el punto de vista ingenieril lo menos atractivo son los tratamientos médicos radiológicos o los análisis clínicos, en los que se suministran dosis de radiación a

pacientes a fin de paliar ciertas dolencias y enfermedades, como el cáncer, o bien, para determinar el contenido de alguna sustancia en la sangre. Lo realmente interesante en el campo de la ingeniería es la fabricación de la maquinaria y el equipamiento.

Este tipo de equipamiento es utilizado en las técnicas de radiodiagnóstico. Este tipo de técnicas resultan muy interesantes ya no solo en los tratamientos médicos, sino que son ampliamente utilizadas en el diagnóstico de piezas y productos industriales. Los sistemas de radiodiagnóstico más usados son la radiografía, que coloquialmente se conocen como Rayos X, las mamografías, la tomografía por emisión de positrones (PET) o la tomografía axial computarizada (TAC).

La proliferación de estos tratamientos médicos ha generado la necesidad de especialistas dedicados al control y gestión de este tipo de equipos, creándose la figura del físico médico, que no tiene necesariamente una formación puramente sanitaria, sino que puede venir de carreras científicas y técnicas.

Los equipamientos de radiografía constan de un emisor de radiación X o gamma, dependiendo de la profundidad a la que se necesite trabajar, y un detector consistente en una película radiográfica o un elemento de detección digital.

Los Rayos X se obtienen al acelerar los electrones que chocan con un elemento metálico. La imagen interior del elemento a estudiar ya sea una persona o una pieza según estemos en el ámbito médico o industrial, se genera debido a la mayor atenuación de las distintas partes que lo conforman. Los rayos que consiguen atravesar el elemento impactan en el detector y forman una imagen que luego es revelada.

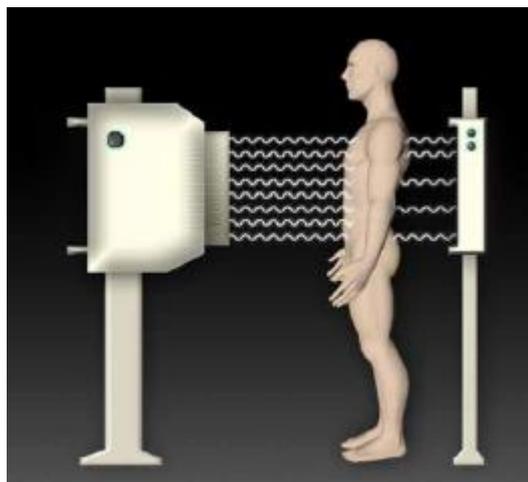


Figura 9. Representación del funcionamiento de un sistema de radiodiagnóstico

El resto de técnicas de radio diagnóstico tienen funcionamiento similar a la explicada, con pequeñas variaciones. Una de las técnicas más significativas es la fluoroscopia, que tiene funcionamiento similar, pero usa la emisión de Rayos X de forma continua y posee un tubo intensificador de la imagen, de esta manera se puede realizar una grabación del interior del organismo.

Los tratamientos con Tomografías Computadas consisten en un emisor de Rayos X y detectores ubicados en un anillo rotatorio con una camilla móvil que se desplaza mientras se emiten Rayos X de forma continua. Esto permite obtener un espectro en tres dimensiones de manera totalmente digital.

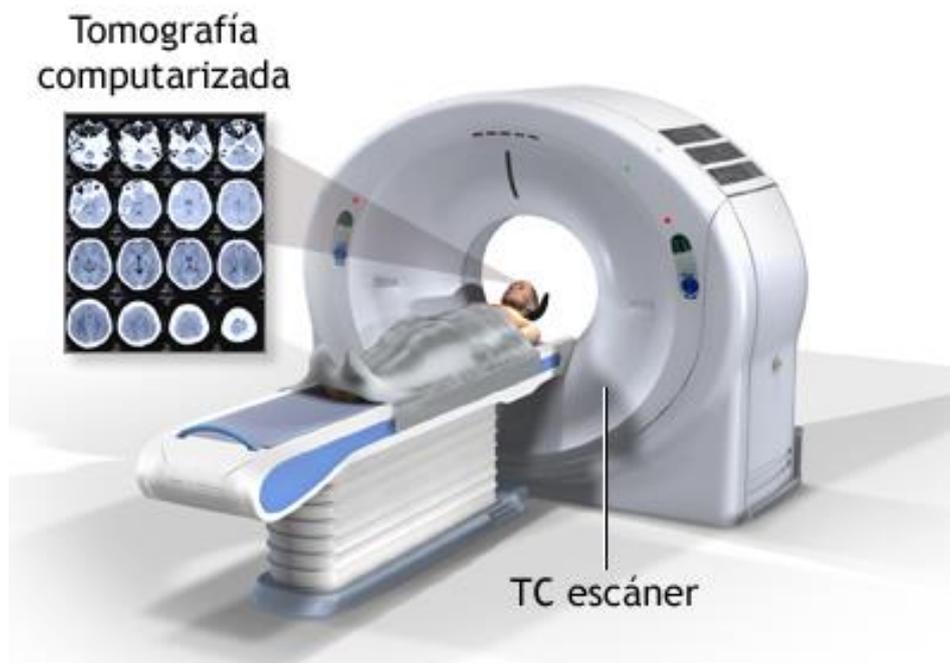


Figura 10. Equipo escáner de Tomografía Computarizada

Existen otros procesos de radiodiagnóstico basados en radiofármacos que son introducidos al paciente, ya sea mediante ingestión, inhalación o por vía venosa, y estos producen una emisión de radiación gamma que tenderá a salir del cuerpo y serán detectados en el exterior, construyendo una imagen del sistema. Este proceso es la base del centellograma.

La tomografía por emisión de positrones, PET, utiliza como radiofármaco un emisor de positrones de tipo beta positivo. Este tipo de partículas al chocar entre sí generan dos fotones que salen cada uno a  $180^\circ$  del otro. Esta emisión es detectada con un anillo de detectores, similar al de la tomografía computarizada.

Como vemos, todos estos sistemas requieren de grandes diseños técnicos e ingenieriles, así como una gran inversión en tecnología de detección y computación muy avanzada. Hay que destacar que las empresas encargadas de vender y dar asistencia en las instalaciones de Rayos X para el diagnóstico médico deben ser autorizadas por el Consejo de Seguridad Nuclear, dado que estas empresas velan por la conformidad del equipo, y además, se encarga de la retirada de este tipo de equipos.

### ***Procesos y sistemas industriales.***

El uso de las radiaciones ionizantes en el sector industrial ha empezado a extenderse en distintas herramientas de medición e inspección, destacando los sistemas de radiografía industrial, los cuales son muy similares a los equipos de radiodiagnóstico anteriormente explicados.

En este caso, la radiografía industrial se utiliza para detectar imperfecciones en piezas metálicas, especialmente elementos críticos, como son las uniones soldadas. En el caso de piezas metálicas se utilizan gammágrafos, consistentes en un emisor gamma que se coloca en un extremo de la piza a examinar, y en el otro se sitúa el elemento detector.

Este tipo de elementos también pueden utilizarse para estudiar la lubricación y el desgaste de partes móviles. Para ello habría que utilizar en las piezas un elemento radiactivo, de manera que, al desgastarse, este pase al lubricante y pueda ser detectado.



*Figura 11. Detector de rayos gamma (gammágrafo)*

Los elementos de radiografía industrial basados en Rayos X no tienen demasiada utilidad para la industria del metal, por lo que este tipo de diagnósticos se utiliza para otros sistemas de control. El más conocido es el escáner de inspección de equipaje que se utiliza en estaciones y aeropuertos. Dicho sistema se utiliza en industria para

observar la estructura de piezas, observando las distintas densidades, así como para observar la uniformidad y el interior de elementos de tipo plástico u orgánico.

Todos estos sistemas de radiografía industrial pueden desarrollarse en instalaciones fijas, necesitando diseños de estructuras blindadas que permitan la radiografía, o bien, instalaciones móviles.

Desde un punto de vista técnico, los gammágrafos son elementos portátiles y ligeros que permiten tener mayor accesibilidad que los rayos X, debido al mayor poder de penetración, aunque con instalaciones de rayos X potentes se consigue una mejor calidad de imagen, debido en parte, a que estas instalaciones permiten regular la capacidad de penetración del haz.

Los equipos de gammagrafía resultan más económicos y más robustos que los equipos de rayos X, aunque estos necesitan consumibles que resultan más caros.

Cabe destacar, que los equipos de radiografía industrial basados en radiación gamma emiten radiación de manera constante, mientras que los equipos de Rayos X solo emiten cuando están en funcionamiento, lo que hace que estos no tengan riesgos de fugas.

Además de la aplicación radiográfica, las radiaciones ionizantes son utilizadas en multitud de reacciones químicas de distintos procesos industriales, especialmente en los relacionados con la fabricación de resinas y polímeros. Puede servir como ejemplo la exposición de la resina poliéster que se utiliza para mejorar las propiedades de maderas blandas, o bien, en la polimerización del polietileno para obtener un producto más resistente mecánicamente en presencia de temperaturas elevadas.

En el ámbito de la medición de parámetros industriales, pueden utilizarse radiaciones ionizantes. Por ejemplo, la medida de humedad de suelos o la búsqueda de depósitos subterráneos a través de añadir a corrientes de agua elementos radiactivos para observar el punto de depósito.

Otro ejemplo más común de elemento detector iónicos de incendios, consistentes en dos cámaras situadas en el interior del detector, una cerrada y otra que contiene una fuente de radiación alfa. La radiación alfa emite He con dos cargas positivas que son neutralizadas por el humo que posee carga negativa. En la cámara abierta se encuentran unas placas cargadas en las que disminuye la carga al entrar el humo.

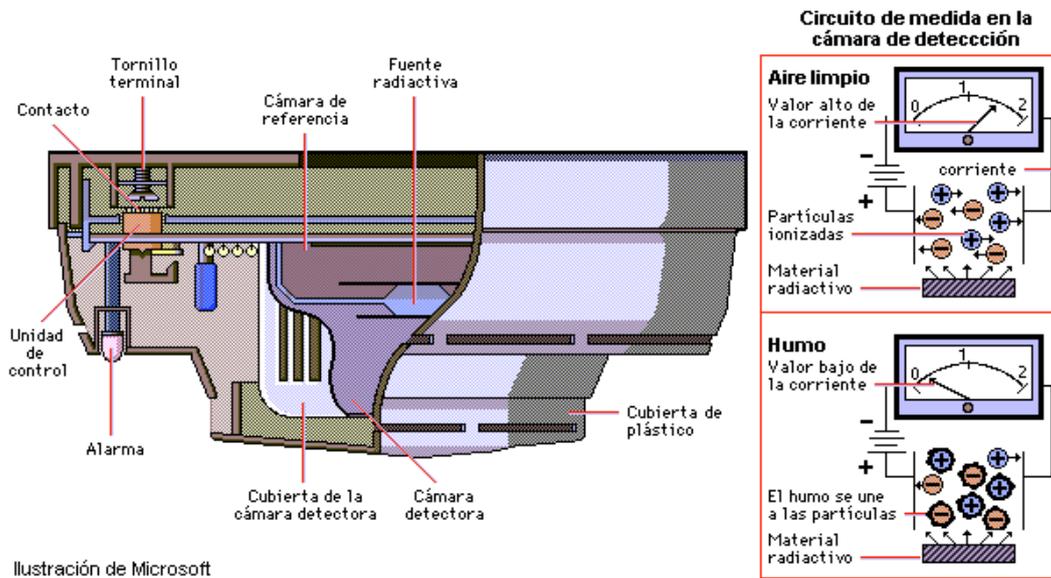


Ilustración de Microsoft

Figura 12. Detector de incendio iónico.

Para el presente trabajo trabajaremos con otro fenómeno radiactivo, que es la capacidad de las radiaciones alfa y beta de generar emisiones de luz en determinados materiales. Ese tipo de luminiscencias pueden utilizarse para desarrollar detectores o bien, para elementos de señalización.

Las cargas que poseen las partículas ionizantes y la neutralización de cargas no solo se utilizan en elementos sensores, como se ha visto con los detectores de humo, sino que también se utilizan para neutralizar la electricidad estática en la industria textil. De esta manera se evita la descarga de corrientes eléctricas en la maquinaria industrial.

### 1.5. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

La radiación tiene el poder de penetrar con la materia que encuentra a su paso. En el caso de las radiaciones ionizantes, la penetración puede suponer un cambio de estructura atómica en el material en el que choque, debido a la carga eléctrica que posee.

De manera general, la radiación puede arrancar electrones de la corteza de los átomos que componen la materia con la que interaccione, generando una ionización de la misma. En el caso de tratarse de materia biológica, al estar formada por moléculas de agua, ya sea en mayor o menor medida, se produciría una ionización de estas moléculas. Dicho proceso de ionización del agua de los tejidos puede tener como resultado la generación de unos radicales libres con la suficiente reactividad química como para alterar seriamente los tejidos de los seres vivos.

Entre esas alteraciones destaca la relacionada con la molécula del ADN, ya que es la molécula básica que forma parte de las células del cuerpo, pudiendo aparecer un desarrollo celular anormal en el organismo de los seres vivos.

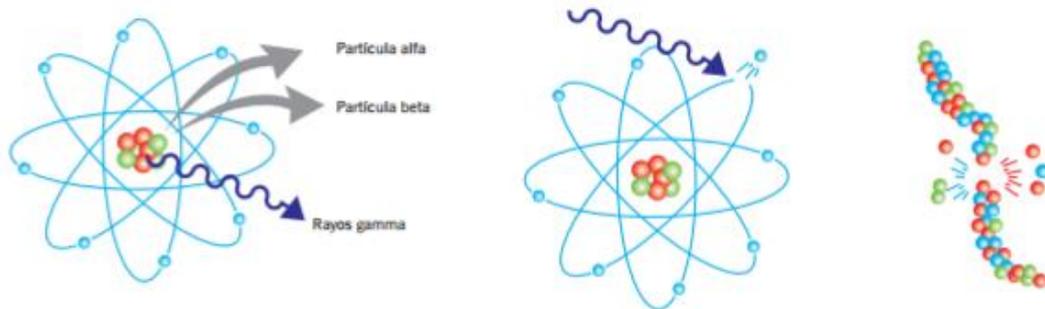


Figura 13. Representación gráfica de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el ADN

La radiación no afecta por igual a todas las células, eso se debe a que cada una tiene una radiosensibilidad distinta, teniendo la radiación distinta influencia sobre cada una de ellas, pudiendo llegar a destruir células cancerosas sin afectar a tejidos normales. Sobre el fenómeno de la radiosensibilidad se asienta el concepto de la radioterapia.

De igual forma, en función de distintos factores, físicos, biológicos o químicos, la exposición puede generar un tipo de daño sobre las células, que abarca desde la muerte de la misma hasta su alteración genética.

Entre los factores físicos destacan la calidad de la radiación, la cual se determina en base a la transferencia lineal de energía (LET) que tiene la radiación incidente, así a mayor LET, sus efectos son más graves. Junto con la calidad de la radiación, está la tasa de dosis. A medida que la tasa es mayor, la gravedad de los efectos aumenta.

Los factores biológicos hacen referencia al ciclo en el que se encuentran las células, en la etapa de mitosis las células son más sensibles, mientras que cuando están en la fase de síntesis estas son más radiorresistentes. De igual manera, las propias células poseen mecanismos de reparación, los cuales son más eficaces cuando la célula está en reposo.

En lo relativo a los factores químicos se hace referencia a distintos elementos que aumentan o disminuyen las posibilidades del daño que puede generar una dosis radiactiva en función de que las células estén compuestas por radiosensibilizadores o radioprotectores.

### **Tipos de efectos biológicos**

Dada la gran variedad de factores que intervienen en el nivel de daño que puede generarse en los sistemas celulares con las radiaciones ionizantes, se distinguen los efectos que pueden encontrarse en dos tipos: los efectos deterministas y los estocásticos.

Los efectos deterministas son aquellos que se producen cuando el nivel de radiación es suficiente como para producir la muerte de un número suficiente de células capaz de generar una disfunción en el órgano correspondiente. La gravedad de este tipo de efectos depende del nivel de dosis recibida, siendo más graves los efectos cuanto mayor es la dosis, siempre y cuando esta supere un nivel de dosis umbral que marca el límite entre la aparición de efectos o no. Cabe destacar que los efectos deterministas aparecen en el medio – corto plazo.

En el caso de que las células no mueran, pero si se sufran una mutación, se habla de efectos estocásticos. En este caso, los efectos aparecen a largo plazo, debido a que las dosis recibidas son bajas. De igual forma, aquí no se habla de la gravedad de los efectos, si no de la probabilidad de los mismos, es decir, cuanto más tiempo sea la exposición a una dosis de radiación baja, mayor probabilidad de que aparezcan efectos.

	<b>Efectos estocásticos</b>	<b>Efectos deterministas</b>
<b>Mecanismo</b>	Lesión subletal (una o pocas células)	Lesión letal (muchas células)
<b>Naturaleza</b>	Somática o hereditaria	Somática
<b>Gravedad</b>	Independiente de dosis	Dependiente de dosis
<b>Dosis umbral</b>	No	Sí
<b>Relación Dosis-Efecto</b>	Lineal-cuadrática; Lineal	Lineal
<b>Aparición</b>	Tardía	Inmediata o a corto plazo

Figura 14. Tipos de efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

Como veremos en el siguiente apartado, el nivel de dosis puede diferenciarse entre la dosis absorbida o efectiva, y para ambos se utilizan distintas unidades. En el caso referente de cuantificar la dosis en los efectos biológicos, se hace referencia a la dosis absorbida, la cual se mide en Gray (Gy), que equivale a un Julio partido kilogramo.

Para exposiciones entre 3 – 5 Gy los efectos inmediatos son vómitos, náuseas y diarreas, apareciendo a partir de la tercera semana tras la exposición trastornos sanguíneos, y si la dosis es menor a 3 Gy a partir de la quinta semana se inicia la

recuperación, aunque dosis más altas, pueden provocar la muerte entre el primer y segundo mes.

Si las exposiciones están entre los 5 – 15 Gy estas son mortales, produciéndose a las pocas horas trastornos gastrointestinales y la muerte en 10 – 20 días de la exposición. En el caso de que la dosis absorbida sea mayor a 15 Gy la muerte puede ocurrir en menos de 5 días de la exposición.

Si la radiación se produce en los en mujeres embarazadas pueden aparecer efectos en el feto, llegando a ocasionar el aborto. En este caso, los umbrales de dosis umbral a partir del cual aparecen los efectos deterministas son más bajos, como podemos ver en la siguiente tabla.

<b>Periodo de gestación</b>	<b>Riesgo más importante</b>	<b>Dosis</b>
Inicio del embarazo	Aborto espontáneo	1,0 Gy
Semana 2	Malformaciones en el feto	0,5 Gy
Semana 8	Retraso mental	0,4 Gy
Semana 15		
Semana 26	Poco riesgo	
Final del embarazo		

Figura 15. Efectos de las radiaciones ionizantes en el embarazo<sup>3</sup>

A medida que el embarazo está más avanzado, los efectos que produce la radiación sobre el feto son menores.

Como ya se ha explicado, la cuantificación de los efectos estocásticos resulta más complicada de realizar, debido a que en este caso se menciona la probabilidad de aparición, no existiendo una dosis umbral. A pesar de esta controversia, se distinguen dos tipos de efectos estocásticos, los hereditarios, que se producen cuando se modifica una célula germinal y el efecto se produce en la descendencia del individuo, o bien, efectos estocásticos somáticos, cuando el daño se produce en células somáticas y sus efectos se observan en el propio individuo. Entre los efectos estocásticos somáticos puede encontrarse el desarrollo de cáncer.

<sup>3</sup> Figura obtenida del “Tema 7: Aspectos Generales de la Interacción de la Radiación con el medio Biológico” del Curso de Supervisores de IR.

## 2. Protección radiológica frente a radiaciones ionizantes.

Hasta el momento ya se han mencionado los distintos usos y efectos que tiene la radiación ionizante en diversos ámbitos. Para proteger a las personas de los riesgos que conlleva la radiación, distintas instituciones han desarrollado normativas y recomendaciones de protección radiológica.

La protección radiológica además de perseguir la protección de las personas frente a la radiación busca la protección de los futuros descendientes y de la humanidad en su conjunto. Dicha protección frente a las radiaciones ionizantes se establece con criterios de tipo científico y social, ya que lo que se persigue es obtener un nivel apropiado de protección para las personas y el medio ambiente, sin que ello lastre los beneficios que aporta un uso responsable de la radiación.

En la búsqueda de dicho equilibrio debe considerarse que todo nivel de radiación, incluso el más pequeño, genera efectos adversos en los seres vivos. La minimización de la dosis a la que se encuentran expuestos los seres vivos no garantiza que no existan efectos adversos, pero si reduce la probabilidad de que aparezcan los mismos.

En el ámbito de la protección radiológica se distinguen dos clases de efectos biológicos:

- **Efectos deterministas:** los que ocurren con total seguridad en el que se recibe una dosis de radiación superior a un umbral determinado. Estos efectos pueden ir desde la aparición de erupciones cutáneas a llegar a casos en los que exista el fallecimiento, todo ello dependiendo del nivel de radiación y el tiempo de exposición.
- **Efectos estocásticos:** la probabilidad de aparición de estos efectos aumenta a medida que se incrementa la dosis de exposición. Este tipo de efectos se asocian a dosis muy bajas o tiempos de exposición muy largos, no apareciendo efectos deterministas apreciables, pero si pudiendo dar lugar a aparición de enfermedades en el medio y largo plazo, como pudiera ser el cáncer.

Con los conocimientos científicos actuales y en base a estos dos tipos de efectos biológicos explicados, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR) define el objetivo de la protección radiológica en evitar la existencia de los efectos deterministas y la limitación al máximo de cualquier probabilidad de aparición de los efectos estocásticos.

La ICPR plantea tres recomendaciones básicas para la consecución de los objetivos planteados en materia de protección radiológica:

1. **Toda exposición debe estar justificada**, es decir, no puede realizarse ninguna actividad que conlleve una exposición a radiación ionizante si no produce un beneficio justificado para el conjunto de la sociedad, considerándose también los efectos negativos y las distintas alternativas que pueden utilizarse para conseguir dicho beneficio.

Esta recomendación siempre es objeto de debate dado que en muchas cuestiones los criterios de justificación son muy subjetivos, como puede ocurrir en el caso del uso de la energía nuclear para la producción de electricidad.

2. Además de estas justificaba, **la exposición debe ser optimizada**, para ello la ICPR plantea el principio ALARA, "As Low As Reasonably Achievable", es decir, la exposición debe ser tan baja como sea razonablemente posible.

La expresión razonablemente posible se refiere a que debe ajustarse a una optimización en base a criterios sociales y económicos, de manera que, aunque toda radiación implique un riesgo y haya unos límites marcados en las distintas normativas, si resulta posible, la dosis debe bajarse todo lo que se pueda de esos límites. De este modo, se garantiza la protección radiológica del ser humano, sin necesidad de limitar las prácticas beneficiosas que pueden aportar las radiaciones ionizantes.

Cabe destacar que la recomendación del uso del criterio ALARA está también exigido legalmente por la normativa nacional.

3. La última recomendación hace referencia **a los niveles de dosis, lo cuales no deben sobrepasar los límites establecidos en las normativas**. Dicha legislación está realizada en base a las recomendaciones del ICPR y contenida en el Real Decreto 783/2006.

De esta manera, se establece un límite a partir del cual se produce una exposición que conlleva un riesgo inaceptable, existiendo una región de riesgo en base la recomendación ALARA.



Figura 16. Representación gráfica de la región de radiación aceptable

Para comprender mejor a que hace referencia esta tercera recomendación resulta necesario profundizar en los distintos tipos de exposiciones que existen, las categorías en las que se dividen y como se distribuyen los niveles de dosis de radiación.

### 2.1. Exposición y dosis recibidas de radiación.

Cuando se presentan los efectos biológicos que producen las radiaciones ionizantes se menciona el término de dosis absorbida, que era la que captaban los distintos tejidos, siendo una dosis en bruto que se medía en Grays.

Dicha dosis debe ser ponderada, ya que a las células y tejidos del organismo esta radiación afecta de distinta manera, obteniendo así la **dosis equivalente**, que es la que tiene en cuenta el tipo de radiación que se ha recibido.

En adicción a esta afirmación, debe tenerse en cuenta que la dosis de radiación que soportar los órganos es muy distinta, de manera que, si se pondera la dosis equivalente por otros factores, se obtiene **la dosis efectiva que mediría el total de daño producido.**

Médula ósea	12%	72%
Colon	12%	
Pulmón	12%	
Estómago	12%	
Mama	12%	
Resto de Tejido	12%	
Gonodas	8%	8%
Vejiga	4%	16%
Hígado	4%	
Esofago	4%	
Tiroides	4%	
Superficie de los huesos	1%	4%
Cerebro	1%	
Glándulas Salivares	1%	
Piel	1%	

Figura 17. Radiación absorbida por distintos órganos del cuerpo humano

Como puede apreciarse, cada órgano o tejido contribuye de una manera al daño total de la persona. Esa contribución no depende del volumen del órgano, sino con respecto al volumen del cuerpo.

La unidad que cuantifica la dosis efectiva es el Sievert (Sv), que es equivalente a Julio partido kilogramo y es una unidad en la que está corregido el daño biológico que producen las radiaciones. Generalmente en el ámbito de la protección radiológica se utilizan los miliSievert o los microSievert para la medición de la dosis.

### ***Tipos de exposición.***

Dentro del ámbito radiológico se consideran tres tipos de exposición:

- Las **exposiciones planificadas**, totalmente preparadas con anterioridad y la operación con las fuentes radiológicas es deliberada y bajo control para la obtención de algún resultado beneficioso.
- Las **exposiciones de emergencia**, en las que se requieren acciones urgentes para evitar riesgos mayores o resultados no deseados.
- Las **exposiciones existentes** son las que se están produciendo antes de que se plantee la necesidad de protegerse ante ellas. Esta exposición es la menos habitual, y suele ocurrir ante descubrimientos de fuentes radiactivas antiguas o la aparición de nuevas formas de radiación desconocidas hasta el momento.

Dentro de estos tres tipos de exposición existen tres categorías en función del motivo por el cual se produce la misma:

- Puede ocurrir que la **exposición sea ocupacional**, debido a que sea durante el trabajo de una persona con fuentes radiactivas artificiales o naturales.
- La **exposición puede ser de tipo médico** con el fin de obtener un diagnóstico o un tratamiento.
- Las **exposiciones del público** comprenden todas aquellas que no sean ni ocupacionales ni de tipo médico.

La importancia de conocer los tipos de exposiciones a las que se está expuesto radica en que para cada tipo de exposición existe un límite de dosis de radiación, que en caso de España viene marcada normativamente por el Consejo de Seguridad Nuclear, que es el organismo con competencias en seguridad nuclear y protección radiológica.

Con todo ello, los niveles de dosis que se plantean dentro de las distintas categorías de exposición son los siguientes:

Aplicación	Ocupacional	Público
<b>Dosis efectiva</b>	100 mSv en un período de 5 años oficiales, no superando 50 mSv en un año	1 mSv/año oficial
<b>Dosis equivalente anual en</b> Cristalino Piel Manos y pies	150 mSv 500 mSv 500 mSv	15 mSv 50 mSv -----

Figura 18. Valores límite de la dosis equivalente y efectiva de radiaciones ionizantes

Estos valores para la dosis efectiva no hacen referencia a las radiaciones recibidas de manera natural, así como tampoco incluye las radiaciones provenientes de pruebas o tratamientos médicos.

La diferenciación entre las exposiciones ocupacionales y públicas se debe a que los seres humanos estamos expuestos a unas radiaciones de origen natural, como los rayos cósmicos, los minerales radiactivos de los que ya se ha hablado en el presente trabajo, algunas sustancias incorporadas a alimentos como el potasio o el yodo, o bien, algunas

sustancias radiactivas que se encuentran en el interior del organismo. Estas radiaciones naturales se acumulan a las radiaciones provenientes de fuentes artificiales.

Con todo ello, podemos ver en la siguiente figura distintas dosis efectivas de radiación que recibimos de manera natural y artificial, ya sean desde procesos médicos de radiodiagnóstico a la exposición a la radiación proveniente del gas radón.

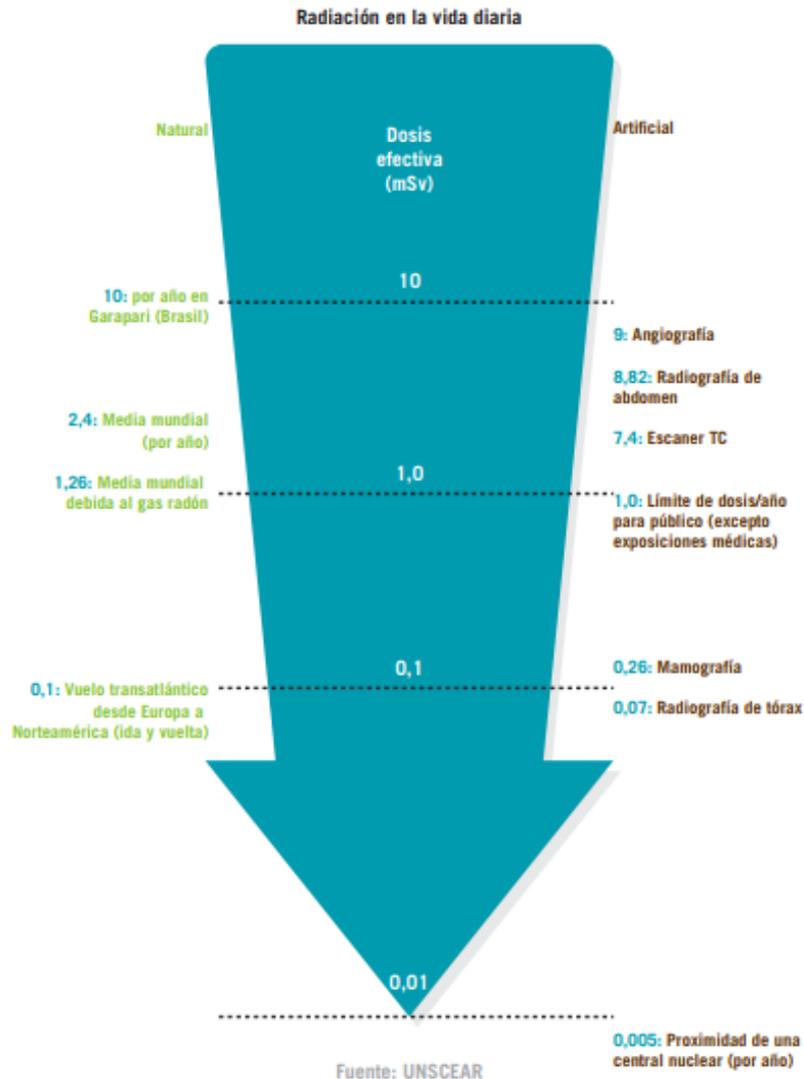


Figura 19. Comparación de dosis naturales y artificiales

A modo de curiosidad, en la figura elaborada por el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), podemos observar como la dosis de radiación natural media mundial está en 2,4 mSv. Una mamografía corresponde a una dosis de 0,26 mSv, una radiografía de tórax 0,07 mSv, veinte veces menos que la dosis natural media anual, y una tomografía computarizada estaría en los 7,4 mSv, tres veces mayor que la dosis natural media anual. Aún a pesar de lo

significativo de las dosis mencionadas, ninguna de estas dosis es considerada en la normativa.

## 2.2. Acciones básicas de protección radiológica

Una vez que conocemos los peligros de las radiaciones ionizantes y las dosis máximas que puede asumir el organismo, resulta necesario mencionar las acciones básicas que pueden plantearse desde el punto de vista de la protección radiológica para limitar la dosis de radiación.

Las acciones para limitar la dosis pueden tomarse en cualquier punto del sistema radiactivo, ya sea sobre la fuente de radiación, el ambiente a través del que se transmiten las radiaciones o bien sobre los individuos expuestos.

Se considerará prioritario tomar todas aquellas medidas que sean posibles sobre la fuente emisora, dado que las decisiones sobre el ambiente y los individuos resultan más complicadas de llevar a la práctica.

De manera general, para rebajar la dosis a la que está sometida un elemento en un ambiente radiactivo pueden aplicarse tres medidas preventivas:

- Aumentar **la distancia** entre la fuente de radiaciones y los operadores la exposición disminuye en la misma proporción en que aumenta el cuadrado de la distancia. Alejándose lo suficiente la fuente de radiación pueden conseguirse niveles de radiación bastante aceptables.
- **El tiempo** es otro factor importante a la hora de conseguir niveles de dosis aceptables, dado que, a menor tiempo de exposición, menor será la dosis recibida, para ello resulta imprescindible minimizar los tiempos de trabajo y encargar las tareas a los empleados adecuados.
- Cuando pueda limitarse el tiempo de operación, ni ampliar la distancia con la fuente de radiación, resultará necesario utilizar **blindajes** con un espesor necesario para absorber la radiación. Para ello, en función de la energía y el tipo de radiación, se utilizarán distintos materiales de blindaje.
  - Las partículas alfa recorren pequeñas distancias, y de manera general con una hoja de papel valdría para detenerlas.

- En el caso de las partículas beta recorren varios metros, y se necesitan espesores más amplios, bastando hojas delgadas de metal o un tablón de madera.
- Las radiaciones gamma son las que más poder de penetración tienen, siendo capaces de recorrer cientos de metros, siendo detenidas por una pared gruesa de plomo o cemento.

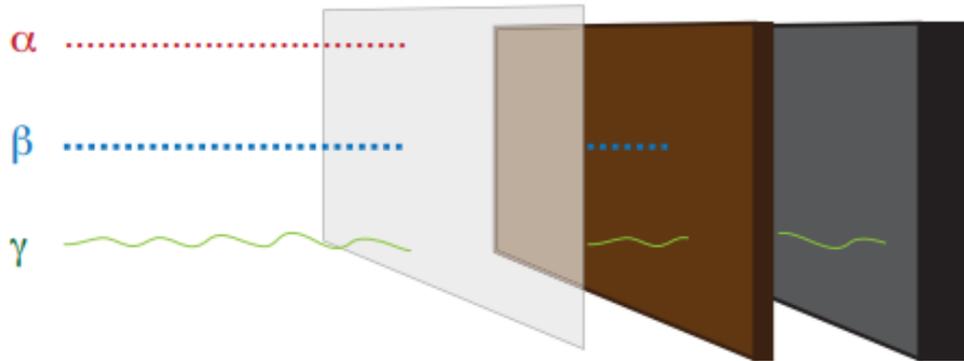


Figura 20. Representación gráfica del poder de penetración de las distintas radiaciones ionizantes

### 2.3. Organismos encargados de la Protección Radiológica

Todos estas acciones y herramientas de control de la dosis con el fin de la protección radiológica hasta ahora expuestas están reguladas por distintas administraciones y organismos encargados de desarrollar normativas de protección y velar por el cumplimiento de las mismas.

#### ***Ámbito Internacional***

En el ámbito internacional ya se ha hablado de la **Comisión Internacional de Protección Radiológica, el ICRP**, la organización de referencia en cuestiones de protección radiológica fundada en 1928.

Dicha comisión está compuesta por científicos de alto nivel con un bagaje contrastado, que emiten informes de distintas investigaciones que no son de obligado cumplimiento, pero si sirven como referencia a las distintas administraciones para desarrollar sus normativas.

El ICRP dispone de cinco comités que se dedican al estudio de las radiaciones, la definición de los límites secundarios de dosis, la protección radiológica en el ámbito médico, desarrollar recomendaciones y a trabajar en la protección del medio ambiente.

Podría afirmarse que como consecuencia de los trabajos e investigaciones del ICRP se tomó conciencia de la importancia que tenían las dosis de exposición en los efectos que producían las radiaciones ionizantes, lo que generó que la comunidad internacional tomara conciencia. Esto provocó que en 1955 la Asamblea General de las Naciones Unidas fundase el **Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, el UNSCEAR**, del que ya se ha aportado alguna información en el presente trabajo.

El UNSCEAR está formado por científicos designados por los Estados Miembros, que se encargan de evaluar los niveles y efectos de la radiación ionizante, sirviendo sus informes y conclusiones como base para adoptar decisiones a distintos gobiernos. El UNSCEAR tiene base científica, no política, de ahí que este organismo no tiene capacidad para establecer las directrices políticas.

Las evaluaciones realizadas por este organismo sirven a su vez para difundir y sustentar el trabajo que realiza la ICRP.

Ajeno al UNSCEAR, pero con un fundamento similar, se encuentra el **Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA)**, que desarrolla guías y normas con las recomendaciones de la ICRP persiguiendo el consenso internacional, pero no solo con comités científicos, sino que también persigue sumar a entidades como la Organización Mundial de la Salud o la Organización Internacional del Trabajo.

En el ámbito europeo la normativa relativa a la protección radiológica es desarrollada por el tratado EURATOM, pero son los Estados miembro los que tienen que transponer y ajustar la misma a cada una de sus normativas.

## Ámbito nacional

Dentro de España existen distintas Administraciones del Estado relacionadas con la protección radiológica frente a las radiaciones ionizantes, destacando el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, en especial, la Dirección General de Política Energética y Minas, que tiene la responsabilidad de autorizar las instalaciones nucleares y radiactivas, desarrollando el registro de instalaciones de Rayos X de diagnóstico médico.

Inicio | Contáctate | Mapa Web | Versión móvil

Introduzca texto

Inicio | El Ministerio | Energía | Sociedad de la Información y Agenda Digital | Turismo | (Industria y PYME)

Estás en: [Energía](#) > [Energía nuclear](#) > [Instalaciones Radiactivas](#) > [Registros de instalaciones radiactivas](#)

### Energía nuclear

- Instalaciones Nucleares
- Centrales Nucleares
- Combustible Nuclear
- Residuos Radiactivos y Desmantelamiento de Instalaciones
- Instalaciones Radiactivas**
  - Autorizaciones para instalaciones radiactivas
  - Transferencia de funciones
  - Registros de instalaciones radiactivas
  - Fuentes Radiactivas
- Transporte
- Vigilancia Radiológica en el reciclado de materiales metálicos
- Organismos Internacionales
- Seguimientos Nucleares
- Convenios Internacionales
- Investigación y Desarrollo Nuclear
- Legislación
- Meas de Diálogo sobre la

#### Instalaciones Radiactivas

### Registros de instalaciones radiactivas

En la Dirección General de Política Energética y Minas están los siguientes registros de instalaciones radiactivas:

#### Registro nacional de instalaciones radiactivas

Creado en la Dirección General de la Energía de acuerdo con el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas; a diciembre de 2016 se han inventariado unas 1.331 instalaciones, de las que 1.103 corresponden a Comunidades Autónomas con funciones transferidas.

- Instalaciones Radiactivas por Comunidades Autónomas [XLSX] [226,2 KB]
- Instalaciones Radiactivas por Comunidades Autónomas [PDF] [90,28 KB]
- Instalaciones Radiactivas por Comunidades Autónomas [CSV] [877 Bytes]

#### Registro nacional de instalaciones de rayos X

Con fines de diagnóstico médico: creado en la Dirección General de la Energía, de acuerdo con el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico; inscritas 41.375 instalaciones.

- Instalaciones de Rayos X de diagnóstico médico por Comunidades Autónomas [XLSX] [225,83 KB]
- Instalaciones de Rayos X de diagnóstico médico por Comunidades Autónomas [PDF] [89,72 KB]
- Instalaciones de Rayos X de diagnóstico médico por Comunidades Autónomas [CSV] [764 Bytes]

#### Registro de empresas de venta y asistencia técnica de equipos e instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico

Figura 21. Registro de Instalaciones Radiactivas del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital

No solo la radiación ionizante está relacionada con el Ministerio de Industria, sino que también Ministerios como el de Sanidad y Medio Ambiente tienen competencias en cuestiones relativas a la protección radiológica y de impacto radiológico ambiental.

Ahora bien, el organismo encargado de desarrollar todas las directrices y normativas relativas a la protección radiológica, así como de informar y asesorar a las instituciones

es el Consejo de Seguridad Nuclear, ya mencionado a lo largo del presente trabajo, y que a continuación veremos con más detalle.

#### **2.4. El Consejo de Seguridad Nuclear.**

El Consejo de Seguridad Nuclear, CSN, fue creado en 1980, a través de la Ley 15/1980 de 22 de abril. En dicha ley se definía el CSN como “un ente de Derecho Público, independiente de la Administración General del Estado, con personalidad jurídica y patrimonio propio e independiente de los del Estado, y como único organismo competente en materia de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica”.

Dicha definición pone de manifiesto que todos los trabajos relacionados con la protección frente a los efectos de las radiaciones están en manos del CSN, el cual tiene que desarrollar medidas de prevención y corrección.

Todos estos trabajos de protección los lleva a cabo a través de distintos trabajos, que van desde la proposición de reglamentos y normativas, todas ellas ajustadas a la legislación y recomendaciones internacionales, hasta actividades de vigilancia del medio ambiente a través de estaciones automáticas que analizan el entorno radiológico en toda España.

Desde la perspectiva de las instalaciones, el CSN es el organismo encargado de revisar las instalaciones y otorgar las licencias y permisos de operación a las personas que trabajan en las mismas. De esta manera, toda instalación, ya sea industrial o no, que tenga algún tipo de actividad o elemento radiactivo tiene que pasar un periodo de validaciones.

Además de las validaciones a personas e instalaciones, las actividades radiactivas conllevan una vigilancia asociada a la dosis de radiación a la que está expuesto el personal, realizando actividades de dosimetría.

Ante el incumplimiento de cualquier tipo de requerimiento, el CSN tiene la capacidad de poder promover sanciones y expedientes, así como, en caso de emergencia, puede desarrollar planes de respuesta.

Por último, aunque no tiene mucho interés desde la perspectiva industrial, el CSN también tiene que rendir cuentas a las Administraciones del Estado, así como de informar a la opinión pública de las distintas cuestiones que considere de interés.

### ***Normativa del Consejo de Seguridad Nuclear.***

Una de las tareas más interesantes a considerar de las que realiza el Consejo de Seguridad Nuclear es el impulso, por iniciativa propia, de normativas de obligado cumplimiento, las cuales se plasman en las Instrucciones y Circulares de carácter técnico. Paralelas a estas, el CSN suele publicar Guías de Seguridad, que no tienen carácter obligatorio, sino recomendatorio.

El Consejo de Seguridad Nuclear ha publicado entorno a medio centenar de instrucciones orientadas a la gestión de entornos radiactivos. En el momento que cualquier actividad desarrollada por una industria lleve asociada el uso de alguna fuente radiactiva, está sujeta al cumplimiento de las mismas, es por ello por lo que es importante conocer dichas instrucciones.

En las distintas instrucciones se mencionan los requisitos de protección física de fuentes radiactivas, los criterios para notificar y documentar distintos hechos tales como sucesos relativos a la seguridad o cuestiones operativas, o bien, podemos encontrar instrucciones que regulan la formación que se debe dar a los operarios, así como la regulación de exámenes para obtener certificaciones tales como la de experto en protección contra radiaciones ionizantes.

De igual forma, existen instrucciones con gran carga técnica que versan sobre los requerimientos mínimos de diseño de instalaciones e infraestructuras, que pueden ir desde infraestructuras complejas como centrales nucleares, a pequeños almacenes o contenedores de almacenamiento de residuos.

También hay que considerar las instrucciones relativas al transporte y gestión de residuos radiactivos en aquellas compañías e industrias que requieran de dichos servicios.

En lo relativo a las Guías de Seguridad, estas tienen un contenido netamente técnico y sirven como orientación para facilitar el uso de la normativa, aunque desde cada instalación radiactiva pueden seguirse los criterios que se estimen convenientes, dada la no obligatoriedad de cumplir dichas Guías.

Entre las publicaciones del CSN podemos encontrar que las Guías de Seguridad están ordenadas en distintos temas:

- Reactores de potencia y centrales nucleares.
- Instalaciones del ciclo de combustible.
- Vigilancia Radiológica Ambiental.

- Instalaciones y Aparatos Radiactivos.
- Transporte de Materiales Radiactivos.
- Protección Radiológica.
- Protección Física.
- Gestión de Residuos.
- Radiación Natural.
- Varios: en los que se incluyen temas de Garantía de calidad y certificaciones de personal.

Como vemos, cualquier instalación radiactiva está sujeta a las mismas, ya sea una consulta médica con un sistema de radiodiagnóstico, un pequeño taller o una gran industria. Por ello, resulta interesante conocer que entiende el Consejo de Seguridad Nuclear por instalación radiactiva y cuáles son las cuestiones más relevantes que considerar a la hora trabajar e impulsar dichas instalaciones.

### ***Instalaciones Radiactivas.***

La definición de instalaciones radiactivas viene establecida en el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, publicado en el Real Decreto 1836/1999, propuesto por el Consejo de Seguridad Nuclear. Dicho reglamento persigue regular las autorizaciones y trámites administrativos que tienen que seguir las instalaciones nucleares y radiactivas relacionadas con radiaciones ionizantes para poder operar.

La mencionada normativa entiende que una instalación radiactiva es cualquier instalación que tenga una fuente de radiación ionizante, cualquier aparato que produzca radiaciones ionizantes que sea alimentado con una diferencia de potencia superior a 5 kV o bien, cualquier espacio, ya sea un local, laboratorio o fábrica, en la que se opere con materiales radiactivos, salvo los espacios destinado a almacenamiento durante el transporte.

La normativa distingue tres categorías de instalaciones radiactivas:

- ***Instalaciones de primera categoría***, que son todas aquellas que producen uranio, torio y sus compuestos, así como las que se encarga de producir elementos combustibles de uranio natural. También se consideran instalaciones de primer nivel las industrias que tienen fuentes radiactivas con fines irradiativos o aquellas instalaciones que almacenen grandes volúmenes de material radiactivos.

- **Las instalaciones radiactivas de segunda categoría** son aquellas que no pueden certificarse como primera categoría, en ellas se manipula y almacena material radiactivo con distintos fines. El límite lo establece la Instrucción de Seguridad IS-05 del CSN, si la actividad es mil veces superior a los valores de exención que establece dicha instrucción, hablaremos de una instalación de segunda categoría.

En esta categoría también se encuadran las instalaciones de Rayos X que funcionen con tensiones de pico superior a 200 kV, así como los aceleradores de partículas y las instalaciones que almacenen fuentes de neutrones.

- Por último, **las instalaciones de tercera categoría** son todas aquellas donde los niveles radiactivos de los materiales manipulados están entre los valores de exención de la normativa IS-05, antes mencionada, y mil veces dichos valores. De igual forma que en caso anterior, en esta categoría encajaría aquellas instalaciones con elementos generadores de Rayos X que en este caso operen con tensiones de pico inferiores a 200 kV.

De igual forma, el Reglamento realiza una serie de exenciones para no calificar como instalaciones radiactivas a aquellas que puedan acogerse a alguna de las condiciones que marca el primer anexo de la normativa. El principal motivo de exención es estar por debajo de los valores radiactivos que marca la IS-05, aunque pueden darse casos en los que se superen dichos niveles, y la instalación pueda acogerse a algún caso concreto de los definidos en el Anexo I, apartado g, para no entenderse tal como una instalación radiactiva.

La tipificación de una instalación radiactiva en una determinada categoría lleva asociadas una serie de medidas y normativas adicionales, así como la solicitud de determinados permisos a través de distintas documentaciones. Todos estos trámites y documentaciones necesarias para cada permiso, ya sea de puesta en marcha, solicitud de cambio o desmantelamiento, viene regulado para categoría de instalación en el propio Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.

Por ejemplo, en el caso de una instalación radiactiva industrial, la solicitud de la misma debe ir acompañada de un estudio de seguridad, una verificación de la instalación, un reglamento de funcionamiento, un plan de emergencia interior, una previsión de clausura y cobertura económica que garantice la seguridad, un presupuesto de la inversión y un plan de protección física. Si además la instalación fuera de primera

categoría habría que añadir información del emplazamiento, un manual de calidad y organización para la construcción y funcionamiento, un manual de protección radiológica y un informe con las especificaciones técnicas de funcionamiento.

Una vez que se ha solicitado la autorización y ha sido concedida con el visto bueno de la administración correspondiente y el Consejo de Seguridad Nuclear, antes de entrar en funcionamiento el titular debe realizar una comunicación al CSN para que este pueda llevar a cabo una inspección y verifique que se cumplen todas las condiciones de seguridad establecidas.

Además de todos los trámites administrativos e inspecciones que llevan asociadas las instalaciones radiactivas, **existen una serie de licencias y acreditaciones del personal** que en ellas opera.

En el caso de la Instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear, todas las operaciones tienen que estar dirigidas por personal con licencia de supervisor, y llevadas a cabo por personal con la licencia de operador. Este tipo de licencias tienen una validez máxima de seis años.

Adicionalmente, este tipo de instalaciones tendrán un Servicio de Protección Radiológica cuyo encargado tiene que disponer del diploma acreditativo de Jefe de Servicio de Protección Radiológica expedido por el CSN.

En lo referido a instalaciones radiactivas con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales, el reglamento establece dos tipos de licencias, como en el caso anterior.

- La licencia de operador, que debe estar en posición por todo el personal que se encargue de manipular los equipos radiactivos.
- La licencia de supervisor, que en este caso debe ser adquirida por el personal de dirección y planificación de la instalación radiactiva.

La diferencia con las instalaciones nucleares es que la validez de estas licencias es de cinco años. Igualmente, el CSN puede requerir que se disponga de un servicio de protección radiológica propio, o bien contratado, en función del riesgo radiológico.

La catalogación de una industria como instalación radiactiva tiene consecuencias en los permisos y autorizaciones de trabajo y puesta en marcha, en las cualificaciones del personal, en el propio organigrama de la compañía en caso de necesitar un servicio de protección radiológica, pero además, tiene un impacto directo en el día a día, ya que la

normativa obliga a disponer de un diario de operaciones que recoja todas las informaciones operativas de la instalación que deben estar validadas por un operador o supervisor.

Además del diario de operaciones, se establece también la necesidad de presentar ante las administraciones de una serie de informes que recojan las operaciones, las estadísticas del control dosimétrico del personal, así como los distintos incidentes que merezcan ser mencionados. El número de informes y el nivel de profundidad de los mismos vendrá delimitado según sea una instalación nuclear o radiactiva, así como por la categoría de la misma.

### ***Entidades de servicio.***

Muchos de los procesos y trámites que tienen que realizarse en las instalaciones radiactivas pueden ser llevados a cabo o supervisado por entidades externas a la compañía denominadas entidades de servicio, las cuales prestan apoyo o asesoramiento técnico.

Dentro de la legislación española se consideran tres tipos de entidades de servicio:

- Unidades Técnicas de Protección Radiológica (UTPR).
- Servicios de Protección Radiológica (SPR).
- Servicios de Dosimetría Personal.

Todas estas entidades tienen que estar autorizadas por el Consejo de Seguridad Nuclear, que se encarga de inspeccionar y controlar a las mismas.

Las Unidades Técnicas de Protección Radiológica, así como los Servicios de Protección radiológica, vienen definidas en el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de Rayos X con fines de diagnóstico médico, y son las encargadas de dar soporte en la instalación de este tipo de instalaciones. Estas Unidades no pueden ser parte o tener relación con las instalaciones de Rayos X a las que vayan a aportar servicio técnico.

Entre las funciones que pueden dar las UTPR y las SPR están las de participar en los trámites de adquisición de equipos, los procesos de diseño, montaje, operación y clausura de las instalaciones, la evaluación de riesgos y control radiológico, actividades de mantenimiento o gestión de la calidad y formación de los empleados.

Los Servicios y Unidades Técnicas de Protección Radiológica deben de disponer de al menos un trabajador con el título de Jefe de Servicio, que se responsabilice de las operaciones y trámites ejecutados por estas entidades.

Estas entidades pueden enviar al CSN informes de las actividades realizadas, el estado y recursos de la unidad o servicio y el resumen de los controles dosimétricos realizados.

Los Servicios de Dosimetría Personal hacen referencia al control de exposición de la dosis a la que están expuestos los trabajadores, y cuyos límites ya han sido expuestos en el presente trabajo.

El Servicio de Dosimetría puede ser interno, como en algunas Centrales Nucleares, o bien, puede estar externalizado en una entidad de servicio validada por el CSN, como pudiera ser el CIEMAT.

### **3. Sistemas de detección radiológica**

Una vez conocido el mundo de la radiación y de las instalaciones radiactivas, resulta necesario hablar de los sistemas de detección, los cuales son un elemento de protección indispensable, ya que sirven para controlar las dosis de exposición de un entorno.

De manera general, los detectores se basan en la medición de un cambio. En este caso, en la medición que produce la radiación ionizante sobre un determinado material. De esta manera obtenemos una relación del nivel de radiación que hay en un entorno. Lo que definirá a cada tipo de detector es el motivo del cambio en cada material.

De esta manera, podemos hablar de gran variedad de tipos, siendo los más habituales los siguientes:

- Los detectores de ionización, que se basan en la ionización que se produce en un gas al ser atravesado por radiación. La medida de la corriente iónica ofrece sirve para medir la radiación incidente.

Los detectores de ionización pueden aportar una señal de salida que es un promedio de un intervalo de tiempo muy grande, conociéndose este modo de funcionamiento como corriente, o bien, devolver una señal de salida impulsiva que ofrece mayor sensibilidad a los cambios.

- Los calorímetros son elementos de detección en los que se basan en la pérdida de calor que se produce en la radiación incidente en un volumen determinado de materia, que es el que recibe el calor. La medida de esta variación de temperatura sirve para caracterizar la radiación incidente.

- Fenómenos como la emisión producida por los electrones al atravesar un material con una velocidad mayor que la luz del propio electrón, conocida como la radiación Cerenkov, sirven también como elemento de detección.
- Por último, existen distintos cambios producidos por las partículas radiactivas al atravesar materiales plásticos, produciéndose una serie de pistas que contabilizan las partículas incidentes y la energía depositada. Un ejemplo de detectores basados en este fenómeno serían los centelladores.

Cuando un detector, ya sea de ionización o no, debe cumplir una serie de requerimientos para que este devuelva un resultado aceptable. Entre las condiciones que deben cumplirse, destacan:

- Cada partícula tiene que producir un impulso eléctrico distinguible.
- La duración del impulso debe ser corta, de manera que puedan distinguirse los distintos sucesos que sucedan en breves espacios de tiempo.
- El tamaño del impulso debe encontrar relación, lineal o no, con la energía del suceso.
- Los sucesos idénticos, producidos por niveles de radiación idénticos, deben dar como resultado señales impulsivas lo más parecidas posibles, independientemente de la parte del detector que la registre.

El cumplimiento de estas condiciones garantiza que podemos caracterizar una fuente radiactiva a través de una distribución de partículas en función de su energía, obteniendo un histograma de amplitud de pulsos.

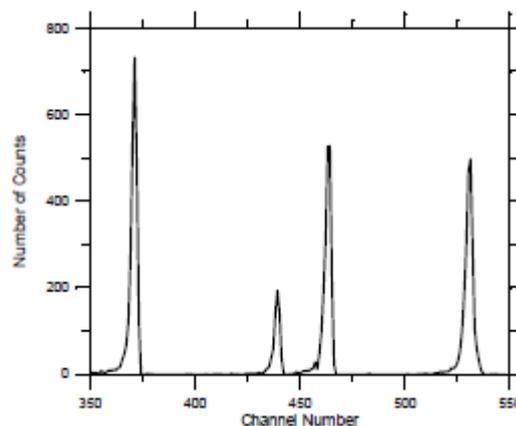


Figura 22. Construcción clásica de un espectro radiológico de energías.

Este histograma contiene los impulsos registrados en función de un intervalo de energía, denominado canal. De esta manera, los canales están relacionados con los tamaños de

los impulsos, obteniendo un espectro de energías en unas determinadas condiciones de medida.

Para conocer este espectro de energías obtenido, resulta indispensable realizar una calibración, que permitirá relacionar los canales y las cuentas con niveles de energía concretos.

Esta calibración puede realizarse mediante un patrón dando, es decir, relaciones de energía – canales ya conocidas, o bien, mediante el propio espectro obtenido, siempre que se haya reconocido algún componente del espectro.

Si no puede hacerse mediante relaciones o reconocimiento, suelen utilizarse fuentes radiactivas especialmente preparadas para la calibración, o bien, mediante medios electrónicos que simulen impulsos producidos con energía conocida.

Con toda esta información, debemos considerar a la hora de desarrollar o instalar un detector, la adaptabilidad del mismo para la fuente a controlar, dado que podemos usar un detector que sea más apto para partículas alfa o beta, que para radiaciones ionizantes de carácter electromagnético, perdiendo así información. También deben considerarse las cuestiones relativas a la calibración, buscando que opciones se ajustan mejor a la presente aplicación.

Todas estas consideraciones facilitarán la tarea de elección del sistema de detección, encontrando en el mercado grandes marcas y fabricantes con sistemas potentes, que permitirán construir sistemas de protección a medida de las necesidades técnicas, así como las necesidades jurídicas impuestas por las normativas de control.

**PARTE 2: SISTEMAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA**  
**EN LA INDUSTRIA LÁSER.**

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

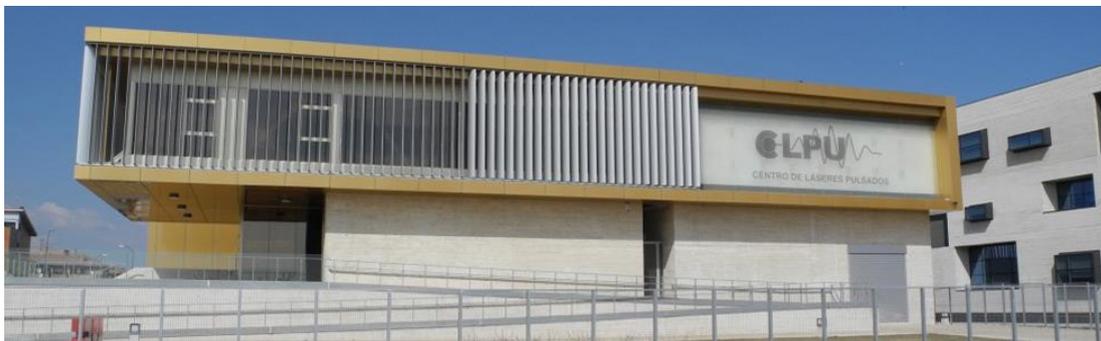
## 4. La Industria Láser: El Centro de Láseres Pulsados

Como se ha expuesto en la primera parte del presente trabajo, existen una gran variedad de instalaciones radiactivas, pudiendo encontrar desde grandes y complejas instalaciones con poderosas fuentes de radiación, hasta pequeñas instalaciones con algún elemento radiactivo.

En este trabajo hablaremos de un tipo de instalación radiactiva singular, con unas especificaciones técnicas muy especiales y concretas, como es el caso del Centro de Láseres Pulsados Ultraintensos y Ultracortos (CLPU), que utiliza un haz laser para producir radiaciones ionizantes.

El CLPU es una instalación de ámbito científico y tecnológico, que se dedica a la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías láseres, pero que además es una instalación abierta a usuarios, dando servicio con sus sistemas láser a aquellas compañías que lo necesiten.

Este centro láser es un consorcio público creado en 2007 con participación del Ministerio de Economía del Gobierno Español, la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca. Dicha instalación está ubicada en el edificio M5 del Parque Científico de la Universidad de Salamanca.



*Figura 23. Edificio del Centro de Láseres Pulsados Ultraintensos y Ultracortos (CLPU).*

El objetivo del CLPU es el de diseñar, instalar y poner en marcha un sistema láser, conocido como VEGA, que alcance potencias de Petavatio. Para ello concentrará altas energías en breve espacios de tiempo mediante pulsos láser. Con energías del orden de Julios y pulsos láser del orden de femtosegundos, obtenemos dicha potencia.

El sistema láser VEGA está basado en un láser de titano – zafiro con tecnología CPA (Chirped Pulsed Amplification), componiéndose de tres fases sincronizadas que comparten el mismo sistema de generación de pulsos.

De esta manera, el sistema VEGA se divide en VEGA-1 y VEGA-2, ambos en funcionamiento, y el sistema VEGA-3, que actualmente se encuentra en la última fase de puesta en marcha.

VEGA System					
Exit	Energy / pulse	Pulse Duration	Wavelength	Peak Power	Repetition Rate
VEGA1	600 mJ	30 fs	800 nm	20 TW	10 Hz
VEGA2	6 J	30 fs	800 nm	200 TW	10 Hz
VEGA3	30 J	30 fs	800 nm	1 PW	1 Hz

Figura 24. Parámetros de funcionamiento del sistema láser VEGA.

VEGA-1 y VEGA-2 ofrecen energías de 600 mJ y 6 J respectivamente, con la capacidad de ofrecer 10 disparos por segundo, mientras que VEGA-3 se espera que llegue a energías de 30 J, alcanzando así el Petavatio de potencia, todo ello con la capacidad de ofrecer un disparo por segundo. Con todo ello, VEGA-3 será uno de los diez láseres más potentes del mundo.

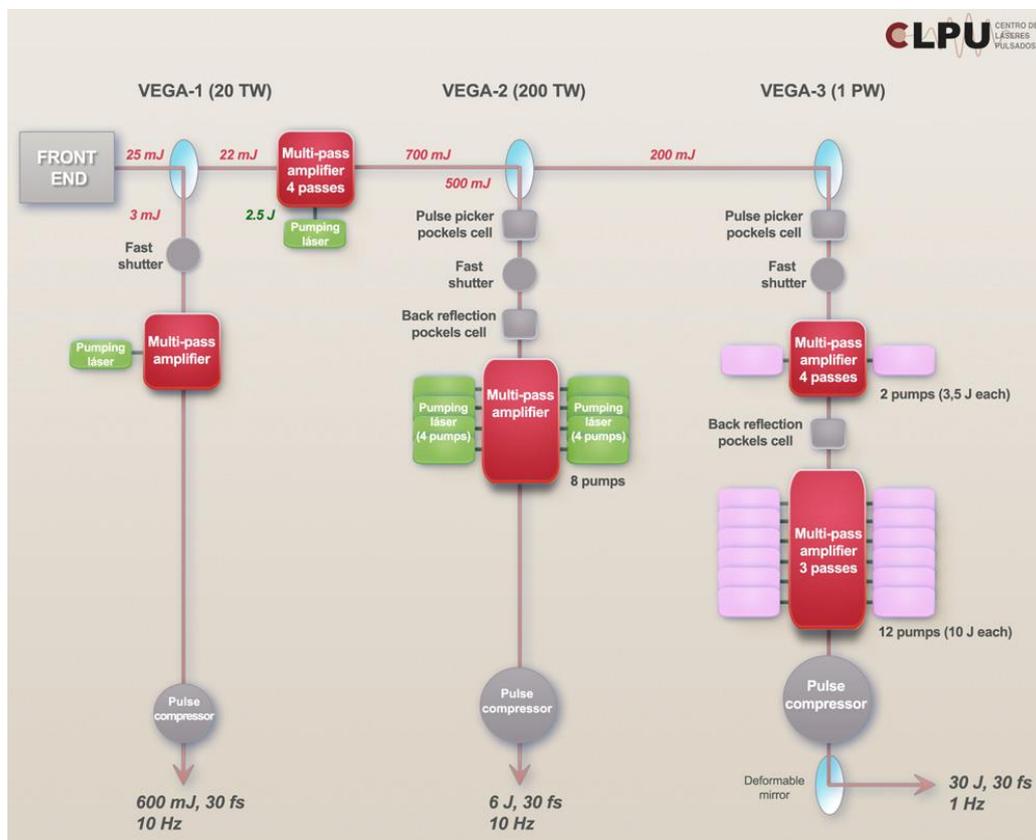


Figura 25. Distribución de las líneas del sistema láser VEGA.

La ventaja de poder disponer de tres modos de funcionamiento en un mismo sistema convierte a VEGA en sistema versátil y con gran variedad de aplicaciones, sirviendo para investigaciones en campos como la física, ingeniería, biología o la medicina.

Entre las investigaciones que se desarrollarán en esta instalación destacan las relacionadas con los procesos elementales que suceden en la naturaleza en tiempos de attosegundo, el desarrollo de nuevas fuentes de luz, la producción de nanopartículas y nanosuperficies, el mecanizado de piezas industriales, el desarrollo de técnicas de microcirugía o la visualización de moléculas y tejidos biológicos

El sistema VEGA también permitirá la aceleración de electrones e iones, así como la generación de Rayos X o el desarrollo de sistemas de radiodiagnóstico. Son precisamente estas aplicaciones las que convierten al CLPU en una instalación radiactiva de segunda categoría.

En sus inicios, el Centro contaba con otros sistemas láser de altas tasas de repetición capaces de trabajar con pulsos de energías de hasta 7 mJ con tasas de 1 kHz. Este tipo de sistemas, entre otras aplicaciones, se utilizaban para la generación de Rayos X. Este uso fue el que propició que el CLPU fuera considerada inicialmente como una instalación radiactiva de tercera categoría.

Spitfire ACE – 7 W	
Energy / pulse	7 mJ
Peak Power	60 GW
Duration / pulse	< 120 fs
Repetition Rate	1 kHz
Beam diameter (1/e <sup>2</sup> )	11 mm
M <sup>2</sup> Parameter	< 1.4 at 7 mJ
Pre-Pulse Contrast	> 1000:1
Energy Stability	< 0.5% rms in 24 hours
Central Wavelength	800 nm
Polarization	Lineal

Figura 26. Parámetros de funcionamiento de los sistemas láser de alta tasas de repetición del CLPU

La instalación de VEGA y la puesta en marcha de VEGA-1 y VEGA-2 dieron lugar a que en diciembre de 2015 el CLPU solicitaran los permisos pertinentes como instalación de segunda categoría, recibiendo la autorización del Consejo de Seguridad Nuclear en mayo de 2016.

Hoy en día los sistemas láser de alta tasa de repetición del CLPU se encuentran ubicados en el edificio M3 de Parque Científico de la Universidad de Salamanca, con previsión de ser trasladados a las instalaciones del CLPU en el edificio M5 del Parque Científico de la Universidad de Salamanca una vez finalizados los trabajos de instalación del sistema VEGA.

#### **4.1. Aplicaciones Industriales de los sistemas láser**

A pesar de que las instalaciones láser como la del CLPU pueden entenderse como centros científicos o de investigación, en la práctica, este tipo de instalaciones tienen un gran potencial industrial, más aún si cabe el CLPU, que como se ha mencionado es un centro abierto a usuarios, en el que se puede solicitar la realización de trabajos y pruebas con sus sistemas láser, todo ello con el apoyo y soporte del equipo técnico y científico del centro.

En los últimos cuarenta años la introducción de los sistemas láser en el ámbito industrial ha ido incrementando notablemente, incrementándose considerablemente el volumen de ventas en este tipo de sistemas a nivel mundial.

Desde sus inicios, las aplicaciones en las que más se han implantado los sistemas láser son las de mecanizado, tales como el corte, la soldadura y el perforado de piezas, especialmente en sectores como el del automóvil, el naval o el aeroespacial.

Además de estas aplicaciones de mecanizado, no pueden obviarse otras aplicaciones de metrología, inspección y control de piezas, existiendo sistemas láser de diagnóstico y detección que se encargan de verificar piezas con buena resolución.

De manera general para las aplicaciones de mecanizado industrial, los sistemas láser están compuestos por una fuente de luz, normalmente de CO<sub>2</sub> o Nd:YAG. A continuación, se dispone de un elemento de corte del haz, así como un mecanismo de conducción del haz hasta la zona de interacción consistente en un sistema de espejos o fibra óptica.

Tras el sistema de conducción del haz, el láser dispone de un sistema de focalización, consistente en lentes o espejos, que permiten situar el haz y enfocarlo hacia una tobera, la cual proporciona un flujo de gas que sirve como elemento de interacción con la luz, además de proteger y refrigerar el medio incidente.

El elemento final del sistema láser es un sistema de posicionamiento, que se encarga de desplazar la pieza con respecto al haz de luz.

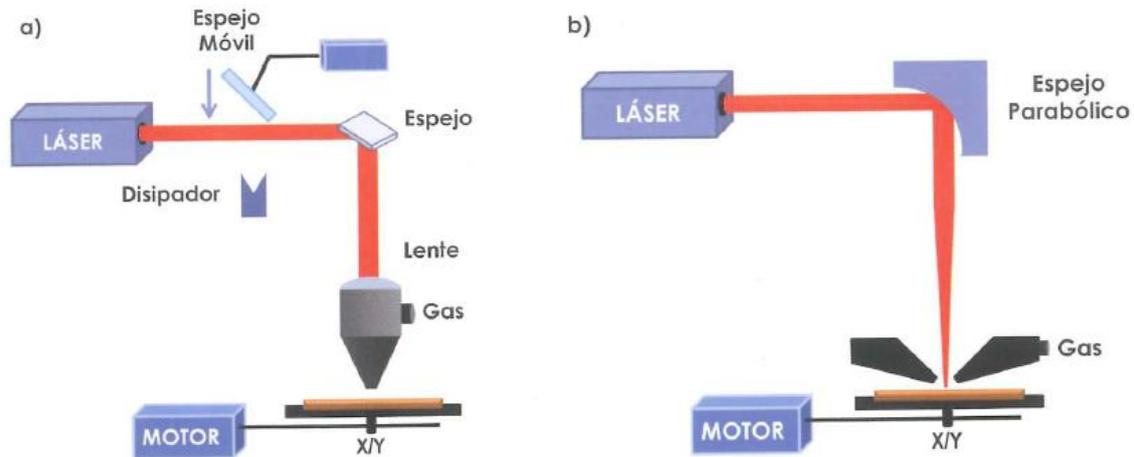


Figura 27. Esquema habitual de los componentes de un equipo láser de operación industrial.<sup>4</sup>

### Corte por láser.

La utilización del equipamiento láser para el corte de piezas es la aplicación más extendida. Desde el punto de vista práctico, esta requiere de una optimización de los parámetros de trabajo del láser para cada tipo de corte, en función del espesor y el material que se desee cortar.

Entre los parámetros a gestionar en este tipo de instalaciones está la potencia del láser, la velocidad de avance del sistema de posicionamiento y el tamaño del punto de focalización.

Con la maquinaria láser se pueden realizar trabajos con una alta velocidad de cortado, todo ello sin que se produzca un deterioro en la herramienta de corte, como si podría ocurrir con las hojas de las sierras. Además, este tipo de procesos es bastante flexible, ya que todo se realiza sin cambios en la herramienta y está altamente automatizado, ya que este tipo de máquinas funcionan mediante programación.

Existen diferentes tipos de corte, destacando el corte por fusión como el más extendido, ya que permite obtener cortes muy estrechos, devolviendo un acabado suave y sin rebabas en las piezas. Igualmente, este tipo de corte afecta a una zona muy limitada térmicamente, lo cual evita problemas microscópicos.

<sup>4</sup> Figura obtenida del capítulo 8 del libro "El láser, la luz de nuestro tiempo"

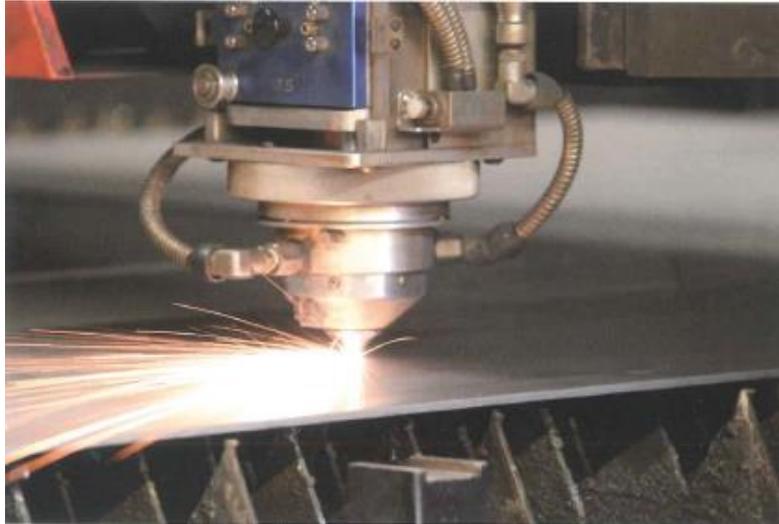


Figura 28. Sistema de corte por láser<sup>5</sup>.

Aún a pesar de estas ventajas, no debemos pasar por alto que este tipo de instalaciones resultan muy costosas y cortan espesores muy limitados. Los láseres de alta calidad actúan con espesores entre 10 y 20 mm, aunque algunos podrían llegar hasta los 25 milímetros.

Por último, aunque hasta el momento se haya hablado de metales, no resulta nada extraño el encontrar este tipo láseres de corte en industrias textiles, para el corque de moquetas, así como para el corte de Kevlar o de fibra de vidrio, dado que reduce el polvo en la operación y la aparición de posibles grietas.

### ***Soldadura por láser.***

Tras el corte, es la aplicación industrial en la que los láseres están más extendido, siendo además una aplicación en plena expansión.

Desde el punto de vista operativo, el gas de los soldadores láser tiene también la función de actuar como atmósfera protectora del material fundido.

Existen dos técnicas de soldadura por láser:

- Limitada a la conducción, en la que el láser lleva al material a una temperatura por debajo de su temperatura de fusión, para evitar que se produzca ningún tipo de evaporación. Por conducción del calor, se funde el material adyacente y se consigue establecer un cordón de unión con un perfil semicircular. Este tipo de técnica es de gran utilidad para piezas pequeñas y con buenos acabados.

---

<sup>5</sup> Figura obtenida del capítulo 8 del libro “El láser, la luz de nuestro tiempo”

- Soldadura de penetración, en la que se trabaja con una gran intensidad del láser hasta producir una evaporación del material, creándose un agujero denominado 'keyhole'. En el interior del agujero se produce la reflexión del haz, de manera que a medida que el láser avanza, las piezas solidifican y forman un cordón de soldadura, penetrando una pieza en el interior de otra. Esta técnica permite alcanzar grandes profundidades.

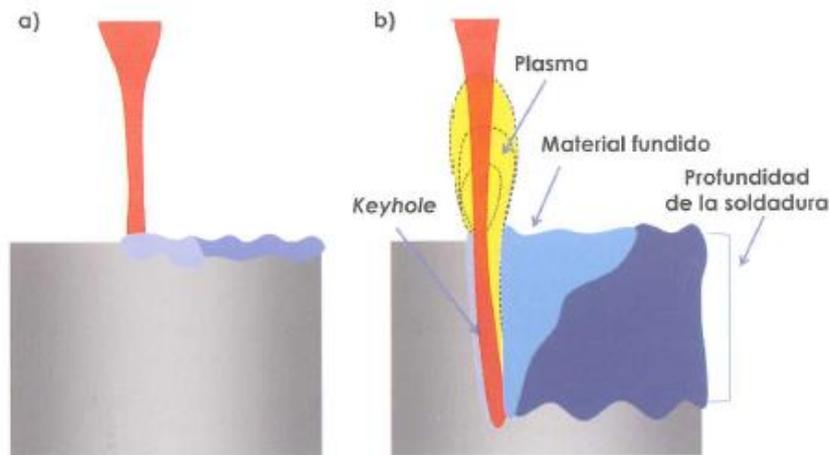


Figura 29. Soldadura láser: limitada a la conducción (a) y penetración (b)<sup>6</sup>

Al igual que en el caso de los láseres de corte, los soldadores láser no necesitan cambios de herramientas, se adaptan fácilmente a los distintos trabajos y es integrable.

### **Perforadoras y taladradoras láser.**

Menos extendidas que las cortadoras y las soldadoras por láser, este tipo de sistemas utilizan láseres pulsados, persiguiendo concentrar grandes energías en poco tiempo. Este tipo de máquinas ofrecen una limitación en la capacidad perforadora.

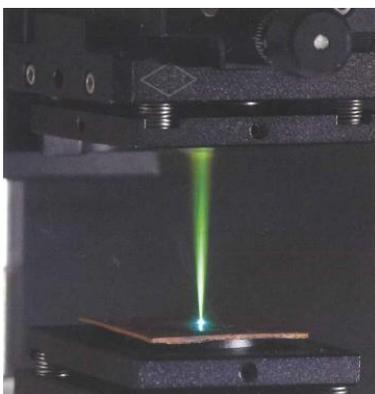


Figura 30. Perforador láser<sup>6</sup>.

Además del uso de láseres pulsados con tiempos de pulso ultracortos, este tipo de sistemas utilizan láseres con longitudes de onda muy cortas con el fin de evitar que exista una transferencia de calor durante la perforación.

Este tipo de perforadoras plantean un control sencillo y permiten utilizar distintas geometrías para el perforado de manera integrada y sin necesidad de utilizar distintas

<sup>6</sup> Figura obtenida del capítulo 8 del libro "El láser, la luz de nuestro tiempo"

herramientas, aunque no puede obviarse que los taladores realizados con láser tienden a tener forma de cono invertido, siendo necesario trabajar muy bien el acabado.

### ***Marcado con láser.***

Además de para mecanizar, en los últimos tiempos se están extendiendo las tecnologías láser para marcar y grabar piezas.

El marcado puede realizarse mediante una matriz de puntos, en la que se trazan caracteres mediante un sistema de barrido utilizando puntos, píxeles o líneas, o bien, un marcado a través de una imagen o máscara que se proyecta sobre una pieza con la ayuda de una lente.

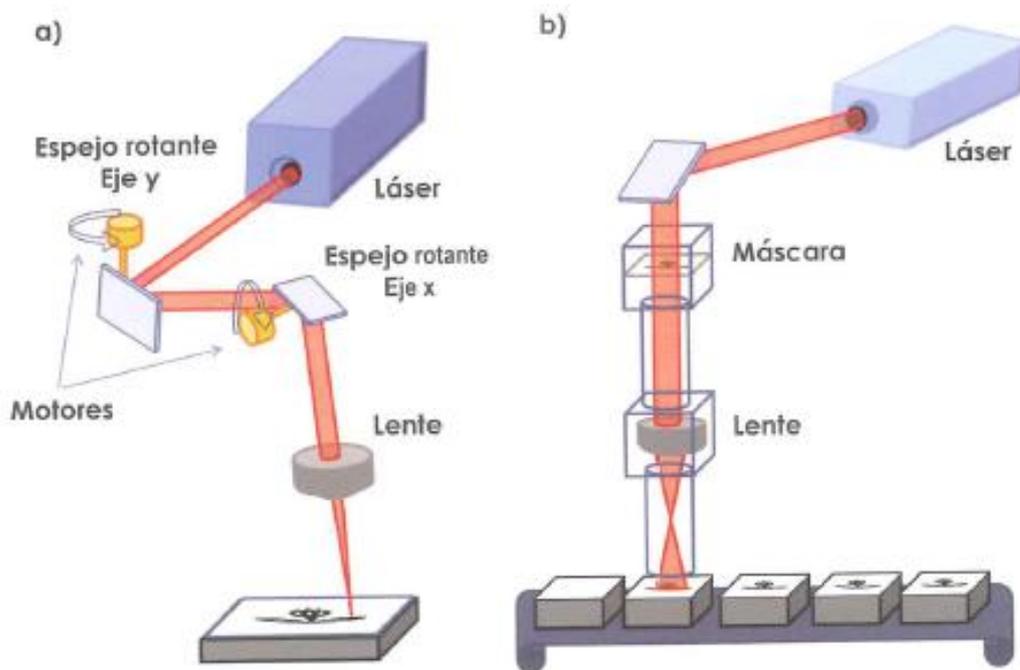


Figura 31. Marcado láser por puntos (a) y marcado láser por máscara (b)<sup>7</sup>.

Los láseres utilizados en el marcado no trabajan con potencias excesivamente grandes, lo que hace que sean más económicos. Esto también facilita que pueda marcarse por láser plásticos, metales, cerámicas, semiconductores, vidrio o papel.

<sup>7</sup> Figura obtenida del capítulo 8 del libro “El láser, la luz de nuestro tiempo”.

Tipo de láser	Industria	Aplicación
<b>CO<sub>2</sub></b>	Electrónica	Circuitos integrados, transistores, condensadores, tubos de TV.
	Envases	Latas de bebidas, etiquetas, cosméticos, farmacéuticos.
<b>Nd:YAG</b>	Electrónica	Circuitos integrados, teclados, paneles de control...
	Automóvil	Partes metálicas, cuadros de mandos.
	Médica	Piezas moldeadas, jeringuillas, envases
	Aeroespacial	Piezas metálicas, monitores
<b>Excímero</b>	Electrónica	Condensadores, cables.

Figura 32. Aplicaciones de los distintos tipos de láser.

### **Tratamientos superficiales con láser.**

Los sistemas láser son un buen elemento sustitutivo de algunos tratamientos superficiales tales como el templado, el recubrimiento, el texturizado o el tratamiento de ondas de choque.

En el caso del templado por láser, se utiliza un sistema no focalizado que realiza un barrido sobre una superficie de un material a templar, para elevar localmente su temperatura.

Procesado láser en régimen de pulsos ultracortos.

La creación de sistemas láser ultracortos, como es el caso de VEGA en el CLPU, ha permitido impulsar e investigar trabajos en el campo de la ciencia y el procesamiento de los materiales, facilitando la aparición de mejoras en los acabados y en la microestructura de los materiales, pudiendo llegar a procesar materiales transparentes y de alta dureza.

## 4.2. Funcionamiento de un sistema láser

Un sistema láser es capaz de producir una emisión estimulada de radiación con el fin de generar una luz con características y propiedades muy concretas y perfectamente controladas. Láser es el acrónimo en inglés de “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación” (light amplification by stimulated emission of radiation).

El origen de la emisión de luz está en los electrones que componen el elemento activo del láser. Como se ha expuesto en la primera parte del presente trabajo, cada electrón está asociado a un nivel de energía, encontrándose en un estado natural estable. Cualquier variación de esta estabilidad puede dar como lugar al cambio de nivel de un electrón, produciéndose una transición entre los niveles energéticos. De esta forma, cuando tenemos un átomo en el que un electrón ocupa el nivel menor de energía, el átomo se encuentra en estado fundamental, mientras que, si en un átomo un electrón ocupa un nivel de energía superior, obtenemos un átomo excitado.

Como ya se explicó, los cambios de nivel de los electrones llevan asociado un cambio de energía en la estructura del átomo, parte de la cual se transforma en forma de fotón, produciéndose una emisión espontánea de luz.

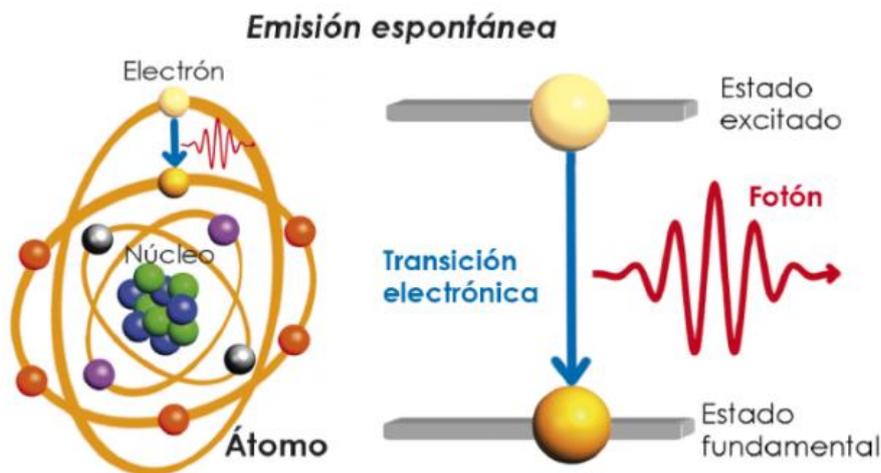


Figura 33. Emisión espontánea de un fotón por un átomo que se desexcita<sup>8</sup>.

Una propiedad de la emisión espontánea es que puede darse su proceso inverso, de manera que, si los fotones que conforman un haz de luz tienen la energía suficiente,

<sup>8</sup> Figura obtenida del capítulo 2 del libro “El láser, la luz de nuestro tiempo”.

puede generarse la transición de un electrón desde un estado fundamental a un estado excitado.

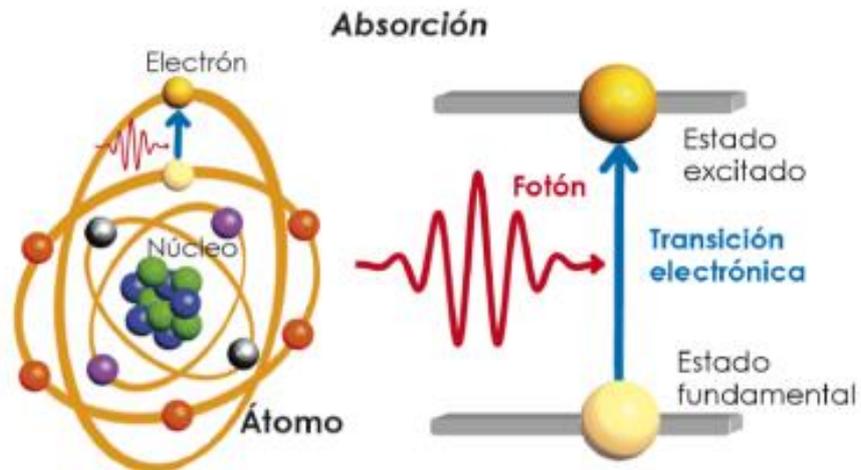


Figura 34. Absorción de un fotón en un átomo que pasa a estar excitado<sup>9</sup>.

Si el proceso de emisión espontánea se produce una estimulación del átomo con un fotón, se producirá una caída de un electrón al nivel inferior, produciéndose la emisión de un segundo fotón idéntico al que estimuló al átomo.

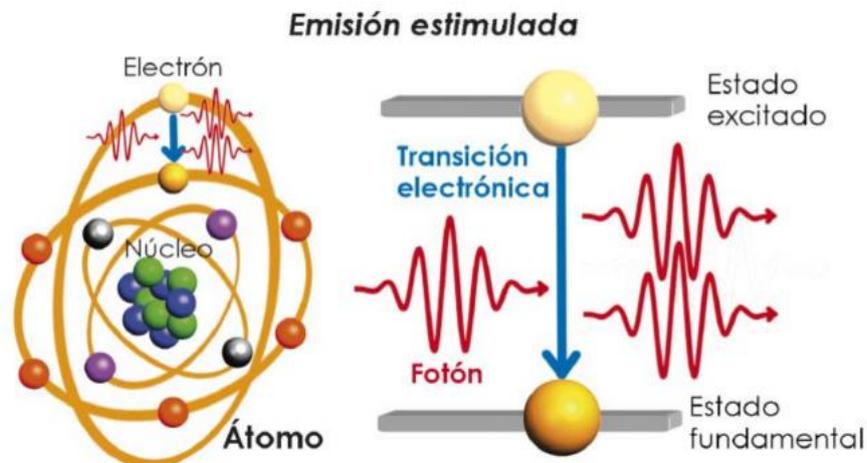


Figura 35. Emisión estimulada de radiación.<sup>9</sup>

Este fenómeno se conoce como emisión estimulada y es la base de la amplificación de la luz, pero para que un medio activo pueda producir estas emisiones estimuladas es necesario que haya más electrones en el nivel de energía superior que en el inferior, de manera que se compense la pérdida de átomos excitados. Esto se consigue mediante técnicas artificiales capaces de invertir la población de electrones, conocidas bajo el

<sup>9</sup> Figura obtenida del capítulo 2 del libro "El láser, la luz de nuestro tiempo".

nombre de bombeo. Un bombeo muy simple se conseguiría inyectando una corriente de electrones energéticos en un semiconductor.

Por tanto, el medio activo y un elemento de bombeo componen partes esenciales del sistema láser, pero no las únicas, dado que en los sistemas láser se persigue que la luz tenga una longitud de onda muy concretas y la mayor intensidad posible, para ello, es necesario que el medio activo y el sistema de bombeo estén ubicados en el interior de una cavidad.

La cavidad está conformada por dos espejos, uno parcialmente reflectante, de manera que devuelva al sistema activo parte de la luz, y salir a la otra parte del sistema láser.

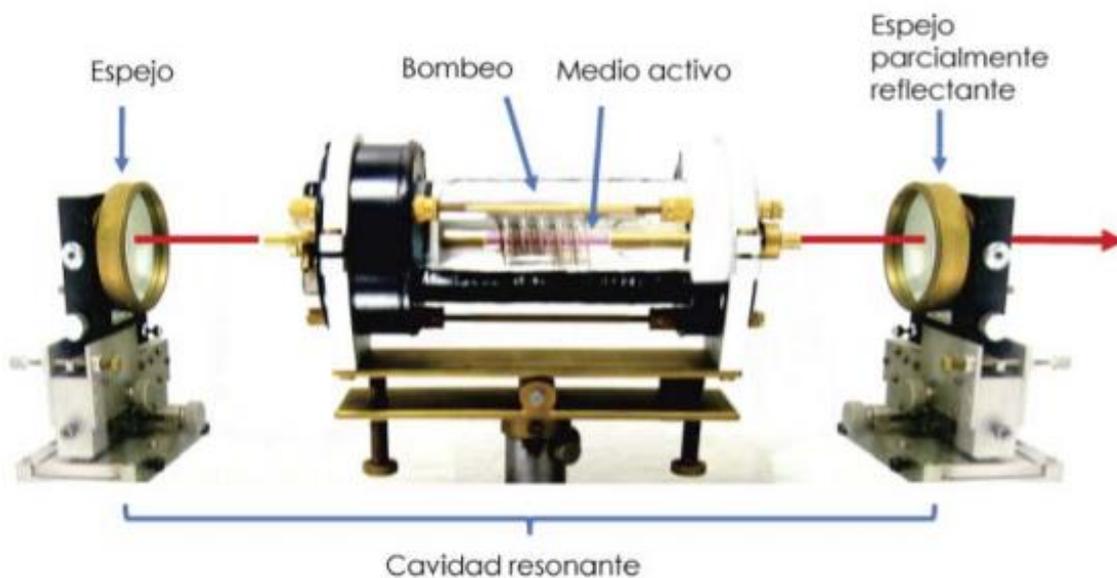


Figura 36. Elementos de un láser: medio activo (barra de rubí de color rosa), bombeo (lámpara de flash) y cavidad.<sup>10</sup>

El elemento que caracteriza a los sistemas láser es el elemento activo, que puede ser sólido, líquido o un gas, ofreciendo cada elemento activo distintas características.

<sup>10</sup> Figura obtenida del capítulo 2 del libro "El láser, la luz de nuestro tiempo".

Láser	Medio activo	Rango de frecuencia de emisión	Régimen de emisión	Potencia de pico máxima (aproximada)
Helio-Neón	Gas	Rojo	Continuo	10 mW
CO <sub>2</sub>	Gas	Infrarrojo	Continuo o pulsado	1 kW
Rubí	Sólido	Rojo	Pulsado	1 kW
Neodimio:YAG	Sólido	Infrarrojo (*)	Continuo o pulsado	1 GW
Titanio:Zafiro	Sólido	Infrarrojo	Continuo o pulsado	1 PW
Semiconductor	Sólido	Infrarrojo – Visible	Continuo	1 mW – 1 kW

Figura 37. Régimen de funcionamiento de distintos tipos de láser.

De manera natural, tendemos a pensar que un sistema láser produce una emisión en modo continuo, existiendo también la posibilidad que funcione de modo pulsado. Los láseres pulsados, como el sistema VEGA del CLPU, han adquirido gran relevancia debido a que a medida que las duraciones del pulso son más cortas, pueden conseguirse picos de potencia más altos.

Cabe destacar que los láseres de alta potencia, como es el caso del sistema VEGA, ocupan un gran volumen de espacio, con potentes sistemas de bombeo y grandes cavidades resonantes. Además, todo el proceso de transporte del haz láser se realiza en un sistema de alto vacío, el cual se va consiguiendo en sucesivas etapas, hasta que finalmente, el haz láser llega a una cámara de vacío en la que se realizan los distintos experimentos.

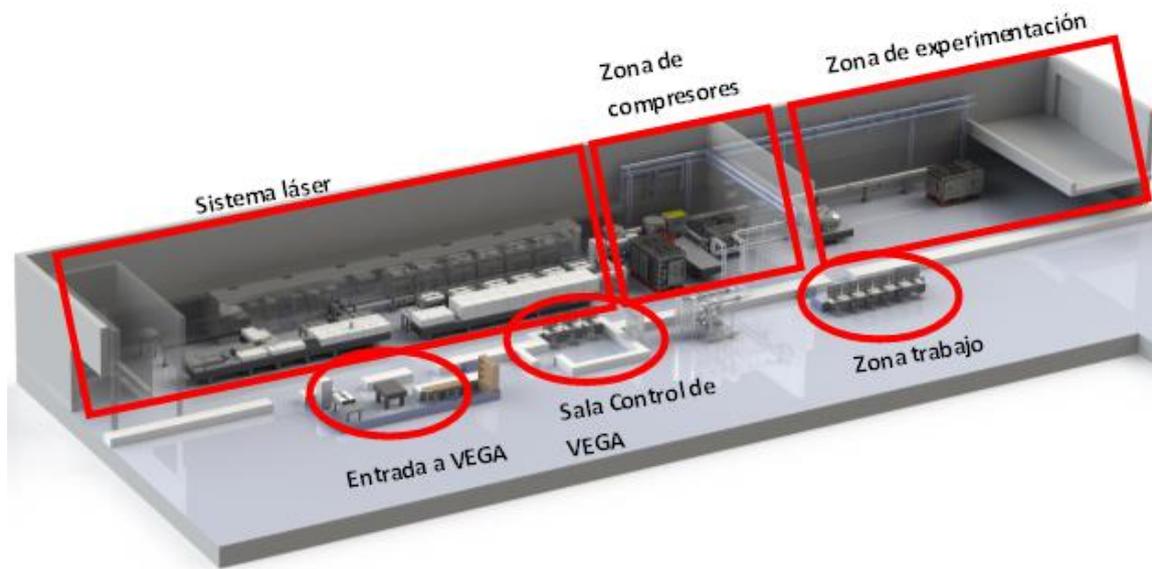


Figura 38. Distribución del sistema láser VEGA en las instalaciones del CLPU.

## 5. Protección Radiológica en instalaciones láser

Como se ha introducido, las instalaciones de láseres intensos pueden ser consideradas instalaciones radiactivas. A continuación, veremos cuál es el origen de la radiación existente en una instalación de estas características.

### 5.1. Radiaciones ionizantes generadas con sistemas láser

Los sistemas láser siempre tienen que interactuar con un elemento que hace las veces de “diana”, recibiendo al haz de luz. Dicho elemento recibe el nombre de ‘target’, y puede ser líquido, sólido o gaseoso.

La interacción del láser con el target puede generar cambios a niveles atómicos, especialmente en el caso de los targets metálicos. De esta forma, si un láser de  $10^{18}$  o  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> incide sobre un metal, los electrones son arrancados de los orbitales, generándose una ionización, y produciéndose un plasma y emitiéndose un haz de protones.

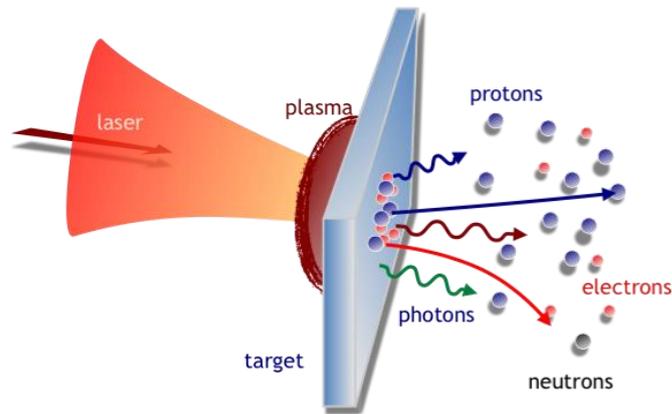


Figura 39. Esquema de un sistema acelerador de partículas por láser.

La generación del plasma con los sistemas láser de alta potencia ha abierto el campo de investigación de las radioterapias con láser, pero a su vez, ha convertido a estos sistemas en poderosas fuentes de radiaciones ionizantes.

Con todo ello, los sistemas láser, ya sean de alta potencia o con altas tasas de repetición, como son los existentes en el CLPU, son capaces de generar radiaciones ionizantes de tipo electromagnético, con rayos X y gamma, o bien, radiaciones de tipo alfa y beta, al interactuar el haz con un blanco metálico.

Todo esto obliga a que el CLPU tenga que poner en marcha las medidas necesarias en el ámbito de la protección radiológica, conforme a lo que establece la normativa vigente.

## 5.2. Riesgos radiológicos en sistemas láser

El incremento de intensidad que han sufrido los sistemas láser ha traído consigo la necesidad de establecer protocolos y medidas de protección radiológica. Cabe considerar que la intensidad del sistema láser no es el único factor que marca el grado de riesgo radiológico que puede suponer dicha instalación, ya que cuestiones como la duración del pulso, la tasa de repetición o la longitud de onda, son también influyentes en las radiaciones ionizantes generadas por estos sistemas.

Para hacernos una idea de la magnitud de la radiación que puede llegar a generarse en las instalaciones con láseres intensos, resulta de gran utilidad conocer algunas de las dosis medidas en instalaciones láser de distintas intensidades.

En el caso de los láseres de Teravatio, es conveniente comentar los trabajos realizados en el Laboratory for the Use of Intense Laser (LULI), en la Politécnica de París, en los que se realizaron distintas mediciones utilizando un láser de Teravatio sobre targets de aluminio, oro y teflón con intensidades entre  $10^{17}$  y  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>.

En dichos trabajos se detectaron Rayos X y Rayos gamma, estos últimos con energías entorno a los 700 keV. Las dosis de radiación medidas en los alrededores, a menos de dos metros de la cámara, llegaban a valores entre 50 y 75 mSv, y en algunos puntos, hasta los 370 mSv/año.

Sin embargo, aún a pesar de lo escandaloso de estas cifras, en las zonas de trabajo y tránsito de personas, la dosis no excedía 1 mSv/año, lo cual muestra la efectividad de los blindajes.

En el caso de instalaciones láser del orden de Petavatio los trabajos resultan más escasos, dado que dichos sistemas láser están en una etapa de nacimiento y no existe un número significativo de mediciones, pero si existen algunas para intensidades de  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>, observándose radiaciones gamma del orden de 0,17 mSv/J por disparo.

En el régimen de  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> se esperan dosis de 0,6 mSv/J, que extrapolado al año son dosis de 70 Sv anuales. Estas dosis elevadas están a 1 metro de la fuente, por lo que los blindajes con las zonas de tránsito jugarán un papel imprescindible.

### **5.3. Riesgos radiológicos en el CLPU.**

Como acaba de mencionarse, las instalaciones láser de Teravatio y Petavatio conllevan unos niveles de radiación importantes, por lo que el resulta evidente que el sistema VEGA del CLPU será una poderosa fuente de radiación. Pero además de VEGA, no pueden olvidarse los otros sistemas láser que disponen de mayores tasas de repetición, aún a pesar de operar con potencias del orden de Gigavatios.

Los sistemas de Gigavatio del CLPU son capaces de realizar mil disparos por segundo, con tasas de repetición de 1 KHz. Este tipo de sistemas con más comunes, existiendo una veintena a lo largo de todo el país.

Dichos láseres producen en cada disparo radiaciones ionizantes compuestas por electrones y rayos X, ambas con bajas energías. Lo que hace peligroso a estos sistemas es la alta tasas de repetición.

En lo referido al sistema VEGA, el CLPU se ha propuesto que todas las zonas de trabajo que sean contiguas a la zona experimental sean de libre acceso, lo cual limita los niveles de radiación a 1 mSv/año.

En la zona de experimentación se instalarán dos cámaras de interacción en las que estará localizada la fuente de radiación ionizante. Una de las cámaras se dedicará a las

líneas VEGA-1 y VEGA-2, de 20 y 200 TW respectivamente, y la otra cámara se dedicará a la línea VEGA-3 de 1 PW.

El siguiente esquema muestra cada una de las cámaras, señaladas en verde, en las cuáles se producirá la aceleración láser. En morado se destacan los blindajes que se dispondrán en el interior de la zona de experimentación, consistentes en muros de hormigón. Dichos blindajes han sido calculados minuciosamente con el fin de conseguir el objetivo de que en las zonas de libre acceso la dosis no supere 1 mSv al año.

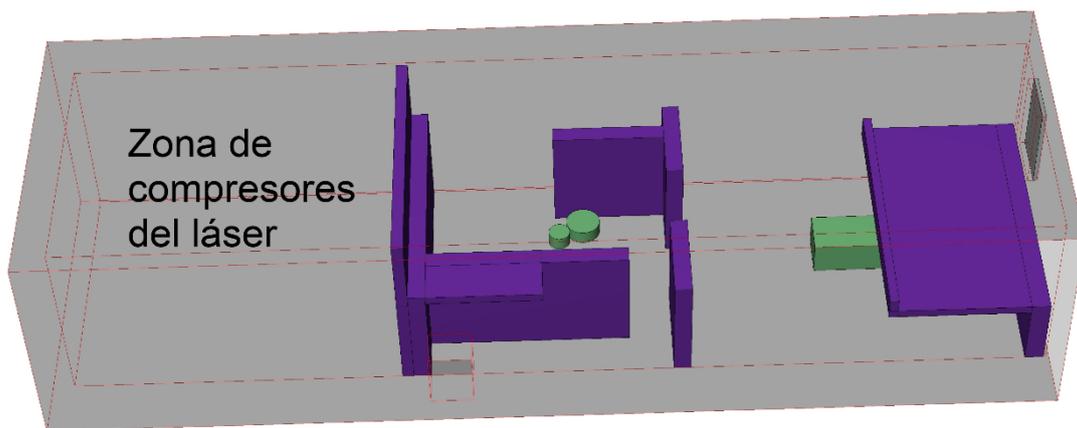


Figura 40. Zona de compresores del sistema láser VEGA.

Este tipo de simulaciones han sido realizadas con el código Montecarlo FLUKA el cual muestra el transporte y la interacción de las partículas generadas por la fuente. Para la realización de la simulación resulta vital aportar una descripción lo más detallada posible.

Cabe destacar que no solo hay que considerar y simular las radiaciones que nacen de la fuente radiactiva, sino que también hay que estudiar las activaciones que pueden producir los protones acelerados generados a través del campo eléctrico que lleva asociado el sistema láser. Estas activaciones pueden consistir en la producción de neutrones en el entorno del punto de interacción, como en la propia cámara.

Este tipo de activaciones presentan un especial riesgo debido a que son las causantes de que siga incrementándose la dosis radiactiva una vez apagado el láser, y pueden llegar a impedir el acceso al área de experimentación si estas son lo suficientemente elevadas. Para minimizar este tipo de dosis, conviene utilizar 'targets' con el mayor nivel de pureza posible.

Una vez simuladas las radiaciones generadas mediante la fuente, así como por la activación de los materiales, la herramienta FLUKA ofrece los resultados relativos a las tasas de dosis que obtendremos en las distintas zonas del CLPU.

A continuación, podemos observar cual es la dosis ambiental estimada para el sistema VEGA-2 en la zona experimental.

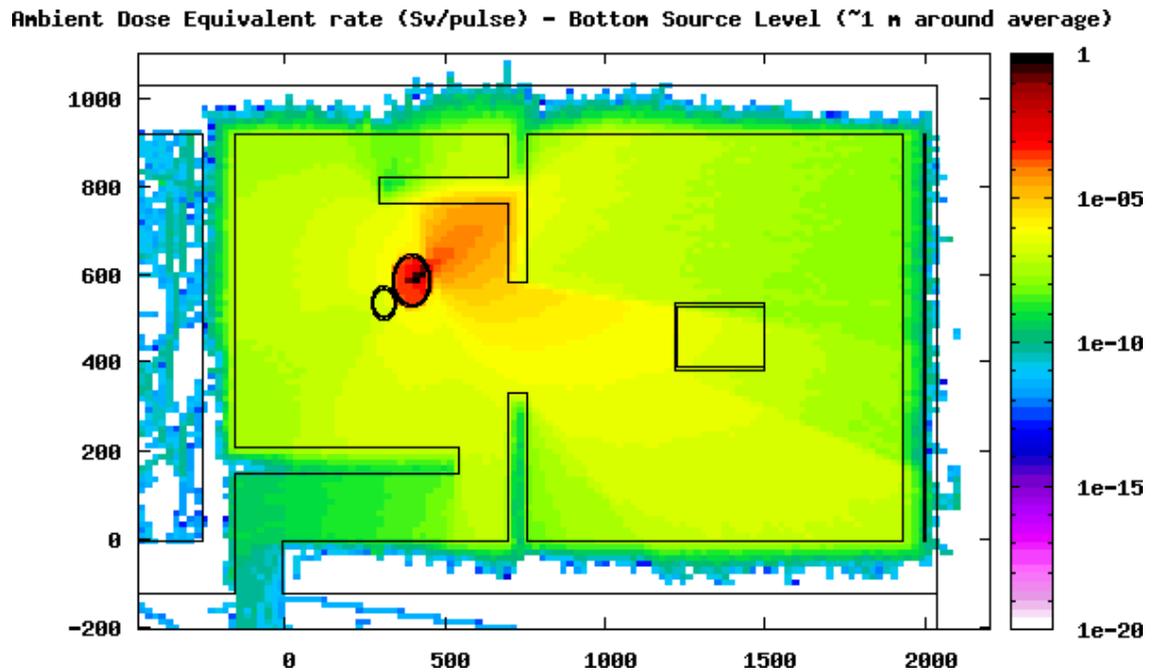


Figura 41. Dosis ambiental en Sv por cada pulso de VEGA-2

De manera similar, esta sería la simulación para el sistema VEGA-3 en la zona de experimentación.

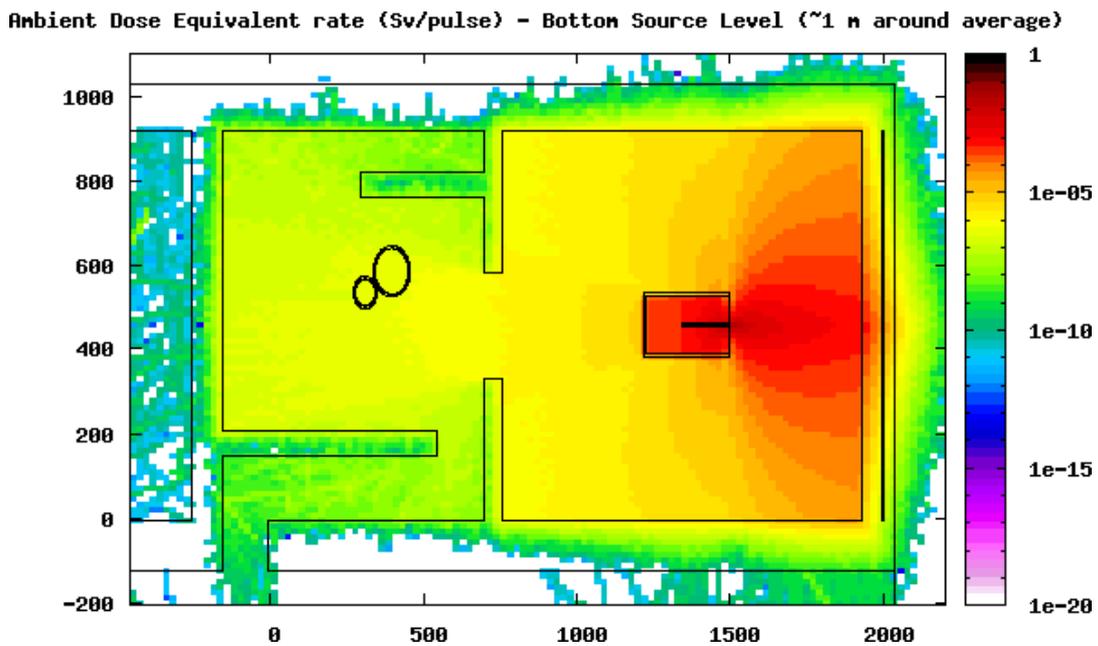


Figura 42. Dosis ambiental en Sv por cada pulso de VEGA-3

Como se puede observar en las gráficas las dosis obtenidas son en Sv/pulse, es decir, son estimaciones realizadas para un disparo del láser, siendo necesario conocer el número de disparos anuales para así obtener la dosis ambiental anual.

La estrategia a seguir para garantizar una buena protección radiológica en el CLPU es la de estimar cual es el número máximo de disparos que pueden realizarse al año sin que se sobrepase la dosis anual de 1 mSv.

En base al número de pulsos máximos, se establece que se trabajarán 35 semanas al año, con tres días a la semana en los que se disparará el láser. De esta forma, en la última columna de la tabla que veremos a continuación, vemos cual es el número de pulsos diario para tener la dosis de 1 mSv/año.

Sistema@Intensidad W/cm <sup>2</sup>	Dosis Sv/pulso	Numero de pulsos para dosis=1 mSv	Pulsos diarios (dosis=1mSv) en exclusividad
VEGA-3@0,8E21	6E-11	16 x10 <sup>6</sup>	150 x 10 <sup>3</sup>
VEGA-3@1E22	2E-10	5 x10 <sup>6</sup>	50 x 10 <sup>3</sup>
VEGA-2@1E20	4E-11	25 x10 <sup>6</sup>	240 x 10 <sup>3</sup>
VEGA-2@1E21	6E-10	1,6 x10 <sup>6</sup>	15 x 10 <sup>3</sup>

Figura 43. Estimación del número de pulsos del sistema láser VEGA y dosis generada.

Como puede apreciarse en la tabla, el número de disparos que puede darse al día es bastante elevado, por lo que, en principio, no habrá gran problema en las zonas de acceso libre.

Con lo visto hasta el momento, puede afirmarse que el principal riesgo radiológico en las instalaciones del CLPU se encuentra en la zona de experimentación, siendo necesario el control y limitación de accesos en dicha zona, incluso una vez finalizada la operación, controlándose en todo momento la exposición de los trabajadores.

#### 5.4. Vigilancia y monitorización de la radiación en el CLPU.

La monitorización de los niveles de radiación ambiental existente en las instalaciones del CLPU se realiza mediante instalaciones de detección, las cuales están compuestas por un detector de neutrones, una cámara de ionización y una estación de monitorización.

El detector de neutrones que compone las estaciones de monitorización es el modelo FHT 762 wendy-2, de Thermo Scientific. Este detector de neutrones tiene una alta sensibilidad y una buena respuesta angular en energías. Además, combina una respuesta en el rango de energías medias (mayor de 15 MeV y hasta 5 GeV) con una buena estimación de la magnitud de dosis equivalente. Debido a su recubrimiento, tiene un rechazo frente a la radiación gamma, además, es capaz de discernir tasas de hasta 1 Sv/h.

##### Características:

- Measuring range: 0.01  $\mu$ Sv/h to 100 mSv/h
- Ambient temperature -30 to +50 °C
- Energy range 25 MeV to 5 GeV Humidity up to 90 % non condensing
- Angular dependence  $\pm 20$  % all directions
- Atmospheric pressure 500 to 1500 hPa
- Linearity  $\pm 20$  %

**UNIDADES DISPONIBLES EN EL CLPU:** 7 Ud.

**COSTE APROXIMADO:** 9.000 €



Figura 44. Detector de neutrones FHT 762 wendy-2

Para la cámara de ionización que compone las estaciones de detección, el CLPU dispone de dos modelos disponibles:

La cámara de ionización FHT 190, de Thermo Scientific, la cual lleva un preamplificador de señal separado. Esta una cámara de media presión de alta sensibilidad con conexión de preamplificador remoto. Está basada en un sistema de presión PTB-media, con la que se puede medir la dosis equivalente ambiente entre el rango de los 30 KeV y los 7 MeV y una tasa de dosis entre 100 nSv/h y 1 Sv/h para la monitorización de área. Como gran inconveniente, es que este tipo de cámara solo puede ser usada con un cable de 42540008x.

Esta cámara de ionización mide radiación gamma y mediante un software es capaz de estimar las dosis. Tiene un recubrimiento de poliespán para detener la radiación que no sea de proveniencia fotónica.

Cabe destacar que, en estas cámaras, la electrónica está separada del dispositivo, el propósito es que el pulso electromagnético que se produce cuando se genera radiación por interacción laser-materia no afecte a la electrónica del dispositivo y en consecuencia se obtenga una medida errónea.

Características:

- Measuring range 100 nSv<sub>h</sub> - 1 Sv<sub>h</sub>
- Energy range 30 keV - 7 MeV
- Gamma- responsiveness 250 fA/μSv<sub>h</sub>
- Angular acceptance  $-45^\circ < \theta < +90^\circ$  (270° solid angle)
- Temperature range: +10 to +35 °C
- Overload Up to 50 Sv/h overload indication
- Filling pressure 7000 hPa (absolute value)

**UNIDADES DISPONIBLES EN EL CLPU:** 4 Ud.

**COSTE APROXIMADO:** 6.500 €



Figura 45. Cámara de ionización FHT 190

El otro modelo disponible es la cámara de ionización FHT 192-10, de Thermo Scientific. Esta cámara es de amplio rango para medidas de alta precisión de dosis ambientales. La cámara de ionización viene con preamplificador integrado y tiene un rango de detección comprendido entre los 30 KeV y los 7 MeV a 1 Sv/h. Puede ser usado como monitor de área o para medidas en lugares con tasas de radiación de altas energías.

Igual que en el modelo anterior, esta cámara es capaz de medir radiación gamma y mediante un software estimar la dosis, disponiendo de un recubrimiento de poliespán para detener la radiación que no tenga origen fotónico.

Características:

- Measuring range 100 nSv<sub>h</sub>-1 - 1 Sv<sub>h</sub>-1
- Energy range 30 keV - 7 MeV
- Gamma- responsiveness 250 fA/μSv<sub>h</sub>-1
- Angular acceptance  $-45^{\circ} < \theta < +90^{\circ}$   
(270° solid angle)
- Temperature range: +10 to +35 °C
- Overload Up to 50 Sv/h overload indication
- Filling pressure 7000 hPa (absolute value)

**UNIDADES DISPONIBLES EN EL CLPU: 5**

Ud.

**COSTE APROXIMADO: 6.000 €**

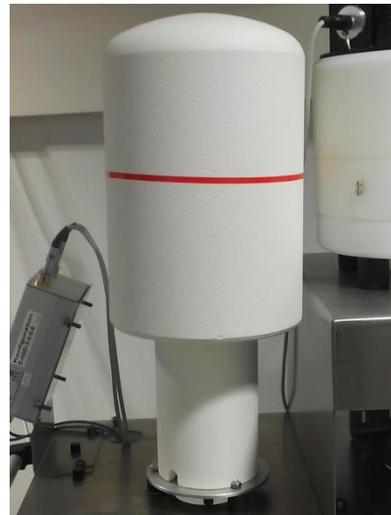


Figura 46. Cámara de ionización FHT 192-

10

Por último, la estación de monitorización que compone las estaciones de detección es el modelo FHT 6020-A, también de Thermo Scientific. Dicha estación trae un kit con un visualizador FHT 6020 al que se le puede acoplar varios detectores, entre ellos, las cámaras de ionización y los detectores de neutrones.

Posibilidades que ofrece:

- Una medida de control sobre la dosimetría personal.
- Medida de la tasa de radiación gamma.
- Operation temperature: 0 °C to +50 °C.
- Storage temperature: -20 °C to +70 °C.
- Posibilidad de medidas externas mediante sondas que se pueden implantar en la estación.
- Medidas mixtas para los distintos tipos de contaminación ambiental gamma, beta y neutrónica de alta sensibilidad, tanto ambiental como artificial.

**UNIDADES DISPONIBLES EN EL CLPU:** 7 Ud.

**COSTE APROXIMADO:** 5.500 €



Figura 47. Estación de monitorización FHT 6020-A

Además de las instalaciones de detección, el CLPU cuenta con dos sondas de monitorización FHZ-621 G-L4, de Thermo Scientific. Esta sonda es un detector gamma de amplio espectro, fabricado para vigilancia ambiental, siendo capaz de rechazar la radiación de fondo, distinguiendo entre el fondo natural frente a la radiación ambiental.

Características:

- Measures range: 100 nSv/h to 100 mSv/h
- Energy Range: 30 KeV to 1.3 MeV
- Temperature Range: -30° to +50°C

**UNIDADES DISPONIBLES EN EL CLPU:** 2

Ud.

**COSTE APROXIMADO:** 4.800 €



Figura 48. Sonda de monitorización FHZ-621 G-L4.

En total, a lo largo de las instalaciones del CLPU hay distribuidas siete estaciones de detección, quedando libres dos cámaras de ionización, una de cada modelo, a modo de reserva por si alguna de las que está en funcionamiento falla. Cada una de las estaciones envía la información a un ordenador a través de ethernet mediante la estación FHT 6020-A.

Además de las siete estaciones, también hay instaladas las dos sondas de monitorización FHZ-621 G-L4, las cuales están conectadas a las estaciones FHT 6020-A para que estas puedan enviar la información adquirida al ordenador central.

Dicho ordenador se encarga de tratar los datos de todas las estaciones de detección y sondas, generando informes de la radiación diaria que se recoge y generando alarmas ante dosis elevadas. Todo ello facilita el trabajo burocrático a la hora de trabajar con el Consejo de Seguridad Nuclear.

La distribución de las estaciones, las sondas y la ubicación del ordenador son las siguientes:

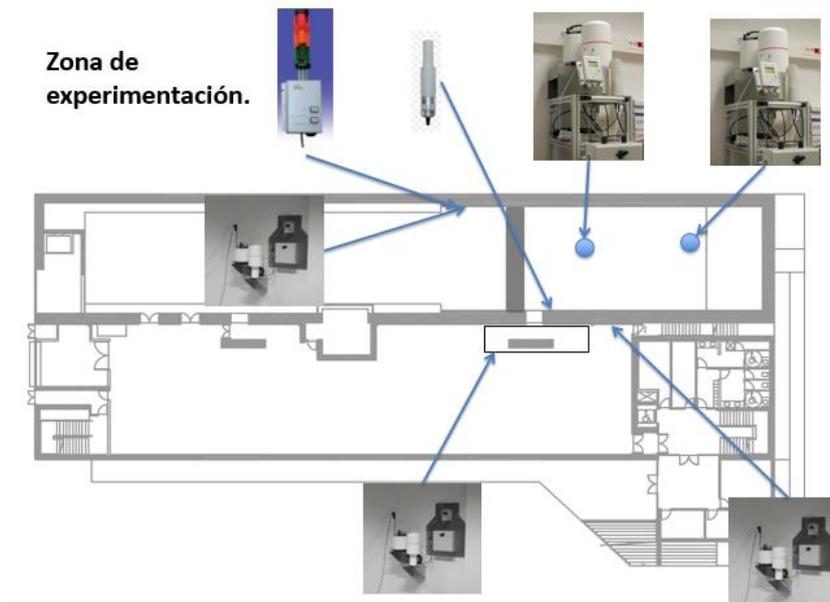


Figura 49.. Distribución de los detectores de radiación en la zona de experimentación del sistema láser VEGA.

La zona de experimentación es sin duda el lugar más vigilado, estando el grueso de las estaciones detectoras. De igual forma, una de las estaciones detectoras ubicada en la zona de compresores dispone de un indicador luminoso y acústico para indicar situaciones de peligro.

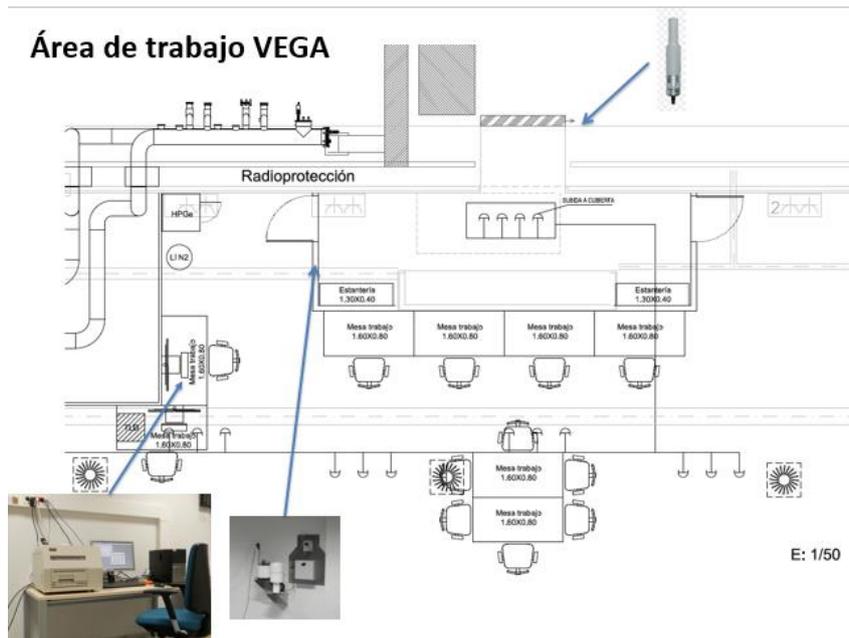


Figura 50. Distribución de los detectores de radiación en la zona de trabajo del sistema láser VEGA.

El área de trabajo del sistema VEGA dispone de una estación de detección. Dicha zona, como ya se ha comentado, está planificada para ser de pública concurrencia, ubicándose allí el ordenador que recoge y procesa toda la información de los detectores.

En las plantas superiores a la que está ubicada el sistema VEGA también pueden encontrarse estaciones de detección y sondas, como es en el caso de los despachos del personal técnico y científico, así como en la planta de administración, en el cuarto de instalaciones:

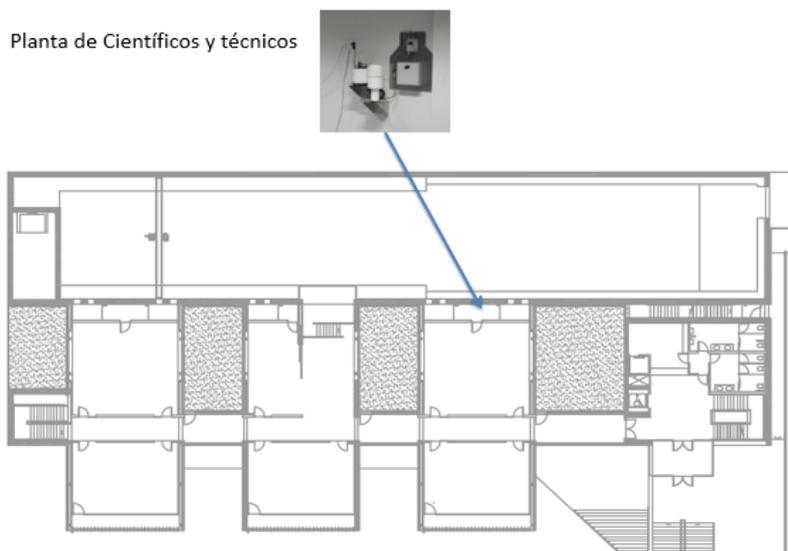


Figura 51. Distribución de los detectores de radiación en la zona de despachos de científicos y técnicos del CLPU.

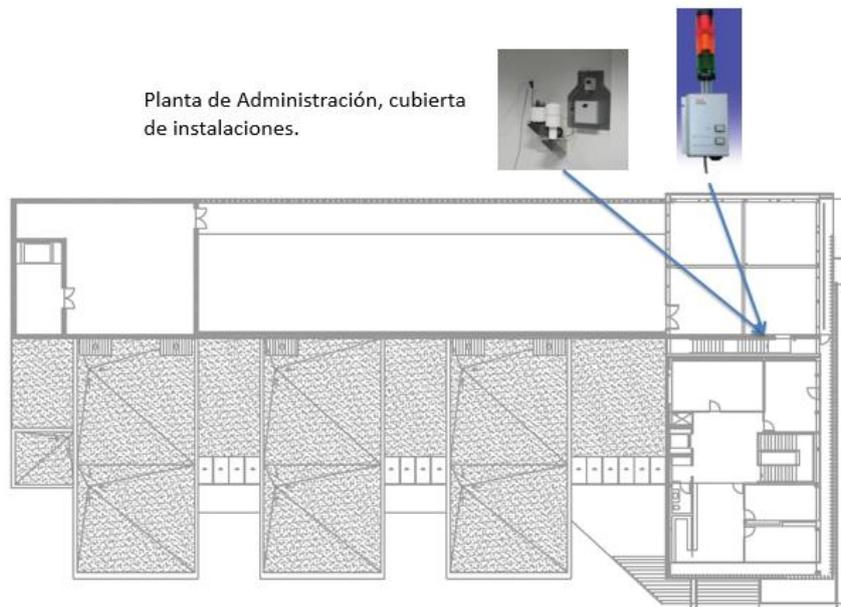


Figura 52. Distribución de los detectores de radiación en la en la cubierta de instalaciones del CLPU.

En la cubierta de instalaciones la estación de detección dispone de un indicador luminoso y sonoro para alertar de situaciones de emergencia.

Por último, cabe destacar la alta inversión que conlleva la instalación de protección radiológica, ya que solo en los equipos detectores mencionados la inversión realizada supera los 160.000 €, a lo que habría que añadirle el coste del ordenador dedicado únicamente a recibir la información, las herramientas software y todo el sistema de cableado y transmisión de la información, pudiendo estimarse que el coste total de la instalación es cercano a 200.000 €.

## **6. Retos de los sistemas de detección radiológica en el CLPU.**

A lo largo del presente trabajo ya se han expuesto las singularidades temporales del CLPU y su sistema láser VEGA, el cual opera con tiempos de disparo de un femtosegundo. Este tiempo limita todos los dispositivos de detección, ya que deben ser capaces de dar una respuesta lo más rápida posible, perdiendo el mínimo de información.

Como ya se ha expuesto, los detectores de radiación se basan en la idea de que una partícula deposita una cierta energía en el medio detector, la cual es transformada en una señal eléctrica a través de un fundamento físico. Todos estos procesos llevan asociados unos tiempos característicos, los cuales hay que tener en consideración para el diseño del detector y su instalación en planta.

De igual forma, hay que considerar que los elementos detectores pueden recibir sucesos simultáneos, separados temporalmente por un intervalo temporal mucho menor que el intervalo de detección del dispositivo, resultando importante conocer este fenómeno dada la pérdida de información que puede llevar asociada.

Con todo ello, un detector de radiación rápido puede tener tiempos característicos del orden de nanosegundos, lo cual es mucho más lento que la radiación emitida a consecuencia de un sistema láser ultracorto. Por todo ello, resulta vital que en este tipo de instalaciones los detectores estén verificados en una escala temporal de femtosegundos y se conozca su comportamiento ante la radiación con estas características temporales.

Además de la escala temporal del detector, existen otras limitaciones geométricas y electromagnéticas que limitan el uso de los detectores de radiación tradicionales en instalaciones láser ultraintensas.

Las limitaciones de los detectores convencionales han generado la necesidad en el CLPU de buscar nuevos métodos de detección que garanticen el funcionamiento en las escalas temporales de trabajo y conlleven la menor pérdida de información posible. El presente proyecto persigue dar respuesta a esta necesidad, desarrollando un elemento detector basado en cristales centelladores acoplados a fotomultiplicadores de silicio.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

**PARTE 3: DESARROLLO DE UN ELEMENTO  
DETECTOR PARA UN SISTEMA LÁSER DE ALTA  
INTENSIDAD.**

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

## 7. Módulo detector de X-ZLAB

Una vez conocidas las cuestiones teóricas de la radiación y las singularidades radiológicas de las instalaciones láser, en la última parte de este proyecto se estudiará el funcionamiento de los centelladores y los fotomultiplicadores de silicio, investigándose el funcionamiento de un módulo detector recientemente creado con esta tecnología, adquirido por parte del CLPU a la compañía norteamericana X-ZLAB, con un coste aproximado de 800 €.

Esta compañía desarrolla nuevas tecnologías de detección radiológica y las facilita a usuarios para que estos puedan ir desarrollando sus propias aplicaciones e instrumentos, al tiempo de que la compañía desarrolla los suyos propios. La finalidad de esta forma de trabajar es la de poder intercambiar información entre los desarrolladores de X-ZLAB y la de los que adquieren los productos

En la página web de la compañía X-ZLAB puede encontrarse toda la información disponible sobre el módulo detector adquirido (<https://www.x-zlab.com/detector-module-radiation-detection-modules/>). Dicho módulo consta de un elemento detector y de un circuito electrónico de lectura y alimentación.

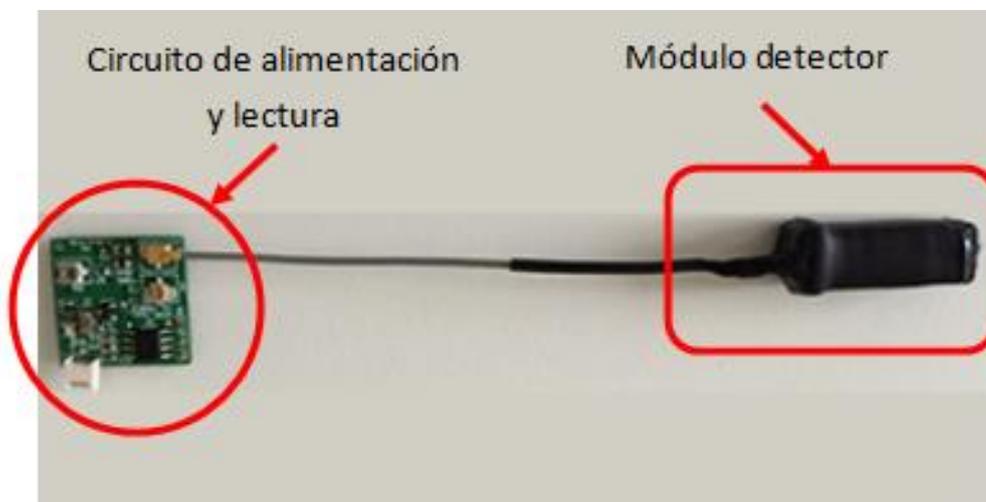


Figura 53. Módulo detector de X-ZLAB

El módulo detector consiste en un cristal centellador acoplado a un fotomultiplicador de silicio (SiPM). De manera muy simplificada el funcionamiento de este módulo se basa en que, al recibir una partícula radiactiva, el cristal produce una emisión de luz que es recibida por el SiPM, que es un detector de luz con pequeños fotodiodos, entre 20 y 100 micrómetros, que forman una matriz y transforman la emisión lumínica en una señal eléctrica.

La distinta energía de cada una de las partículas que inciden en el cristal genera un fotón con un determinado nivel de energía, activando un mayor o menor número de los fotodiodos del SiPM. Más adelante veremos con mayor detalle el fundamento de los cristales centelladores y el de los SiPM.

El cristal que compone el módulo es un centellador YSO ( $Y_2SiO_5$ ) capaz de emitir a 420 nm de longitud de onda, con una excelente resolución en tiempo y energía.

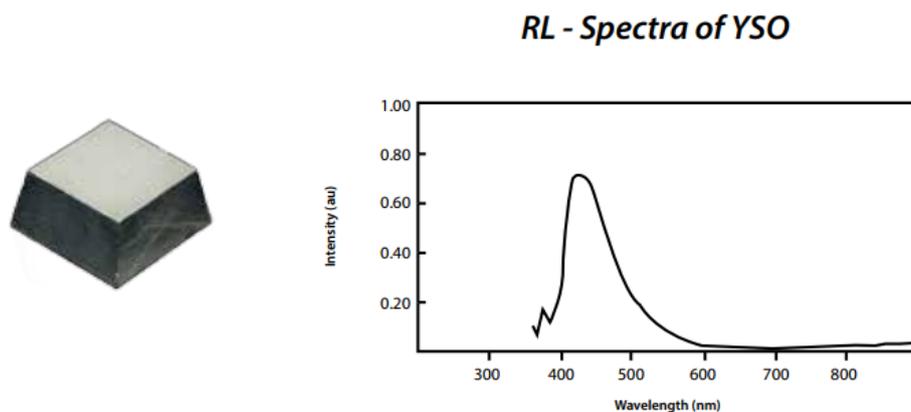


Figura 54. Cristal centellador YSO montado en el Módulo de X-ZLAB.

Las características principales que ofrecen estos cristales son:

Feature	Parameter
<b>YSO</b>	
Density (g/cm)	4.5
Melting Point (K)	2273
Index of Refraction	1.8
Effective Atomic No.(Z)	39
Hardness (Mohs)	5.6
Radiation Length (cm)	1.16
Hygroscopic	No
Cleavage Plane	None
Wavelength (nm)	420
Decay time (ns)	50-70
Light Yield (photons/keV <sub>p</sub> )	10
Photoelectron yield [(% of NaI(Tl))] for γ-ray	20

Figura 55. Características de trabajo del cristal YSO instalado en el módulo X-ZLAB.

En lo referente al SiPM X-ZLAB únicamente ha informado que tiene unas dimensiones de 6x6 mm<sup>2</sup> y que la matriz está compuesta de 19096 microcélulas que actúan como fotodiodos. Esta información no está disponible en la web, sino que ha sido solicitada directamente.

Dichos módulos pueden utilizarse para el conteo de radiación Gamma o la medición de espectros energéticos. La principal ventaja de estos módulos es la alta sensibilidad del cristal, la estabilidad frente a campos magnéticos y variaciones de temperatura, su diseño compacto y el bajo consumo. Cabe destacar también el bajo coste del módulo, el cual ha costado al CLPU alrededor de 800 €.

Las limitaciones físicas del módulo están en los rangos de energía que puede medir el módulo. En el caso de que vaya a utilizarse para el conteo de rayos gamma, el rango de energía está entre los 20 keV – 3 MeV, y para espectrómetros el rango es entre 30 keV – 1,33 MeV.

En lo referente al módulo de lectura y alimentación, este consiste en un pequeño circuito que puede ser alimentado con una tensión entre 2 y 5 voltios, realizando dos funciones:

- La regulación de corriente continua a corriente continua de alto voltaje para alimentar a los SiPM, los cuales necesitan una corriente de alimentación de  $30 \pm 2$  V.
- La conversión de la señal de corriente procedente de los SiPM en un voltaje que pueda ser posteriormente procesado por un sistema de adquisición. Esta señal consiste en un pulso con una duración de microsegundo, en el que varía el valor de pico del pulso.

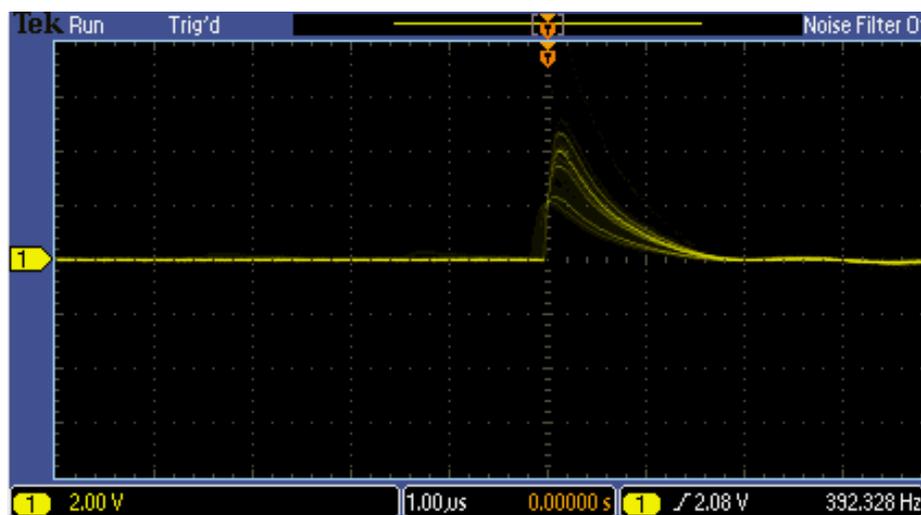


Figura 56. Señal de salida del módulo X-ZLAB obtenida en modo continuo con el osciloscopio.

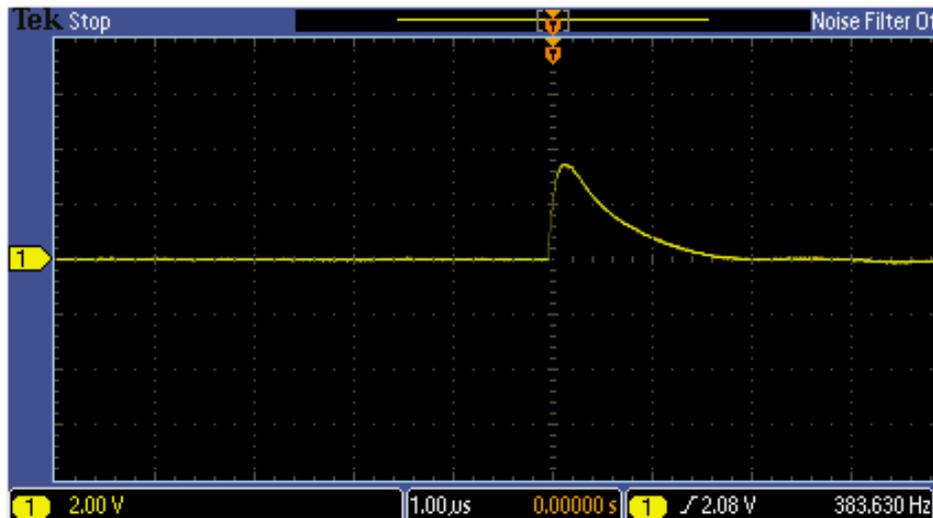


Figura 57. Señal de salida del módulo X-ZLAB obtenida en modo "single" con el osciloscopio.

El valor del pulso viene marcado por el número de células del SiPM que han sido activados por cada partícula radiactiva, que, en parte, depende de la tensión de alimentación y la temperatura, los cuales afectan a la resolución del SiPM.

El circuito dispone de un pin de dos entradas para la alimentación y dos conectores 'U.FL', uno para conectar al módulo detector y otro con una salida BNC para la obtención del pulso de salida.

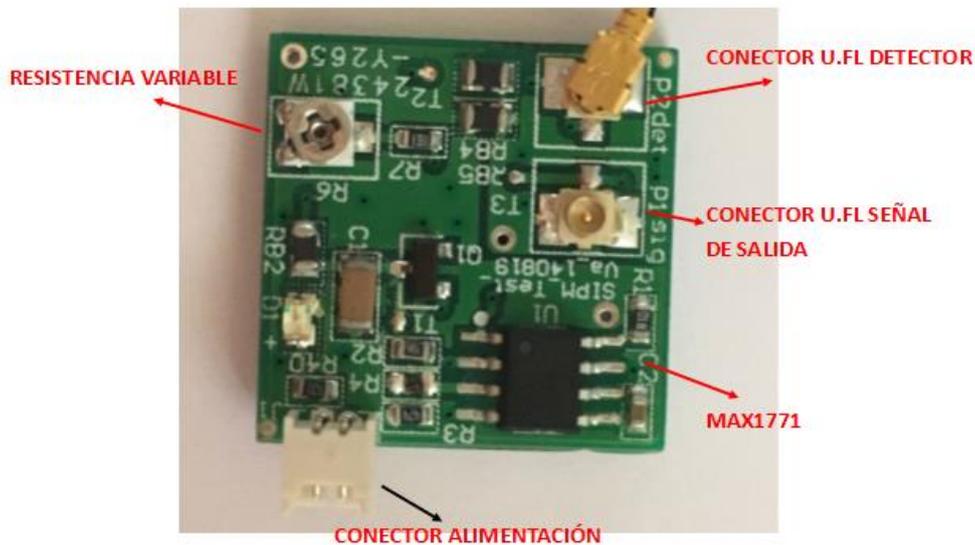


Figura 58. Circuito lectura y alimentación del módulo X-ZLAB (anverso).

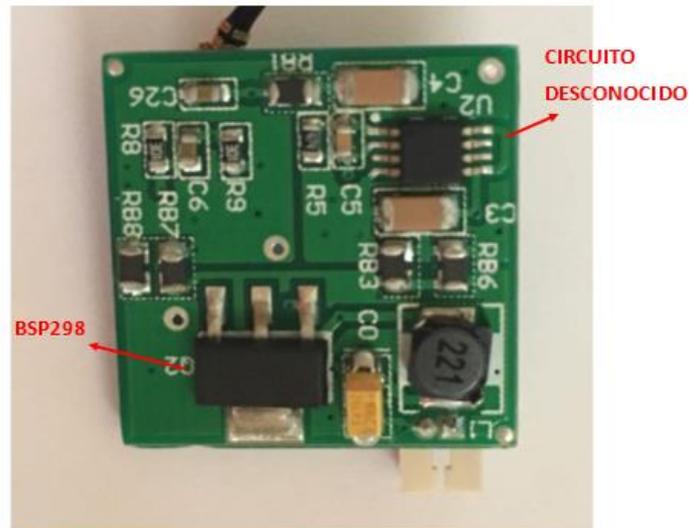
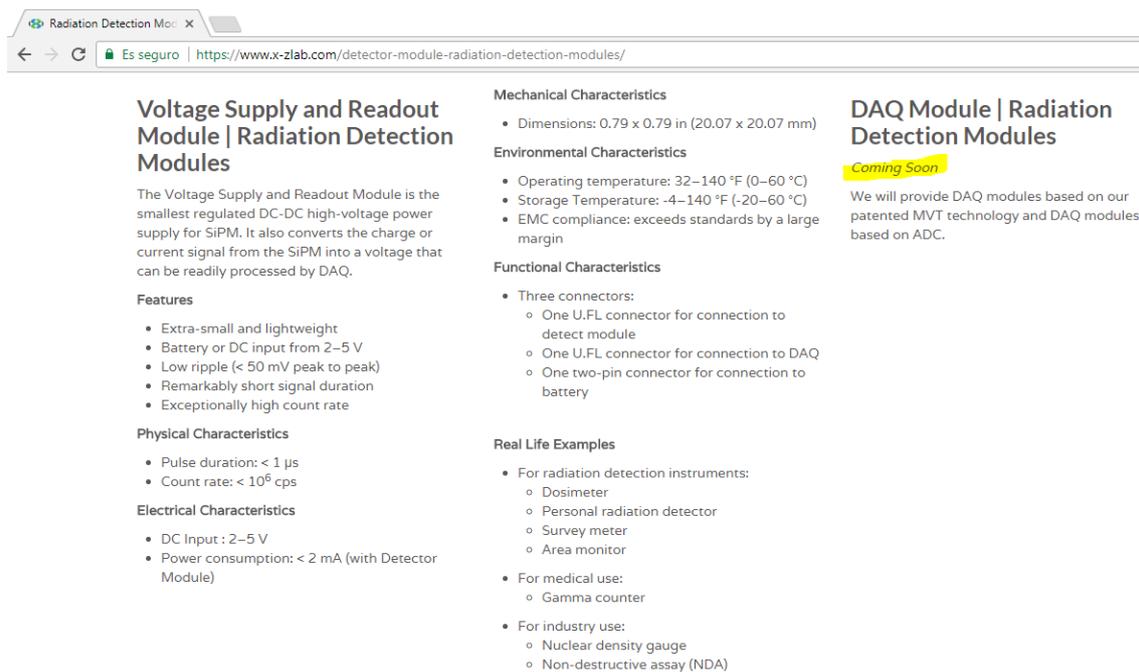


Figura 59. Circuito lectura y alimentación del módulo X-ZLAB (reverso).

Como se puede observar, el circuito dispone de varias resistencias, condensadores y bobinas, pero son cuatro los componentes claves que conforman el circuito:

- Un circuito integrado MAX1771 que se encarga de elevar la corriente de entrada, adaptándola a los valores de trabajo del SiPM, que como se ha visto en las especificaciones llega hasta los 30 voltios. Con una entrada de 2 Voltios, el circuito puede devolver una salida de 12 Voltios.
- Un transistor MOSFET BSP298, encargado que conmutar y amplificar las señales que se envían y reciben del módulo detector.
- Una resistencia variable, la cual permite modificar el valor de la ganancia del circuito.
- Un circuito integrado el cual no puede apreciarse bien la información que viene grabada en el encapsulado.

Con toda esta información que, obtenida del fabricante, así como de una inspección ocular y de la visualización de la señal en el osciloscopio, el objetivo es realizar un sistema de adquisición para el módulo detector. Dicha aplicación no ha sido siquiera desarrollada por la propia compañía fabricante del módulo, como puede verse en su página web:



The screenshot shows a web browser window with the URL <https://www.x-zlab.com/detector-module-radiation-detection-modules/>. The page content is organized into several sections:

- Voltage Supply and Readout Module | Radiation Detection Modules**

The Voltage Supply and Readout Module is the smallest regulated DC-DC high-voltage power supply for SiPM. It also converts the charge or current signal from the SiPM into a voltage that can be readily processed by DAQ.

**Features**

  - Extra-small and lightweight
  - Battery or DC input from 2–5 V
  - Low ripple (< 50 mV peak to peak)
  - Remarkably short signal duration
  - Exceptionally high count rate

**Physical Characteristics**

  - Pulse duration: < 1  $\mu$ s
  - Count rate: <  $10^6$  cps

**Electrical Characteristics**

  - DC Input : 2–5 V
  - Power consumption: < 2 mA (with Detector Module)
- Mechanical Characteristics**
  - Dimensions: 0.79 x 0.79 in (20.07 x 20.07 mm)
- Environmental Characteristics**
  - Operating temperature: 32–140 °F (0–60 °C)
  - Storage Temperature: -4–140 °F (-20–60 °C)
  - EMC compliance: exceeds standards by a large margin
- Functional Characteristics**
  - Three connectors:
    - One U,FL connector for connection to detect module
    - One U,FL connector for connection to DAQ
    - One two-pin connector for connection to battery
- Real Life Examples**
  - For radiation detection instruments:
    - Dosimeter
    - Personal radiation detector
    - Survey meter
    - Area monitor
  - For medical use:
    - Gamma counter
  - For industry use:
    - Nuclear density gauge
    - Non-destructive assay (NDA)
- DAQ Module | Radiation Detection Modules**

**Coming Soon**

We will provide DAQ modules based on our patented MVT technology and DAQ modules based on ADC.

Figura 60. Página web X-ZLAB - sistema de adquisición.

## 8. Elementos detectores de centelleo

Antes de desarrollar cualquier tipo de módulo para el presente proyecto, resulta necesario conocer los fundamentos y el funcionamiento de los elementos centelleadores, para comprender así la naturaleza de las señales que van a procesarse y a trabajar, así como evaluar cuál puede ser la respuesta de estos elementos detectores en las instalaciones del CLPU.

Como se ha explicado, los detectores de centelleo basan su funcionamiento en la emisión de luz cuando reciben una radiación ionizante. Esta emisión se debe a la ionización y excitación que se genera en los átomos y moléculas del elemento, las cuales al volver a su estado fundamental se desexcitan emitiendo fotones de luz en el espectro visible.

La mayoría de elementos transparentes sufren esta emisión al recibir radiaciones ionizantes, pero solo unos pocos sufren este efecto de manera eficiente, distinguiéndose dos procesos de emisión de luz, la fluorescencia y la fosforescencia.

La fluorescencia es un proceso rápido, casi instantáneo, en el que se produce una emisión de luz una decena de nanosegundos después de la exposición a la radiación. Las emisiones fosforescentes van asociadas con un pequeño retardo debido a que la

radiación generó en el elemento centellador un estado metaestable que puede durar varios minutos, incluso horas.

Para procesar todas emisiones, los elementos centelladores van acoplados a fotodetectores que generen una señal eléctrica a partir de la luz del centelleo. Tradicionalmente el dispositivo más utilizado para esta tarea eran los tubos fotomultiplicadores (Photomultiplier tube PMT), aunque en la actualidad empieza a extenderse el uso de fotodetectores basados en semiconductores, como es el caso con el SiPM.

La siguiente imagen muestra el esquema tradicional de un detector de centelleo, en el que la radiación ionizante incide en el centellador generándose una emisión de luz, la cual es conducida hacia el fotomultiplicador, consistente en un fotocátodo que absorbe los fotones del centelleo, generando electrones que son procesados por un multiplicador que devuelve una señal eléctrica.

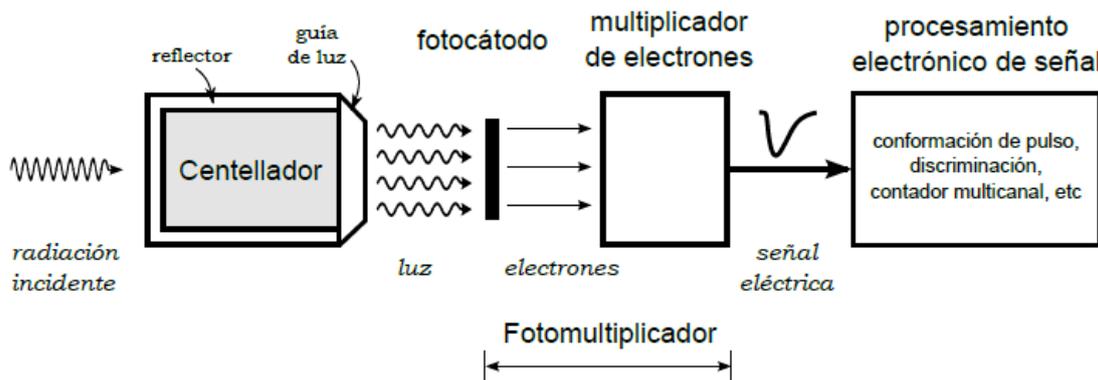


Figura 61. Esquema tradicional de los detectores de centelleo.

A partir de esta idea y conociendo el funcionamiento de un detector de estas características más en profundidad, cabe destacar que existen diferentes materiales centelladores, divididos en dos categorías: los materiales orgánicos y los inorgánicos. Cada uno de estos ofrece distintas respuestas y aplicaciones, lo cual veremos a continuación con más detalle.

### 8.1. Centelladores orgánicos

Estos centelladores pueden encontrarse en soluciones líquidas o matrices poliméricas, dando lugar a los centelladores líquidos o a los centelladores plásticos. Los compuestos centelladores disponen de Carbonos ligados entre sí en forma de anillo, más conocidos como hidrocarburos aromáticos, tales como el  $C_{18}H_{14}$ ,  $C_{24}H_{22}N_2O$ , etc.

De manera general, estos materiales surgen de la mezcla de dos compuestos, uno denominado centellador primario y el otro “wavelength shifter”. El centellador primario está concentrado entre 20 y 30 veces más que el segundo y realiza emisiones lumínicas hasta en el espectro Ultravioleta. El “wavelength shifter” se encarga de absorber fotones ultravioletas ajustándolos a longitudes de onda más largas, facilitando así la lectura de estos fotones en los fotodetectores.

El **mecanismo de centelleo** de los elementos orgánicos tiene su base en las transiciones que se generan entre niveles energéticos de electrones de valencia.

En la práctica, el centellador conoce tres niveles electrónicos de energía, el fundamental  $S_0$ , un estado excitado al que llega tras recibir la radiación ionizante  $S_1$ , y otro estado excitado triplete  $T_1$ . Dentro de cada uno de estos estados existen unos subniveles energéticos de excitaciones, conocidos como modos vibracionales moleculares. La diferencia de energía entre los niveles electrónicos es del orden de 3 eV, mientras que la diferencia en los subniveles vibracionales es del orden de 0,15 eV. En el siguiente esquema se representan los niveles electrónicos y los subniveles vibracionales.

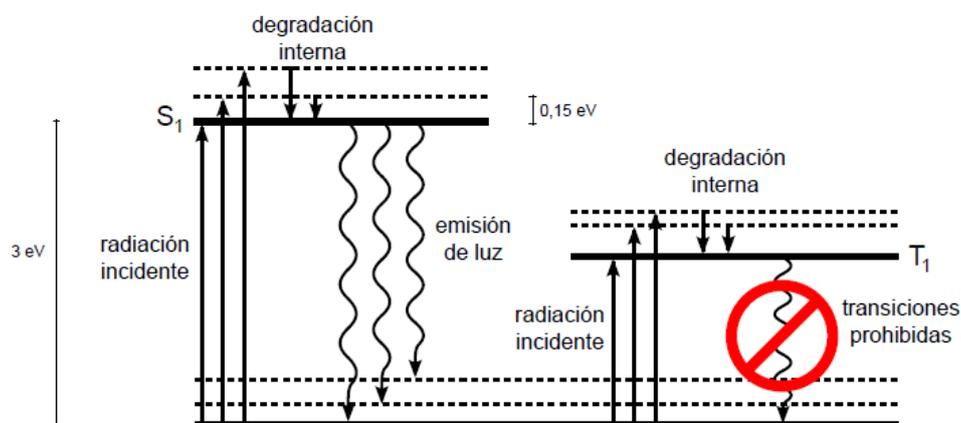


Figura 62. Transiciones energéticas entre los distintos niveles electrónicos atómicos.

La energía cedida por la radiación incidente genera que los electrones de valencia se ubiquen en niveles electrónicos y subniveles vibracionales de estados excitados. En el

caso de estar en estados singuletes como el  $S_1$ , los electrones del estado vibracional caen inmediatamente al estado fundamental, a partir del cual, los electrones caen al estado fundamental y sus subniveles vibracionales generando una emisión de luz, tal y como se representa en el esquema.

Este proceso de emisión ocurre unos pocos de nanosegundos después la aparición de la radiación incidente, correspondiendo a la emisión fluorescente.

Cabe destacar también el hecho de que los electrones puedan decaer desde el nivel  $S_1$  a subniveles vibracionales del estado  $S_0$ , ya que es este fenómeno el que explica la transparencia de los centelladores a su propia radiación.

De igual forma, en este proceso de absorción de luz por parte del elemento centellador y posterior emisión, se produce un corrimiento del espectro, incrementándose la longitud de onda, tal y como puede observarse en la siguiente representación:

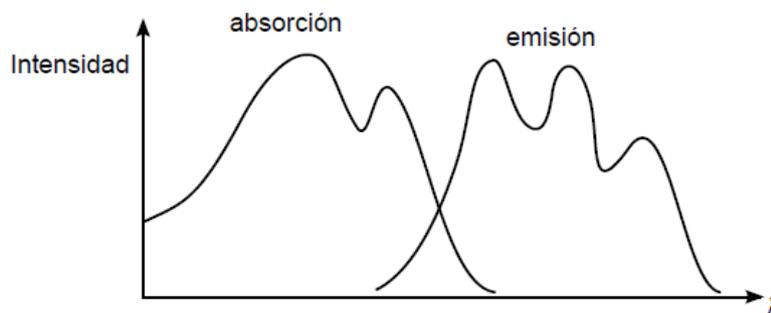


Figura 63. Distribución de las longitudes de onda absorbidas y emitidas por los centelladores.

En el caso de que los estados triplete, se produce también una degradación interna de la luz entre los estados vibracionales al fundamental  $T_1$ , sin embargo, en la transición de  $T_1$  al estado fundamental  $S_0$  las transiciones están prohibidas, siendo posibles únicamente las transiciones entre  $T_0$  a  $S_0$ , las cuales son las responsables de los centelleos fosforescentes.

Este mecanismo de centelleo es válido para todos los elementos orgánicos, tanto para los centelladores líquidos como para los plásticos.

### ***Centelladores líquidos.***

En este tipo de materiales el elemento centellador se ubica en un solvente líquido. Entre los solventes más utilizados son el Xileno, Tolueno, Benceno, Fenilbenceno, Trietilbenceno y decalina, con una concentración de centellador de entre 2 – 4 gramos por litro de solvente.

Estos centelladores tienen bajos tiempos de respuesta y son bastante económicos, siendo ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren grandes volúmenes.

Otra gran ventaja de estos centelladores es que pueden diluirse en volúmenes de otras sustancias, lo que facilita la detección de las partículas ionizantes. En el caso de que el material centellador esté encapsulado y la radiación ionizante tenga poco poder de penetración, esta no atravesaría el encapsulado, o si lo hiciera, podría dar lugar a señales de muy bajo nivel. Si se utilizan centelladores líquidos con radiolúcidos diluidos, la emisión de los electrones se da desde el seno del fluido, garantizándose que los electrones ceden toda su energía al material sensible.

### ***Centelladores plásticos.***

Estos centelladores están compuestos por una matriz polimérica en la que hay disuelto un elemento centellador, el cual está disperso de manera homogénea. Los polímeros base más utilizados son el poliestireno, el polimetilmetacrilato y el poliviniltolueno.

El centellador tiene una concentración de 1% en peso del centellador primario y del 0,05% en peso de “wavelength shifter”, quedando ambas especies uniformemente distribuidas en la matriz polimérica.

Este tipo de centelladores son los más utilizados en aplicaciones de física nuclear y en aplicaciones de altas energías, siendo sencillos de fabricar y de mecanizar, disponiendo de un tiempo de decaimiento corto.

Debido a su bajo coste, suelen utilizarse estos centelladores con grandes áreas de detección. El gran tamaño que suelen usar los centelladores en estas aplicaciones, contrasta con el tamaño menor de los fotodetectores. Para perder la menor cantidad de luz emitida posible, se utilizan las denominadas guías de luz, las cuales pueden constar de elementos macizos o bien, de fibras ópticas.

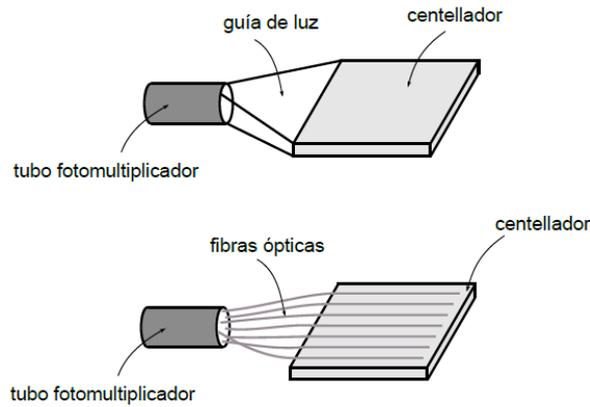


Figura 64. Sistemas de guiado de la luz del centellador.

Por último, podemos ver en la siguiente tabla, una gran variedad de centelladores orgánicos comercializados de distinto tipo, con un amplio rango de parámetros entre los que decantarnos tales como la longitud de onda de emisión o los tiempos de decaimiento.

Eljea	Bicron	Light Output % Anthracene*	Wavelength of Max Emission (nm)	Decay Constant (ns)	Attenuation Length (cm)	Refractive Index	H/C Ratio	Density	Loading Element % by weight or dist. feature	Softening or Flash Point (°C)	Uses
<b>Crystal</b>											
	Anthracene	100	447	30		1.62	0.715	1.25		217	
	Stilbene	50	410	4.5		1.626	0.858	1.16		125	
<b>Plastic</b>											
EJ-212	BC-400	65	423	2.4	250	1.581	1.103	1.032		70	General purpose
EJ-204	BC-404	68	408	1.8	160	1.58	1.107	1.032	1.8 ns time constant	70	Fast counting
EJ-200	BC-408	64	425	2.1	380	1.58	1.104	1.032		70	TOF counters, large area
EJ-208	BC-412	60	434	3.3	400	1.58	1.104	1.032	Longest attn. length	70	General purpose, large area, long strips
	BC-420	64	391	1.5	110	1.58	1.100	1.032	1.5 ns time constant	70	Ultrafast timing, sheet areas
EJ-232	BC-422	55	370	1.4	8	1.58	1.102	1.032	1.4 ns time constant	70	Very fast timing, small sizes
	BC-422Q	11	370	0.7	< 8	1.58	1.102	1.032	Benzophenone, 1%	70	Ultrafast timing, ultrafast counting
	BC-428	36	480	12.5	150	1.58	1.103	1.032	Green emitter	70	Photodiodes and CCDs: phoswich detectors
	BC-430	45	580	16.8	NA	1.58	1.108	1.032	Red emitter	70	Silicon photodiodes and red-enhanced PMTs
EJ-248	BC-434	60	425	2.2	350	1.59	0.995	1.049	High temp	100	General purpose
	BC-436	52	425	2.2	NA	1.61	0.960 D/C	1.130	Deuterium, 13.8%	90	Thin disks
EJ-240	BC-444	41	428	285	180	1.58	1.109	1.032		70	Phoswich detectors for dE/dx studies
EJ-256	BC-452	32	424	2.1	150	1.58	1.134	1.080	Lead, 5%	60	X-ray dosimetry (< 100 keV)
	BC-454	48	425	2.2	120	1.58	1.169	1.026	Boron, 5%	60	Neutron spectrometry, thermal neutrons
EJ-252	BC-470	46	423	2.4	200	1.58	1.098	1.037	Air equivalent	65	Dosimetry
	BC-490	55	425	2.3		1.58	1.107	1.030	Casting resin	70	General purpose
	BC-498	65	423	2.4		1.58	1.103	1.032	Applied like paint	70	β, γ detection
<b>Liquid</b>											
EJ-301	BC-501A	78	425	3.2			1.212	0.874	Pulse shape discrim.	26	γ > 100 keV, fast n spectroscopy
EJ-305	BC-505	80	425	2.5			1.331	0.877	High light output	47	γ, fast n, large volume
EJ-313	BC-509	20	425	3.1			0.0035	1.61	F	10	γ, fast n
EJ-321H	BC-517H	52	425	2.0			1.89	0.86	Mineral oil-based	81	γ fast n, cosmic, charged particles
	BC-517P	28	425	2.2			2.05	0.85	Mineral oil-based	115	γ, fast n, cosmic, charged particles
EJ-325	BC-519	60	425	4.0			1.73	0.875	Pulse shape discrim.	74	γ, fast n, n-γ discrimination
EJ-331	BC-521	60	425	4.0			1.31	0.89	Gd (to 1%)	44	Neutron spectrometry, neutrino research
EJ-339	BC-523A	65	425	3.7			1.67	0.93	Enriched <sup>10</sup> B	1	Total absorption neutron spectrometry
EJ-335	BC-525	56	425	3.8			1.57	0.88	Gd (to 1%)	64	Neutron spectrometry, neutrino research
	BC-533	51	425	3.0			1.96	0.8	Low temp operation	65	γ, fast n, cosmic
	BC-537	61	425	2.8			.99 (D:C)	0.954	<sup>2</sup> H	-11	Fast n, pulse shape discrimination
	BC-551	40	425	2.2			1.31	0.902	Pb (5% w/w)	44	γ, X-rays < 200 keV
	BC-553	34	425	3.8			1.47	0.951	Sn (10% w/w)	42	γ, X-rays

\*NaI(Tl) is 230% on this scale

Figura 65. Tipos y características de centelladores orgánicos.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Figura obtenida de "Radiation Detection and Measurement"; Glenn F. Knoll.

## 8.2. Centelladores inorgánicos

Los centelladores inorgánicos son en su mayoría cristales fabricados en hornos a alta temperatura, con compuestos binarios de un metal con un compuesto del grupo halógeno (iodo, flúor). Los compuestos más utilizados son el ioduro de sodio dopado con talio, NaI(Tl), o el ioduro de cesio dopado con talio, CsI(Tl). Entre los cristales no alcalinos pueden encontrarse el fluoruro de Bario, BaF<sub>2</sub>, o el BGO (Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>).

Este tipo de centelladores tienen tiempos de respuesta mayor a los orgánicos, del orden de los 300 nanosegundos. Otra característica es su higroscopicidad, es decir, que pierden propiedades en presencia de humedad, lo que hace necesario que estos cristales se utilicen con una envoltura estanca.

De todos los centelladores, los elementos inorgánicos son los que mayor cantidad de fotones devuelven por unidad de energía absorbida, es decir, ofrece una mayor intensidad lumínica, lo que ofrece una mejor resolución, siendo adecuados para la detección y la espectrografía de los rayos gamma.

La buena resolución de estos elementos de centelleo se ve reforzada por las longitudes de onda de trabajo de estos materiales, las cuales están entre las regiones de máxima sensibilidad de los fotodetectores comerciales, tal y como puede apreciarse en la siguiente gráfica comparativa, en la que se aprecian las longitudes de onda de emisión de varios cristales y las zonas de trabajo de algunos de los tubos fotomultiplicadores más utilizados.

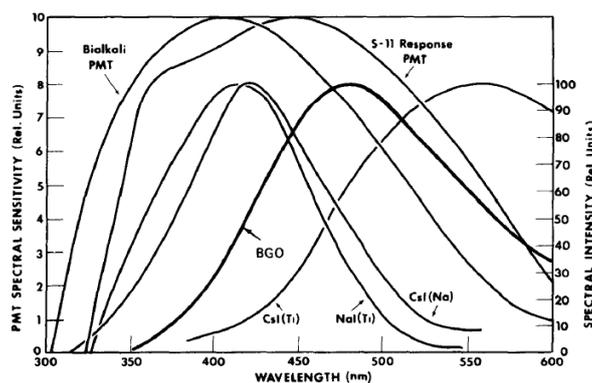


Figura 66. Longitudes de onda de trabajo de los centelladores inorgánicos y fotomultiplicadores clásicos<sup>12</sup>

Además de los cristales, existen algunos gases como el nitrógeno, oxígeno y gases nobles con características centelladoras, aunque con muy baja resolución. Son

<sup>12</sup> Figura obtenida de "Radiation Detection and Measurement"; Glenn F. Knoll.

precisamente estos gases los causantes de las aureolas verdosas que se generan entorno a las sustancias radiactivas.

Gas	Mean Wavelength of Emission	Number of Photons with $\lambda > 200$ nm per 4.7 MeV Alpha Particle
Xenon	325 nm	3,700
Krypton	318 nm	2,100
Argon	250 nm	1,100
Helium	390 nm	1,100
Nitrogen (for comparison)	390 nm	800
NaI(Tl)	415 nm	41,000

Source: J. B. Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. Copyright 1964 by Pergamon Press, Ltd. Used with permission.

Figura 67. Características de gases inorgánicos centelladores<sup>12</sup>

En este tipo de centelladores, el **mecanismo de centelleo** se debe a la estructura electrónica de las bandas, la cual es propia de la estructura cristalina que compone cada material y define los rangos de energías que puede tener un electrón, bandas permitidas, y los rangos que no puede tener, bandas prohibidas o band gaps.

La banda de valencia marca el rango de energía más alto que se encuentra ocupado por electrones en el cero absoluto, estando por encima de esta la banda de conducción, ocupada por electrones que se mueven libremente. Ambas bandas pueden estar superpuestas o separadas por una de energías prohibidas, band gap. Esta distribución marca la diferencia entre los conductores y los aislantes.

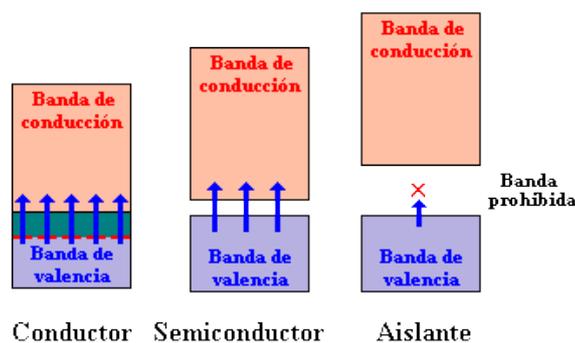


Figura 68. Bandas de conducción y valencia.

En los aislantes, la banda de valencia está llena de electrones y la de conducción vacía, siendo necesaria una gran cantidad de energía para generar una transición de la banda de valencia a la de energía. Precisamente en esta clasificación se encuadran los centelladores inorgánicos.

En el momento en el que un centellador inorgánico recibe la energía suficiente, a través de radiación ionizante, como para que un electrón pase de la banda de valencia a la de conducción, este se excita y deja un hueco libre en la banda de valencia y tiene un electrón libre en la de conducción.

En el momento que cesa la excitación, el electrón vuelve a la banda de valencia y se recombina con el hueco que deja. En este proceso de desexcitación se produce la emisión de un fotón. En el caso de los cristales puros la emisión generada es muy poco eficiente, por lo que suelen agregarse activadores que realizan cambios en la estructura de las bandas del cristal. De esta forma, la nueva estructura de bandas posee estados energéticos accesibles dentro la banda prohibida, lo que facilita que desde dichos estados puedan desexcitarse los electrones y volver a la banda de valencia. Además, estos activadores son los que marcan la emisión de fotones visibles.

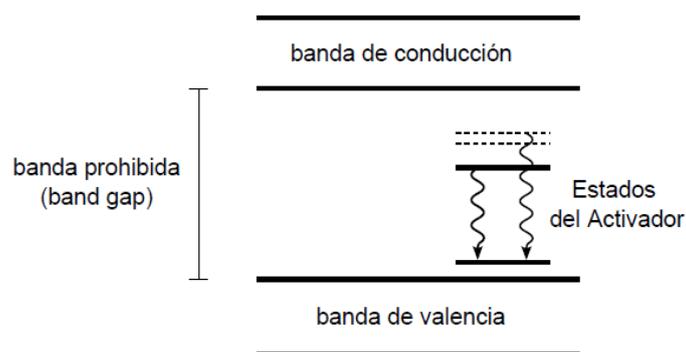


Figura 69. Distribución de las bandas de energía en los centelladores inorgánicos.

Por tanto, la radiación ionizante es la causante de la transición de electrones entre la banda de valencia y la banda de conducción, moviéndose libremente los electrones y los huecos que estos dejan. Cuando un átomo activador captura uno de estos huecos o electrones de forma sucesiva, el hueco toma su forma fundamental y el electrón algún nivel de energía excitado. Si en dicho nivel están permitidas las transiciones, se liberará energía mediante un fotón visible.

Este proceso de captura de huecos y electrones por parte de un elemento activador puede ocurrir de manera metaestable, no estando permitida la transición directa y por tanto no se produce emisión. La absorción de energía térmica es la que permite acceder a niveles energéticos en los que puede existir una transición que lleve asociada la emisión de un fotón.

Finalmente, los defectos de la red cristalina y las distintas impurezas representan una trampa para la radiación ionizante, la cual queda en la red y pasa a capturas electrones y huecos, generando unas recombinaciones que produce la emisión de fonones, traduciéndose en una gran ineficiencia para la generación del centelleo.

De manera análoga que con los centelladores orgánicos, en el mercado existe una gran variedad de elementos inorgánicos de centelleo con una amplia gama de características entre las que se puede elegir.

	Specific Gravity	Wavelength of Max. Emission	Refractive Index	Decay Time ( $\mu$ s)	Abs. Light Yield in Photons/MeV	Relative Pulse Height Using Biak. PM tube	References
<b>Alkali Halides</b>							
Nal(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	38 000	1.00	
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	0.68 (64%), 3.34 (36%)	65 000	0.49	78, 90, 91
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.46, 4.18	39 000	1.10	92
Li(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	11 000	0.23	
<b>Other Slow Inorganics</b>							
BGO	7.13	480	2.15	0.30	8200	0.13	
CdWO <sub>4</sub>	7.90	470	2.3	1.1 (40%), 14.5 (60%)	15 000	0.4	98-100
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2		1.3*	
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	435	1.47	0.9	24 000	0.5	
<b>Unactivated Fast Inorganics</b>							
BaF <sub>2</sub> (fast component)	4.89	220		0.0006	1400	na	107-109
BaF <sub>2</sub> (slow component)	4.89	310	1.56	0.63	9500	0.2	107-109
CsI (fast component)	4.51	305		0.002 (35%), 0.02 (65%)	2000	0.05	113-115
CsI (slow component)	4.51	450	1.80	multiple, up to several $\mu$ s	varies	varies	114, 115
CeF <sub>3</sub>	6.16	310, 340	1.68	0.005, 0.027	4400	0.04 to 0.05	76, 116, 117
<b>Cerium-Activated Fast Inorganics</b>							
GSO	6.71	440	1.85	0.056 (90%), 0.4 (10%)	9000	0.2	119-121
YAP	5.37	370	1.95	0.027	18 000	0.45	78, 125
YAG	4.56	550	1.82	0.088 (72%), 0.302 (28%)	17 000	0.5	78, 127
LSO	7.4	420	1.82	0.047	25 000	0.75	130, 131
LuAP	8.4	365	1.94	0.017	17 000	0.3	134, 136, 138
<b>Glass Scintillators</b>							
Ce activated Li glass <sup>c</sup>	2.64	400	1.59	0.05 to 0.1	3500	0.09	77, 145
Tb activated glass <sup>b</sup>	3.03	550	1.5	~3000 to 5000	~50 000	na	145
<b>For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:</b>							
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	10 000	0.25	

\*for alpha particles

Figura 70. Tipos y características de los centelladores inorgánicos.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Figura obtenida de "Radiation Detection and Measurement"; Glenn F. Knoll.

### 8.3. Centelladores orgánicos frente a inorgánicos.

Las principales diferencias entre los centelladores orgánicos e inorgánicos radican en propiedades físicas y químicas, tales como su densidad y número atómico promedio, aunque las más importantes desde el punto de vista de la detección son las diferencias en los tiempos de respuesta y de decaimiento, así como las longitudes de onda a la que producen las emisiones.

Cuestiones como el coste, las propiedades mecánicas y la durabilidad en el tiempo a los efectos de la radiación son otros de los factores que determinan la elección de un tipo u otro.

Centellador	tipo	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	fotones/MeV	$\tau_{\text{decay}}$ [ns]	$\lambda_{\text{max}}$ [nm]
NaI(Tl)	inorg	3,67	38 10 <sup>3</sup>	230	410
CsI(Tl)	inorg	4,51	65 10 <sup>3</sup>	1300	560
BGO	inorg	7,13	8,2 10 <sup>3</sup>	300	480
NE104	plástico	1,03	10 10 <sup>3</sup>	1,8	406
NE224	líquido	0.88	12 10 <sup>3</sup>	2,5	425

Figura 71. Comparativa de centelladores orgánicos e inorgánicos más utilizados.<sup>14</sup>

Los centelladores inorgánicos tienen mayor número atómico y densidad, lo que les hace idóneos para aplicaciones de detección y espectrometría de fotones, mientras que, los centelladores plásticos, al tener una densidad y número atómico menor ofrecen una menor sensibilidad para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, la emisividad de fotones por unidad de energía absorbida de los elementos orgánicos e inorgánicos son del mismo orden de magnitud, estando alrededor de 10<sup>4</sup> fotones/MeV.

Desde el punto de vista de los tiempos de respuesta, ya se ha destacado la mayor rapidez de los centelladores orgánicos frente a los inorgánicos.

En lo referente a la resistencia frente a la radiación, esta genera dislocaciones en las redes cristalinas de los centelladores inorgánicos y degrada las cadenas de los centelladores plásticos, generando en ambos casos una pérdida de transparencia. En el caso de los centelladores orgánicos el umbral de radiación que genera este tipo de daños es una dosis de 1 kGy, mientras que en el caso de los centelladores inorgánicos la dosis puede extenderse hasta los 100 kGy.

<sup>14</sup> Figura obtenida de "Radiation Detection and Measurement"; Glenn F. Knoll.

La temperatura a la que se encuentran los elementos de centelleo también juega un papel muy importante a la hora de obtener una mejor o peor respuesta del elemento detector, especialmente en el caso de los centelladores inorgánicos, los cuales tienen una fuerte dependencia de la temperatura, existiendo una gran variación en la salida a distintas temperaturas de trabajo.

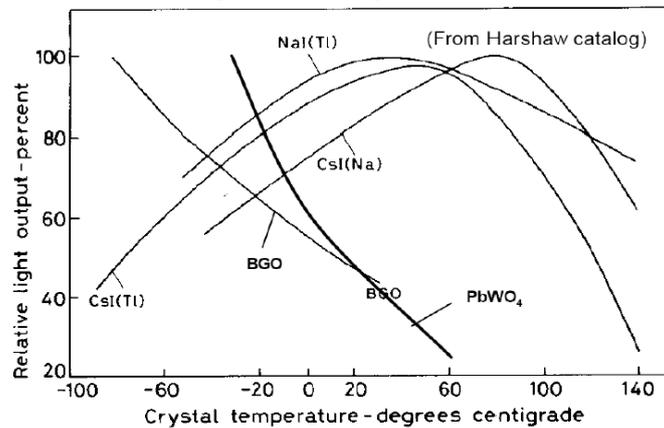


Figura 72. Comparativa de longitudes de onda y emisión lumínica entre centelladores orgánicos e inorgánicos.<sup>15</sup>

En el caso de los centelladores orgánicos hay que tener en consideración la distinta respuesta temporal que ofrecen para distintos tipos de radiación. Dicha dependencia temporal es fácilmente observable en el caso de utilizar una misma intensidad de radiación en un mismo periodo de tiempo, observándose como varía el tiempo de respuesta en función del tipo de radiación.

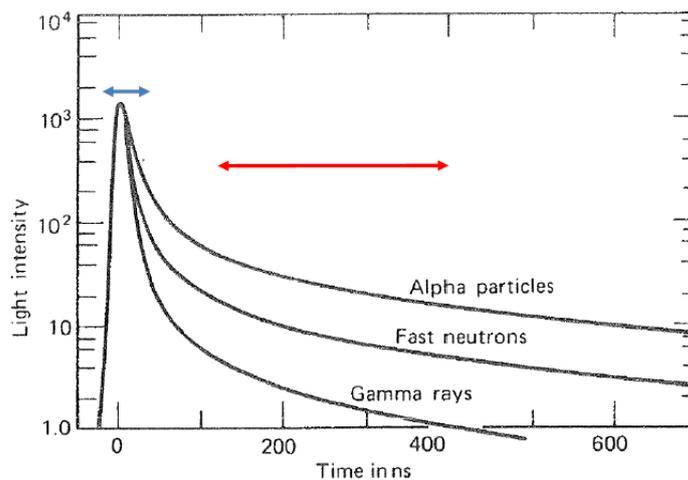


Figura 73. Respuesta temporal de los centelladores orgánicos ante distintas radiaciones.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Figura obtenida de "Radiation Detection and Measurement"; Glenn F. Knoll.

## 9. Fotomultiplicadores de Silicio (SiPM)

Una vez profundizados los conocimientos en los elementos centelladores, resulta necesario hacer lo propio con el elemento encargado en transformar las emisiones de fotones en señales eléctricas.

Ya se ha comentado que hasta hace escasos años el dispositivo más utilizado para la realización de tal transformación eran los tubos fotomultiplicadores (PMT), consistentes en un fotocátodo y un multiplicador de electrones. La aparición de nuevos elementos semiconductores ha supuesto un cambio de tendencia en la utilización de los PMT, abogando por la implementación de fotodiodos de avalancha basados en semiconductores.

Estos nuevos fotomultiplicadores de Silicio ofrecen una mayor ganancia y mayor eficiencia cuántica que los dispositivos utilizados hasta la fecha, existiendo ya dispositivos lo suficientemente asequibles como para liderar este sector.

Estos fotodiodos están formados por una unión p-n semiconductor, generalmente dopada, a la que se le aplica un voltaje inverso, llamado BIAS ( $V_{BIAS}$ ). Este voltaje crea un campo eléctrico es el encargado de favorecer la creación de un par electrón-hueco cuando el elemento semiconductor recibe un fotón con un nivel de energía suficiente.

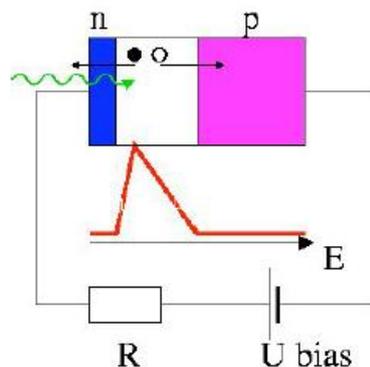


Figura 74. Esquema de una célula fotomultiplicadora semiconductor.

Un SiPM consta de multitud de estos elementos, los cuales forman una matriz de celdas, de manera que en escasos milímetros cuadrados pueden encontrarse miles de fotodiodos. De manera general, el orden de microceldas o píxeles es de 1000 por cada milímetro cuadrado de SiPM.

Cada uno de estos píxeles, además de disponer de un fotodiodo, está formado por una resistencia de extinción, conocida como “quenching”, en serie. La necesidad de esta

resistencia radica a que estos fotodiodos trabajan en modo de cascada eléctrica, es decir, en modo de operación Geiger. Para conseguir esta forma de operación hay que dotar al semiconductor de una tensión de BIAS por encima de la denominado “Breakdown Voltage”,  $V_{BR}$ .

De esta manera, cada vez que las microcélulas del SiPM están sometidas a una tensión de BIAS ( $V_{BIAS}$ ) superior al  $V_{BR}$ , al recibir un fotón se genera un par electrón-hueco que acelerado por el campo eléctrico ioniza el resto de los átomos de la red que conforma el semiconductor aumentando el número de portadores libres. A su vez, estos portadores también son acelerados por el campo eléctrico y pueden seguir ionizando los átomos de la red generando nuevos portadores, generándose una reacción en cascada a partir de la absorción de un único fotón.

Esta reacción en cascada dependerá en gran medida de la corriente de BIAS, así como de la ganancia del SiPM que es la encargada de multiplicar el número de portadores libres. Como ya se ha comentado, la ganancia de un SiPM es mucho mayor a la de un PMT, rondando valores de ganancia de  $G \approx 10^6$ , ofreciéndose así un número de electrones mucho mayor por cada fotón recibido y, además, ofreciendo una relación más uniforme.

Cabe destacar la gran influencia que tiene la temperatura sobre el parámetro de la ganancia, modificándose dicho valor con la más mínima variación de temperatura, tal y como puede observarse en cualquier hoja de características de cualquier SiPM.

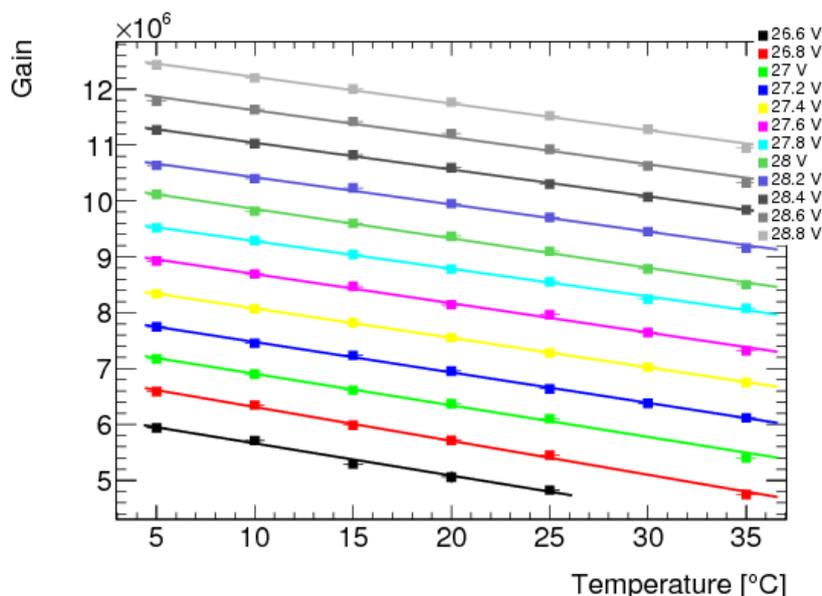


Figura 75. Variación de la Ganancia del SiPM a distintas temperaturas y tensiones de alimentación.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Figura obtenida de <http://inspirehep.net/record/1425539/plots>

Una vez se ha producido la cascada en uno de los píxeles entra en juego el papel de la resistencia denominada como “quenching”, conectada en serie al fotodiodo y encargada de detener la cascada de portadores cuando la carga atraviesa la resistencia. Además de la conducción por la resistencia, otro de los mecanismos utilizados para finalizar con las corrientes en cascada es la reducción del voltaje de BIAS.

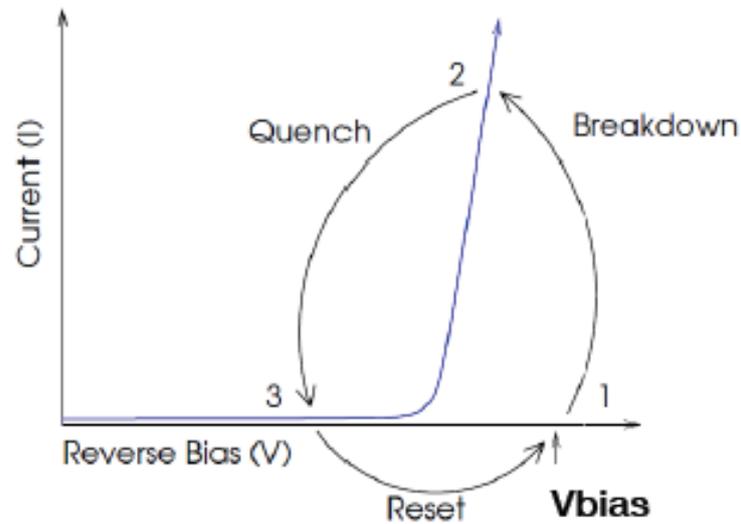


Figura 76. Diagrama Tensión - Intensidad de funcionamiento de un SiPM

De manera esquemática, podemos representar una matriz de doce píxeles, con sus fotodiodos y su “quenching” en serie. Todos los elementos están conectados en paralelo entre sí.

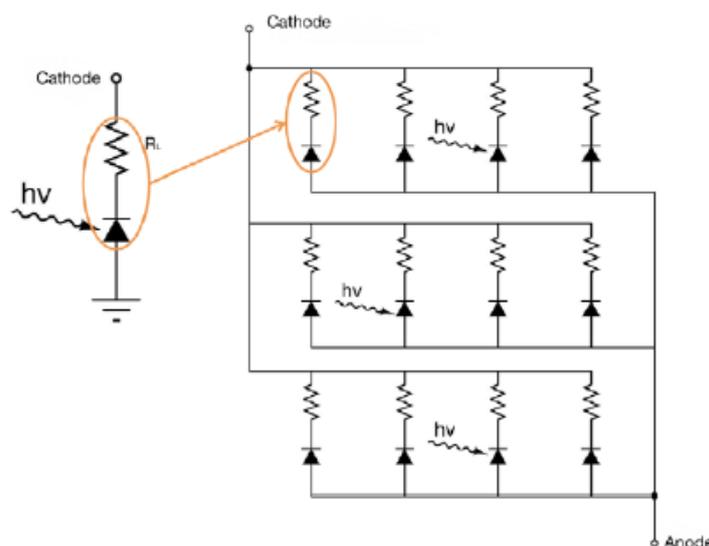


Figura 77. Esquema de conexión de un SiPM.

Desde el punto de vista constructivo, cada píxel tiene dimensiones de micrómetros cuadrados, utilizándose distintas pastas para la fabricación de los mismos.

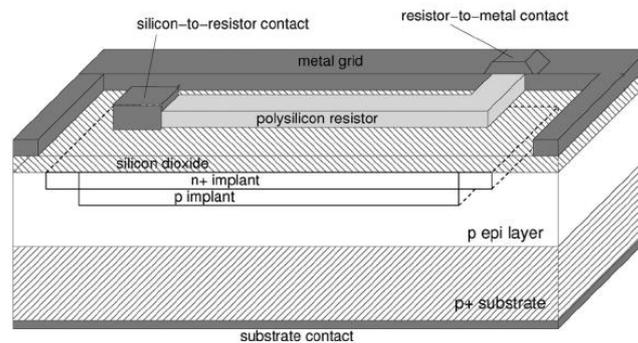


Figura 78. Microcélula de un SiPM.

Además de los sustratos de silicio utilizados para la fabricación de cada píxel, en el proceso de fabricación se utilizan elementos que eviten la reflexión de fotones en la superficie de impacto de los fotones provenientes del centellador. En condiciones normales, sin ningún tipo de recubrimiento, el 20-30% de la luz incidente en un píxel puede perderse, mientras que con la adición de elementos antirreflejantes estas pueden minimizarse hasta el 10%.

La minimización de las reflexiones es una de las cuestiones que facilita que la eficiencia cuántica de los SiPM se más elevada que la de los tubos fotomultiplicadores, ya que este tipo de acciones aumentan la relación entre el número de pares electrón-hueco que se generan y el número total de fotones que inciden en la matriz.

Además de añadir elementos antirreflejantes, la disposición constructiva del SiPM juega un papel muy importante en el aumento de la eficiencia. De manera visual puede apreciarse en las siguientes imágenes como hay una fracción importante de área del SiPM la cual no es sensible a los fotones incidentes, suponiendo un factor de pérdida de información.

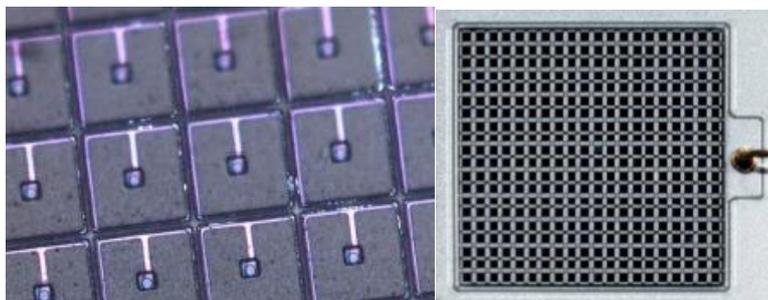


Figura 79. Vista microscópica de un SiPM

El factor de llenado de un SiPM relaciona el área sensible a la detección, es decir el área que ocupan los píxeles, con el área total del dispositivo. Este factor es de gran utilidad para hacernos una idea de la eficiencia del SiPM.

Para un SiPM de $3 \times 3 \text{ mm}^2$		
Número de píxeles	3600	900
Tamaño del píxel ( $\mu\text{m}^2$ )	$50 \times 50$	$100 \times 100$
Factor de llenado	61,5 %	78,5 %

Figura 80. Factor de llenado de un SiPM de  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ .

De manera general, puede afirmarse que cuanto más pequeño sea el tamaño del píxel, menor será el factor de llenado del SiPM.

La Eficiencia cuántica (QE) y el factor de llenado ( $\epsilon_{\text{geo}}$ ) son parámetros que condicionan la eficiencia del dispositivo, midiéndose la eficiencia a través del PDE, "Photon Detection Efficiency". Dicho parámetro marca la eficiencia con la que los fotones de una determinada longitud de onda pueden ser detectados, y esta viene dada en función del factor de llenado, la eficiencia cuántica y un factor de probabilidad ( $\epsilon_{\text{trigger}}$ ) que marca la posibilidad de que inicio de una cascada eléctrica:

$$PDE = \epsilon_{\text{geo}} \cdot QE \cdot \epsilon_{\text{trigger}}$$

Una vez adquiridas las nociones de funcionamiento de los SiPM, resulta interesante conocer tres parámetros de funcionamiento que marcarán la utilidad de estos dispositivos para distintas aplicaciones y centelladores, como son el tiempo de recuperación, el 'overvoltage' y las fuentes del ruido del elemento.

### 9.1. Tiempo de recuperación de un SiPM

En el momento que en una microcelda del fotomultiplicador sufre una avalancha de corriente, se produce un corte de esta corriente a través del “quenching”. El tiempo que tarda en desaparecer toda la corriente y el SiPM está preparado para iniciar otra avalancha es mucho mayor que el tiempo que dura la avalancha en si, de ahí que la señal característica que devuelve un SiPM sea un pulso un cortísimo tiempo de subida y una tendida señal de caída.

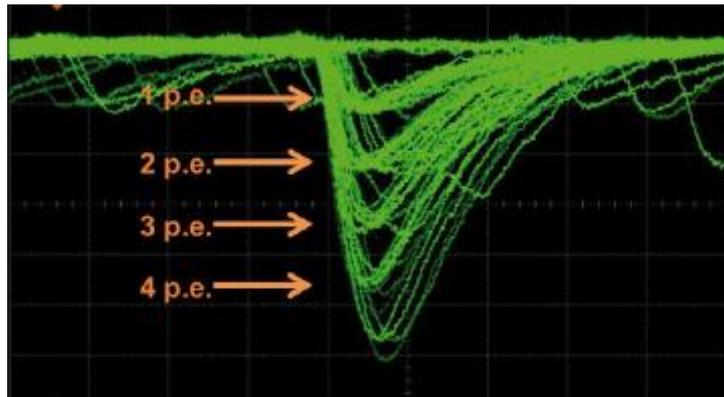


Figura 81. Señal de salida de un SiPM.

Además de caracterizarse la señal por los tiempos de subida y decaimiento, ya se ha comentado la uniformidad que presenta la señal de salida a partir del número de fotones que generan la avalancha, de esta forma, conociendo bien los parámetros del SiPM y las microcélulas que lo componen pueden identificarse los fotones que han generado la avalancha.

De esta forma, tras la avalancha y la generación de una señal con el SiPM, los fotones pasan a denominarse fotoelectrones (Photo Electrons, p.e.), y el conocimiento de los mismos es de gran utilidad para calibrar los niveles de energía de la radiación ionizante que ha generado estas señales.

Los parámetros característicos de estas señales vienen dados por una constante de tiempo asemejada a la de un RC. Esto se debe a que la celda tiene una capacidad intrínseca, que al estar en serie con la resistencia, hace que la descarga, y por consiguiente el tiempo de recuperación, siga la relación de un circuito RC serie.

Como cada microcelda tiene una capacitancia, esta dependerá de las dimensiones de la misma, siendo nuevamente el factor geométrico un factor determinante en el funcionamiento y recuperación del SiPM.

Los valores típicos del tiempo de recuperación son de unos 20 ns para áreas activas de 1 mm<sup>2</sup> compuestas por píxeles de 25 μm<sup>2</sup>. En el caso de áreas activas de 1 mm<sup>2</sup> con píxeles de 50 μm<sup>2</sup> el tiempo de recuperación es de unos 50 ns, y para un tamaño de píxel de 100 μm<sup>2</sup>, con áreas activas de 1 mm<sup>2</sup> este tiempo oscila entre 100 y 200 ns.

De manera general, interesa que el tiempo de recuperación sea lo más corto posible, dado que en el momento que entraran en funcionamiento todos los píxeles del fotomultiplicador de silicio, toda la información en forma de fotones que llegase al mismo se perdería hasta que no se hayan recuperado los fotodiodos.

## 9.2. Sobretensión en la alimentación (Overvoltage)

Como se ha visto cuando se explicaba el funcionamiento del SiPM, resulta necesario introducir una tensión de BIAS a cada fotodiodo para propiciar que este funcione en modo Geiger. La tensión a partir de la cual se opera en dicho modo es la tensión de corte, denominada  $V_{BR}$ .

Podemos afirmar que cuando  $V_{BIAS} = V_{BR}$ , las microcélulas actúan en modo Geiger, pero este funcionamiento se mantiene cuando  $V_{BIAS} > V_{BR}$ , generándose una sobretensión, conocida como Overvoltage, que resulta realmente interesante desde el punto de vista operacional.

$$V_{over} = V_{BIAS} - V_{BR}$$

La relevancia de este parámetro reside en que el overvoltage evoluciona de manera independiente a la temperatura, mientras que las tensiones de BIAS y Breakdown dependen de la temperatura.

De esta manera, a través del overvoltage podemos trabajar sobre algunos parámetros como la eficiencia del dispositivo y el ruido que se genera en el mismo.

Dentro de la escasa información que X-ZLAB ha ofrecido sobre el SiPM que tiene montado en el módulo detector, toda ella está relacionada con este parámetro, ofreciéndonos algunas gráficas para operar en la eficiencia del dispositivo a través de aumentar la tensión de alimentación, tal y como puede verse en la figura.

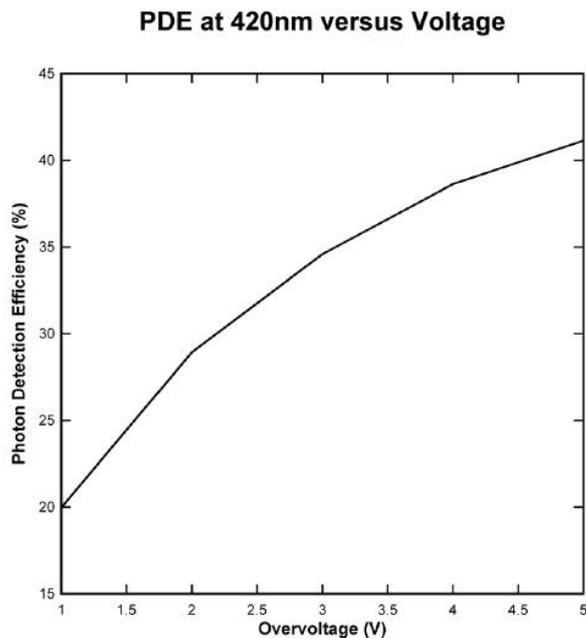


Figura 82. Diagrama Overvoltage - Eficiencia de detección del módulo X-ZLAB

### 9.3. Fuentes del ruido en los SiPM

Las fuentes de ruido de los fotomultiplicadores de silicio generan accionamiento de algún píxel de manera espontánea, produciéndose una cascada innecesaria y añadiéndose ruido eléctrico a la señal de salida. Este accionamiento involuntario puede darse a través de tres fenómenos: las cuentas oscuras o Dark Counts, el crosstalk y al after-pulse.

#### *Cuentas oscuras (Dark Counts)*

Este tipo de accionamiento de la microcélula se produce de manera espontánea, teniendo su origen en los pares electrón-hueco de origen térmico. Cuando el SiPM opera en entornos con temperaturas elevadas, este adquiere una energía térmica suficiente como para excitar los electrones de la red sin necesidad de que haya un fotón.

En la práctica estas avalanchas se producen cuando hay aplicado un BIAS al SiPM, sin embargo, no existe una fuente radiactiva que genere emisiones de fotones en el centellador.

La mejor forma de combatir este tipo de ruido es enfriando el SiPM, pudiéndose reducirse en un factor dos por cada ocho grados que descienda la temperatura.

En el caso del SiPM que está incorporado en el módulo detector de X-ZLAB, únicamente se ha facilitado la siguiente gráfica que relaciona el overvoltage con las dark counts.

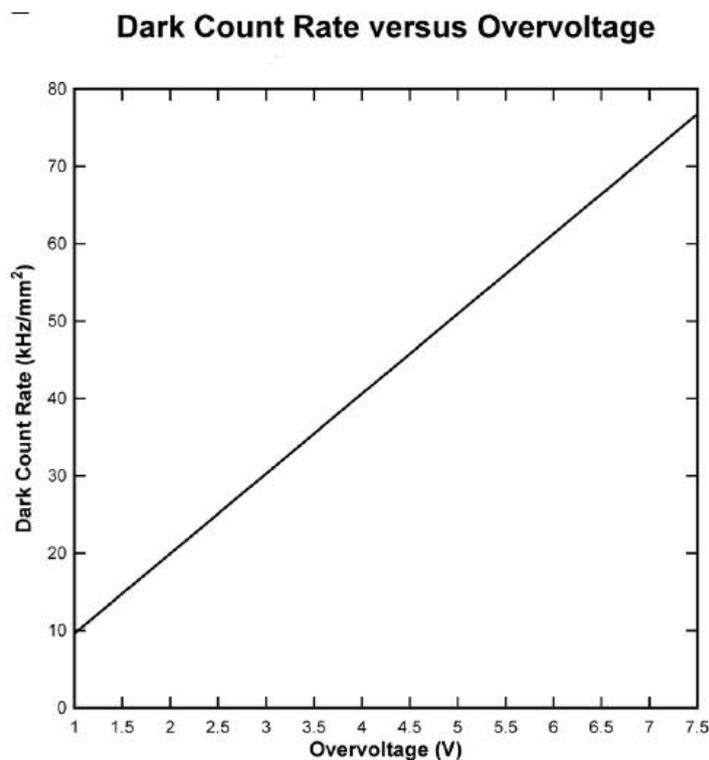


Figura 83. Diagrama Overvoltage – Cuentas oscuras del módulo X-ZLAB

### Crosstalk

En el caso de las dark counts la avalancha se produce sin la recepción de ningún tipo de luz, en el caso del crosstalk, el disparo de la célula se produce por la recepción de fotones cercanos al espectro infrarrojo, con longitudes de onda entre los 850 – 1100 nanómetros.

Estos fotones son producidos por las propias celdas durante la avalancha y son acelerados por el campo eléctrico hacía las células colindantes, de manera que, si estos fotones alcanzan píxeles que no estén activados pueden producir la activación de los mismos.

La probabilidad de que se produzca el fenómeno del crosstalk viene definida por la probabilidad de que la avalancha en una celda genere otra avalancha en una celda cercana.

Desde el punto de vista electrónico, lo que en principio era un fotón puede llegar a ser leído por la electrónica como dos o tres, e incluso más, debido al a activación simultánea de varias celdas por este efecto.

La mitigación de este efecto se realiza solo a nivel de fabricación, utilizando elementos semiconductores que sean poco sensibles a longitudes de onda del infrarrojo, el usuario solo puede elegir SiPM cuya probabilidad de crosstalk sea lo más baja posible.

### *After-pulse*

En el momento en el que un semiconductor recibe un fotón el número de portadores que cruzan la unión P-N desde la banda de valencia hasta la banda de conducción es elevado, como ya se ha visto, debido en gran parte a la gran ganancia de los píxeles.

De todos los portadores que atraviesan la unión P-N, existe una probabilidad pequeña, pero no nula, de que algunos queden atrapados en una región intermedia de gap y sean liberados tiempo después.

Si la liberación se produce en el periodo de tiempo en el que en la microcélula se está produciendo una avalancha o durante el tiempo de recuperación de la misma, este no generará ningún efecto sobre el fotodiodo. Ahora bien, si la liberación se produce con el fotodiodo activo y esperando la recepción de un fotón, el portador puede producir un disparo en el píxel.

La probabilidad de que ocurra este fenómeno es pequeña, ya que tiene que compaginar la probabilidad de un portador quede atrapado, y que justo sea liberado tras la avalancha y el tiempo de recuperación, lo cual es poco probable, pero puede suceder y generar que un solo fotón sea entendido como varios.

## 10.Desarrollo de un sistema de adquisición para el módulo X-ZLAB

Una vez conocemos los fundamentos de los centelladores y los fotomultiplicadores de silicio, se está en disposición de comenzar a desarrollar un sistema de adquisición que sea capaz de trabajar con esta tecnología.

El objetivo final es construir un espectrómetro con el módulo de X-ZLAB, validando el comportamiento del módulo y valorando su aplicabilidad en una fuente de radiación de origen láser.

Debe tenerse en cuenta que muchas de las cosas que suceden en el módulo detector de X-ZLAB son una incógnita, ya que el fabricante no ha facilitado toda la información, como es en el caso del circuito y del SiPM instalado.

De igual forma, debe considerarse que el procesado que hace el circuito de la señal de salida del SiPM es resulta desconocido, ya que solo se dispone de información sobre el pulso de salida del módulo, del cual ya se han mostrado algunas capturas de osciloscopio a lo largo del presente trabajo.

Es por ello, que para el módulo detector es una caja negra en la que puede operarse a través de la tensión de alimentación y la fuente de radiación utilizada, obteniendo como salida los distintos pulsos.

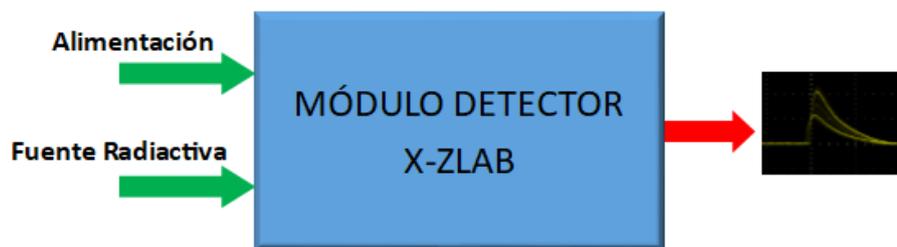


Figura 84. Representación Entradas y Salidas del módulo X-ZLAB.

Una de las consideraciones más importantes para desarrollar el sistema de adquisición es la frecuencia de trabajo del mismo, ya que será necesario discernir pulsos que duran un microsegundo, por lo que la frecuencia de la señal de salida del módulo (que será la de entrada del sistema de adquisición) es de 1 MHz. Trabajar con frecuencias menores a esta supondrá una pérdida de información, la cual puede llegar a ser asumible siempre que se trabaje con tiempos de adquisición de datos largos.

Igualmente, el sistema de adquisición tendrá que enfrentarse al reto de procesar pulsos superpuestos, un fenómeno que se presenta en numerosas ocasiones, tal y como ha podido capturarse con el osciloscopio.

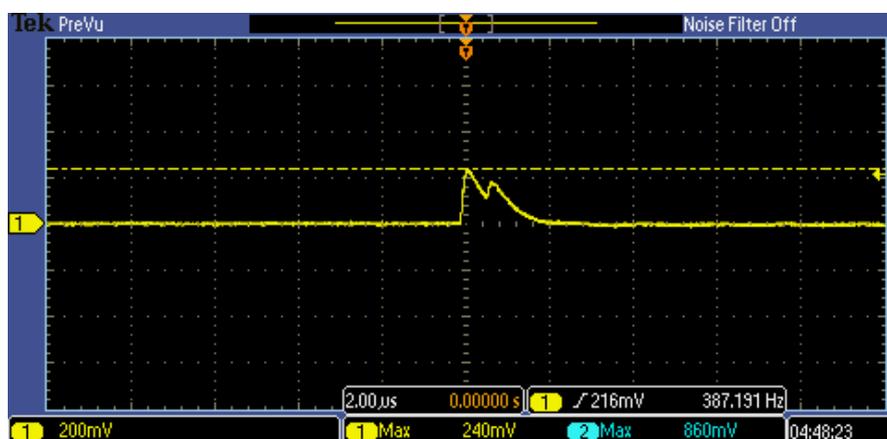


Figura 85. Sobreimpresión de pulsos de salida del módulo X-ZLAB (1).

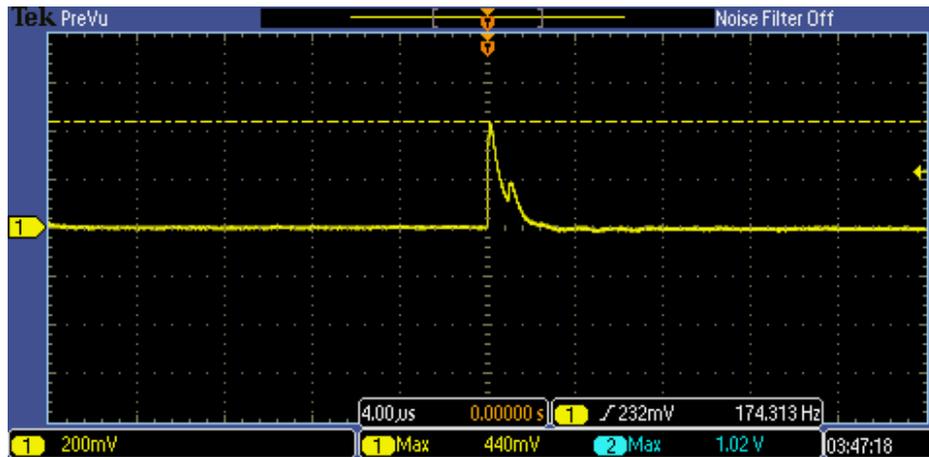


Figura 86. Sobreimpresión de pulsos de salida del módulo X-ZLAB (2).

Por último, el trabajo de adquisición debe centrarse en leer el valor de pico del pulso y realizar un histograma en el que en el eje horizontal se refleje el valor de la amplitud del pulso y el vertical refleje el número de cuentas.

### 10.1. Utilización de una tarjeta NI-6008.

Los primeros trabajos de construcción de un sistema de adquisición se han planteado con una tarjeta de National Instrument, concretamente el modelo NI-6008. El motivo es la disponibilidad inmediata que existe en el CLPU con este tipo de tarjetas, existiendo varias libres de uso en el departamento de Ingeniería.

Esta tarjeta es una solución de bajo coste, simple y que facilita la construcción rápida de aplicaciones a través del software de LabVIEW. De igual forma, estas tarjetas pueden ser leídas y configuradas a través del software de servicios de medida NI-DAQmx.



Figura 87 Tarjeta NI-6008

La tarjeta dispone de 8 entradas analógicas que funcionan a 12 bits con un rango de entrada entre -10V y 10 V, ofreciendo una precisión de 7,73 mV. El dispositivo tiene una capacidad de muestreo de 10 kS/s, lo que hace que trabajen a una frecuencia de 10 kHz. Como vemos, esta tarjeta trabaja a una frecuencia muy baja en comparación con lo que se necesita, pero se considera que, si se realizan

mediciones largas, puede servir para realizar una primera aproximación sobre el funcionamiento y la respuesta del módulo.

Además de las 8 entradas analógicas, la tarjeta dispone de dos salidas analógicas y 12 entradas/salidas digitales totalmente configurables por el usuario. Esta disposición hace que este dispositivo sea realmente versátil, abriéndose la posibilidad de poder realizar más operaciones sobre el módulo detector, como podría ser instalar un sensor de temperatura para recoger el valor de temperatura del módulo.

Otra de las facilidades que oferta esta tarjeta es que dispone de salidas de alimentación, con lo que puede alimentarse el módulo detector directamente sin necesidad de fuentes de alimentación o baterías portátiles.

Para realizar las mediciones es necesario crear un nuevo programa en el que utilizaremos el DAQ Assistant para medir la entrada analógica a la que se conecta el módulo detector. Dicho asistente permite configurar si se desea muestrear de forma continua o no, así como la frecuencia y el número de muestras que quieran tomarse.

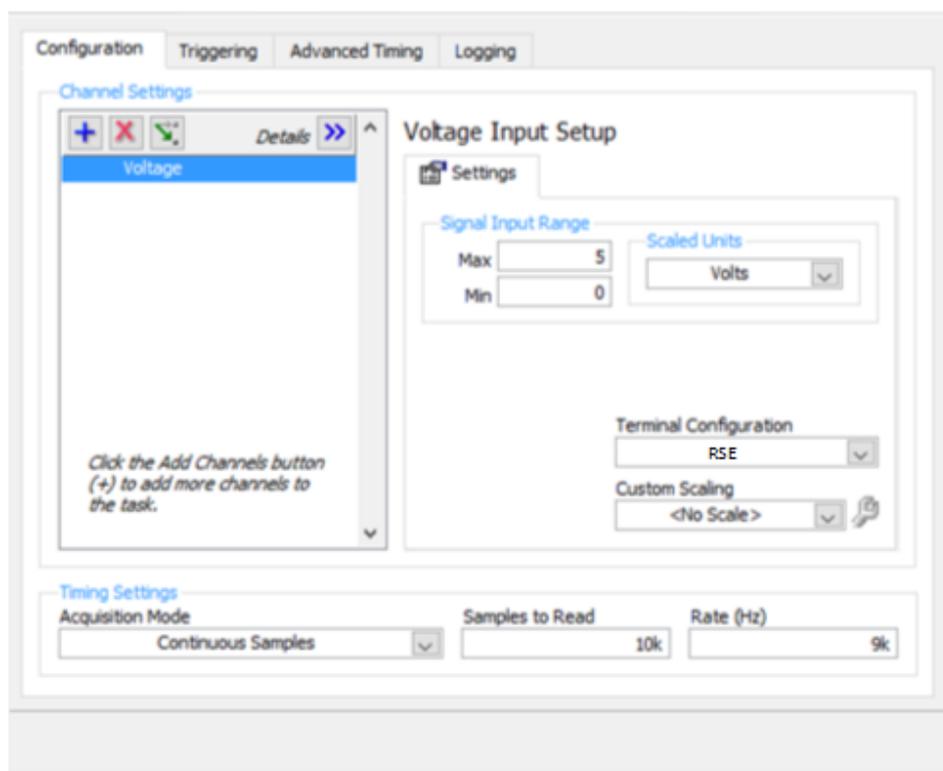


Figura 88. Configuración de trabajo de la tarjeta NI-6008.

Además de ofrecer la posibilidad de configurarlo, el DAQ Assistant permite visualizar los datos que obtiene la tarjeta de manera continua cuando se introduce la señal del detector.

La fuente que va a utilizarse para excitar el módulo detector es una fuente de las denominadas exentas, que emiten bajas dosis de radiación. En este caso se utilizará

una fuente de Ba-133, ya que dentro de las fuentes disponibles dentro del CLPU, es en la que mejor pueden distinguirse distintos rangos de energía.



Figura 89. Fuente radiactiva Ba-133.

La representación que ofrece de la señal el DAQ Assistant sería la siguiente:

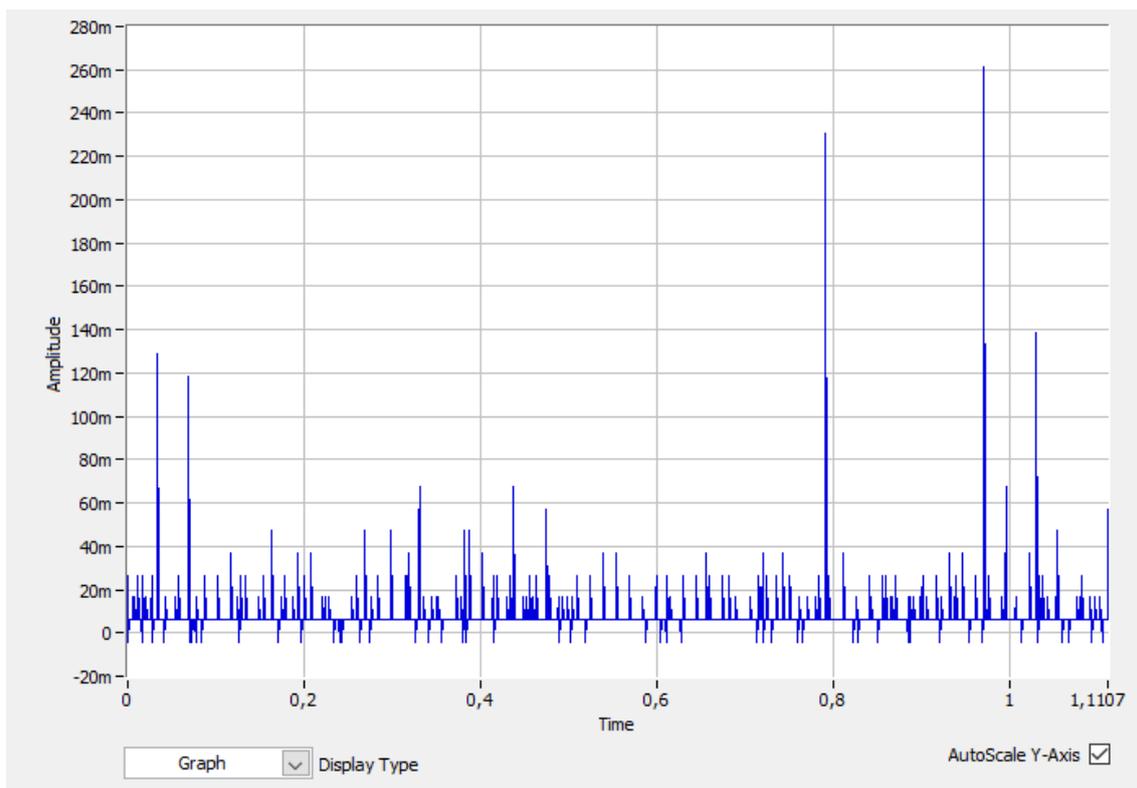


Figura 90. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 y el asistente DAQ Assistant (1)

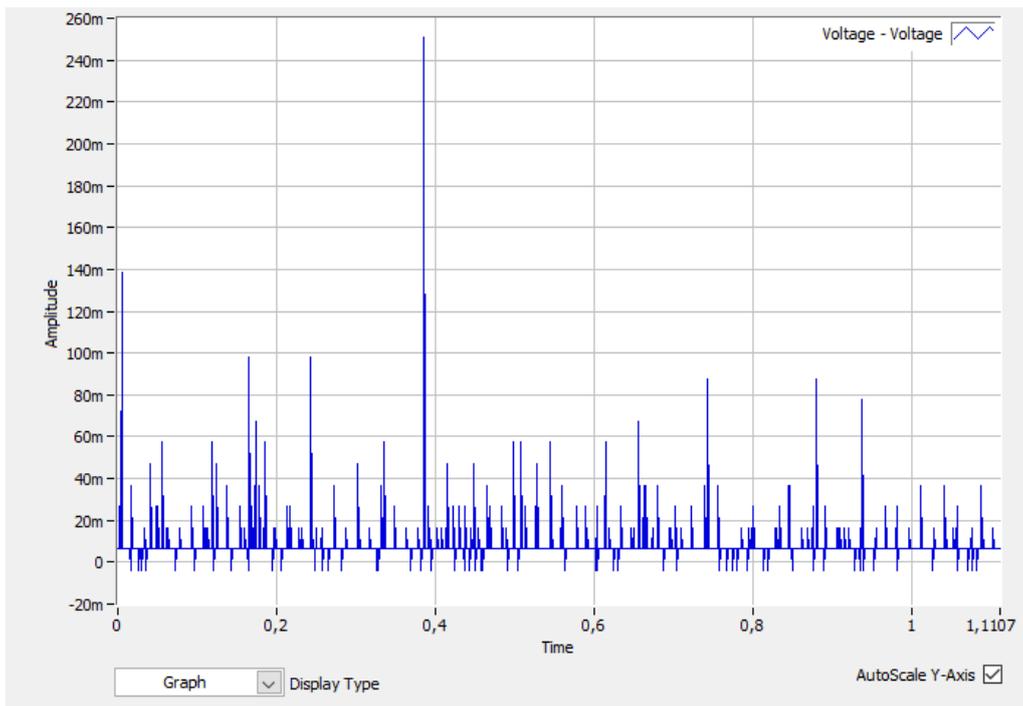


Figura 91. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 y el asistente DAQ Assistant (2)

Pueden observarse distintos picos, pero la escasa amplitud de los mismo no permite diferenciar si es ruido o algún pulso del detector. Esto se debe a la escasa velocidad de adquisición de la que disponemos con la tarjeta.

Puede construirse un programa que genere un histograma con la amplitud de los pulsos obtenidos, obteniendo así un espectro. Para ello se usará el siguiente código:

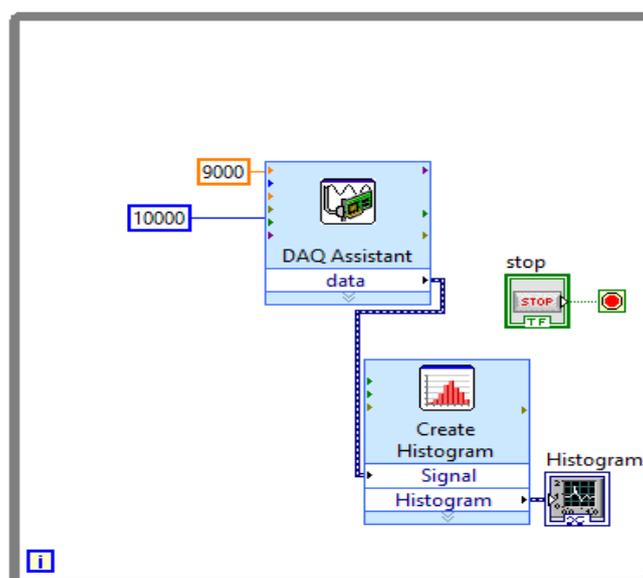


Figura 92. Código LabVIEW para adquisición de datos con NI-6008

El siguiente el panel de trabajo recogería el histograma:

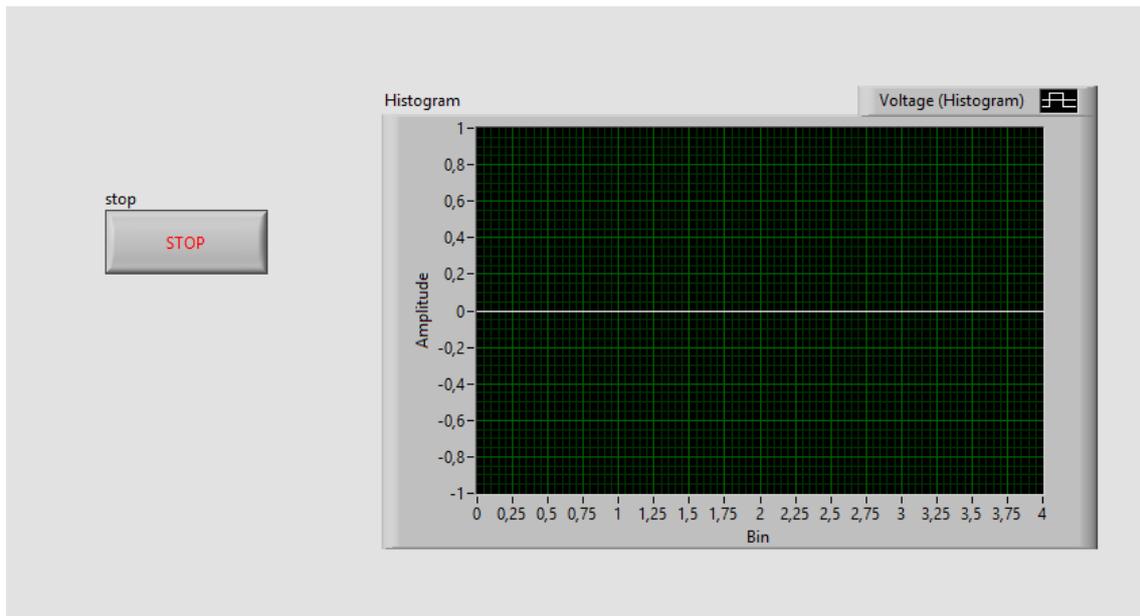


Figura 93. Panel de trabajo de LabVIEW para adquisición de datos con NI-6008

El montaje físico del circuito quedaría de la siguiente manera:

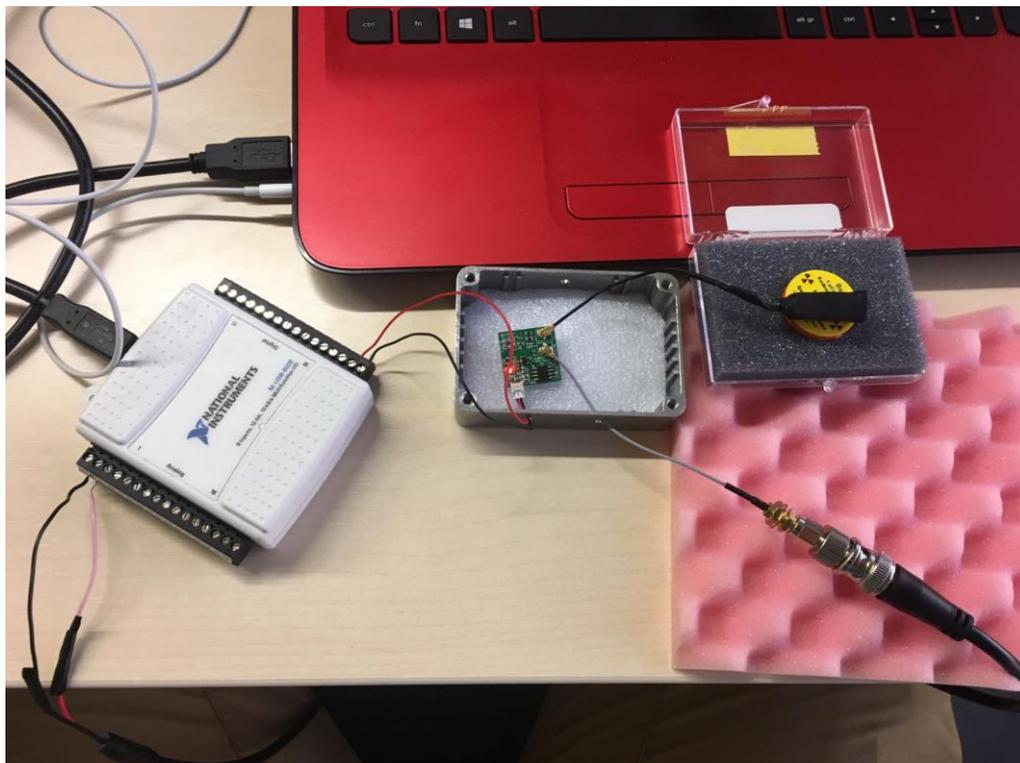


Figura 94. Imagen del montaje para la adquisición de datos con la tarjeta NI-6008.

Como puede aventurarse, lo que va a obtenerse es un número elevado de cuentas cercano al cero, y no un espectro de energías distribuido a lo largo del eje horizontal:

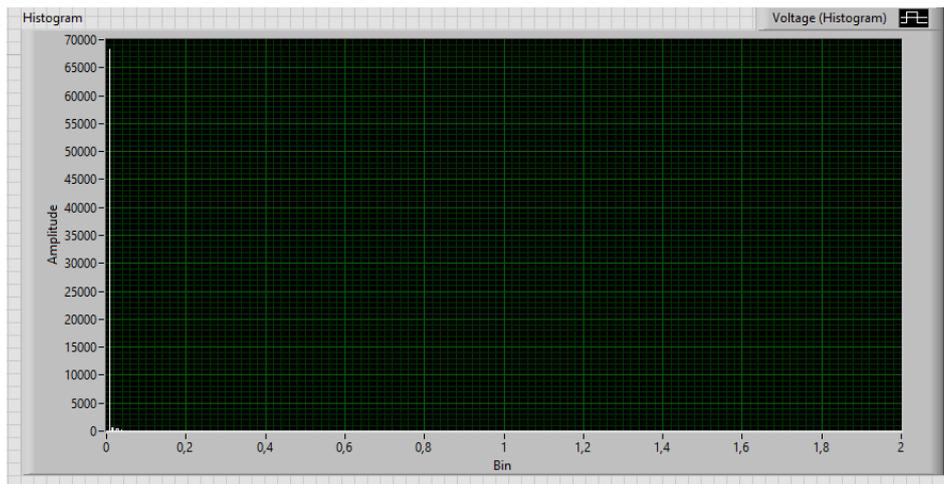


Figura 95. Histograma obtenido con la tarjeta NI-6008.

### Diseño de un circuito de muestreo y retención.

Como los resultados obtenidos no han sido satisfactorios, se plantea la construcción y diseño de un circuito de muestreo y retención que sea capaz de alargar la duración del pulso, de esta forma podría seguirse utilizando todo el trabajo realizado hasta ahora con la tarjeta NI-6008.

Para ello, utilizando los componentes disponibles en el laboratorio de electrónica del CLPU, se procede a construir el circuito partiendo del amplificador operacional TLC272CP. Dicho componente de Texas Instrument dispone de un doble amplificador operacional, trabajando a tensiones máximas de alimentación de 18 Voltios.

Se opta por desarrollar un circuito en el que el amplificado operacional configurado con un condensador de 20 pF y una resistencia de 10 kΩ a tierra en la salida, y a continuación el circuito una resistencia y condensador en serie que hace las veces de retención.

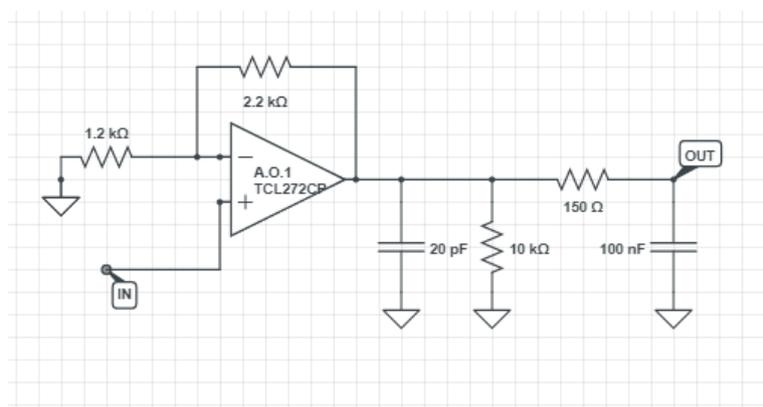


Figura 96. Circuito de muestreo y retención diseñado para conectar con la tarjeta NI-6008.

El motivo de esta configuración es que a consecuencia de la escasa duración y la pequeña amplitud de los pulsos se pierde gran parte de la señal. Hay que tener en cuenta que el montaje de este circuito se ha realizado en una placa board, lo que hace que se introduzca ruido y pérdidas en la señal.

De igual forma, se ha observado que si se amplía la ganancia de salida que devuelve el operacional la señal se distorsiona y pierde su sentido. Esta es la razón por la que se han elegido los valores del esquema para las resistencias que configuran el funcionamiento del operacional.

La razón por la que se ha elegido un valor de  $150 \Omega$  y  $100 \text{ nF}$  en el circuito RC serie que hace la retención es porque la constante de tiempo está en el orden de los microsegundos, acercándose así al valor del ancho de pulso.

Tras hacer pasar al pulso de salida por este circuito, se observan las siguientes señales en el osciloscopio:

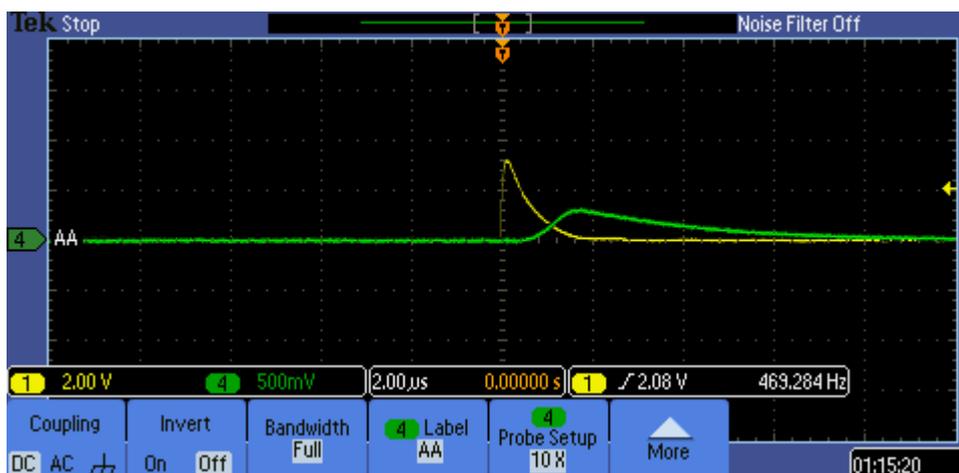


Figura 97. Señal adquirida con el circuito de muestreo y retención con la tarjeta NI-6008.

En amarillo el pulso de salida del módulo detector, en verde la salida del circuito de muestreo y retención. Puede observarse que hay una gran pérdida de amplitud en la señal que sale del circuito, pero se considera que, si la señal temporal es válida para la tarjeta de National Instruments, pueden buscarse después nuevas configuraciones, o quizás otro amplificador operacional, para solucionar los problemas de pérdida de valor de pico de la señal.

Con una etapa de amplificado, el DAQ Assistant elimina pequeños picos de ruido y distingue pulsos más significativos, que además, no se alejan mucho del valor real del pulso, que como se ha mencionado, ha visto mermada su amplitud.

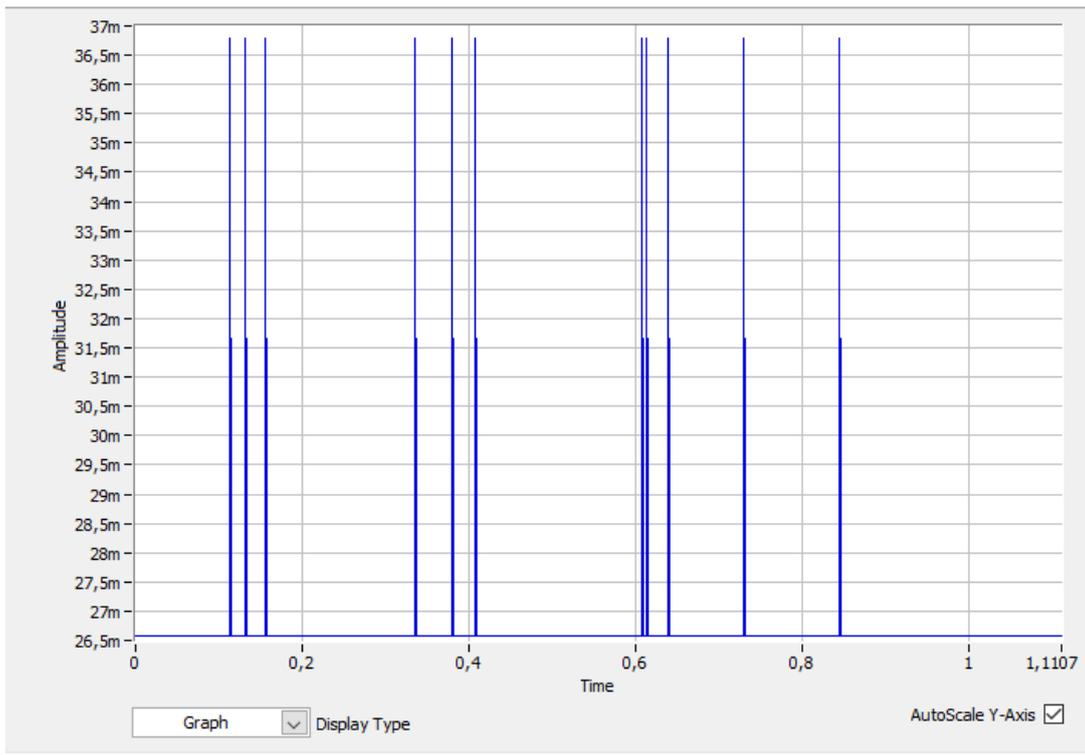


Figura 98. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 conectado al circuito S&H y el asistente DAQ Assistant (1).

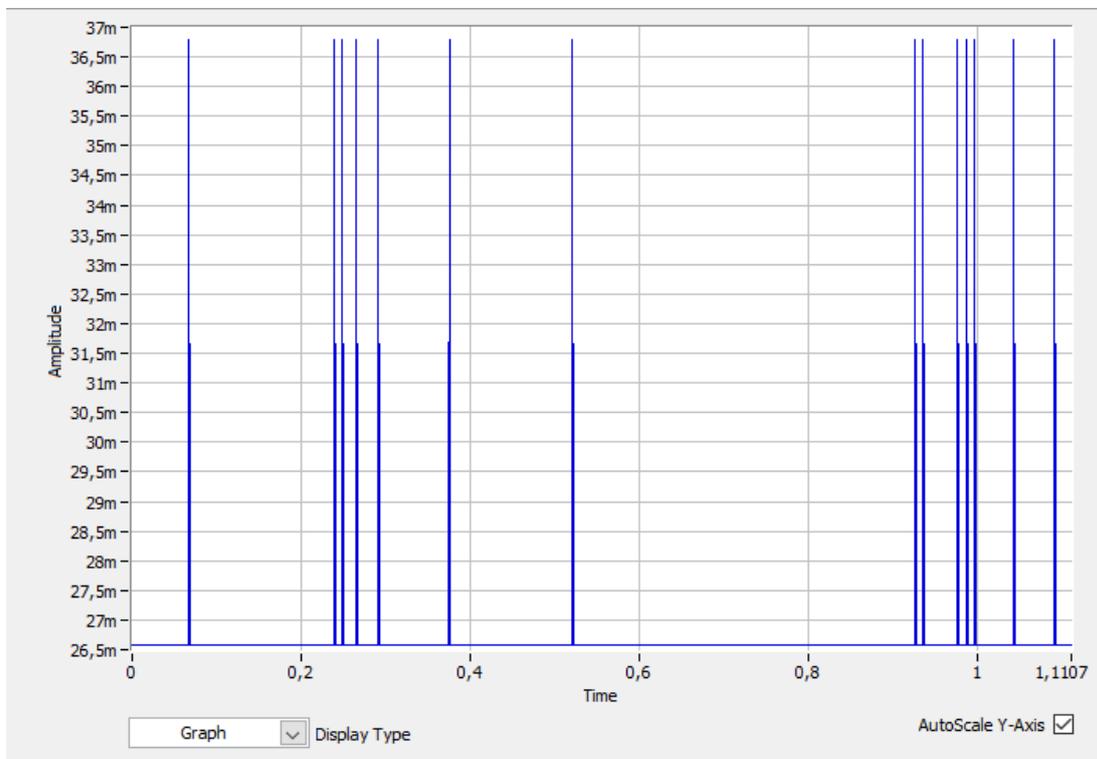


Figura 99. Adquisición de pulsos obtenida con NI-6008 conectado al circuito S&H y el asistente DAQ Assistant (2).

Sin embargo, el histograma no varía excesivamente:

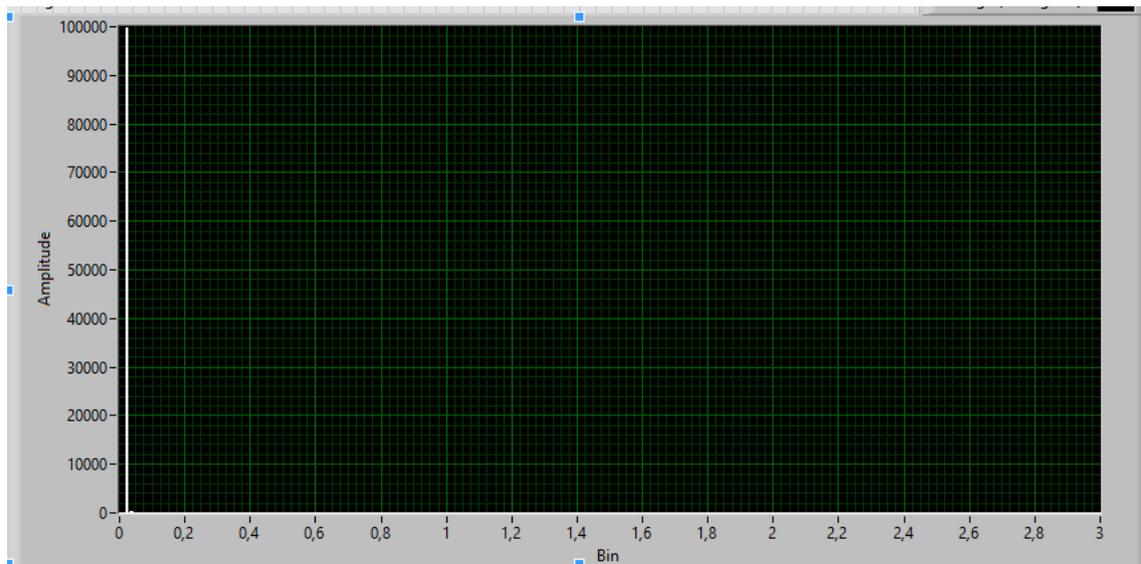


Figura 100. Histograma obtenido con NI-6008 y el circuito de muestreo y retención.

Como aún a pesar de haber ampliado la duración del pulso, esto sigue sin dar resultados apreciables en la tarjeta de National Instruments, se apuesta por desarrollar dos veces el circuito de muestreo y retención conectándolo en serie, obteniéndose la siguiente respuesta en el osciloscopio.

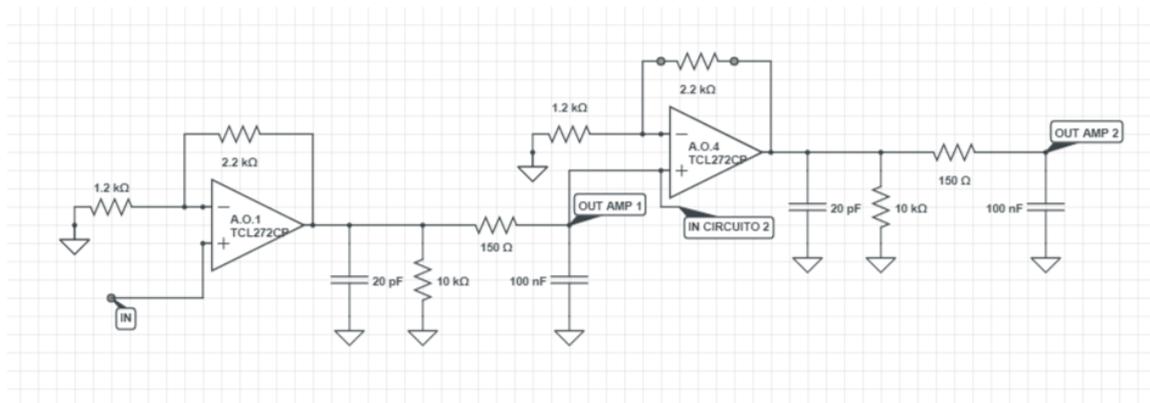


Figura 101. Diseño de doble circuito de muestreo y retención.

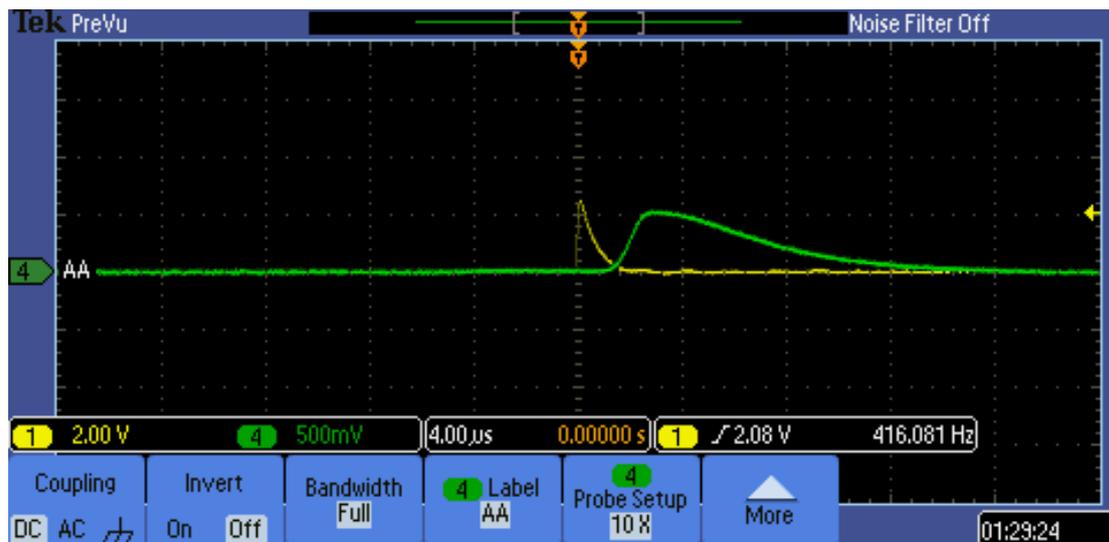


Figura 102. Señal obtenida con el doble circuito de muestreo y retención.

De esta forma puede afirmarse que se ha ampliado la duración del pulso hasta los 10 microsegundos, por el contrario, el valor de pico del pulso ha pasado a ser una cuarta parte del valor inicial.

Además, se observa que el circuito es capaz de seguir a la perfección el pulso que devuelve el módulo detector, de tal forma que, si el pulso que devuelve el módulo detector ensancha un poco y amplía su duración algo más del microsegundo, el pulso que devuelve el doble circuito de muestreo y retención amplía también su duración.

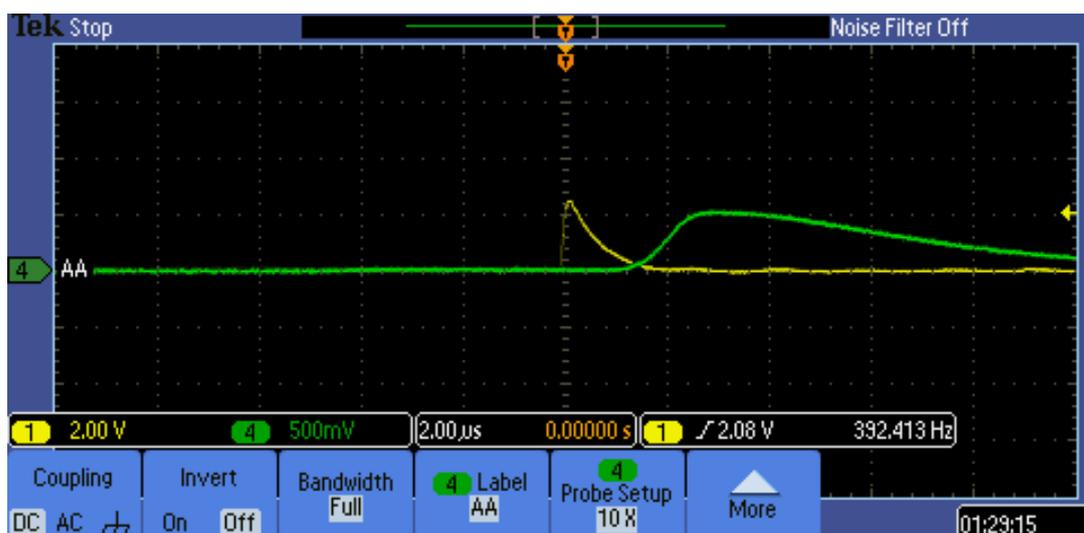


Figura 103. Señal obtenida con el doble circuito de muestreo y retención (2).

Utilizando el circuito con los dos amplificadores el DAQmax, se observa lo siguiente:

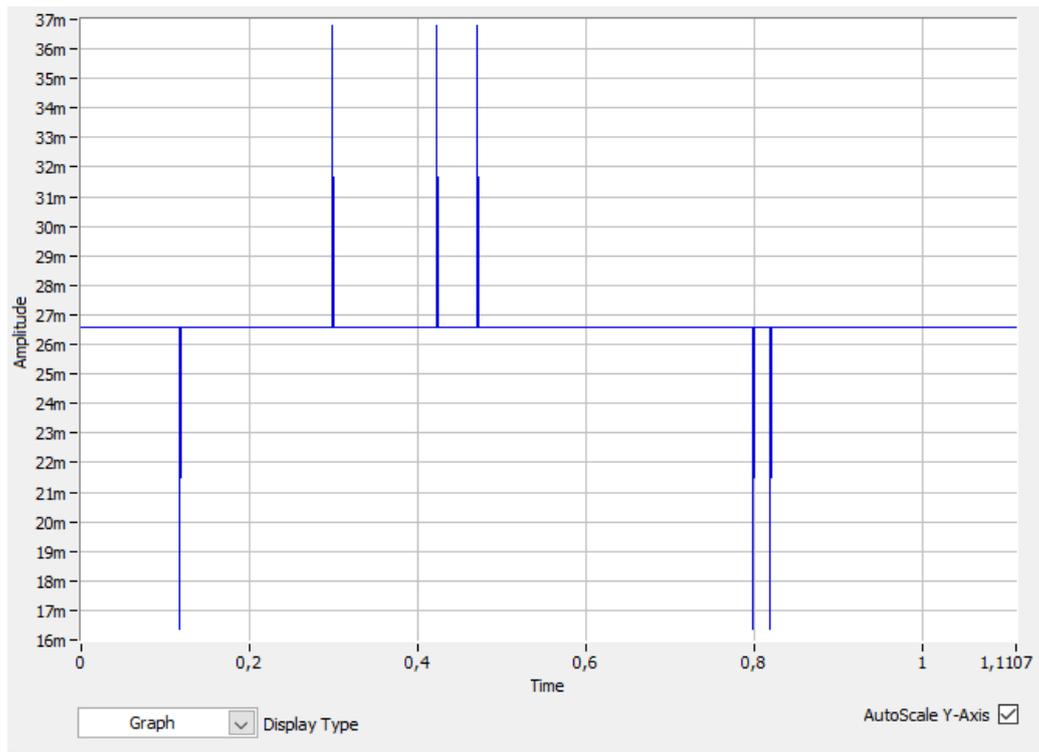


Figura 104. Diagrama obtenido con el DAQ Assistant en tiempo real con la tarjeta NI-6008 y el doble circuito S&H.

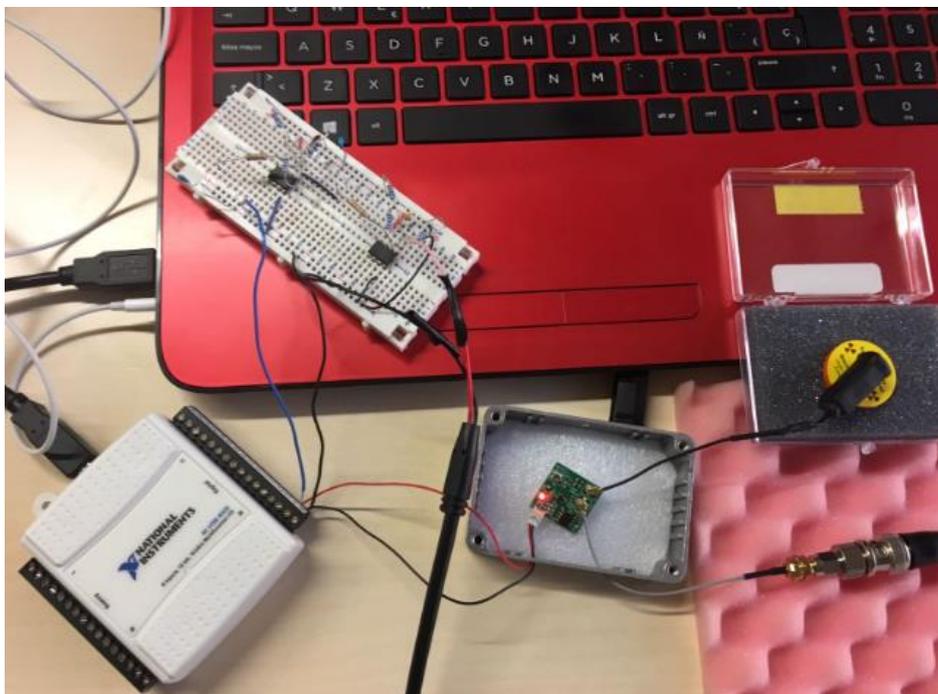


Figura 105. Imagen del montaje del doble circuito S&H con NI-6008.

Aunque la gran variación está en el histograma que devuelve el programa, especialmente si se modifica la escala decimal y se ajusta a una escala logarítmica:

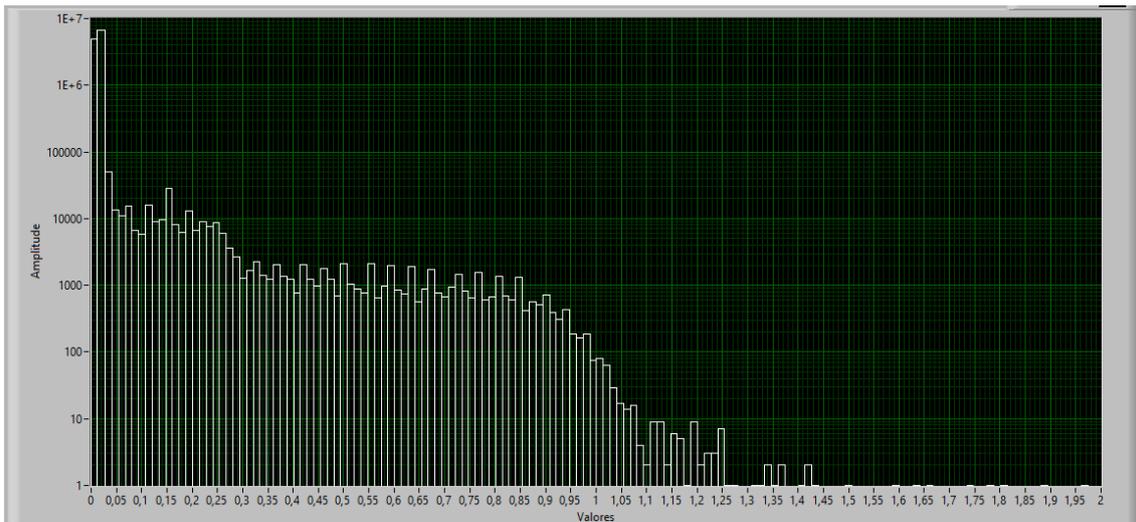


Figura 106. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala logarítmica.

Por primera vez se obtienen amplitudes repartidas a lo largo del eje horizontal, aunque se observa un número elevadísimo de cuentas muy cercanas al cero. Si se crea en el código de programa un pequeño operador para que no se representen en el histograma los valores por debajo de 50 mV, el resultado sería el siguiente:

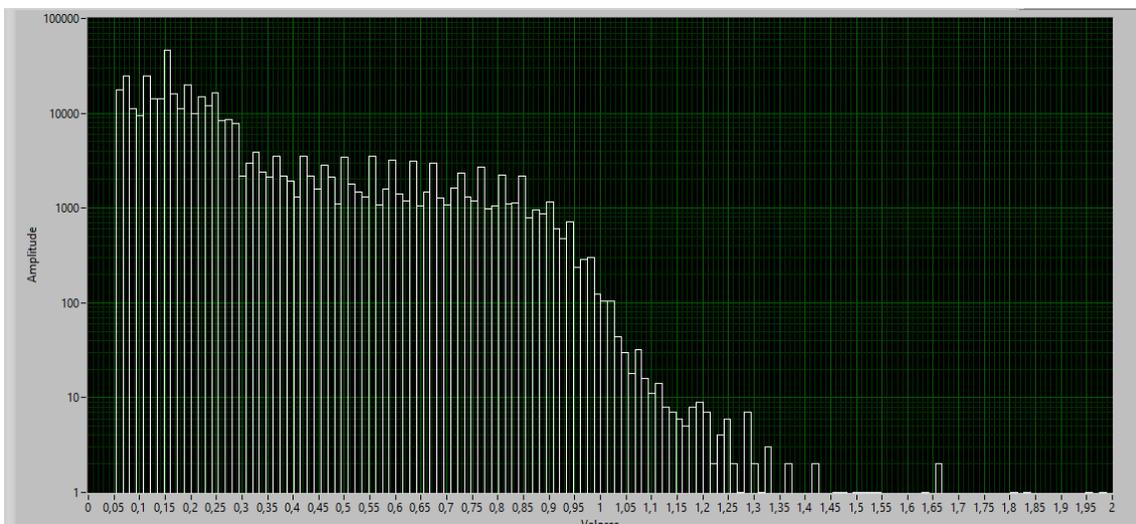


Figura 107. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala logarítmica y filtrado a 50 mV.

Aunque el resultado realmente sorprendente se observa si vuelve a cambiarse la escala del histograma al modelo decimal, donde se observa lo siguiente:



Figura 108. Histograma obtenido con NI-6008 y doble circuito S&H en escala decimal y filtrado a 50 mV.

Con un tiempo de adquisición de varias decenas de minutos, se obtiene una distribución de las cuentas a lo largo del eje horizontal con valores cercanos al voltio, y con un número de cuentas bastante significativo. De igual forma, se observa un pequeño pico si se sigue la tendencia de la representación en barras.

Dado lo rudimentario del circuito y la escasa potencia de la tarjeta, no puede afirmarse que la distribución obtenida se asemeje al espectro de energías del Bario, sin embargo, este resultado permite adivinar que el módulo de X-ZLAB tiene un comportamiento que puede ser bastante positivo en las instalaciones del CLPU, por lo que se va a trabajar con herramientas más potentes para mejorar la resolución del trabajo.

## 10.2. Utilización de una tarjeta MyRIO.

Tras desechar la idea de utilizar la tarjeta NI-6008, se apuesta por seguir con material de adquisición de National Instruments, dada la facilidad de programación que ofrecen los dispositivos y la versatilidad de aplicaciones que pueden ofrecer, como ya se comentó anteriormente.

Es por ello, que surge la oportunidad de disponer de una tarjeta más potente perteneciente al Departamento de Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar. En concreto, el modelo myRIO-1900.

La tarjeta myRIO es un módulo lanzado por National Instruments con fines educativos, ofreciendo una tarjeta programable de aplicación industrial a un precio asequible y con recursos educativos de hardware y software.

myRIO dispone de distintas entradas y salidas reconfigurables que permiten construir aplicaciones, todo ello gestionado a través de un procesador de doble núcleo y una FPGA que permite configurar las distintas entradas y salidas en función del fin que se quiera conseguir.

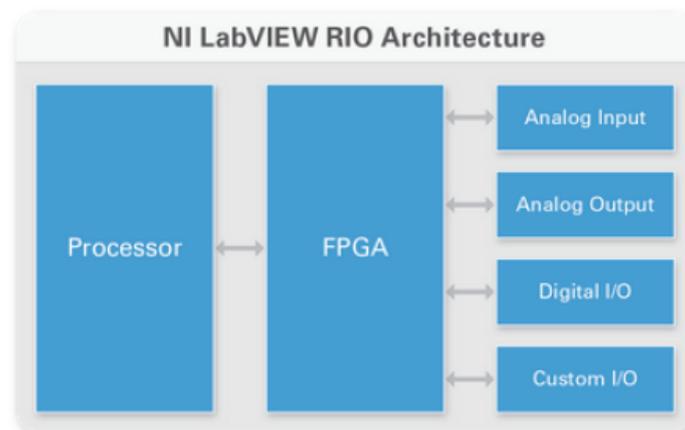


Figura 109. Arquitectura tarjeta myRIO.

Del mismo modo, la FPGA puede ser programada de manera sencilla con LabVIEW, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones en las que se puedan obtener tiempos de trabajo mucho más rápidos.

El hardware de myRIO está compuesto por un procesador Real Time de doble núcleo y una FPGA con 28.000 células de lógica programable. Además, dispone de 10 entradas y 6 salidas analógicas, así como entradas y salidas de audio, y más de 30 líneas de entradas y salidas digitales que pueden ser configuradas por el usuario.

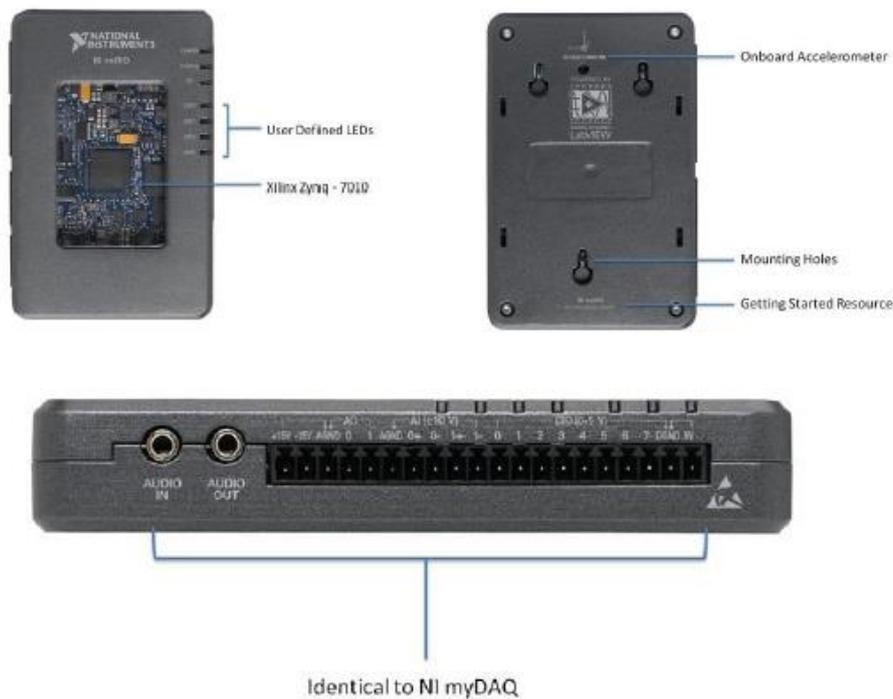


Figura 110. Tarjeta NI myRIO.

De manera adicional, myRIO incluye un sistema de conexión Wifi para trabajar de manera inalámbrica, un acelerómetro y varios leds programables, que permiten incorporar más funciones a las distintas aplicaciones que desarrollemos.

La tarjeta dispone de una memoria no volátil de 256 MB, una memoria DDR3 de 512 MB, una frecuencia de reloj de 533 MHz y un ancho de bus de 16 bits. En lo que respecta a las entradas y salidas analógicas, estas funcionan a 12 bits con una capacidad de muestreo de 500 kS/s. Como se observa, la capacidad de muestreo de esta tarjeta es 50 veces mayor a la del módulo NI-6008.

Aún a pesar del salto cuantitativo que ofrece esta tarjeta en lo que a tasa de muestreo se refiere, esta queda aún un poco justa, debido a que está en 500 kHz (0,5 MHz). Aun así, se sigue considerando que este problema se solventa realizando medidas temporalmente largas.

Para sacar el máximo partido a las especificaciones que ofrece la tarjeta myRIO, el programa con LabVIEW debe realizarse a partir de un proyecto en la FPGA programando en Real Time. Esto hace que haya que utilizar algunos bloques de programación más complejos.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

Para comenzar resulta necesario crear un FPGA project, seleccionando la myRIO con la que va a trabajarse.

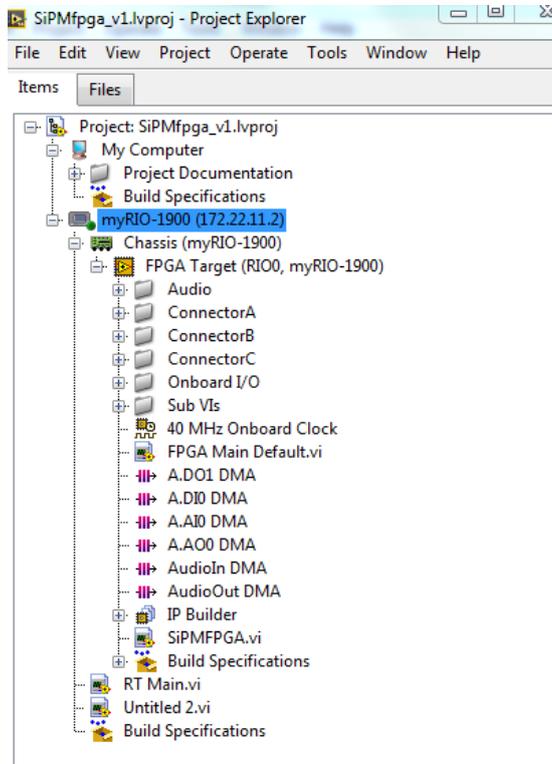


Figura 111. Árbol de proyecto FPGA LabVIEW para tarjeta myRIO.

Una vez generado el proyecto, para sacar el máximo partido a la velocidad de adquisición hay que crear un programa dentro de la FPGA, para lo cual, se selecciona la tarjeta FPGA (“FPGA Target”) y con el botón derecho se genera un nuevo programa, en este caso denominado “SiPMFPGA”.

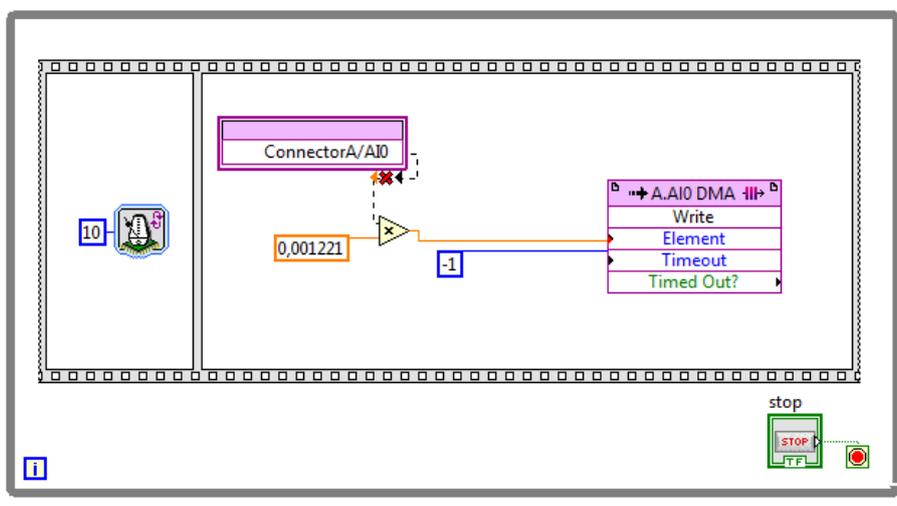


Figura 112. Código de programa FPGA myRIO.

Dicho programa consistirá en un bucle while, en el que se volcarán los datos de la entrada analógica de la tarjeta a un elemento FIFO. Esta herramienta permite realizar adquisiciones en la entrada analógica a la máxima frecuencia que trabaje la FPGA, en este caso, a 1 MHz.

Una vez trasladados los datos de la entrada analógica a la FPGA, el tratamiento de esos datos se realiza dentro de un programa almacenado en la tarjeta myRIO, pero que opere fuera de la FPGA:

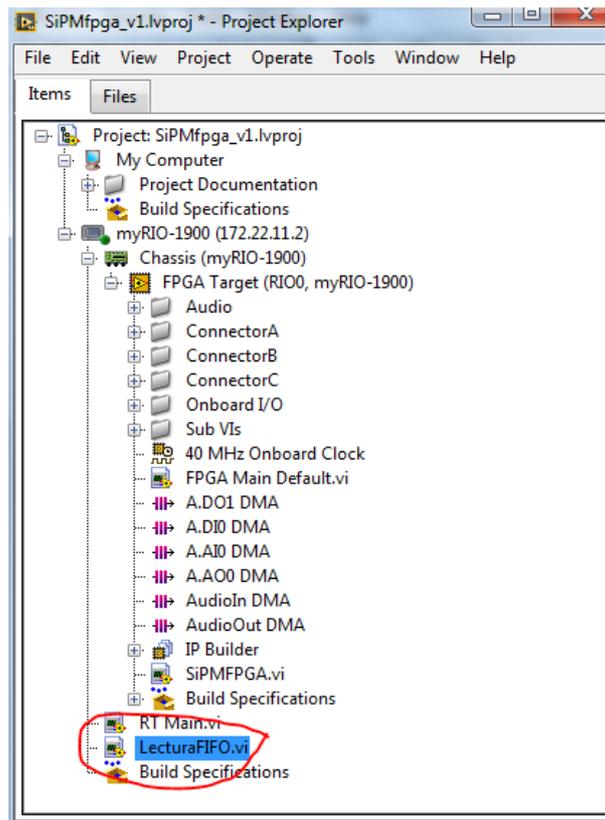


Figura 113. Programa de Lectura de FPGA de MyRIO.

Para ello, se selecciona la tarjeta myRIO (“Chassis myRIO”) y se crea un nuevo código de programa, que se llamará “LecturaFIFO.vi”.

El esquema de programación es el siguiente:

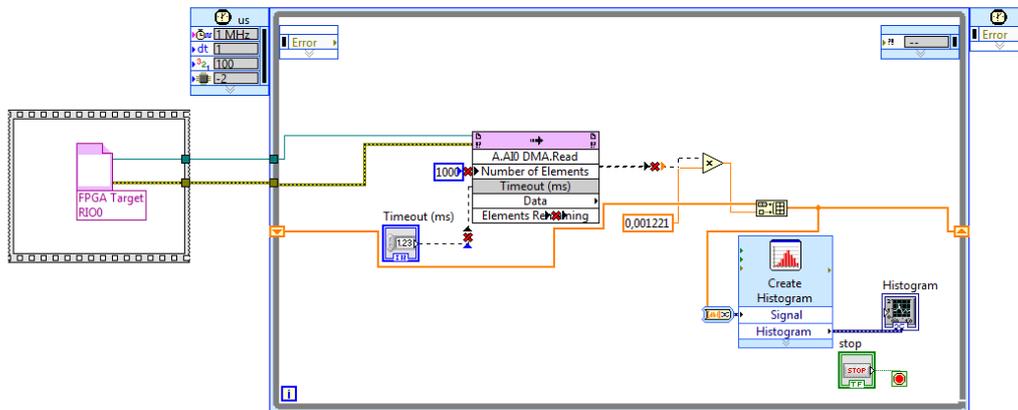


Figura 114. Código de programa de Lectura de FPGA de MyRIO.

Se puede observar cómo se extrae la información de la tarjeta FPGA y se introduce en un “Single-Cycle Timed Loop”, que no es más que una estructura de la FPGA que reduce tiempo de recursos.

En dicho bucle se introduce un elemento FIFO que se configura como un FIFO de lectura para la entrada analógica de la tarjeta a la que llega la señal del módulo detector y que previamente se ha configurado en la FPGA de la myRIO.

La información de salida se introduce en un histograma que se actualiza a tiempo real a través de un túnel que refresca y acumula los valores leídos.

El panel del control del programa generado es el siguiente:

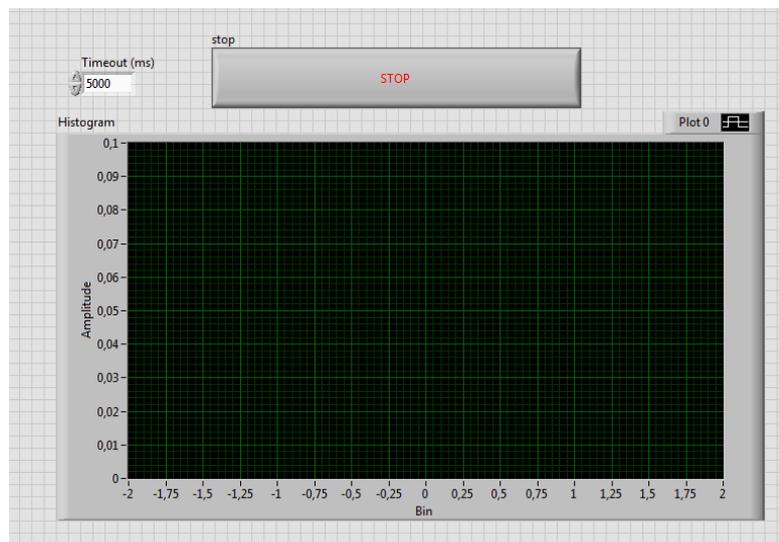


Figura 115. Panel de visualización de datos de myRIO.

Una vez construido el programa en la tarjeta myRIO, si se pone en funcionamiento se obtiene el siguiente histograma con una fuente de Ba-133 y alimentando el módulo con una tensión continua de 5 Voltios.

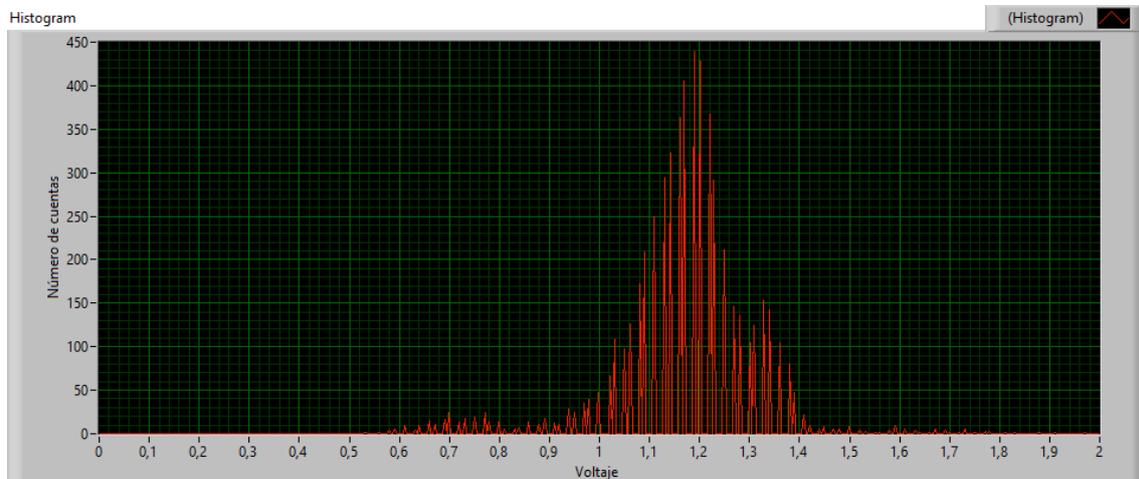


Figura 116. Espectro de Ba-133 obtenido con myRIO y una alimentación de X-ZLAB de 5 voltios.

Cómo puede observarse, se produce un corrimiento de la representación gráfica hacia amplitudes que reflejan voltajes más cercanos a la amplitud real de los pulsos de salida, aun así, se produce una pérdida de información importante.

Igualmente, en la representación puede observarse nítidamente un pico en el número de las cuentas, lo cual es positivo ya que refleja un pico de energías, pero dada la poca resolución de la tarjeta, no puede asociarse a un determinado nivel de energías.

Finalmente, aunque puede afirmarse que se está cerca de obtener un buen sistema de adquisición, se necesita ganar en precisión, por lo que resulta necesario seguir buscando un método con el que aumentar la resolución y precisión.

### 10.3. Uso del osciloscopio como tarjeta de adquisición.

Durante el trabajo de construcción de la aplicación con la tarjeta myRIO, se observó en distintos manuales y foros de National Instruments cómo existían distintos drivers para construir sistemas SCADA que permiten operar y recoger la información desde osciloscopios digitales.

Para ello resulta necesario disponer de un osciloscopio digital conectable a un ordenador a través de un USB, lo cual es bastante común entre los osciloscopios digitales, y que National Instruments tenga drivers para dicho osciloscopio.

Uno de los osciloscopios disponibles en el CLPU y con el que se ha trabajado hasta la fecha cumple esos dos requisitos, concretamente el modelo DSO5052A de Agilent. Dicho osciloscopio se asemeja a cualquier osciloscopio de la serie 6000.

Por lo tanto, se plantea utilizar el osciloscopio como sistema de adquisición y recoger el valor del valor de pico (“top measurement”) que realiza el propio osciloscopio del pulso que devuelve el módulo detector, y así construir un histograma.



Figura 117. Osciloscopio DSO5052A de Agilent.

Para poder construir el programa, resulta necesario instalar los drivers de National Instruments, de manera que entre las funciones de los instrumentos de entrada y salida aparezcan las siguientes opciones:



En esta parte del programa pueden modificarse todos los parámetros de adquisición, desde la frecuencia hasta los valores de representación.

Por último, tras la configuración del osciloscopio, se procede a leer el valor de la medida de la amplitud del pulso a través del bloque “Measurement Function”, seleccionando el valor del “top measurement”.

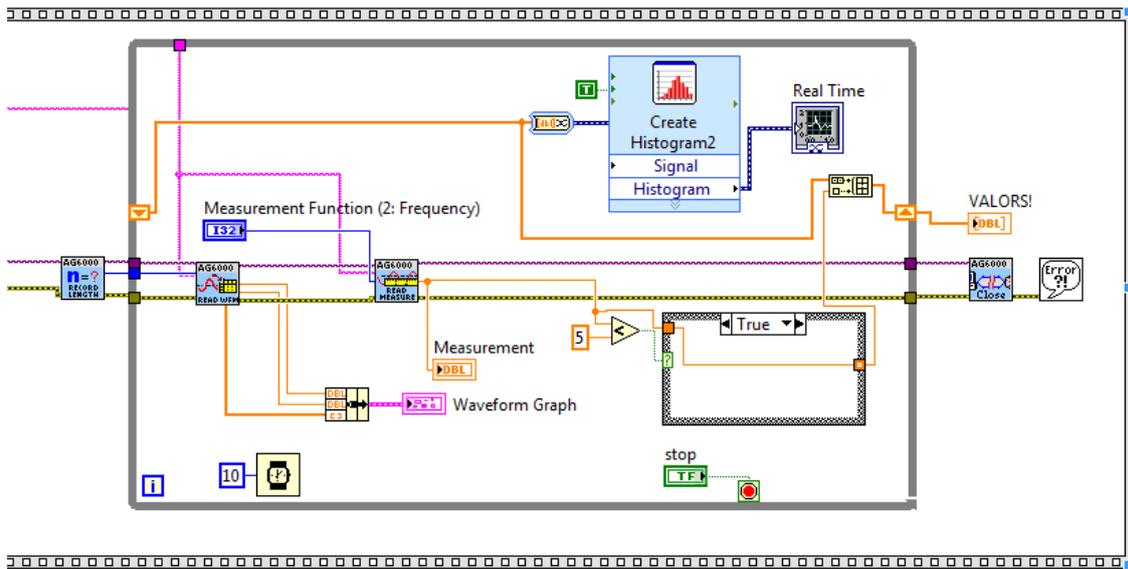


Figura 121. Programación LabVIEW para visualización de los valores leídos desde osciloscopio.

Dicho valor es filtrado a través de un “case structure” para solo coger los valores de pico que sean superior a 5 mV. De esta manera en el histograma no se introducen aquellas medidas que devuelvan un valor nulo o negativo.

Estos valores se introducen en un histograma que se actualiza en tiempo real a través de un túnel del bucle while. Los valores visualizados se introducen también en una matriz de valores, que puede ser de utilidad para procesarla posteriormente.

De igual forma, a través de un “Waveform Graph” se visualiza en la pantalla del programa la imagen que esté en la pantalla del osciloscopio en tiempo real.

Con todo ello, quedaría la siguiente de pantalla, en el que se selecciona el osciloscopio conectado por USB y se modifican los parámetros de funcionamiento del osciloscopio.

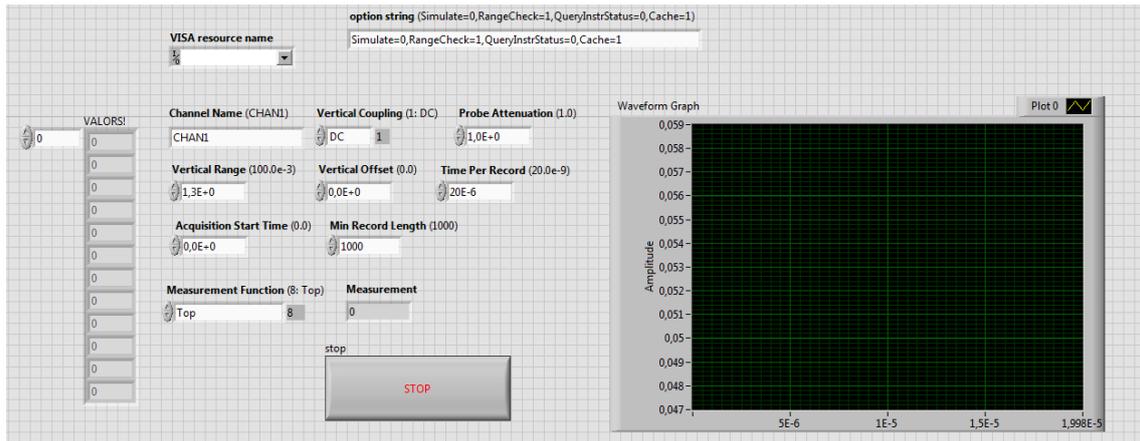


Figura 122. Panel de trabajo para sistema de lectura con osciloscopio.

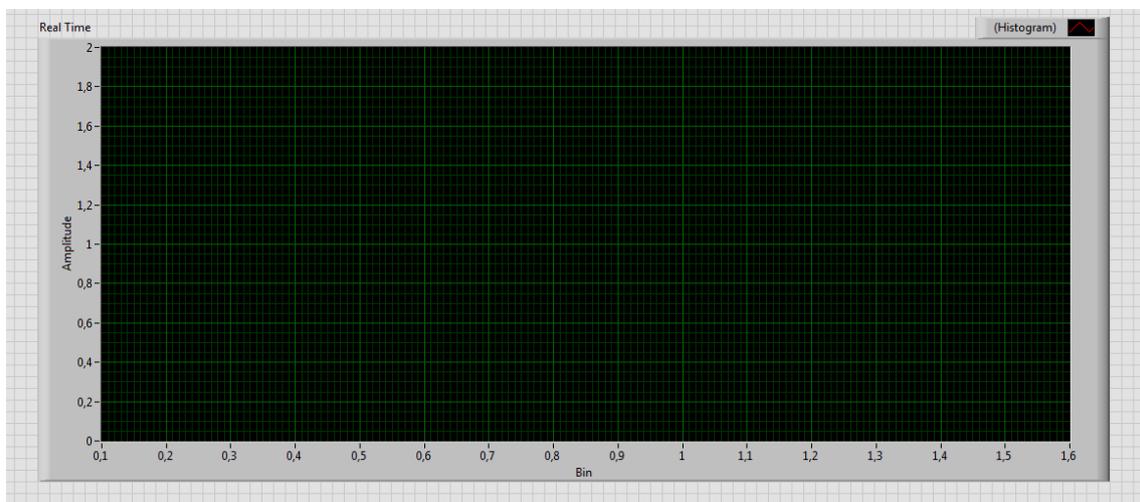


Figura 123. Panel de trabajo para sistema de lectura con osciloscopio - Histograma en tiempo real

Una vez puesta en marcha la aplicación construida, esta ofrece resultados muchos más claros y nítidos, hasta tal punto que puede visualizarse cada pulso de medida adquirido en el programa:

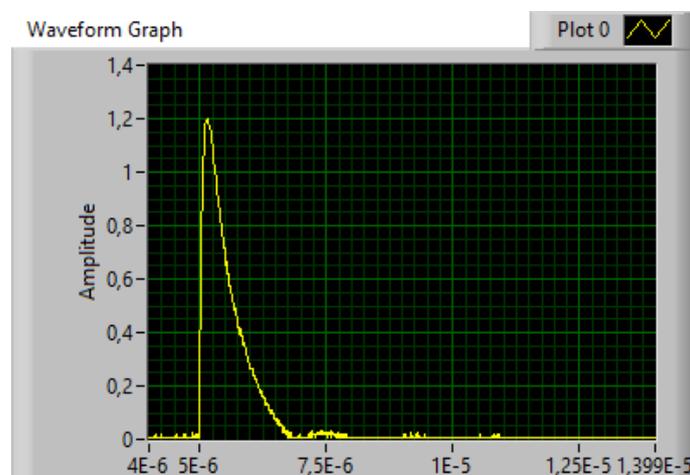
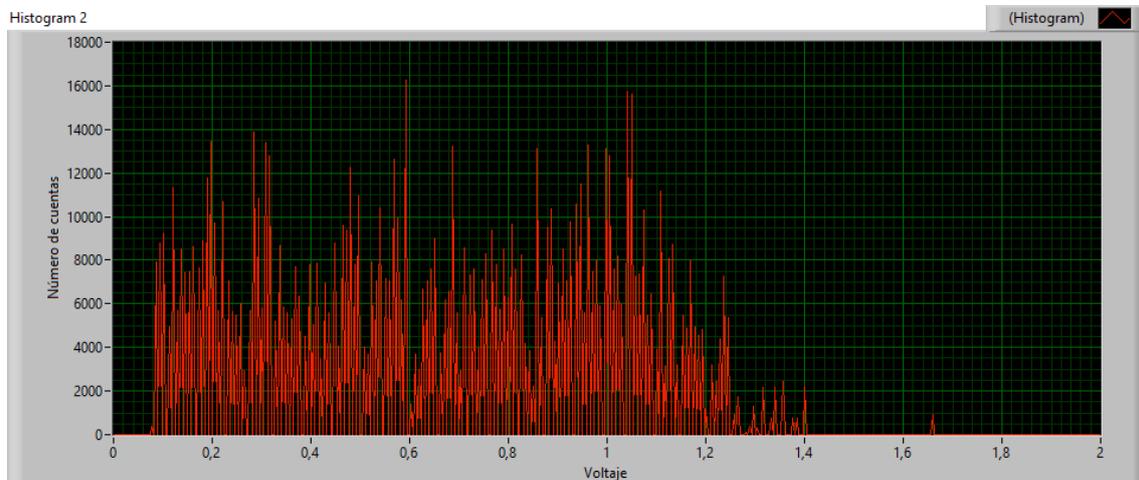


Figura 124. Pulso del módulo X-ZLAB en panel LabVIEW adquirido con osciloscopio.

De esta manera, si se realizan capturas con una fuente de Ba-133 y se alimenta el módulo con una tensión continua de 5 voltios, se obtiene el siguiente histograma:



*Figura 125. Histograma obtenido con el osciloscopio para una fuente de Ba-133 y alimentación del módulo X-ZLAB de 5 V.*

Como puede observarse el histograma cambia bastante, existiendo cambios de tendencia en el número de cuentas. Así mismo, el número de cuentas obtenidas aumenta, ya que se está trabajando a una frecuencia de muestreo mayor que en los prototipos anteriores.

Aún a pesar de no tener una frecuencia de muestreo tan alta como se desearía, esta es una solución factible, pero poco práctica, ya que conllevaría la inutilización de un osciloscopio para el uso de esta aplicación, lo cual es poco viable tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista de instalación del prototipo en el sistema VEGA.

A pesar de esto, existe un alto grado de satisfacción, dado que el módulo detector de X-ZLAB ofrece una buena respuesta con fuentes exentas, lo cual da buenas perspectivas para su instalación en el CLPU.

#### 10.4. Utilización del MCA PX5 de AMPTEK.

Durante el desarrollo de los trabajos de construcción de un sistema de adquisición, se plantea la posibilidad de utilizar un módulo de AMPTEK disponible dentro de la Unidad de Protección Radiológica. Dicho módulo es un procesador digital de pulsos PX5.

Dicho módulo va asociado a un detector de Cadmio – Teluro, concretamente al detector de Amptek XR100. El PX5 sirve para aportar alimentación al detector y a su vez recoger y procesar la información proveniente del detector.



Figura 126. Procesador Digital de Pulso PX5.

En las hojas de especificaciones de AMPTEK, la compañía presenta esta tarjeta como un elemento que no solo puede utilizarse con los detectores de AMPTEK, sino que también puede aplicarse a detectores desarrollados por los usuarios, aportando alimentación y procesado de las señales.

El módulo PX5 es un procesador digital de pulsos compuesto por un MCA (multichannel analyzer) y un amplificador muestreador, siendo capaz de digitalizar la señal de entrada, aplicar un procesado en real – time, detectar el valor de pico del pulso y mostrar todo en un histograma. Toda la información es comunicada vía USB y puede ser visualizada en el software desarrollado por la compañía, el DppMCA, que puede ser descargado gratuitamente a través de la página web de AMPTEK.



Tras esto, se procede a realizar un muestreado digital del pulso, obteniendo así pulsos digitales de distinta amplitud. En esta etapa la señal también puede enviarse a un conversor digital analógico, pudiendo mostrar las señales a través de algún canal auxiliar del PX5 con fines de diagnóstico.

De manera gráfica, puede observarse en el osciloscopio cual es la evolución de las distintas señales en el PX5, en este caso, con la señal que proviene del detector XR100.

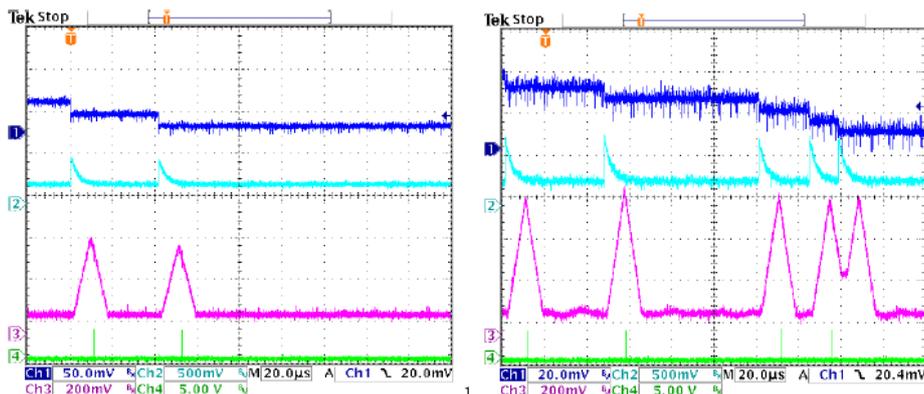


Figura 129. Señales procesadas por el PX5 con un detector XR100.

En azul oscuro está representada la señal proveniente del XR100. Dicha señal es escalonada, teniendo poco que ver con la señal que se introduciría con la señal del módulo detector de X-ZLAB.

Dicha señal de entrada del XR100 pasa por el prefiltro analógico, transformándose la señal en un tren de pulsos representados en azul claro. Dicho cambio se realiza en base a los cambios que se producen en la señal escalonada proveniente del detector.

A partir de ahí, la señal magenta refleja el muestreado (shaping) que realiza el módulo PX5. Dicho muestreado puede ser trapezoidal o en pico, y este parámetro puede ser configurado por el usuario en el software de AMPTEK, siendo el parámetro clave para realizar una buena adquisición y tratamiento de la señal.

La importancia de un buen ajuste reside en que los pulsos sean detectados o no. La señal que queda por comentar, la verde, muestra cada vez que un pulso es detectado y contabilizado por el PX5. Como se observa, en el muestreado anterior ante dos pulsos casi superpuestos, solo contabiliza uno.

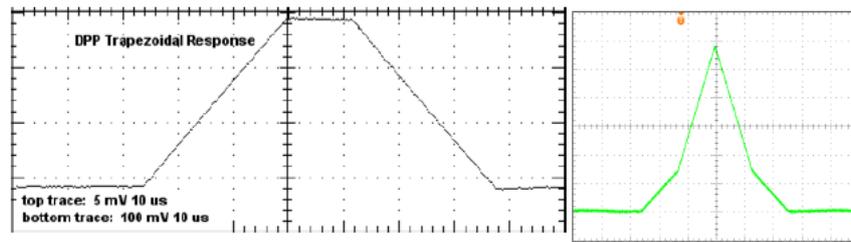


Figura 130. Señal muestreada con el PX5.

Para poder comprender mejor como se realiza el muestreo de la señal, resulta necesario conocer las especificaciones técnicas que ofrece el módulo PX5, así como las oportunidades que ofrece el software DppMCA de AMPTEK, ya que, como se ha comentado, no solo realiza una visualización de los datos, sino que permite operar en todos los parámetros de funcionamiento del módulo.

### Características del módulo.

Dentro de los manuales de trabajo y funcionamiento del PX5, pueden encontrarse las distintas especificaciones técnicas del mismo. En este caso resulta interesante lo referente al procesado y análisis de la información.

Pulse Processor	
Gain Settings	Combination of coarse and fine gain yields overall gain continuously adjustable from 0.75 to 516.
Coarse Gain	28 log spaced coarse gain settings from x1 to x413
Fine Gain	Software selectable, 0.75 to 1.25, 10 bit resolution
Full Scale	1000 mV input pulse @ X1 gain
Gain Stability	<30 ppm/° C (typical)
ADC Clock Rate	20 or 80 MHz, 12 bit ADC
Pulse Shape	Trapezoidal or Cusp. (A semi-Gaussian amplifier with shaping time $\tau$ has a peaking time of $2.4\tau$ and comparable performance with a trapezoidal shape of the same peaking time.)
Peaking Time	Software selectable peaking times between 0.05 and 102 $\mu$ s, corresponding to semi-Gaussian shaping times of 0.02 to 43 $\mu$ s.
Flat Top	Software selectable values for each peaking time (depends on the peaking time), > 0.05 nsec.
Maximum Count Rate	With a peaking time of 0.2 $\mu$ s, 4 MHz periodic signal can be acquired.
Dead Time Per Pulse	1.05 times the peaking time. No conversion time.
Fast Channel Peaking Time	50, 100, 400 ns (80 MHz)
Fast Channel Pulse Pair Resolving Time	1.2 x Fast Channel Peaking Time (minimum of 80 nsec)
Pile-Up Rejection	Pulses separated by more than the fast channel resolving time and less than 1.05 x peaking time are rejected.
Baseline Restoration	Asymmetric, 16 software selectable slew rate settings
Dead Time Correction Displayed in Software	Manual correction based on Fast Channel measurement of ICR. Accurate to 1% for ICR < 1 Mcps under typical conditions.
Rise Time Discriminator (RTD)	The digital pulse processor can be programmed to select input pulses based on their rise time properties.
Gate	The gate input is used with external circuitry to determine if events should be included or excluded from the spectrum. The gate can be active high or active low (or disabled).

Figura 131. Tabla de características técnicas del Procesador de Pulsos PX5.

En las especificaciones técnicas del PX5, pueden elegirse picos con duraciones entre 0,05 microsegundos hasta los 102 microsegundos, a los que realiza un muestreo semi-gaussiano. De igual forma, se observa como es capaz de discernir pulsos de manera periódica con una frecuencia de 4 MHz, lo que garantizará poder trabajar con la señal de entrada del módulo X-ZLAB.

Cabe destacar, que el PX5 funcionando como un MCA puede disponer de un número de canales configurable. A su vez, dentro de este número de canales, pueden disponerse una parte de ellos para el tratamiento de señales rápidas, con pulsos de 50, 100 y 400 nanosegundos, funcionando a los 80 MHz.

<b>Multichannel Analyzer</b>	
Number of channels	256, 512, 1024, 2048, 4096, or 8192 channels.
Bytes per channel	3 bytes (24 bits) - 16.7M counts
Acquisition Time	10 msec to 466 days
Data Transfer Time	1k channels in 4.8 milliseconds (USB) or 35 milliseconds (Ethernet)
Conversion Time	None.
Presets	Time, total counts, counts in an ROI, counts in a channel

*Figura 132. Tabla de características técnicas del PX5 en modo multicanal.*

Esto hace que pueda discernir pulsos muy cercanos, acabando así con uno de los problemas que puede plantearse con la señal del módulo detector X-ZLAB, que a veces genera pulsos superpuestos.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

### Características del Software - DppMCA.

Teniendo en mente las especificaciones técnicas y los rangos en los que puede ajustarse el “shaping” de la señal, el siguiente paso es conocer el software de AMPTEK y ver cómo se configuran y ajustan los distintos parámetros del dispositivo.

Para poder operar con el software de AMPTEK DppMCA, resulta necesario encender el dispositivo PX5 y conectarlo vía USB al ordenador, ya que automáticamente, al abrir el programa, aparece el menú de conexión.

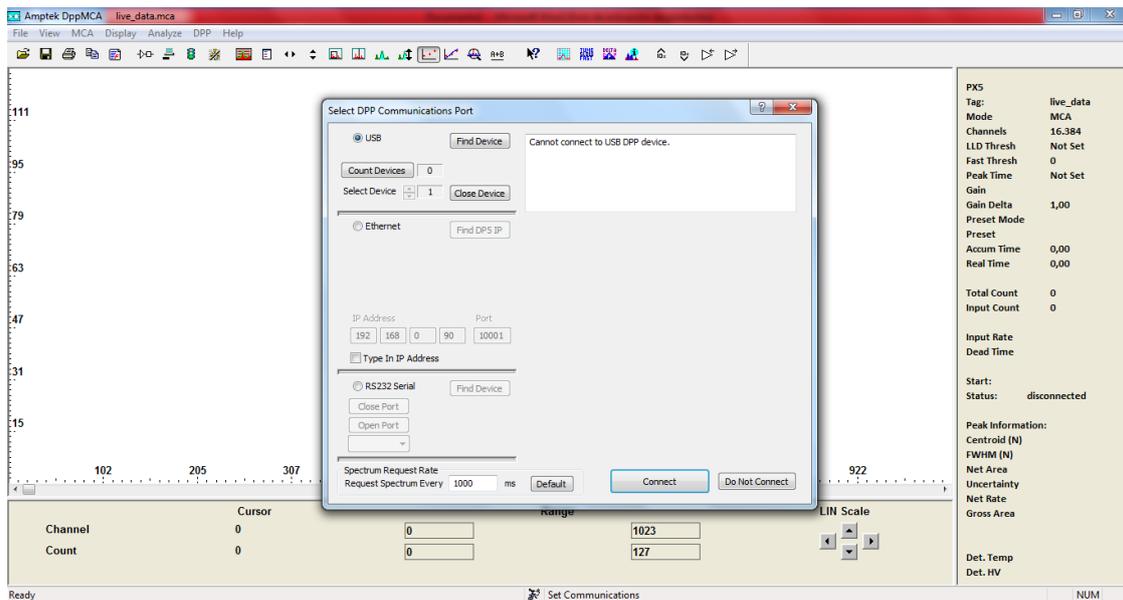


Figura 133. Pantalla de inicio al abrir el software DppMCA de AMPTEK.

Una vez ha sido encontrado el dispositivo, se selecciona y se conecta.

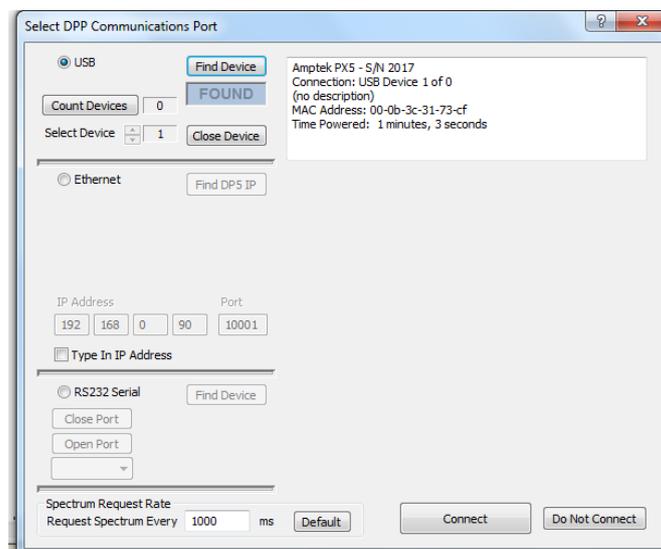


Figura 134. Menú de conexión de dispositivos del DppMCA.

Una vez conectado, el software empieza automáticamente a adquirir datos. Esta adquisición lo hace con una configuración que viene hecha por defecto. Lo más cómodo en este caso es parar la adquisición y abrir el menú de configuración, para poder así configurar la tarjeta PX5 a la adquisición que quiera realizarse.



Figura 135. Barra de herramientas DppMCA: Configuración y adquisición.

Una vez abierto el menú de configuración pueden cargarse archivos de configuración guardados con anterioridad. De igual forma, los detectores comerciales de AMPTEK traen un archivo previamente configurado para poder cargarlo directamente.

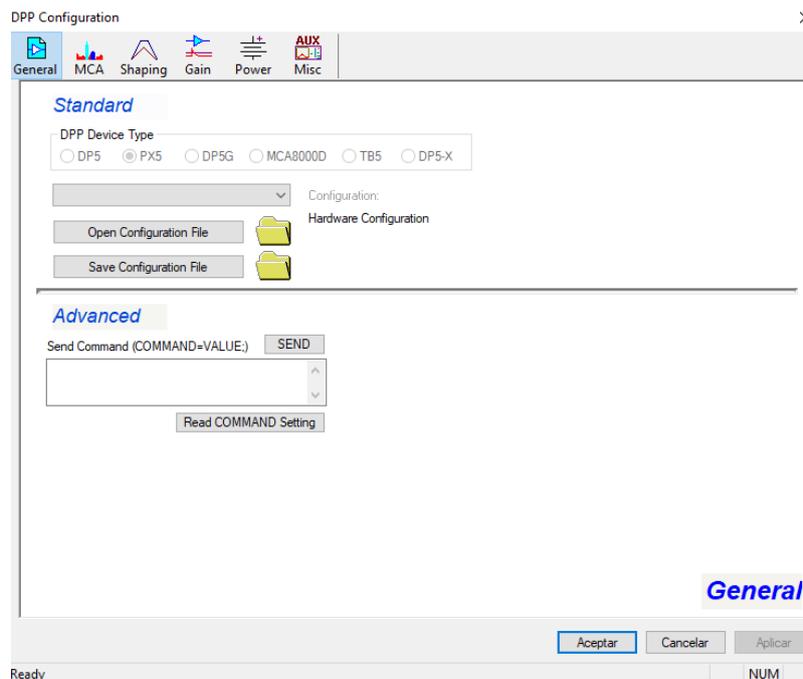


Figura 136. Menú configuración DppMCA: General.

De cualquiera de las maneras, pueden configurarse todos los parámetros desde el momento inicial.

El primer menú, el referente al MCA, permite modificar los parámetros de funcionamiento del analizador multicanal, pudiendo elegirse el número de canales con el que se quiere trabajar, a partir de que canal se quieren iniciar las cuentas, la configuración de un threshold o el tiempo de duración de la adquisición

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

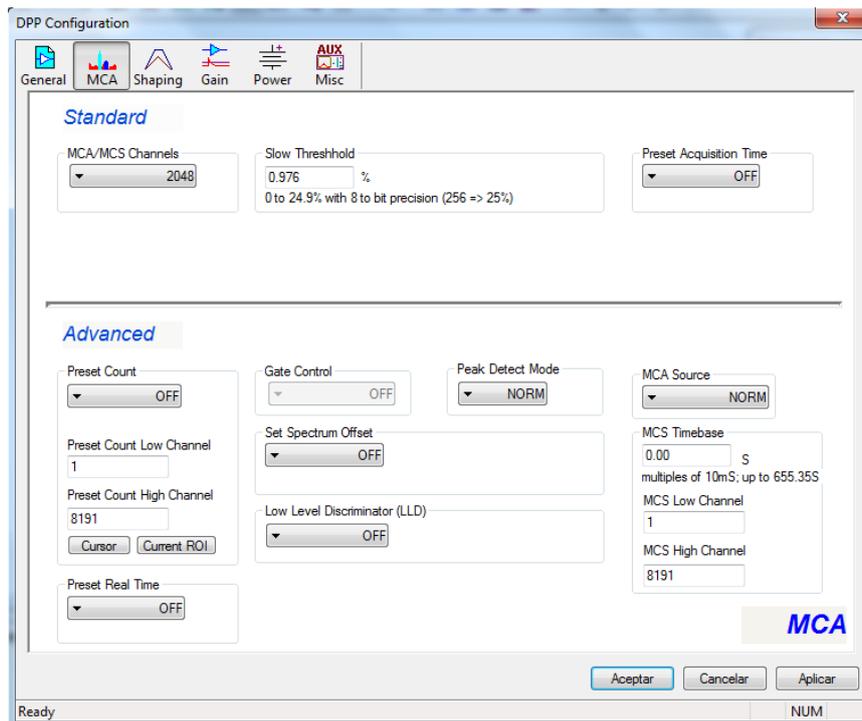


Figura 137. Menú configuración DppMCA: Multicanal.

El siguiente menú es el más importante para la aplicación que ocupa el presente proyecto, ya que modifica todos los parámetros relativos al muestreo, o shaping, de la señal.

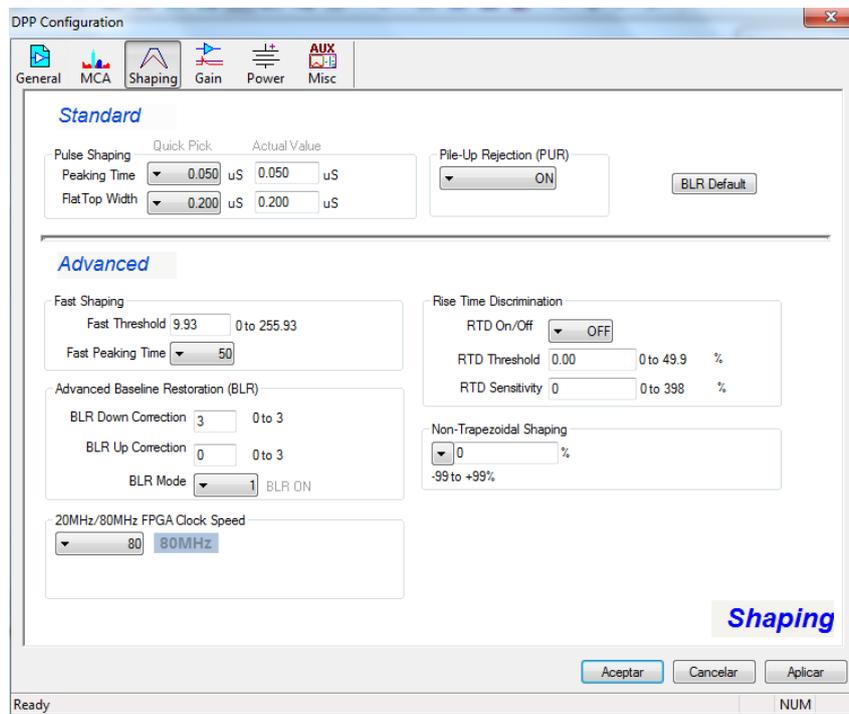


Figura 138. Menú configuración DppMCA: Shaping.

La modificación del peaking time o del flat top width modifica la duración del pico y el tiempo de ancho del pico del pulso. Elegir estos parámetros es importante, ya que, si se elige un tiempo muy elevado y las señales son muy cortas, se produce una pérdida importante de información.

Por el contrario, si se eligen tiempos de muestreo muy pequeños con señales de entrada largas, se hará trabajar de más al analizador.

Las siguientes imágenes muestran la señal de salida del módulo detector de X-ZLAB frente a una señal de muestreo configurada con distintos parámetros.

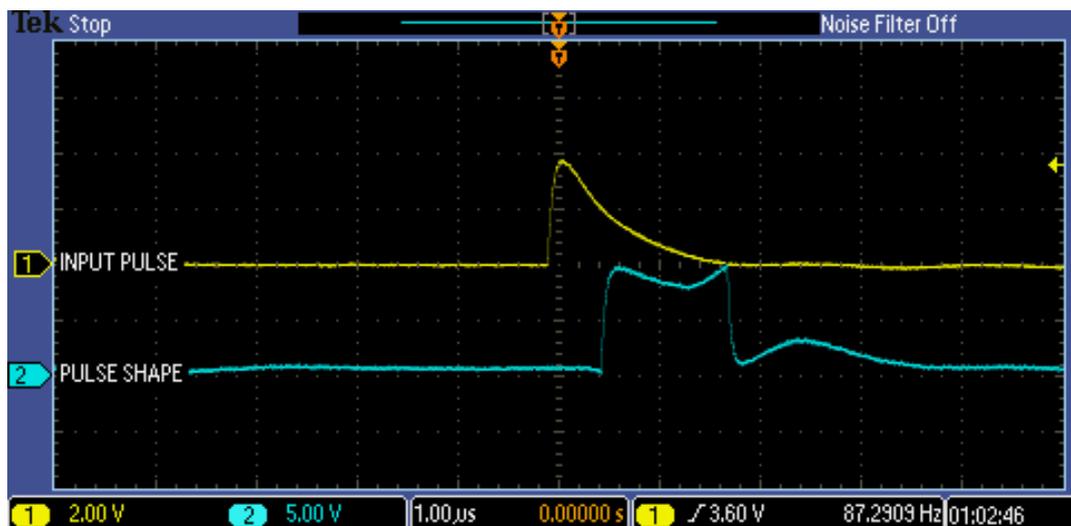


Figura 139. Señal del PX5 tras el shaping con un 'peaking time' de 1 ms y flat de 0,37  $\mu$ s.

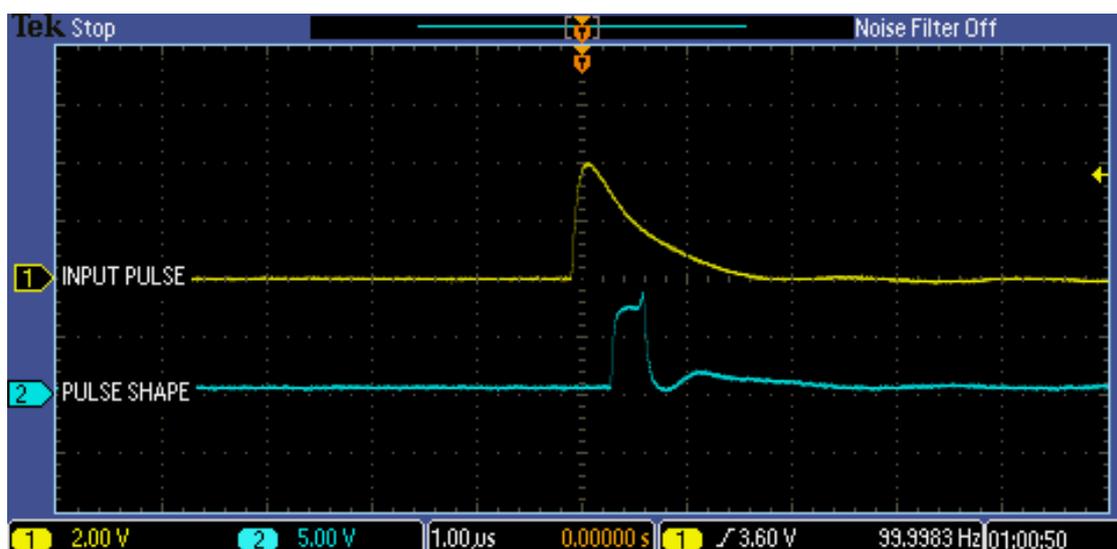


Figura 140. Señal del PX5 tras el shaping con un 'peaking time' de 0,05  $\mu$ s y flat de 0,2  $\mu$ s.

Otro de los parámetros que permite configurar el menú es el de la Ganancia, a través del menú “Gain”

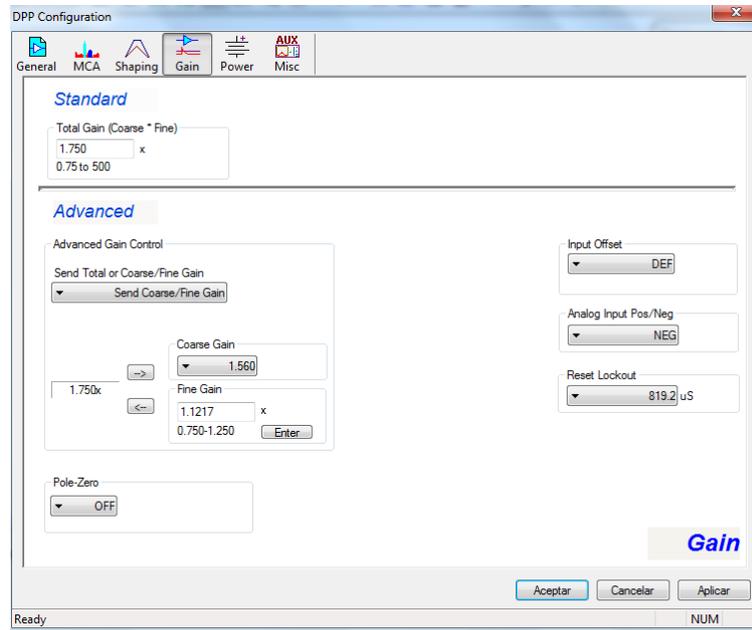


Figura 141. Menú configuración DppMCA: Ganancia.

En el caso de disponer de un detector bien caracterizado, como pueden ser los modelos de AMPTEK, puede configurarse manualmente con el menú de manera rápida y sencilla.

Resulta más aconsejable ajustarla manualmente utilizando el funcionamiento Delta. Dicho modo de funcionamiento representa en pantalla el número de cuentas en cada segundo.

La configuración puede realizarse directamente en la barra de tareas del programa, para ello se selecciona el “Delta mode” y posteriormente se aumenta o disminuye el valor de la ganancia, de manera que visualmente la señal de salida quede con la resolución buscada y en el eje horizontal quede bien representada.



Figura 142. Barra de herramientas DppMCA: Delta Mode y Configuración de la ganancia.

En este caso, se ha realizado el ajuste buscando que el espectro que devuelva el software siga una tendencia similar a la fuente con la que se trabaje en ese momento.

Por último, para el presente proyecto no resulta de gran utilidad presentar el menú “power”, ya que no va a alimentarse el detector con el módulo PX5, sin embargo, si resulta interesante presentar el menú auxiliar.

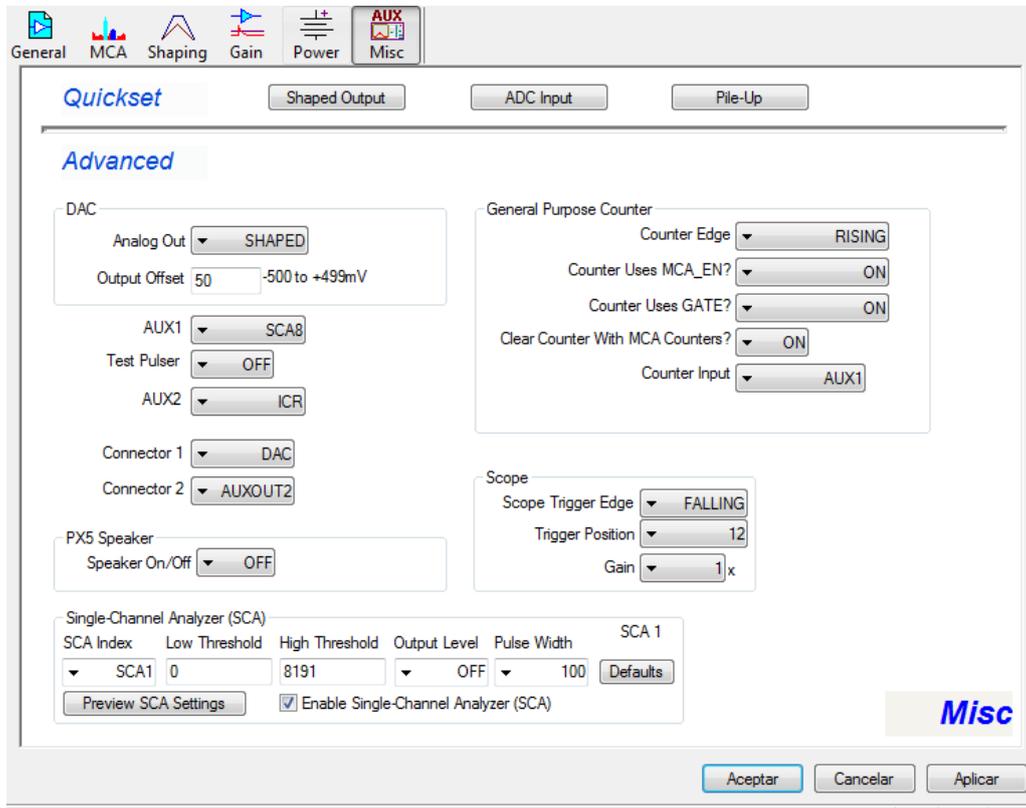


Figura 143. Menú configuración DppMCA: Señales auxiliares.

Dicho menú ofrece la posibilidad de configurar las señales que quieran mostrarse por los canales auxiliares del PX5. Dichas señales vienen explicadas y caracterizadas en cualquier manual editado por AMPTEK sobre el PX5.

Resulta de interés la señal ICR, que muestra cuando tiene lugar una cuenta en el módulo PX5. Por ejemplo, la siguiente gráfica muestra en amarillo el pulso que devuelve el módulo X-ZLAB, en azul la señal del shaping y en violeta muestra como al finalizar el shaping realiza una cuenta.

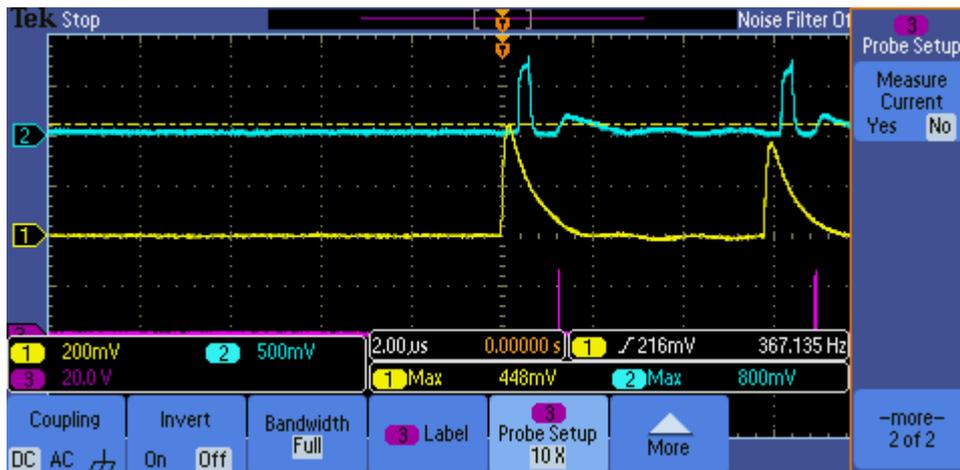


Figura 144. Visualización señal auxiliar de detección de shaping e incremento de cuentas.

Por último, fuera de las opciones de configuración, merece la pena mencionar dos funcionalidades del software DppMCA.

La primera es la opción de crear regiones de interés, en las que manualmente se introduce un intervalo de canales, y devuelve información entorno al mismo.



Figura 145. Barra de herramientas DppMCA: Crear ROI.

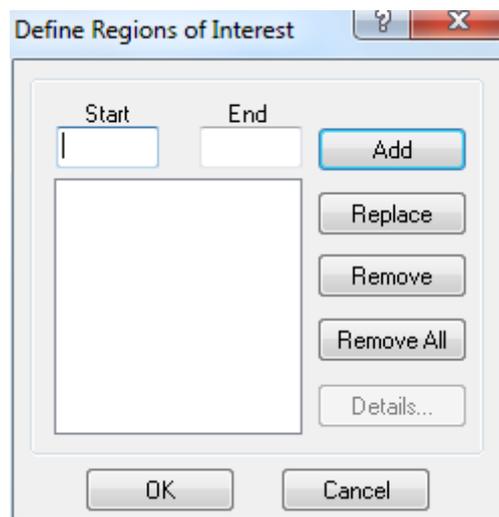


Figura 146. Menú de creación de ROI DppMCA.

La información que devuelve el software sobre las distintas regiones de interés permite añadirla a un menú de calibración, de manera que al introducir el canal que ocupa el máximo valor de la región de interés, para así asignar a los canales los niveles de energías:

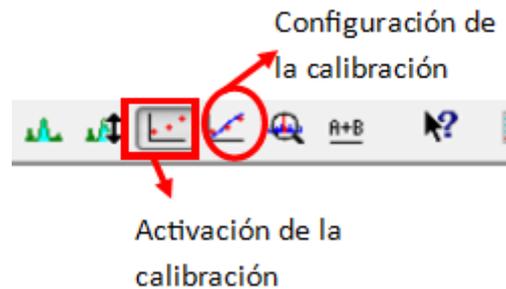


Figura 147. Barra de herramientas DppMCA: Configuración y activación de la calibración.

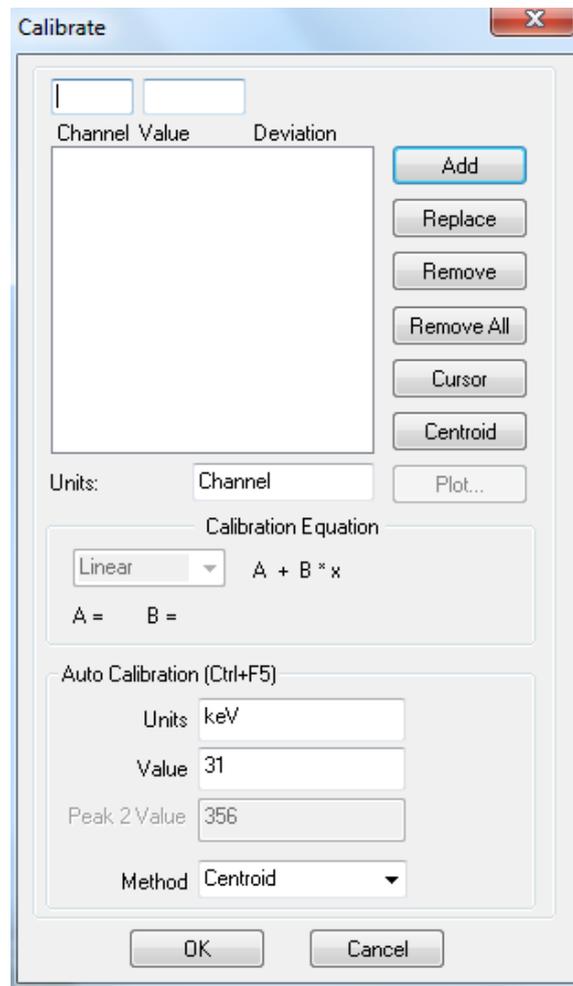


Figura 148. Menú de Calibración DppMCA.

Con toda la información vista hasta el momento de la herramienta software, ya se está en disposición de establecer una configuración para realizar una adquisición. En este caso, los parámetros los configuraremos de la siguiente forma:

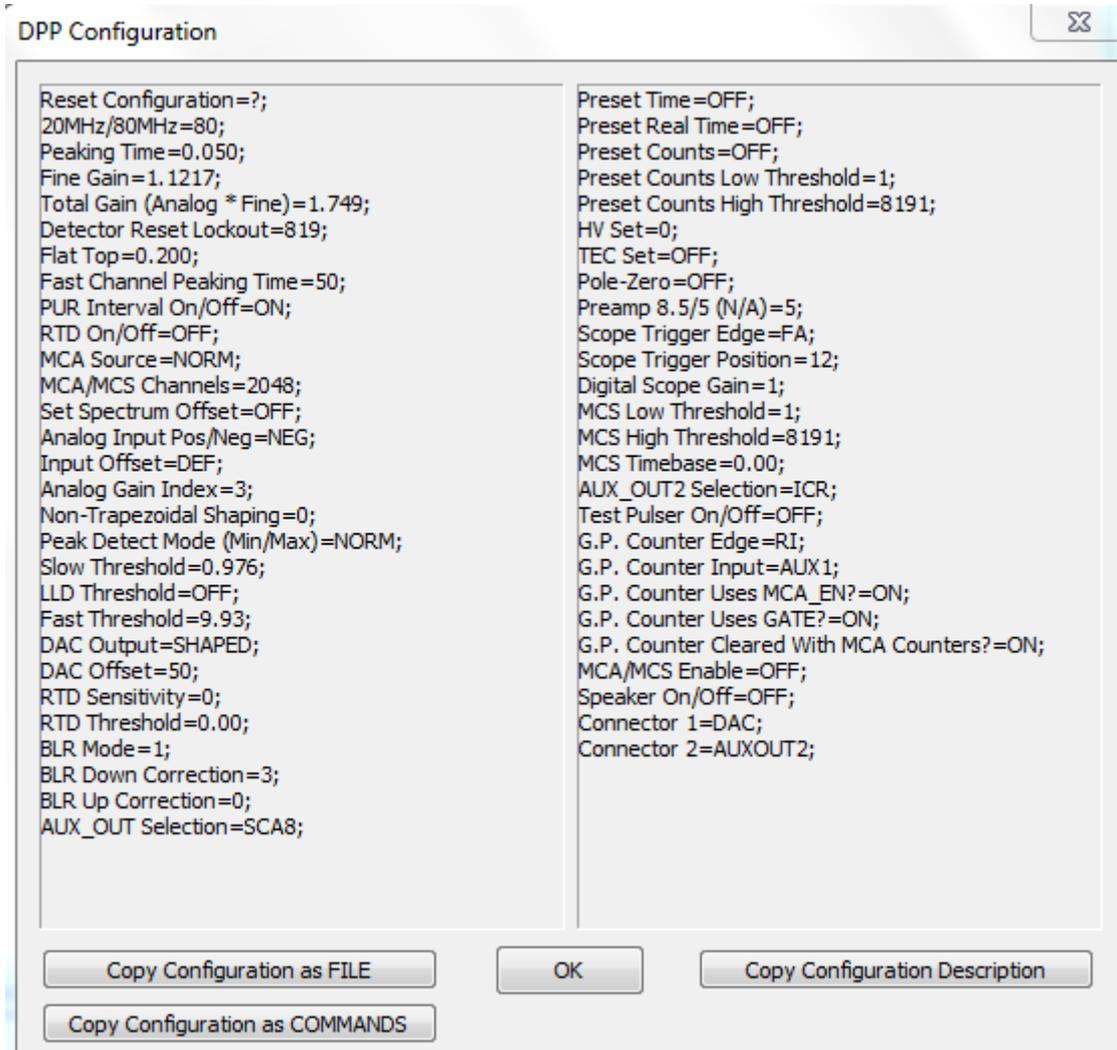


Figura 149. Parámetros de configuración del DppMCA.

### ***Espectros obtenidos.***

Una vez realizada la configuración tal y como se ha mostrado en el punto anterior, se comienzan a realizar distintas mediciones con una fuente de Ba-133. Previsiblemente se deberían visualizarse picos de energía a 30, 81 y 356 keV.

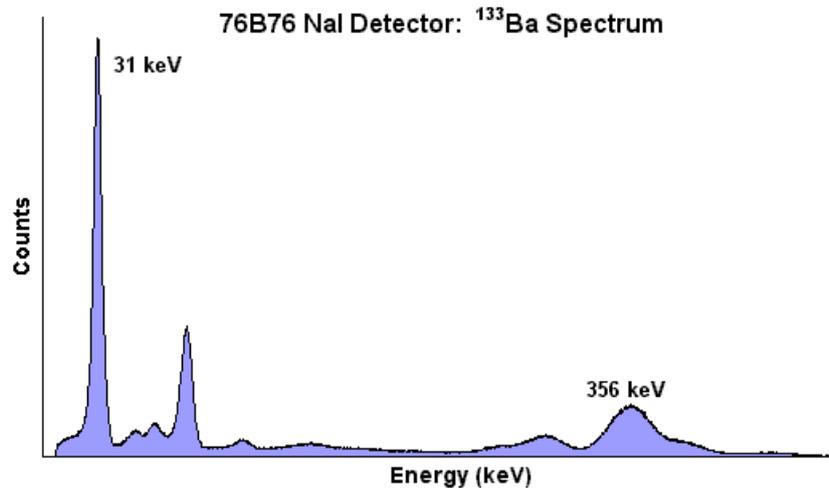


Figura 150. Espectro energético del Ba-133.

Se realizan unas primeras mediciones con una duración programada de 18 segundos y una alimentación de entrada de 5 voltios, se obtienen los siguientes resultados:

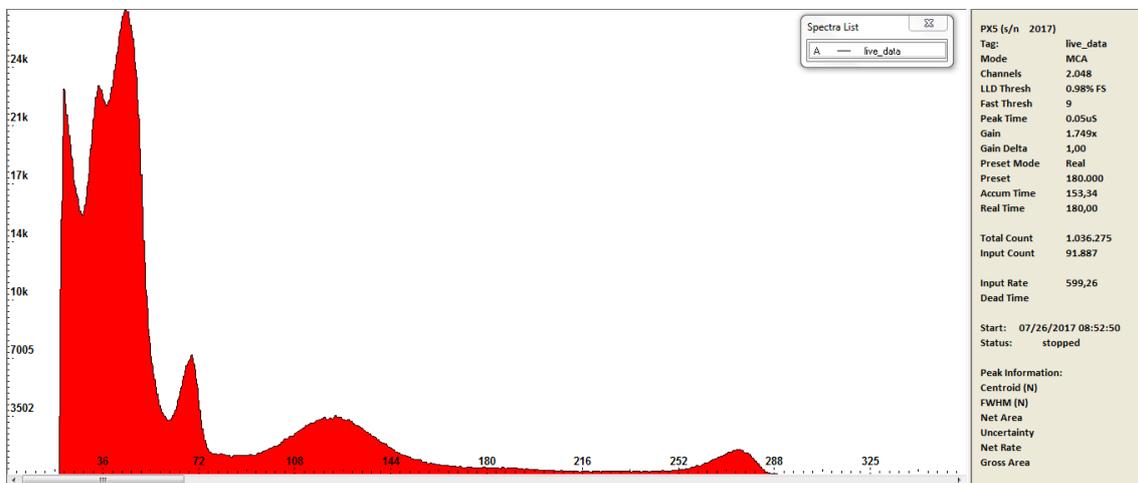


Figura 151. Espectro obtenido con alimentación de 5V, 25° C y fuente de Ba-133

Dicha medición es realizada con 5 Voltios de alimentación y con una temperatura ambiente de 25° C. En dicho espectro se realizan distintas observaciones:

- Se observa un número de cuentas muy elevadas en los canales iniciales, lo que hace sospechar que existe un ruido muy elevado.

- Más allá de los canales iniciales, se pueden observar dos picos significativos en el entorno de los canales 120 y 250, lo cual pueden ser picos de energía gamma del Bario.
- Se produce un corte en el número de cuentas entorno al canal 300. Debe considerarse que la amplitud de los pulsos es muy pequeña, por lo que es normal que no ocupe todo el eje horizontal.

Para mejorar el espectro, se persigue la eliminación del ruido. A continuación, se realiza una medición quitando la fuente de Ba-133 del módulo detector, y se observa lo siguiente:

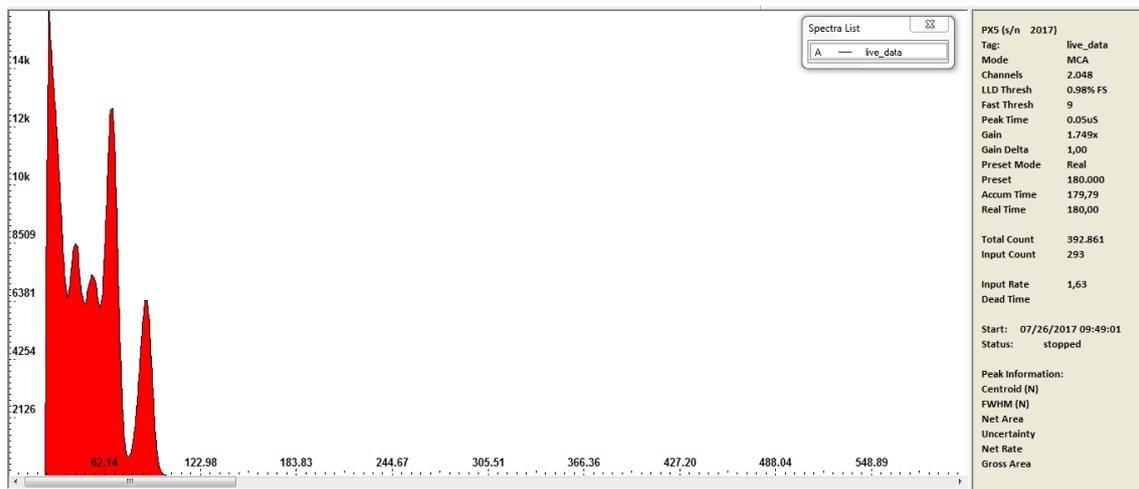


Figura 152. Espectro obtenido con alimentación de 5V, 25° C y sin fuente.

Existe un alto número de cuentas en los primeros canales, lo cual distorsiona el espectro obtenido. Dada esta situación se buscan dos soluciones para mitigar este efecto: trabajar a temperaturas más bajas y buscar cual es la alimentación más adecuada para el módulo.

Como una primera prueba se opta por desconectar el módulo detector del circuito de alimentación y leerlo e introducirlo en un congelador para así realizar mediciones con el cristal y el SiPM en frío.

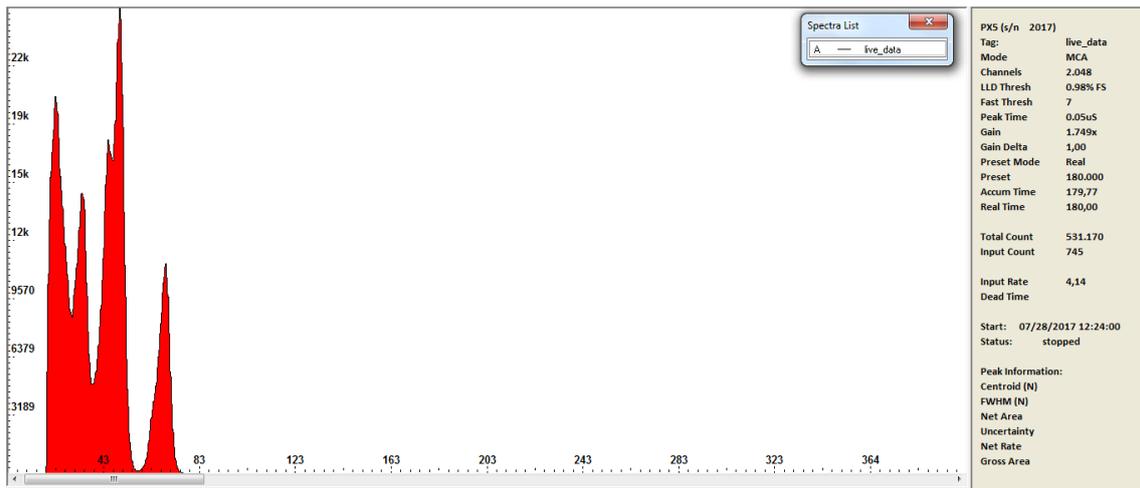


Figura 153. Espectro obtenido con alimentación de 5V, baja temperatura y sin fuente.

Tras una primera medición se observa que la opción de trabajar a temperaturas bajas no sirve para solucionar las cuestiones relativas al ruido, ya que, aunque el espectro cambia, en una medición de 180 segundos sin la presencia de una fuente en el módulo detector, se observa que sigue existiendo un número elevado de cuentas.

Dado el desigual resultado conseguido con la opción de enfriar el cristal, se opta por utilizar una fuente de alimentación variable y realizar mediciones sin fuente a distintos voltajes de alimentación, obteniendo los siguientes resultados:

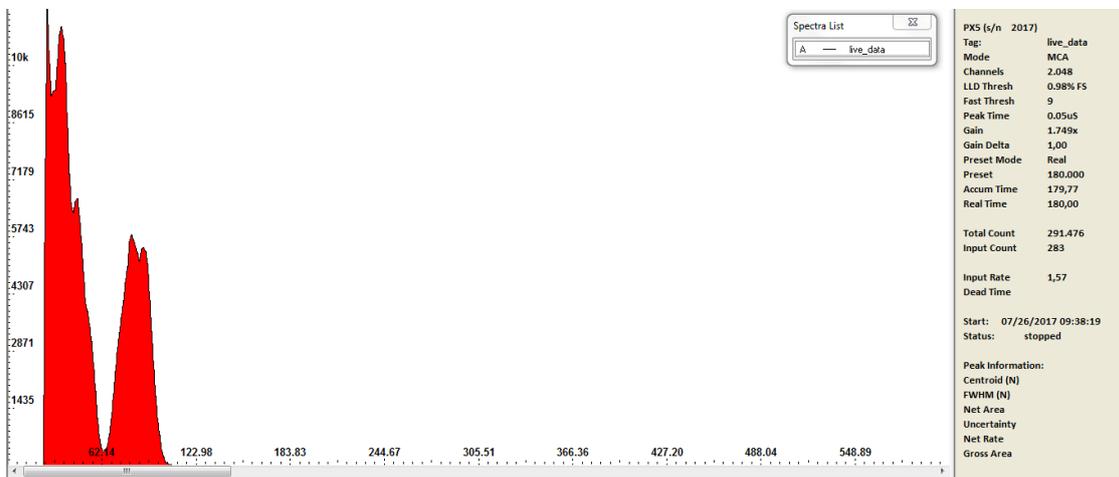


Figura 154. Espectro obtenido con alimentación de 6.5V, 25° C y sin fuente.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

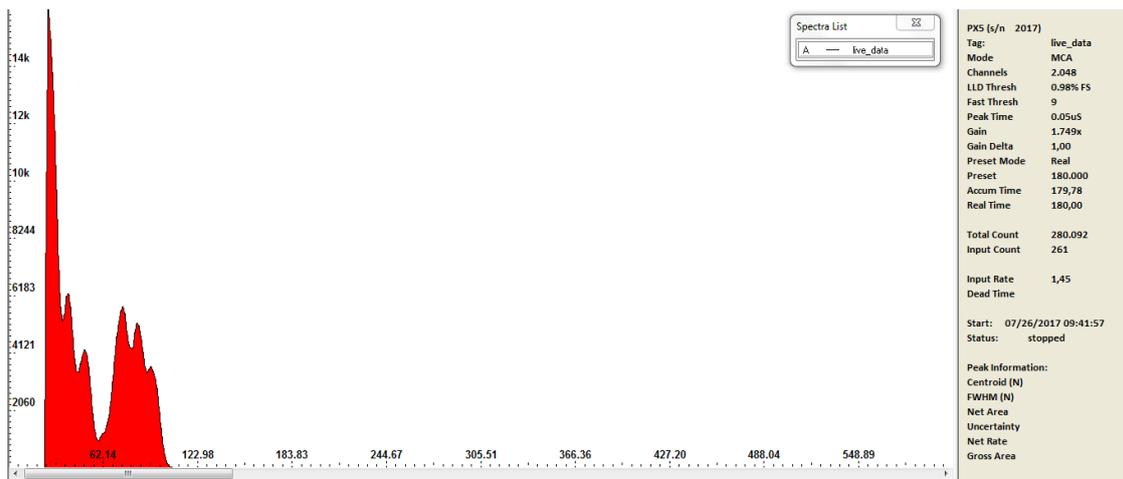


Figura 155. Espectro obtenido con alimentación de 6V, 25° C y sin fuente.

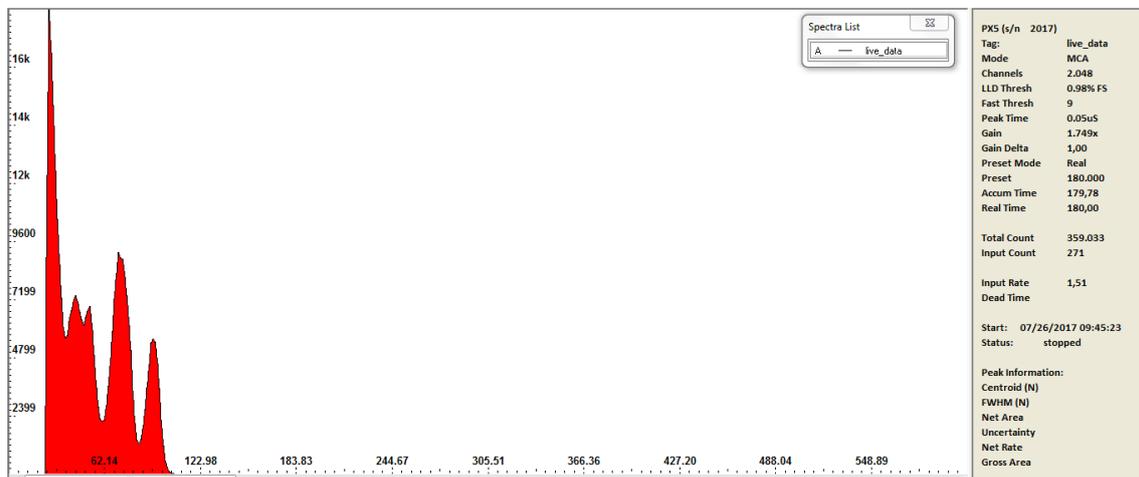


Figura 156. Espectro obtenido con alimentación de 5.5V, 25° C y sin fuente.

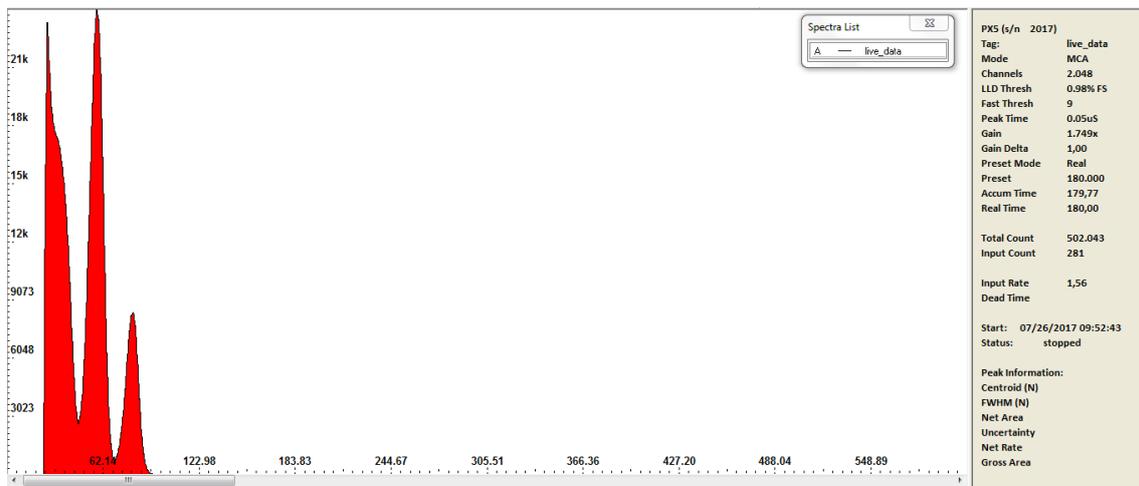


Figura 157. Espectro obtenido con alimentación de 4.5V, 25° C y sin fuente.

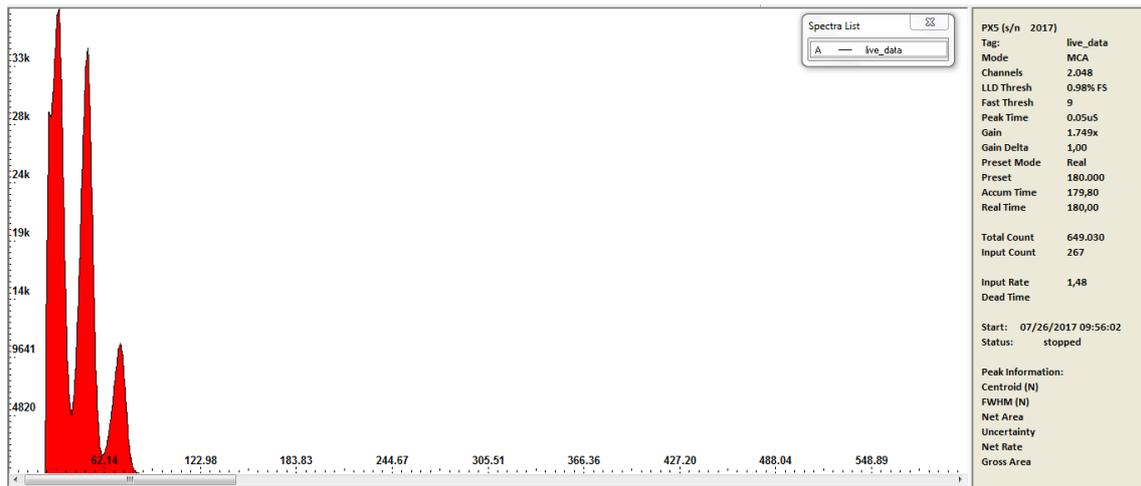


Figura 158. Espectro obtenido con alimentación de 4V, 25° C y sin fuente.

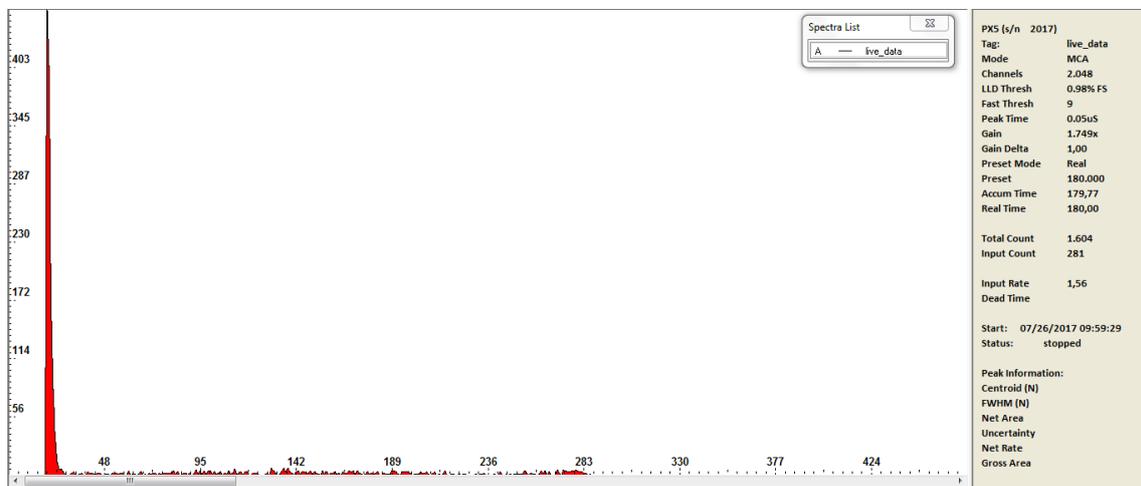


Figura 159. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y sin fuente.

Por tanto, puede observarse como a medida que se disminuye la tensión de alimentación del módulo X-ZLAB decrece el ruido en los canales iniciales del espectro obtenido con la tarjeta PX5 de AMPTEK.

Una vez realizada esta comprobación, se vuelve a colocar la fuente de Ba-133 junto al módulo detector, esta vez con una alimentación de 3,5 voltios, obteniéndose el siguiente espectro:

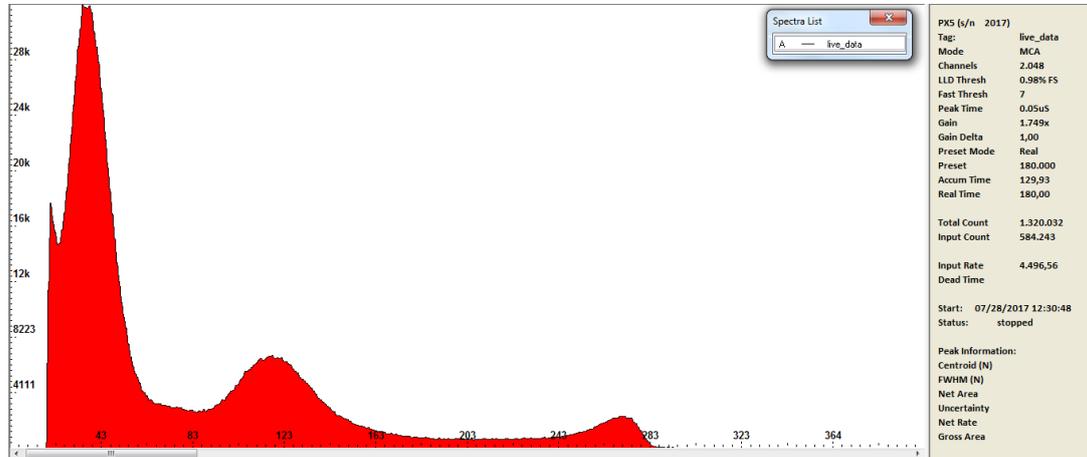


Figura 160. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y fuente de Ba-133.

Pueden distinguirse tres picos de energía muy concretos, y además, se puede observar claramente como hay un pico inicial de ruido, el cual se ha observado en el espectro realizado sin fuente

Para ver si el espectro obtenido tiene veracidad, se utilizará otra fuente radiactiva, observando cuál es el cambio que sufre la representación gráfica. Se utilizará una fuente de estroncio Sr-90.

El resultado obtenido con el módulo X-ZLAB alimentado con 3,5 voltios y la tarjeta PX5, es el siguiente:

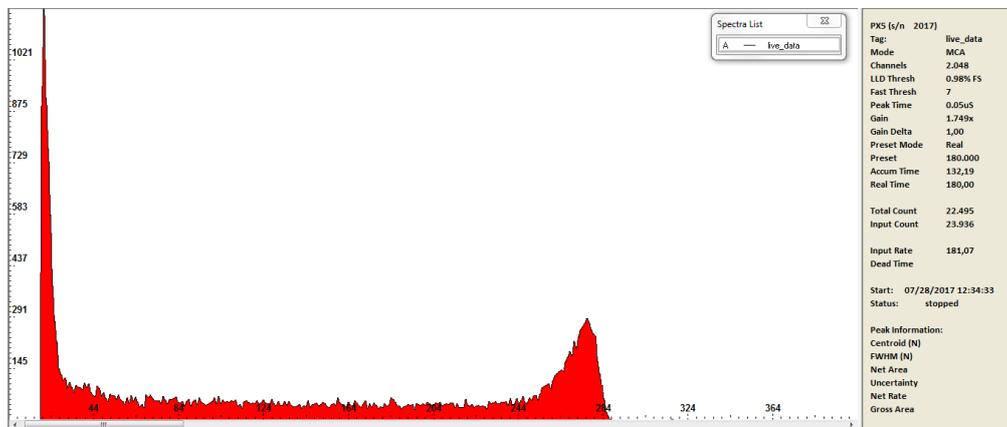


Figura 161. Espectro obtenido con alimentación de 3.5V, 25° C y fuente de Sr-90.

La fuente de Sr-90 no es una de las mejores para visualizar energías gamma, pero dentro de las disponibles en el CLPU, tras la de Ba-133, es la más favorable.

### **Conclusiones del módulo PX5**

Con todas las mediciones y trabajos realizados con la tarjeta PX5 hasta el momento, hay información suficiente para sacar unas primeras conclusiones sobre el prototipo de espectrómetro desarrollado.

En primer lugar, puede afirmarse que se ha conseguido realizar un espectrometro aprovechando las herramientas disponibles, sacándole partido a los recursos existentes sin necesidad de adquirir nada nuevo. Frente a esto, debe mencionarse que la utilización de recursos existentes ha lastrado en el tiempo de desarrollo, alargándolo más de lo deseable, ya que ha resultado necesario realizar muchas pruebas y ajustes para acoplar bien los distintos elementos.

Con todo ello, ya se dispone de un primer prototipo para poder probar la respuesta de la tecnología de detección de centelleo y fotomultiplicadores de silicio en un sistema láser de alta potencia. Es precisamente este tipo de pruebas las que van a validar o no el prototipo, ya que los espectros realizados hasta ahora con las fuentes exentas solo han indicado que la tecnología responde correctamente a fuentes radiactivas convencionales.

Una de las cuestiones a mejorar es la resolución que ofrece el prototipo, siendo conveniente estudiar la posibilidad de introducir un circuito de amplificado a la entrada de la tarjeta de adquisición PX5, de manera que pueda mejorar la resolución del histograma que realiza, y además, se aprecien mejor las bajas energías.

La posibilidad de incluir un circuito de amplificado o no vendrá marcada por la respuesta del detector frente al sistema láser VEGA, ya que presumiblemente este generará energías más altas, con lo que puede no ser necesario amplificar las señales con el fin de distinguir niveles bajos, aunque si puede ser una herramienta útil para mejorar la resolución del espectro.

Con todo ello, resulta necesario realizar un pequeño desarrollo mecánico que albergue el módulo X-ZLAB y que permita la conexión y operación en las cámaras de trabajo del sistema láser.

A continuación se mostrará una propuesta de desarrollo, así como se plantearán las cuestiones relativas a una campaña de medición con el sistema VEGA que sirva para validar o no el primer prototipo. De igual manera se plantearán las distintas

consideraciones para tener en cuenta en lo relativo a la compatibilidad electromagnética, que jugará un importante papel en las pruebas que realicemos.

## **11.Desarrollo mecánico del prototipo.**

Para poder trabajar de manera cómoda y compacta con el detector, se desarrollará un prototipo mecánico para la carcasa en la que se instalarán las distintas conexiones para la alimentación del módulo y la lectura de los datos.

En el caso de la lectura de los datos, el módulo utiliza un conector de tipo BNC. Para la alimentación del módulo podemos añadir el tipo de conector que deseemos, dado que disponemos de los dos cables para soldar el conector.

Como veremos en el próximo punto, en el que se prepararán las cuestiones relativas a la experimentación el sistema VEGA, las comunicaciones entre el interior y exterior de la cámara de experimentación se realizan a través de conectores BNC, por lo que se instalará un BNC para la alimentación.

Con todo ello, se propone para el diseño realizar una pequeña caja con una tapadera, en la que se realicen las aberturas necesarias para los conector BNC y un pequeño saliente en el que se dispondrá el módulo detector.

Para el diseño, se utilizará el programa SOLIDWORKS, ya que es el programa de diseño utilizado en el CLPU, entre otras cosas porque a partir de él pueden mecanizarse las piezas con la máquina herramienta de la que dispone el centro.

Para empezar, se realizará la primera pieza, consistente en la caja contenedora que albergará el detector:

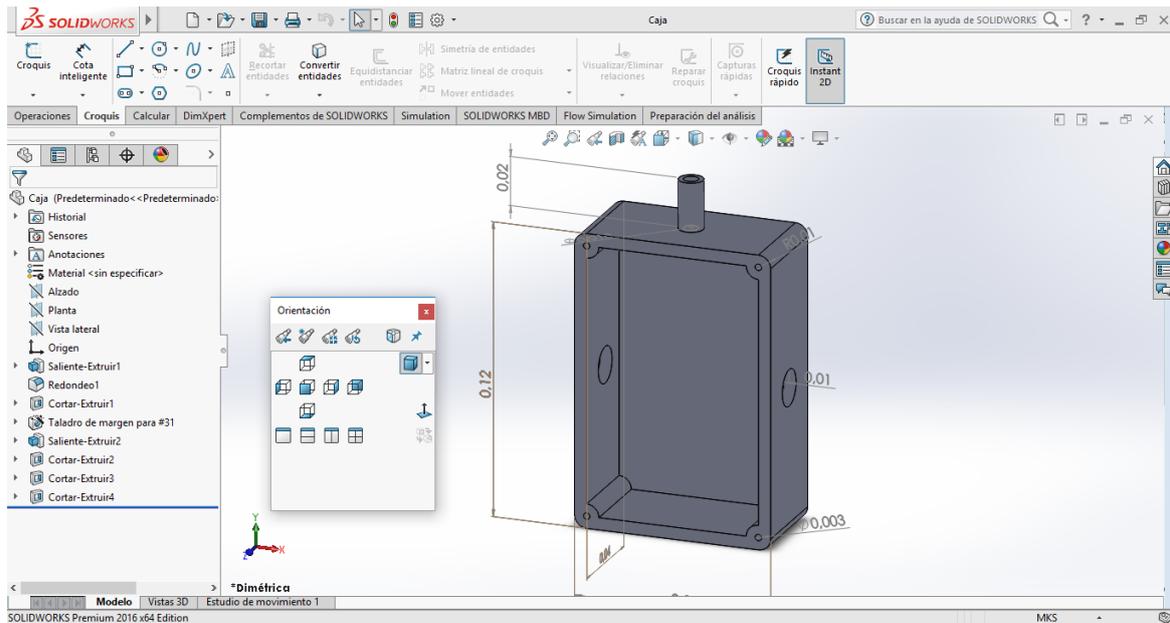


Figura 162. Diseño en SolidWorks de la caja del elemento detector.

A continuación, se diseñará la tapadera para la caja, cuidando especialmente las dimensiones, para que posteriormente encajen los taladros.

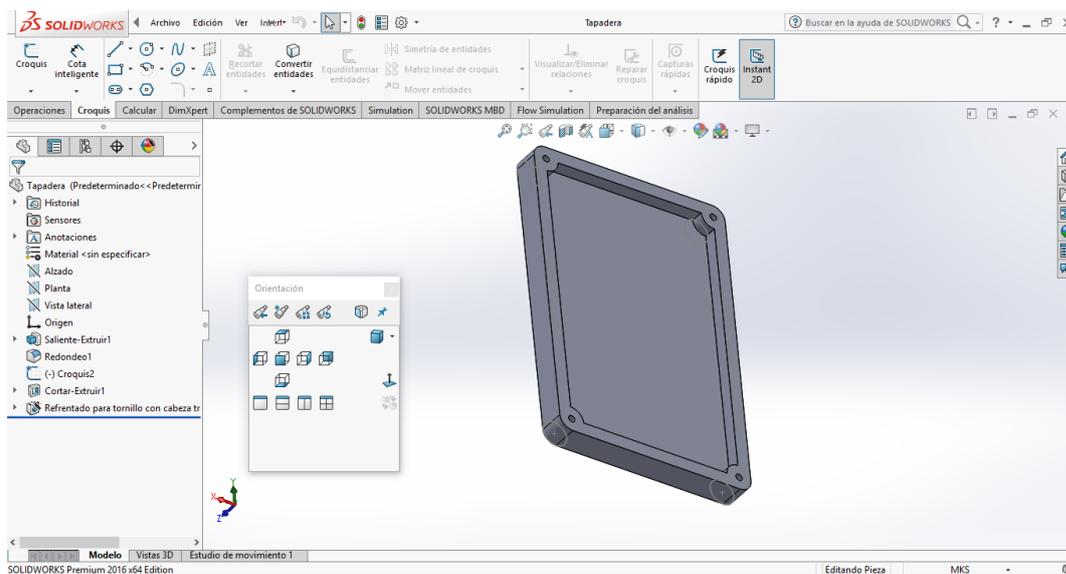


Figura 163. Diseño en SolidWorks de la tapadera del elemento detector.

La tapadera dispondrá de un pequeño vaciado para así poder colocar un material aislante que sirva para proteger tanto eléctricamente, como de los posibles impactos. Dicho material puede ser una capa de poliespán de un par de milímetros.

Finalmente, se genera un ensamblaje de ambos componentes en SOLIDWORKS para comprobar así el ajuste de ambas piezas.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

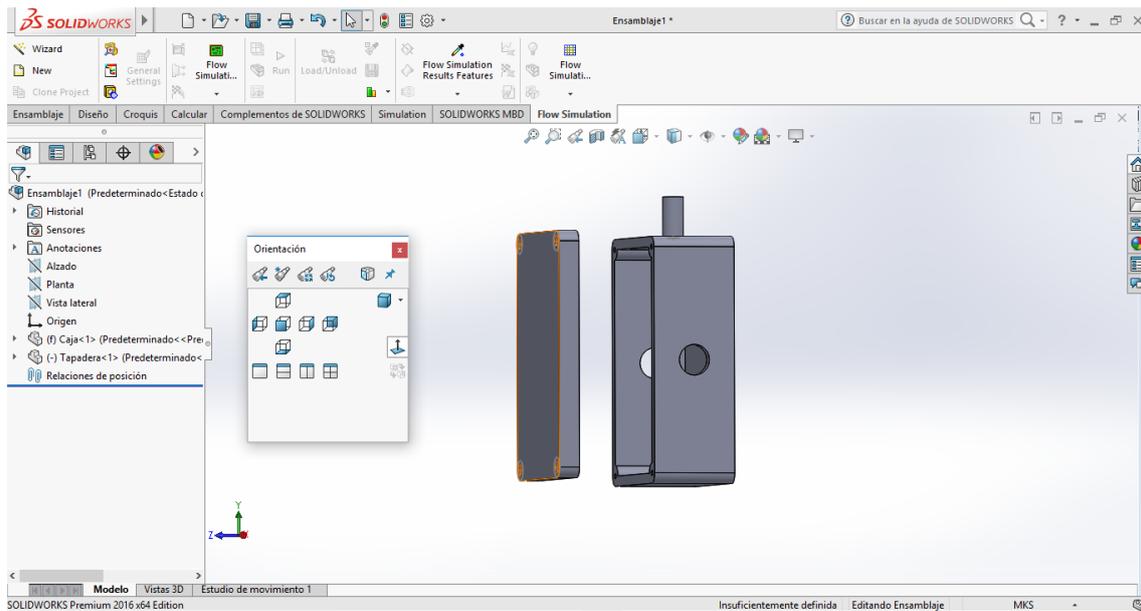


Figura 164. Diseño en SolidWorks del ensamblaje de la carcasa del elemento detector.

La propuesta de diseño prevé que la caja esté compuesta por un material metálico, como pudiera ser el aluminio, dado su precio y su fácil mecanizado por parte de la máquina herramienta del Centro.

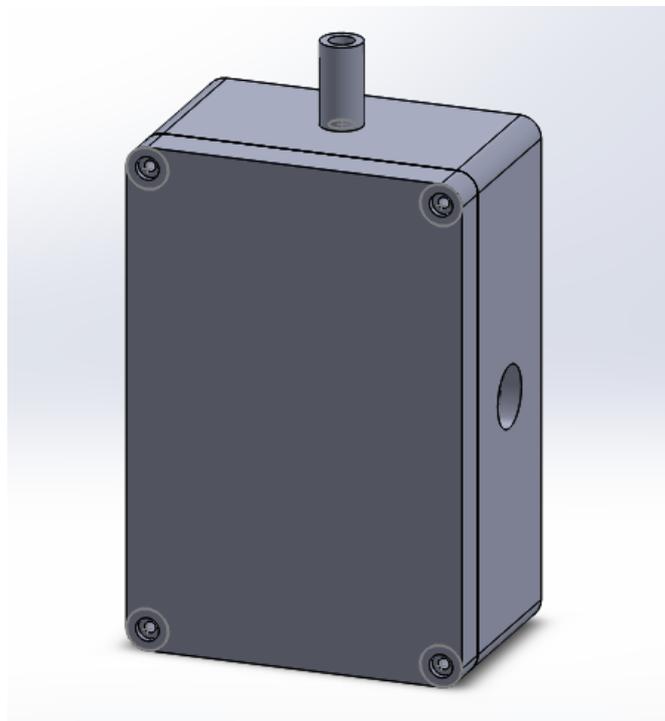


Figura 165. Vista del diseño de carcasa del elemento detector.

Finalmente, en los anexos del presente proyecto se adjuntan los planos detallados del diseño.

## **12. Líneas de trabajo futuras.**

Una vez se dispone de un primer prototipo, hay por delante una serie de retos los cuales deben planificarse previamente. El primero de ellos es el de ajustar el prototipo para su uso en una fuente láser, lo cual puede dar un resultado totalmente distinto a lo obtenido hasta ahora.

También deben considerarse algunos efectos secundarios que puede sufrir el módulo detector durante los trabajos de medición en el láser VEGA, como es el fenómeno del pulso electromagnético, del cual se hablará a continuación. Aunque no exista mucha información al respecto y no haya desarrollado trabajos muy profundos en el CLPU sobre el tema, pondremos sobre la mesa algunas líneas de actuación.

Por último, con toda la experiencia ganada a lo largo del desarrollo del presente prototipo, se abre la posibilidad de desarrollar un detector propio, de manera que con las herramientas de CLPU y los conocimientos adquiridos, se seleccionen centelladores y SiPM que mejor se ajusten a las fuentes láser, construyendo un detector desde cero totalmente a medida. Al final de este trabajo se darán unas pinceladas para realizar dicho desarrollo.

### **12.1. Plan de medidas en el láser VEGA.**

El objetivo final del detector desarrollado es el de ser testeado con un sistema láser de alta intensidad, observando cuál es su nivel de respuesta energética, y de igual forma, validando su respuesta temporal, ya que no puede olvidarse que, con pulsos de disparo del orden de femtosegundos, los detectores convencionales ofrecen varias limitaciones.

Hasta el momento no ha sido posible realizar ningún tipo de pruebas en el sistema VEGA del CLPU debido a que en los últimos meses se ha estado trabajando en la instalación y puesta a punto de dicho sistema.



Figura 166. Recorte de prensa del anuncio de puesta en marcha de VEGA-2.

Justo cuando terminaban dichos trabajos, desde la dirección del CLPU se lanzó la primera llamada a usuarios, para que aquellos sectores que lo deseen ya fueran científicos o industriales, pudieran solicitar la utilización del sistema VEGA, todo ello contando con el soporte científico y técnico del personal del centro.



CLPU – Centro de Láseres Pulsados  
Edificio M5, Parque Científico de la USAL  
C/ del Adaja, 8. 37185 Villamayor, Salamanca. SPAIN  
Tel: (+34) 923 338 121  
Fax: (+34) 923 338 134  
[www.clpu.es](http://www.clpu.es)

**RESOLUTION OF THE DIRECTOR OF THE CONSORTIUM FOR THE DESIGN, CONSTRUCTION, EQUIPMENT AND EXPLOITATION OF THE SPANISH PULSED LASERS CENTER (CLPU), DATED 30 MARCH 2017, IN WHICH THE REGULATORY BASES OF THE FIRST CALL FOR ACCESS TO THE VEGA LASER SYSTEM ARE APPROVED.**

**1 Aim of the Call**

The following terms aim to regulate the conditions for the access of researchers from Spanish or foreign institutions, whether public or private, to the VEGA Laser System, to develop scientific experimental proposals and public or public-private collaborative projects, as well as the beam time allocation to the aforementioned.

To this end, the CLPU will consider as scientific experimental proposals those whose results may be published and disseminated, thus becoming part of scientific literature.

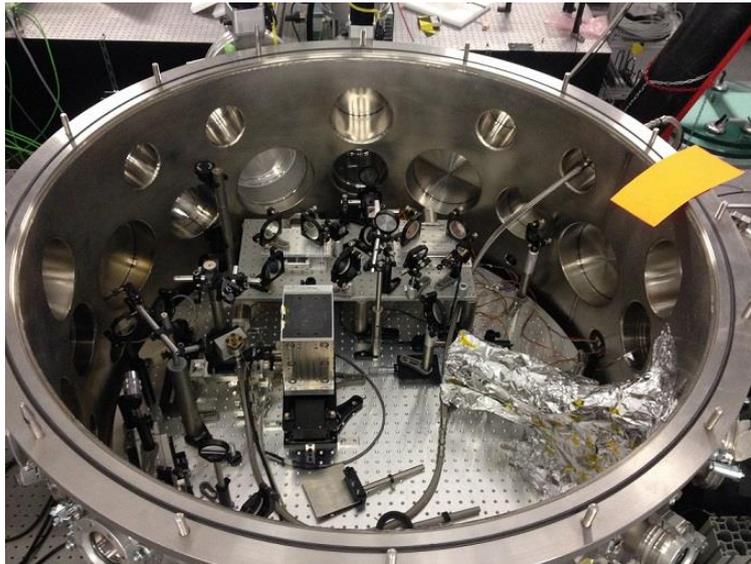
Similarly, the CLPU will consider as public or public-private collaborative projects those resulting from an agreement signed by the CLPU and other public or private institutions for the development of an experiment of common interest for both parties.

Those applications containing commercial or industrial proposals in which the participating researchers will use the results in a confidential manner, thus not willing to publish and disseminate the achieved results in scientific literature due to commercial purposes will be excluded from this call for access. In such cases, an appropriate contract will have to be signed with the CLPU.

Figura 167. Llamada a usuarios para el sistema VEGA-2.

Se espera que en los próximos meses la dirección del centro resuelva las numerosas solicitudes que se han realizado, pudiendo llevarse a cabo simultáneamente varios experimentos siempre que sean compatibles. De esta manera, aprovechando la puesta en marcha del sistema VEGA puede realizarse una campaña de validación del prototipo.

El principal condicionante que va a encontrarse es que hay que adaptarse al experimento principal que vaya a realizar el usuario, teniendo que ubicar el dispositivo en los espacios de la cámara que queden en libres durante el experimento.



*Figura 168. Cámara de experimentación sistema VEGA.*

La información sobre el experimento estará disponible con tiempo suficiente como para hacer una buena planificación, dado que en la solicitud a completar por los usuarios deben completarse información y esquemas del experimento.

Una vez esté planificada la ubicación del dispositivo, el siguiente paso es habilitar las conexiones del dispositivo con el exterior de la cámara, para lo cual se utilizará un dispositivo de conexiones BNC acoplado a la cámara de vacío, denominado “feedthrough”.



Figura 169. Feedthrough vista frontal.



Figura 170. Feedthrough vista lateral

La utilización de este tipo de conector es la razón por la que se ha optado por instalar una conexión BNC para alimentar el dispositivo.

Los BNC y los cables coaxiales que estén en el interior de la cámara de vacío no requieren unas especificaciones técnicas especiales, dado que las señales con las que se va a trabajar son pequeñas, por tanto se optará por el material disponible en el laboratorio de electrónica. Aunque como se explicará en el siguiente punto, resulta altamente conveniente la utilización de cables fuertemente blindados para evitar interferencias y acoplamientos electromagnéticos.

Por último, dado que los niveles de energía que se van a encontrar en la cámara son elevados, se propone que la campaña de medidas se realice utilizando distintos blindajes, realizando varios disparos con cada blindaje, de manera que gradualmente se vaya reduciendo el mismo hasta que el detector sature.

Se propone la siguiente experimentación.

Número de experimento	Material de blindaje	Número de disparos
1	Blindaje metálico de espesor entre 3 – 5 mm	<10
2	Blindaje metálico de espesor entre 3 – 5 mm	10<N<20
3	Blindaje metálico de espesor entre 1 - 3 mm	<10
4	Blindaje metálico de espesor entre 1 – 3 mm	10<N<20
5	Blindaje polímero alta densidad de espesor entre 3 - 5 mm	<10
6	Blindaje polímero alta densidad de espesor entre 1 - 3mm	10<N<20
7	Blindaje polímero baja densidad de espesor entre 3 - 5 mm	<10
8	Blindaje polímero baja densidad de espesor entre 1 - 3mm	10<N<20
9	Blindaje corcho natural de espesor entre 5-10 mm	<10
10	Blindaje corcho natural de espesor entre 5-10 mm	10<N<20
11	Blindaje corcho natural de espesor entre 3- 5 mm	<10
12	Blindaje corcho natural de espesor entre 3- 5 mm	10<N<20
13	Blindaje corcho natural de espesor entre 1 – 3 mm	<10
14	Blindaje corcho natural de espesor entre 1 – 3 mm	10<N<20
15	Sin blindaje	<1
13	Sin blindaje	<5

Figura 171. Propuesta de línea de experimentación con el prototipo detector.

De cualquier manera, se solicitará soporte técnico al personal científico del centro para que hagan sus sugerencias para mejorar la propuestas de experimentación.

## 12.2. Estudios de compatibilidad electromagnética.

Los pulsos láser de alta potencia (TW y PW) enfocados sobre un medio material hasta intensidades extremas son versátiles y poderosas fuentes de radiación y aceleración de partículas de alta energía. Dicha aplicación cambia el paradigma de la aceleración de partículas, ofreciendo nuevas oportunidades científicas y tecnológicas. Sin embargo, en este proceso de interacción de los láseres también se generan fuertes ondas electromagnéticas en forma de pulsos.

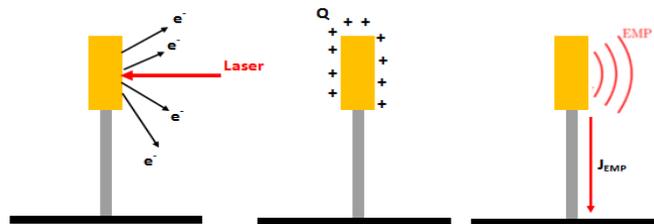


Figura 172. Generación de Pulso Electromagnético en targets sólidos.

Este pulso electromagnético (PEM, en inglés “Electromagnetic pulse, EMP”) plantean serios problemas para la operación, así como para la supervivencia de dispositivos y equipamiento electrónico.

En el CLPU se han observado lo que pueden ser sus primeros efectos en el controlador de una válvula de gas Helio. Dicho gas hace las veces de target sobre el que incide el láser. En las siguientes imágenes puede observarse como el funcionamiento de la señal del controlador se ve alterada con la presencia de un disparo láser.



Figura 173. Señal del controlador de entrada de gas en cámara de experimentación en condiciones normales.

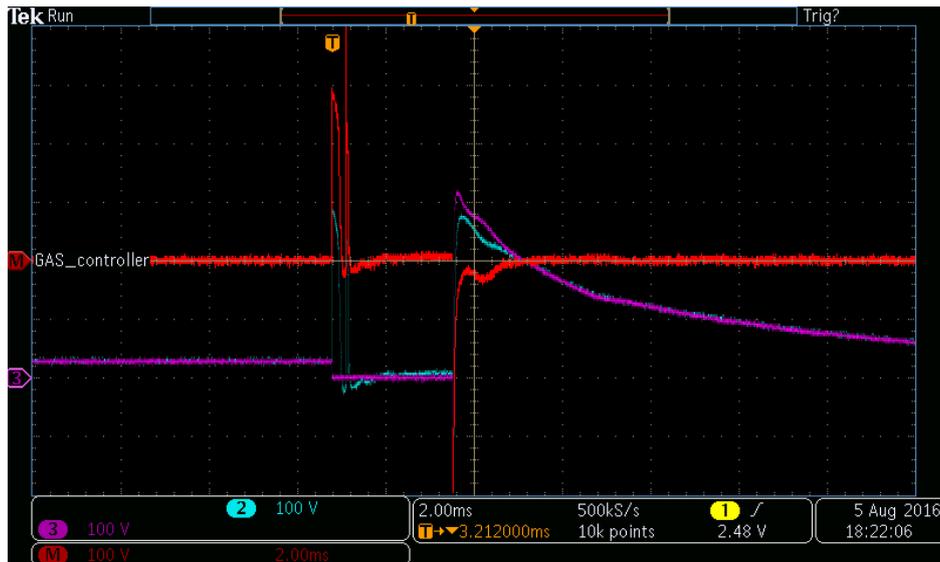


Figura 174. Señal del controlador de entrada de gas en cámara de experimentación tras disparo de VEGA láser.

Los efectos que puede generar el PEM en un sistema láser como VEGA son totalmente desconocidos, pero su existencia es uno de los principales desafíos a superar, siendo necesario desarrollar sistemas de adquisición que sean capaz de monitorizar dicho fenómeno, para así poder articular una respuesta más eficiente al mismo, estableciendo sistemas de protección de los equipos de trabajo y experimentación que se encuentren en la cámara de disparo, como sería el caso del módulo detector desarrollado.

En la actualidad se dispone de experiencias de desarrollos en instalaciones láser con tiempos de disparo de nanosegundo y picosegundo, habiéndose medido campos de más de cien kV/m a través de la instalación de sensores de campo eléctrico y magnético, conocidos como D-dot y B-dot.

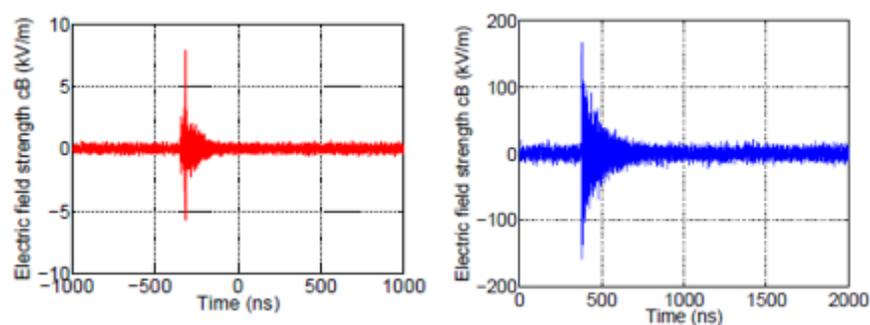


Figura 175. Magnitud del PEM en una instalación láser de nanosegundo (rojo) y picosegundo (azul).<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Figura obtenida del artículo: • Brown Jr, C. G. et al. (2010). Assessment and mitigation of electromagnetic pulse (EMP) impacts at short-pulse laser facilities. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 244, No. 3, p. 032001). IOP Publishing.

Sin embargo, en instalaciones con tiempos de disparo de femtosegundo este problema aún no ha sido estudiado en profundidad, y hasta el momento las acciones realizadas en estas instalaciones se han limitado a mitigar los efectos a través, por ejemplo, de blindajes o evitando el uso de equipos electrónicos en las proximidades del punto de interacción. Este tipo de acciones obligan al uso de detectores pasivos (películas radiográficas, detectores de trazas CR-39, ...) para la caracterización de las emisiones, dificultando considerablemente la operatividad, ya que resulta necesario extraerlos del interior de las cámaras de vacío para poder registrar las medidas a cada disparo del láser. Esta manera de operar puede exponer a los trabajadores a los campos electromagnéticos generados en la cámara.

Cabe destacar también que las elevadas tasas de repetición de los láseres en construcción presentan una situación sin precedentes desde la cual debe enfrentarse este problema. Esta cuestión es de importancia capital y urgente, no solo para el CLPU y su sistema láser VEGA (60 J / 30 fs), sino en un creciente número de instalaciones que iniciarán en breve a operar.

Hasta el momento, en lo que respecta a los equipos electrónicos que se encuentran fuera de la cámara de experimentación, la praxis habitual ha sido la de alejar estos equipos del punto de emisión, y blindarlos en la medida de lo posible frente al PEM, muchas veces de forma aleatoria y con resultados impredecibles.

Todo este planteamiento lleva a la conclusión de que se necesita conocer el comportamiento electromagnético del prototipo detector para así poder prevenir los posibles daños que pueda sufrir como consecuencia de la acción del PEM.

Los altos niveles de radiación que van a existir en la cámara de experimentación permitirán también establecer un pequeño blindaje entorno al centellador y el SiPM para evitar así que el campo eléctrico genere cuentas falsas en las microcélulas del mismo.

Es por ello por lo que se realizarán pruebas con distintos blindajes entorno al conjunto del cristal y el SiPM, buscando aquel que menos afecte electromagnéticamente al dispositivo, pero que permita caracterizar lo más precisamente posible la radiación existente.

En lo referente al módulo de lectura, la utilización de una carcasa metálica hará que este esté protegido por una especie de jaula de Faraday, a la cual afectará en muy pequeña medida el efecto del pulso electromagnético. De cualquiera de las maneras, sería

aconsejable establecer una puesta a tierra en la carcasa exterior que sirva de protección adicional para el módulo detector.

En ningún caso puede obviarse la protección de los cables que servirán para alimentar el módulo y recoger la información del mismo, conectando el prototipo con el exterior de la cámara de experimentación, ya que será el elemento más vulnerable que sufrirá los efectos del PEM, generándose interferencias en las señales.

En esta línea se utilizarán cables con blindajes robustos, procurando que las conexiones estén lo más aisladas posible.

Lo más beneficioso en todo este proceso sería acompañar los trabajos de medición y prueba del módulo detector en el sistema VEGA con la instalación de un sistema de adquisición y monitorización del PEM.

Para ello, podrían instalarse sensores de campo eléctrico y magnético, D-dot y B-dot, capaces de trabajar en distintos rangos de frecuencia, tanto dentro como fuera de la cámara de experimentación.

En lo referido a los sensores que trabajen en el interior de la cámara resultaría conveniente instalar varios dispositivos distribuidos de manera homogénea, de manera que se realice un mapeado de la misma, obteniendo así un mapa que indique en que manera se propaga el pulso electromagnético en su interior consiguiendo una fuerte de información valiosísima para poder decidir la colocación de los distintos equipos de trabajo.



Figura 176. D-dot PROLYN AD-55

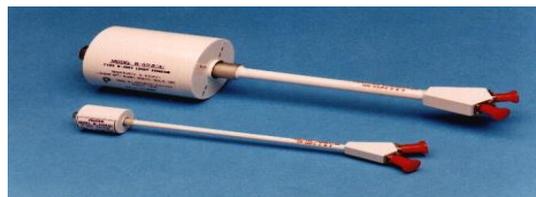


Figura 177. Dispositivos B-dot PROLYN RB

Una propuesta de los dispositivos que podrían utilizar sería:

- Sensor B-dot para baja frecuencia: PROLYN's RB-50
- Sensor B-dot para media frecuencia: PROLYN's RB-270
- Sensor B-dot para alta frecuencia: PROLYN's RB-230
- Sensor D-dot: PROLYN's AD-55

Por último, no debería obviarse que estos trabajos de protección no solo van encaminados a los equipos electrónicos, sino que también persiguen la protección de

las personas frente a este tipo de radiación electromagnética, con una naturaleza no ionizante y con efectos biológicos desconocidos.

El estudio de las ondas electromagnéticas y sus efectos sobre las personas ha ocupado una parte importante de los trabajos realizados en el ámbito de la protección frente a partículas no ionizantes. Con el impulso de las nuevas tecnologías y formas de telecomunicación aparecieron los primeros estudios entorno a este tipo de ondas, en los que ya se anunciaban los posibles efectos que podrían tener sobre los organismos biológicos.

El impulso de los campos electromagnéticos (CEM) generó una gran ansiedad y especulación entorno a sus efectos biológicos, creándose en 1996 el Proyecto Internacional CEM, impulsado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), con el objetivo de evaluar las pruebas científicas sobre los posibles efectos que tienen las ondas electromagnéticas sobre la salud en el intervalo de frecuencias de los 0 a 300 GHz.

Los primeros resultados sobre los efectos de las radiaciones no ionizantes basadas en campos electromagnéticos marcaban la no existencia de evidencias de que los pequeños campos electromagnéticos, a los que estamos expuestos a diario, generen efectos negativos en los seres vivos, no tanto es así con los CEM fuertes, como es el caso de los que previsiblemente se generarán en el sistema láser VEGA.

El CEM puede inducir corrientes eléctricas en seres vivos que afectan al crecimiento y desarrollo celular, dicho efecto puede resultar positivo si afecta a células enfermas, pero no sucede igual en el caso de afectar a células sanas. De igual forma, si dichos campos afectan a células del sistema nervioso, los efectos pueden ser muy peligrosos.

Igualmente, aunque el riesgo de problemas cardíacos a consecuencia del CEM es mínimo, resulta necesario minimizar los riesgos existentes, especialmente con los dispositivos cardíacos, ya que puede alterarse su funcionamiento.

En 2004 la Comisión Europea publica la directiva 2004/40/CEE sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos, particularmente sobre los campos electromagnéticos.

Esta directiva hace referencia a los campos electromagnéticos que están entre los 0 Hz y los 300 GHz y hace referencia a los efectos considerados a corto plazo, sin abordar los posibles efectos a largo plazo, así como los posibles efectos carcinógenos. En dicha normativa se marcan los valores límite de exposición y los valores que dan lugar a una

acción, marcando así una referencia normativa en el ámbito de la protección de las personas.

La posterior aparición de nuevas fuentes industriales de radiación electromagnética y la preocupación del colectivo médico en cuanto a la posible incidencia de la aplicación de la directiva existente en la utilización de procedimientos basados en imágenes médicas causaron el cambio de dicha normativa, apareciendo así la Directiva 2013/35/CEE. Dicha directiva amplía las exigencias de protección basándose en los nuevos datos científicos facilitados por expertos de reconocimiento internacional, apareciendo distintos niveles de protección en función de los efectos biofísicos directos o indirectos, los cuales quedan definidos y clasificados en dicha normativa. Igual que en la normativa anterior, no se hace referencia a los posibles efectos a largo plazo.

A lo largo de este trabajo se ha incidido en que la aparición y desarrollo de los láseres pulsados de alta intensidad ha generado la necesidad de desarrollar nuevos estándares de protección radiológica frente a radiaciones ionizantes.

En el caso de las radiaciones no ionizantes, como el pulso electromagnético, estas instalaciones pueden aportar nuevos conocimientos entorno a los efectos biológicos de los campos electromagnéticos fuertes, generándose así una necesidad de nuevos estándares de protección y la actualización de las normativas.

Todas las cuestiones relativas al estudio de los efectos del pulso electromagnético tanto en equipos electrónicos como en personas, así como los planteamientos de la medición y parametrización del PEM han sido objeto de varias publicaciones científicas, en forma de póster divulgativo, por el autor y tutores del presente Trabajo Final de Máster:

DDFIW2017  
13<sup>th</sup> Direct-Drive & Fast Ignition

## Initial research of Electromagnetic Pulse generated by VEGA system

A. Antolín<sup>1,2</sup>, J.M. Álvarez<sup>1</sup>, E. Sánchez<sup>2</sup>, R. G. Gatti<sup>1</sup>, L. Voipe<sup>1,2</sup>, L. Roso<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Láseres Pulsados (CLPU), 37185 Villamayor, Salamanca, Spain  
<sup>2</sup> Universidad de Salamanca (USAL), Salamanca, Spain  
e-mail: antolimo@usal.es

The operation of VEGA-2 laser system (200TW, 6J@30fs) at the Spanish Pulsed Laser Center (CLPU) facilities generates an Electromagnetic pulse (EMP) that is necessary to analyze and get to know in depth. Both to mitigate its effects and to be ready for the EMP that the VEGA-3 laser (1PW, 30J@30fs) generates. VEGA-3 laser is currently being setting and first laser shots in the Target Area are expected at the end of this year. Some experiment have probably showed the first effects of EMP in the chamber experimentation and out of the chamber. In order to apply the appropriate protection measures to mitigate the impact of the EMP, the first actions to control and work with the EMP have been carried out at the CLPU.

### SPANISH PULSED LASERS CENTRE (CLPU)

The Spanish Pulsed Laser Center (CLPU) has VEGA laser system that consists in three lines with different pulses energy. The main laser system is VEGA-3 that is able to reach a Petawatt peak power with femtosecond length pulse.

Figure 1. VEGA system architecture

Actually, CLPU is able to operate with VEGA-1 and VEGA-2. VEGA-2 laser is currently being setting and first laser shots in the Target Area are expected at the end of this year. One important issues to be addressed at CLPU is the Electromagnetic Pulse (EMP), in particular for experiments with solid targets aimed to proton or ion acceleration.

Figure 2. EMP generation is mitigated with a target holder

In a very simple model, schematically represented in the figure above, the EMP is generated by the drift current on the target holder that neutralize the positive charging produced by the effect of the laser on the target. Then, the target size and material couple with the target are some variables to consider in order to study the EMP [4].

### EMP in a Laser Facility

The generation of an Electromagnetic Pulse in a Laser facility is know for many years (The Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2007). In the last years, some research teams of the most important laser facilities are published a great variety of papers with theoretical approaches, EMP measure and simulations; for instance:

- The National Ignition Facility (NIF) have made some interesting studies about EMP installing high-frequency B-dot and D-dot probes to measure the electric and magnetic field. The energy and laser pulse duration were about 200 J and nanosecond/picosecond respectively.
- EMP studies have also been made with B-dot and D-dot probes to measure electric and magnetic fields in the VULCAN laser (700 fs) at Central Laser Facility (CLF) or in the TIGA laser at Prague Asterix Laser System (PALS) [2].

EMP studies made until now shows one important relationship between time pulse and EMP magnitude: the more short pulse laser, the more EMP peak magnitude. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and NIF research about EMP show how the EMP peak magnitude increases when time pulse decreased:

Figure 3. EMP magnitude with nanosecond laser pulse measured by B-dot

Figure 4. EMP magnitude with picosecond laser pulse measured by B-dot

In the figures above we can observed that with nanosecond pulse EMP peak magnitude up to 1D kV/m while with picosecond pulse the EMP peak magnitude is on the order of tens to hundreds of kV/m. [2]

### First EMP Experience with VEGA-2

A first hand-on experience with the effects of an EMP was observed during the commissioning of the experimental line of VEGA-2. Figure 5 shows control signal under standard conditions of the gas jet valve used on the experiment [5]. Figure 6 shows the control signal with the laser pulse. The alteration observed could have generated by electromagnetic signal coupled to the gas controller:

Figure 5. Gas controller signal under standard conditions

Figure 6. Gas controller signal with laser pulse

### Perspectives & Future Work at CLPU

At CLPU we are starting a research aimed to characterize the generation of an EMP with VEGA-2 and VEGA-3. We aim to build a sensor network that monitored and measure the electromagnetic fields inside and outside of the interaction chamber.

This sensor network can be built with commercial sensor devices like the used in other EMP measure campaigns to gain a first approach and then will design measure devices that generate a mapping of the EMP in the laser chamber. In addition, we need to establish analysis and simulation capabilities.

Figure 7. Laser chamber setup

Last but not least, we are considering to design an specific target holder to study and characterize the drift currents in solid targets. This studies could be an important step to mitigate the EMP with solid targets experiments at laser facilities.

#### REFERENCES

[1] Brown, J. G. S., Truesdell, A., Blair, S., & Gillingham, J. (2008). Electromagnetic pulses at short pulse laser facilities. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 112, No. 3, p. 03202). IOP Publishing.

[2] de Marco, A., Antolín, A., Gilmore, J., Pardo, S., Cruzado, E., Baganha, G., ... & Truesdell, A. (2014). Measurement of electromagnetic pulses generated during transitions of high-power lasers with solid targets. *Journal of Inertial Confinement Fusion*, 19(2), 022601.

[3] Brown, J. G. S., Reed, B., Clancy, T., Stang, S., Blair, S. C., Ferguson, W., ... & Truesdell, A. (2016). Characterization and mitigation of electromagnetic pulse (EMP) impacts at short-pulse laser facilities. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 744, No. 5, p. 052001). IOP Publishing.

[4] Gilmore, J. J., Luterano-Lucasiani, F., Ruffalo, S., Rivetti, J., Barone, J., La Rossa, A. G., ... & Yáñez-Ruiz, V. T. (2014). Target charging in short-pulse laser plasma experiments. *Physical Review B*, 89(1), 013102.

[5] Rodríguez, C., *poscar* (2016) *poscar*, Laser other elements & 3 ray System relation generation at VEGA.

Figura 178. Publicación presentada para el 13<sup>rd</sup> Workshop Direct-Drive & Fast Ignition



## Caracterización del Pulso Electromagnético en las instalaciones del CLPU: medidas de protección

A. Antón<sup>1,2</sup>, J.M. Álvarez<sup>1</sup>, E. Sánchez<sup>2</sup>, G. Gatti<sup>3</sup>, L. Voipe<sup>1,2</sup>, L. Roso<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Láseres Pulsados (CLPU), 37185 Villamayor, Salamanca, Spain  
<sup>2</sup> Universidad de Salamanca (USAL), Salamanca, Spain  
 e-mail: eanton@usal.es

---

### CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS: SALUD Y LEGISLACIÓN

El estudio de los campos electromagnéticos (CEM) y sus efectos sobre las personas ha ocupado una parte importante de los trabajos realizados en el ámbito de la protección frente a radiación no ionizante. La aparición de los primeros estudios anunciaban los posibles efectos que podrían tener sobre los organismos biológicos [1]. Para estudiar estos efectos la Organización Mundial de la Salud (OMS) impulsó en 1988 el "Proyecto Internacional CEM", impulsado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), con el objetivo de evaluar las pruebas científicas sobre los posibles efectos que tienen los CEM sobre la salud en el intervalo de frecuencias de 0 a 300 GHz [2].

Los primeros resultados sobre los efectos de las radiaciones no ionizantes basados en CEM muestran la no existencia de evidencias de que los pequeños campos, a los que estamos expuestos a diario, generen efectos negativos en las seres vivos, no tanto es así con los CEM fuertes. Así así, los CEM pueden inducir corrientes eléctricas en seres vivos afectando al crecimiento y desarrollo celular, siendo especialmente peligrosos en las células del sistema nervioso. En el caso de problemas cardíacos, el riesgo es mínimo, aunque resulta necesario monitorizar los riesgos existentes, especialmente con los dispositivos cardíacos, ya que puede afectar a su funcionamiento [3].

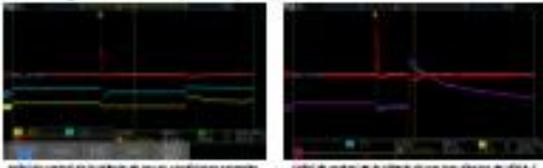
La certificación de los efectos provenientes de los CEM dieron paso al desarrollo normativo entorno a las radiaciones no ionizantes publicándose la Directiva 2004/40/CE sobre las disposiciones normativas de seguridad y salud relativas a la exposición a los CEM entre 0 - 300 GHz. Dicha normativa fue sustituida por la Directiva 2013/35/CE ampliándose las exigencias de protección en base a los nuevos datos científicos, definiéndose distintos niveles de protección en función de los efectos biológicos directos o indirectos. Este cambio normativo fue consecuencia de la aparición de nuevas fuentes industriales de radiación electromagnética y la preocupación del colectivo médico en cuanto a la posible incidencia de la aplicación de la directiva existente en la utilización de procedimientos basados en imágenes médicas.

### MEDICIÓN DEL PEM EN EL CLPU

En España se encuentra el Centro de Láseres Pulsados Ultravioletas y Ultracortos (CLPU) con su sistema laser VERGA, instalado en tres líneas con distintas energías y tiempos de disparo.

En la actualidad el CLPU tiene operativo los sistemas VERGA-1 y VERGA-2, estando el instalado el sistema VERGA-3, uno de los sistemas más potentes que se conocen, siendo capaz de alcanzar potencias de hasta un petawatt, con tiempos de disparo del orden de femtosegundos.

Con los parámetros en los que trabaja VERGA-3 no se conoce cuál puede ser el valor del PEM en las instalaciones, aunque los primeros disparos con VERGA-3 han dejado apreciar lo que pueden ser los primeros efectos de mismo, atendiendo a señales del combocador encargada de la entrada del gas-helio sobre el que se disparan el haz laser.

Para abordar el problema se plantean dos líneas de actuación:

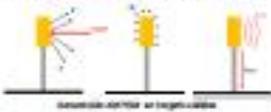
- Medida de las corrientes eléctricas generadas:** caracterizando el nivel de corriente generada por la acción del pulso laser sobre el target. Lo ocurrido con el combocador de gas nos hace pensar que las corrientes eléctricas generadas por el pulso electromagnético son lo suficientemente importantes como para provocar a los elementos de la cámara de descarga de descarga de dichas corrientes.
- Medida de las ondas electromagnéticas generadas:** para la medición de estas ondas se están estudiando diferentes fuentes de sistemas receptores e intentos para registrar la señal generada por el pulso en diferentes longitudes de onda y rangos de frecuencia. El reto es usar instrumentos para caracterizar un PEM que a su vez puede estar alterando la capacidad de detección del propio instrumento.




### INSTALACIONES LÁSER: EL PULSO ELECTROMAGNÉTICO

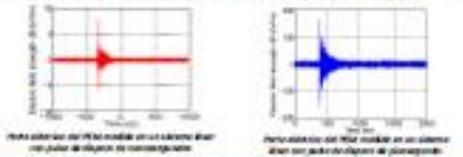
La aparición y desarrollo de los láseres pulsados de alta intensidad ha supuesto una revolución en un aspecto amplio de la ciencia, especialmente desde el punto de vista de la física de partículas, siendo uno de los sectores industriales y de investigación que necesita estándares de protección radiológica, tanto para radiaciones ionizantes, como para radiaciones no ionizantes.

Desde el punto de vista de las ondas electromagnéticas dichas instalaciones pueden generar distintos tipos de perturbaciones debido a la interacción de un pulso laser ultracorto con un medio, ya sea sólido, gaseoso o líquido. Esta interacción, del haz del laser con el blanco y en general con todo el sistema experimental a su alrededor, se traduce en la generación normalmente no deseada de un pulso electromagnético (PEM) extraordinariamente intenso y con un gran ancho de banda, se produce con un pulso de duración ultracorta.



La generación del PEM supone un potencial riesgo para el funcionamiento de los equipos electrónicos cercanos al lugar de emisión debido a la alta intensidad del mismo. Sin embargo, desde el punto de vista de la protección de personas, no se han realizado estudios ni se conocen los efectos que este tipo de PEM pueden tener. Un trabajo de caracterización y parametrización del pulso sería de gran utilidad para realizar investigaciones sobre sus efectos biológicos.

Hasta la fecha se han desarrollado trabajos de caracterización del PEM en instalaciones laser con pulsos de disparo de hasta picosegundos, obteniendo una primera conclusión: cuanto más corto sea el pulso laser, mayor será el valor de pico del PEM. [4]



### CONCLUSIONES

Con todo lo expuesto puede concluirse que los trabajos de caracterización del PEM de una instalación laser sirven para dar un fuerte impulso a la protección radiológica frente a los CEM desde varias ópticas:

- La caracterización de PEM nos permite considerar una fuente de radiación electromagnética potencial que nos permite conocer más sobre sus efectos en la salud.
- Las nuevas evidencias permitirán mejorar la normativa de protección frente a los CEM.
- La posibilidad de someter a equipos a radiación electromagnética facilitará el desarrollo de sistemas de protección frente a la misma.

### REFERENCES

[1] Occupational Hazards from Non-Ionizing Electromagnetic Radiation, Occupational Safety and Health Series No. 63, International Labour Office, Geneva, 1981.  
 [2] The International EMF Project, Progress Report, 1990-1997.  
 [3] Informe de 2007.  
 [4] Green et al. J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 244, No. 5, p. 052001, 2010.

Figura 179. Publicación presentada para el V Congreso Conjunto de la SEFM - SEPR

## Targ3 – Targetry for High Repetition Rate Laser-Driven Sources

### Initial research of Electromagnetic Pulse generated by VEGA system

A. Antolín<sup>1,2</sup>, J.M. Álvarez<sup>1</sup>, E. Sánchez<sup>3</sup>, F. Arteché<sup>3</sup>, G. Gatti<sup>1</sup>, L. Volpe<sup>1,2</sup>, L. Roso<sup>1,2</sup>

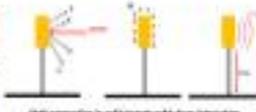
1) Spanish Center for Pulsed Lasers (CLPU), Salamanca, Spain  
 2) Universidad de Salamanca (USAL), Salamanca, Spain  
 3) Instituto Tecnológico de Aragón (ITAINNOVA), Zaragoza, Spain  
 e-mail : antolimo@usal.es

High intensity laser facilities generate an Electromagnetic Pulse (EMP) that might affect equipment. This EMP has been studied using different systems and devices for laser systems in the nanosecond and picosecond scale. In this contribution, we present a preliminary program including our approach to EMP characterization produced at the Spanish Center for Pulsed Lasers (CLPU) that will be produced in the operation of VEGA-2 (200TW; 6J@30fs) and VEGA-3 (1 PW; 30J@30fs). In order to characterize the EMP some customize targets to control the EMP generation will be explored. To measure it, we are considering the development of a sensor network to map the electric and magnetic fields. B-dots and D-dots probes are widely used for this proposal. In order to have a wide network of measurement points at an affordable cost, we are doing a survey of the available technologies in the market that could be used.

#### LASER FACILITIES & EMP

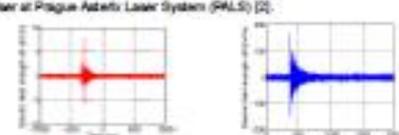
A Laser facility operation generates an Electromagnetic Pulse (EMP) that might affect equipment. The EMP is due to the laser impact in a target. This target could be solid, liquid or gas. The laser beam, which it has positive charge, expels the electrons of the target and this situation generates a pulse drift current with the form of an electromagnetic field. The target size and material are some variables to consider in order to study the EMP. [1]

The EMP has an electric field, which it propagates by the electric conduction, and it has a magnetic field which it propagates around the laser chamber. The electric and magnetic fields could be measured with sensor devices. The most commonly used are D-dot to electric field and B-dot to magnetic fields in the EMP laser facilities studies.



During some years the laser facilities are working in the EMP studies to measure and to characterize the EMP. Some research teams of the most important laser facilities are published a great variety of papers with theoretical approaches, EMP measures and simulations, for instance:

- The National Ignition Facility (NIF) have made some interesting studies about EMP installing high-frequency B-dot and D-dot probes to measure the electric and magnetic field. The energy and laser pulse duration were about 300 J and nanosecond/picosecond respectively.
- EMP studies have also been made with B-dot and D-dot probes to measure electric and magnetic fields in the VULCAN laser (700 fs) at Central Laser Facility (CLF) or in the Tilia laser at Prague Asterix Laser System (PALS) [2].



EMP studies made until now shows one important relationship between time pulse and EMP magnitude: the shorter laser pulse, the more EMP peak magnitude. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and NIF research about EMP show how the EMP peak magnitude increases when time pulse decreased. [2]

#### EMP MEASUREMENT AT CLPU

Until now, EMP measurements that have been made are relative to nanosecond and picosecond laser pulse time. The question that we need to answer is if these devices could be used in the EMP measurements in VEGA laser system, at the Spanish Pulsed Laser Center (CLPU), that it has laser pulse time of femtosecond order.

VEGA consists in three lines with different pulses energy. The main laser system is VEGA-3 that is able to reach a Petawatt peak power with femtosecond length pulse.

In order to study if the B-dot and D-dot used until now in EMP measurements are able to measure the EMP in VEGA system we are going to make a survey of the available B-dot and D-dot sensors in the market that could be used. The objective of this survey is to know about the electromagnetic parameters. After that we will select the sensors with the best response and we are going to make Electromagnetic tests of these sensor probes to characterize their response previous to any exposition to the EMP.

These test will be done with some customize targets that will be made with different materials and designs. The design variety allow us to know about how the targets affects in the EMP propagation in the frequency spectrum. [4]




#### EMP MEASUREMENT DEVICES

The LLNL and NIF measurements were made with B-dot and D-dot devices, but in the measurement experiment also used other devices like electron spectrometers, image plates and Faraday cups.

In the measurement studies B-dot and D-dot devices was shielded for common-mode noise rejection. The conductors were also shielded to attenuate fields impinging on measurement cables. The relation of the magnetic and electric fields sensor is:

- Low frequency B-dot device: PRODYNA RB-50
- Mid frequency B-dot device: PRODYNA RB-270
- High frequency B-dot device: PRODYNA RB-230
- D-dot device: PRODYNA AD-65



B-dot device was located inside and outside of the laser chamber, and D-dot devices were only inside.

#### EMP MAPPING AT CLPU

With the conclusions of the sensors survey and the customize targets, we are going to build a sensor network that monitored and measure the EMP inside and outside of the laser chamber. The objective is inside the chamber is generate a mapping of the EMP with sensors devices, and not only use B-dot and D-dot in random points inside the chamber like until now.

The sensor that will be used in the EMP mapping could be tested in the Electric Laboratory of ITAINNOVA. This lab is well equipped (including 2 semi-anechoic chambers) to perform EMC test.




The mapping results will be very valuable to build a EMP model with a software tool. This model will allow us to simulate the EMP in VEGA laser experiments. In this way, we will protect the equipment of the EMP effects with the simulation tool.

#### REFERENCES

[1] Double et al, Physical Review E, 49(1), 012102, 2014.  
 [2] Rosen et al, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 112, No. 3, p. 032007, 2008.  
 [3] Rosen et al, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 264, No. 3, p. 032007, 2012.  
 [4] Popik et al, Workshop contribution at CLPU, EMP induced by high intensity laser, 2015.





Figura 180. Publicación Presentada al Targ3 - Targetry for High Repetition Rate Laser-Driven Sources.

### **12.3. Aplicación de centelladores para la medición de radiaciones NORM en ambientes de construcción.**

El pasado diciembre de 2013 se publicó en el Diario Oficial de la Unión Europea la Directiva 2013/59/EURATOM por la que se establecen las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros de la exposición a radiaciones ionizantes, en la que se introducen conceptos básicos de protección radiológica en distintos ámbitos y sectores productivos, incluido el de la construcción.

Desde el punto de vista de la industria de la construcción la directiva marca dos líneas concretas de actuación, una referida a las industrias que procesas materiales radiactivos naturales extraídos de la corteza terrestre, y la segunda referida a los materiales de construcción que emitan radiación ionizante.

Por tanto, supone un grupo de riesgo todos aquellos trabajadores expuestos a NORM (Naturally occurring radioactive materials), que incluye todos los materiales radiactivos naturales. Siendo la industria de la construcción, en distintas vertientes, una de las principales industrias NORM.

La Directiva mencionada marcaba además el plazo de febrero de 2018 como fecha máxima para desarrollar las normativas necesarias por los Estados Miembro para la consecución de los objetivos marcados desde la Comisión Europea.

A un año vista de la fecha final propuesta desde las instituciones europeas, se observa como algunas cuestiones marcadas en la Directiva mencionada han sido desarrolladas, sin embargo, en los aspectos referentes a la construcción la puesta en marcha de las normas y reglamentos en el caso del Gobierno Español ha sido dispar.

El nuevo desarrollo normativo podría acarrear una inversión económica alta en sectores como el de la construcción, en el que hasta el momento no se ha sido un requerimiento establecer medidas de protección radiológica, como si ha ocurrido en otros sectores.

Debemos tener en cuenta el reto que supone detectar la radiación proveniente de fuentes naturales en entornos de trabajo como el de la construcción, ya que los niveles de radiación son muy bajos y se necesitan detectores de gran sensibilidad que sean capaces de diferenciar la radiación de fondo natural, de la radiación proveniente de la acción humana.

Desde el punto de vista práctico el desarrollo de sistemas de detección radiológica es un campo muy conocido y existen técnicas y metodologías muy desarrolladas, ya que existen multitud de empresas dedicadas a la instalación de dichos sistemas, con gran

variedad de productos que se ajustan a las necesidades de los distintos entornos y ambientes radiológicos.

Sin embargo, desde el punto de vista económico, las soluciones de protección radiológica convencionales resultan muy costosas, por lo que para las nuevas necesidades surgidas del nuevo desarrollo reglamentario, así como para conseguir la protección personal y medioambiental, es interesante trabajar en sistemas de coste reducido, más si cabe en un sector como el de la construcción, duramente golpeado por la crisis económica y que empieza a notar mejoría, siendo deseable que las acciones de mejora de la protección radiológica se ajusten a los requerimientos dentro del menor coste posible, siempre garantizando los requisitos de seguridad y fiabilidad de los métodos de detección.

Partiendo del contexto expuesto, el alumno y tutores del presente Trabajo Final de Máster decidimos plantear la tecnología de centelladores acoplados a SiPM como una solución eficaz, fiable y con costes competitivos al reto de proteger a los trabajadores expuestos a radiaciones NORM en ambientes de construcción.

Uno de los obstáculos a superar en el desarrollo de esta propuesta, es el de ajustar con la mayor precisión posibles las emisiones luminiscentes de los centelladores orgánicos con los sistemas fotomultiplicadores de silicio, ya que de esta forma el sistema detector tendría máxima eficiencia de detección para mejorar la sensibilidad, con un coste reducido.

Una ventaja de estos sistemas de detección es que son completamente abiertos, pudiéndose construir aplicaciones a medida de manera relativamente rápida, lo que facilita enormemente la puesta en marcha de los mismos.

Se plantea generar dos ideas de desarrollo en el campo de la construcción que den respuesta y satisfagan las necesidades emanadas de las normativas expuestas anteriormente.

### ***Desarrollo 1. Sistema de detección ambiental:***

Sistema de detección fijo que recoja el acumulado de un ambiente de trabajo, siendo una solución óptima para el control de los entornos de generación, almacenamiento o manipulación de residuos naturales radionucleidos, conocidos como NORM y que son de carácter sólido, muy comunes en el campo de la construcción.

Para el desarrollo de este sistema se consideran dos opciones, una que envíe datos de manera autónoma y periódica a una base de datos acumulados en el intervalo temporal deseado de manera inalámbrica, y otra que lo haga mediante cable, de esta forma podrían tenerse sistemas fijos y móviles.

Así, se dispondría de sistemas de detección ambiental en puntos fijos, como pueden ser almacenes de construcción o graveras, y sistemas de detección móviles para puntos de acumulación de materiales en obra, teniendo un control del entorno radiológico completo.

Todo este flujo de información proporcionaría una protección radiológica en la instalación total, conociendo la dosis acumulada y disponiendo del margen suficiente para tomar las decisiones oportunas para no superar las dosis que pongan en peligro la salud de las personas.

### ***Desarrollo 2. Sistema de detección en máquina.***

La segunda línea de desarrollo persigue la implementación en maquinaria industrial de un sistema de detección integrado que sea capaz de enviar la información requerida a un ordenador que genere señales de control.

La incorporación de un sistema de estas características a cualquier maquinaria conlleva estudiar cuidadosamente el punto de incorporación, de manera que le afecten lo menos posible las vibraciones existentes, así como el ruido que puede introducirse a la circuitería electrónica.

Estos sistemas podrían disponer de elementos de almacenamiento en el que periódicamente se descargarían los datos obtenidos, o bien, sistemas inalámbricos que enviarían la información a un sistema. De igual manera resultaría altamente positivo instalar un LCD que muestre los valores de la radiación para un control directo por parte del operario.

Puede plantearse como ejemplo de desarrollo la instalación de uno de estos sistemas en una hormigonera, de manera que capte todas las radiaciones naturales de los elementos que procesa.

Estas dos ideas de desarrollo fueron presentadas al I Premio Torres Quevedo Maquinaria Nuevas Ideas, organizado por el Salón Internacional de Maquinaria de Obras Públicas, Construcción y Minería, siendo galardonadas con un accésit en dicho certamen.

Por último, cabe destacar que este tipo de tecnología de detección ya ha sido probada y utilizada en algunos sectores industriales, como por ejemplo los arcos industriales que detectan carga radiológica en camiones, habiéndose conseguido buenos resultados, sin embargo, nunca se ha planteado su utilización como elemento de protección radiológica.

#### **12.4. Desarrollo de un detector de centelleo “Made in CLPU”.**

Una de las cuestiones en la que se ha puesto el foco ha sido en la construcción de un marco conceptual sólido entorno a los centelladores y los SiPM. Esto se debe a que, si comprendemos bien las especificación y respuesta de estos elementos, podemos plantear la construcción de un elemento detector desde cero que se ajuste mucho mejor a las necesidades.

Con todo ello, podemos acudir a distintos fabricantes de centelladores y SiPM, y buscar la combinación que ofrezca un mejor rendimiento y respuesta. Además, también podemos aprovechar el sistema de adquisición desarrollado de tal manera que puedan acoplarse distintos elementos de detección.

No debemos olvidar tampoco que el desarrollo desde cero de un elemento de estas características aporta algo que ahora el prototipo no lo ofrecía: información, ya que, al utilizar un módulo desarrollado, como es el caso del módulo de X-ZLAB, no disponemos de información alguna sobre el SiPM montado.

Con todo ello, en el presente trabajo se propone acudir a distintos fabricantes de centelladores y estudiar otros cristales, tales como el BGO o el LYSO, y acoplarles un SiPM. De igual forma, sería aconsejable estudiar la respuesta de los centelladores líquidos, ya que podrían ofrecer más resistencia a la saturación en fuentes de radiación láser, lo que generaría una menor pérdida de información para esta aplicación.

En lo referente a cristal, la compañía Epic-Cystal (<http://www.epic-scintillator.com/>) ofrece una amplia gama de productos, a costes bastante asumibles.



Figura 181. Cristales centelladores compañía Epic-Crystal

En lo que se refiere al SiPM, lo más recomendable es buscar alguno de la compañía “hamamatsu”, ya que es el líder en este tipo de dispositivos, pudiendo ofrecer gran información y soporte técnico, así como gran variedad de productos, tanto en tamaño como en número de píxeles.

Type no.	Photo	Photosensitive area	Pixel pitch	Package
S13360-1325CS		□1.3 mm	25 μm	Ceramic
S13360-1350CS			50 μm	
S13360-1375CS <b>NEW</b>			75 μm	
S13360-1325PE		□1.3 mm	25 μm	Surface mount type
S13360-1350PE			50 μm	
S13360-1375PE <b>NEW</b>			75 μm	
S13360-3025CS		□3.0 mm	25 μm	Ceramic
S13360-3050CS			50 μm	
S13360-3075CS <b>NEW</b>			75 μm	
S13360-3025PE		□3.0 mm	25 μm	Surface mount type
S13360-3050PE			50 μm	
S13360-3075PE <b>NEW</b>			75 μm	
S13360-6025CS		□6.0 mm	25 μm	Ceramic
S13360-6050CS			50 μm	
S13360-6075CS <b>NEW</b>			75 μm	
S13360-6025PE		□6.0 mm	25 μm	Surface mount type
S13360-6050PE			50 μm	
S13360-6075PE <b>NEW</b>			75 μm	

Figura 182. Gama de SiPM de hamamatsu.

Igualmente, la compañía Hamamatsu tiene muy estudiados los problemas de ruido en sus dispositivos, ofreciendo mucha información entorno a los fenómenos descritos de las cuentas oscuras, el crosstalk y el after pulse.

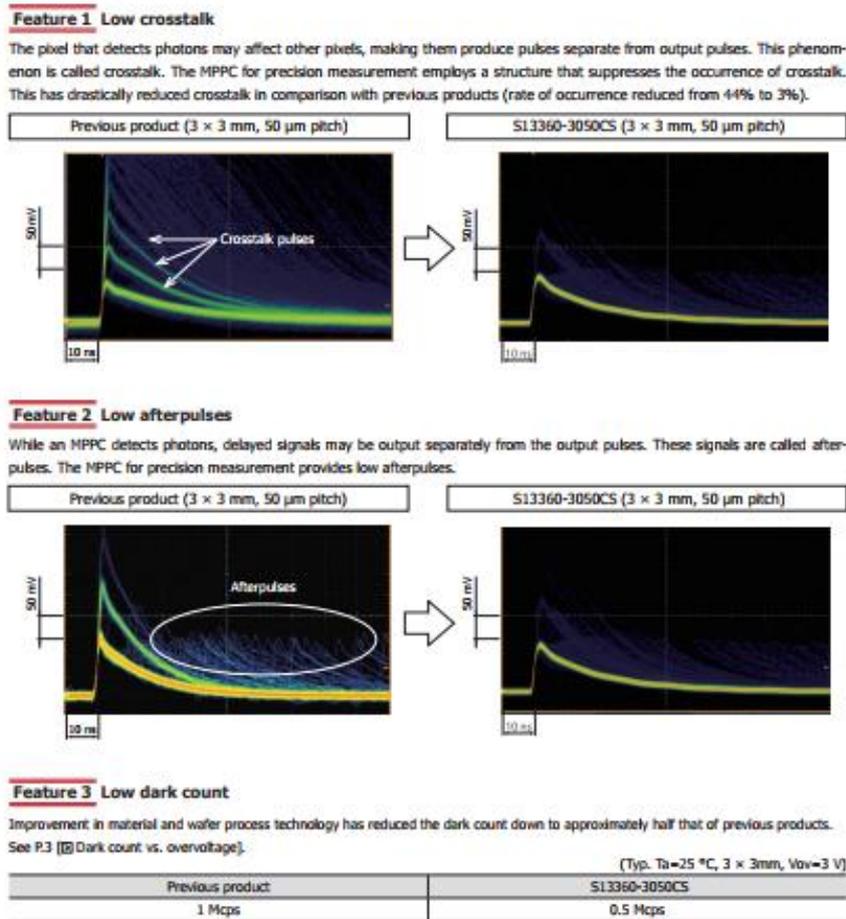


Figura 183. Ruido en los dispositivos Hamamatsu.

Tras la elección de la combinación de centellador y SiPM, convendría utilizar un filtro que elimine el ruido y filtre la señal devuelta por el SiPM, pudiendo utilizarse un sencillo circuito basado en un muestreo y retención.

En lo referido al sistema de adquisición, en el presente trabajo se ha optado por la solución del módulo PX5 debido a que era un recurso disponible en el CLPU, pero podría optarse por cualquier módulo de instrumentación nuclear, conocidos como módulos NIM, que realizan cuentas de señales rápidas (del orden de MHz – GHz) y posteriormente ofrecen los datos para la construcción del espectro. De cualquiera de las maneras, el diseño desde cero del sistema de adquisición conllevaría un tiempo y recursos que no compensaría.

Por último, el desarrollo de todo el elemento permitiría controlar y conocer una variable que hasta el momento no era posible: la temperatura. En la unión del centellador y el SiPM, podría colocarse un elemento termopar que devolviera la temperatura del centellador, siendo un dato de gran utilidad a la hora de abordar el ruido en el sistema.

## Conclusiones del Trabajo

Desde el punto de vista técnico, la principal conclusión que puede obtenerse del presente trabajo es que se ha conseguido realizar un prototipo de detector con el que poder realizar pruebas en el sistema VEGA y observar su respuesta. Sin embargo, queda pendiente en el presente trabajo mostrar los resultados de las pruebas en el sistema láser, no pudiéndose realizar ante la fase de desarrollo en la que se encuentra el sistema VEGA. Por ello, no pueden obtenerse conclusiones entorno a la respuesta de los centelladores acoplados a fotomultiplicadores de silicio en sistemas láser ultraintensos.

Desde el punto de vista de la investigación, puede concluirse que el siguiente trabajo recoge un profundo estudio del estado del arte de los elementos centelladores acoplados a fotomultiplicadores de silicio, lo cual aporta el conocimiento suficiente como para desarrollar módulos detectores propios que puedan ajustarse a las necesidades de la fuente.

En lo referente al campo de la innovación, este Trabajo Fin de Máster abre la puerta al desarrollo e incorporación de esta tecnología de detección en el campo industrial, ofreciéndose soluciones con costes muy competitivos sin poner en riesgo a las personas y entornos de trabajo desde el punto de vista de la protección radiológica.

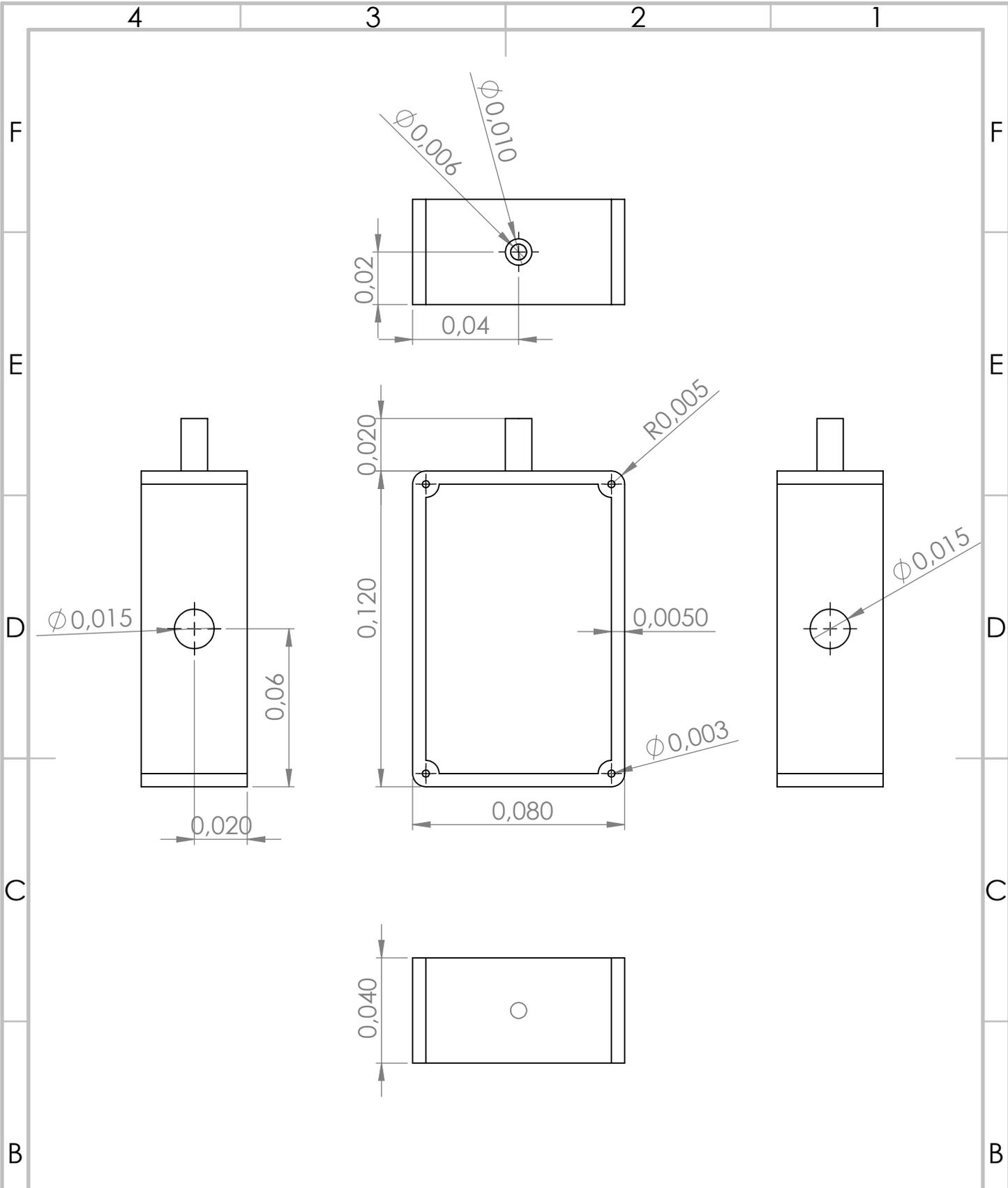
También resultaría interesante mencionar que el presente trabajo aporta una visión de un campo de la ingeniería industrial poco mencionado en el ámbito académico, como es la protección radiológica y las instalaciones radiactivas, que como se ha visto, son numerosas y tienen una alta carga técnica. Dichas instalaciones pueden resultar una salida laboral muy atractiva para los Ingenieros Industriales a través de la obtención de las licencias de supervisor de instalaciones radiactivas.

Finalmente, cabe destacar que desde el punto de vista académico el presente trabajo sirve como un complemento formativo a la docencia impartida durante el Grado en Ingeniería y el presente Máster, adquiriendo conocimientos de los campos de la física de partículas, física médica y la física nuclear.

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.

## **ANEXO I: PLANOS**

Desarrollo de sistemas de detección de radiación para fuentes no convencionales en entornos industriales.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ. Álvaro Antolín</td> <td></td> <td>01/08/17</td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA		DIBUJ. Álvaro Antolín		01/08/17		VERIF.				APROB.				FABR.				CALID.				TÍTULO: <b>Caja: vistas acotadas</b>		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																												
DIBUJ. Álvaro Antolín		01/08/17																												
VERIF.																														
APROB.																														
FABR.																														
CALID.																														
MATERIAL: ALUMINIO				N.º DE DIBUJO		A4																								
PESO:				ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1																								



4 3 2 1

F

F

E

E

D

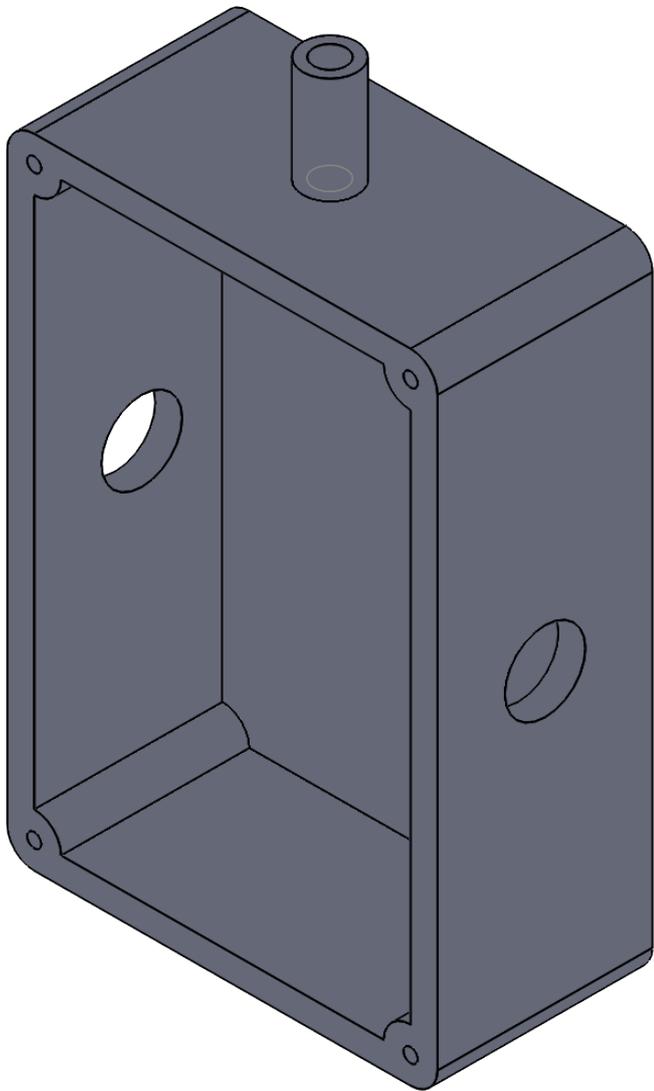
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Álvaro Antolín		01/08/17
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:  
**Caja: vista tridimétrica**

N.º DE DIBUJO

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

MATERIAL: ALUMINIO

A4

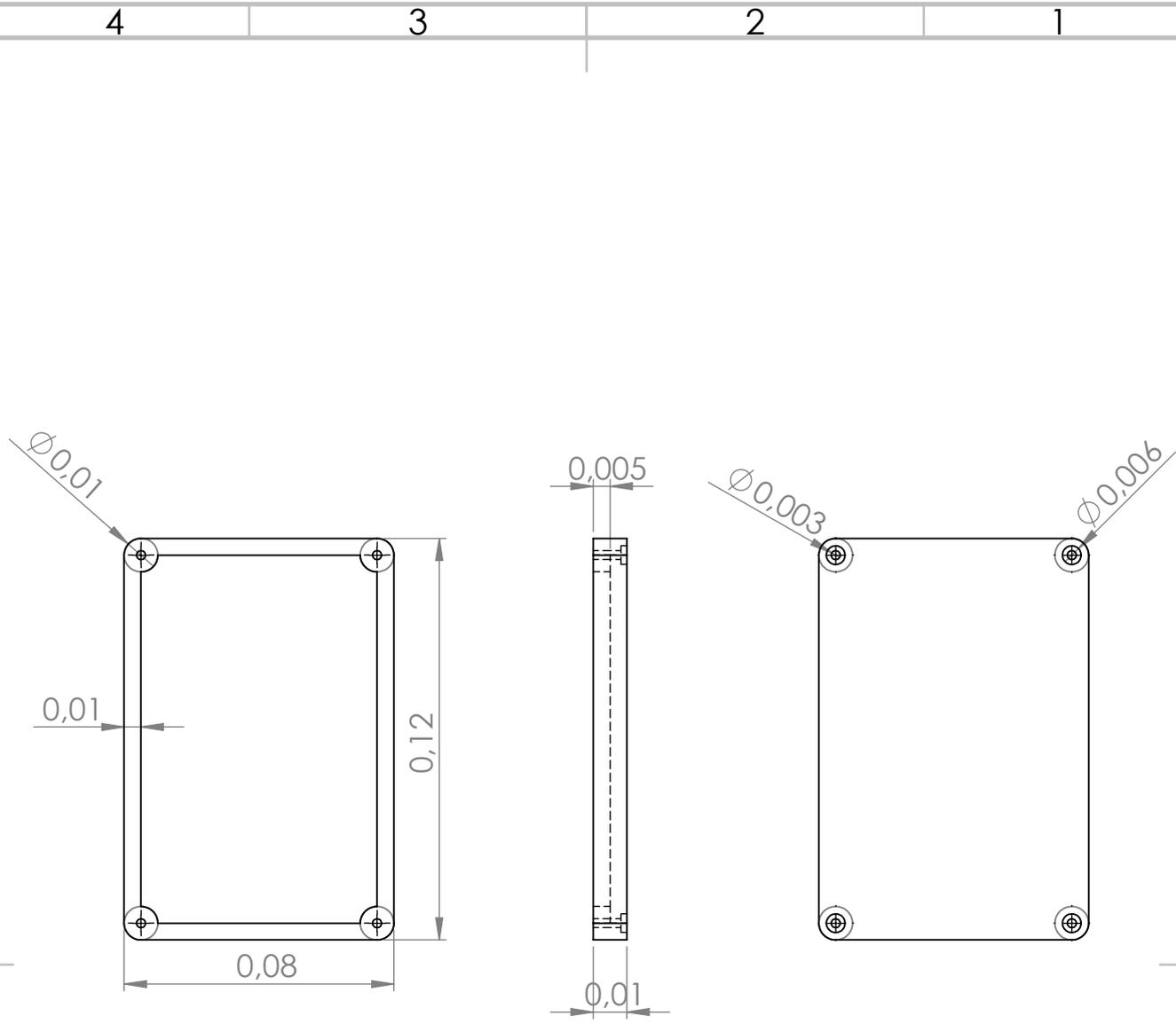
PESO:

4 3 2 1

A

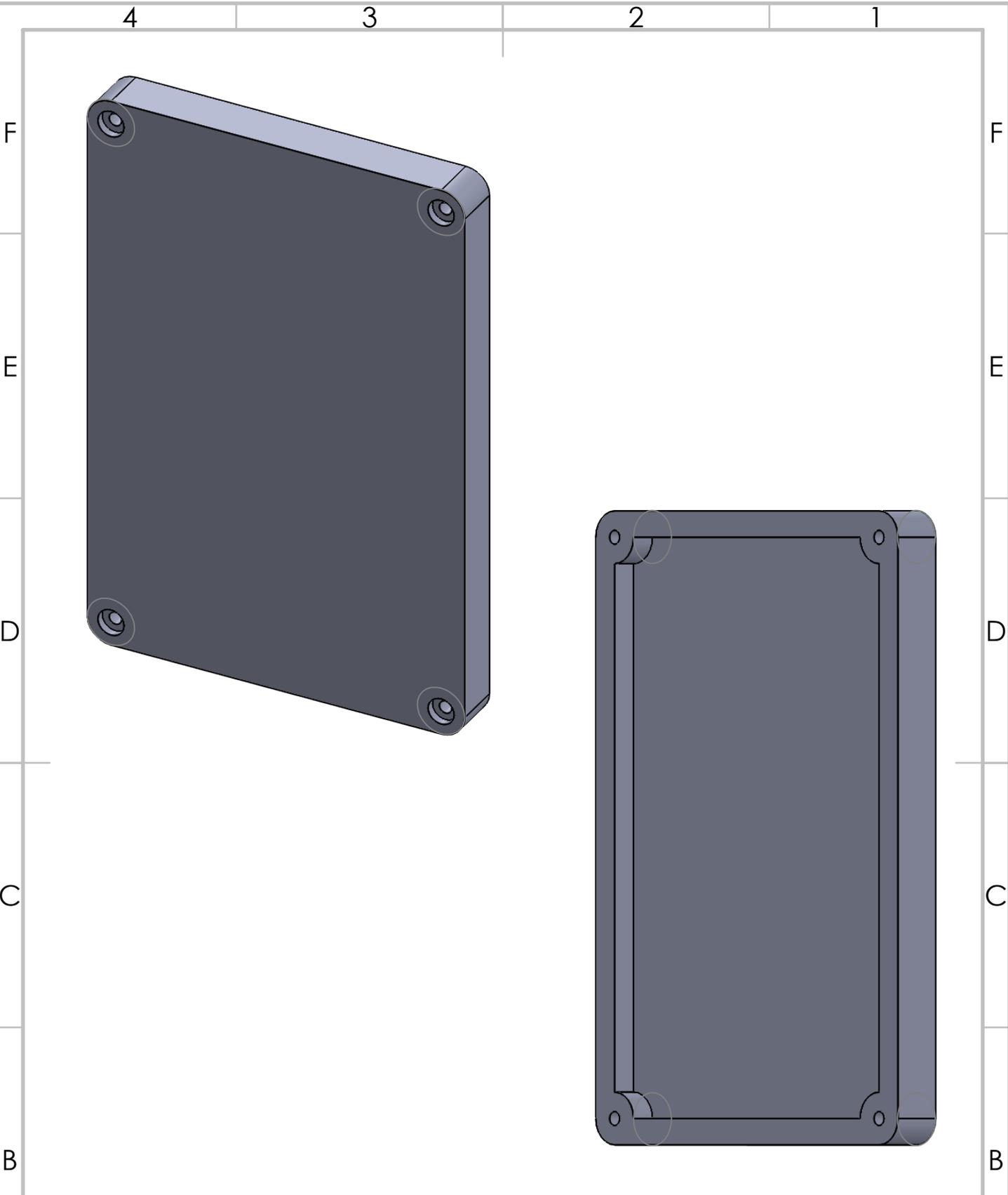
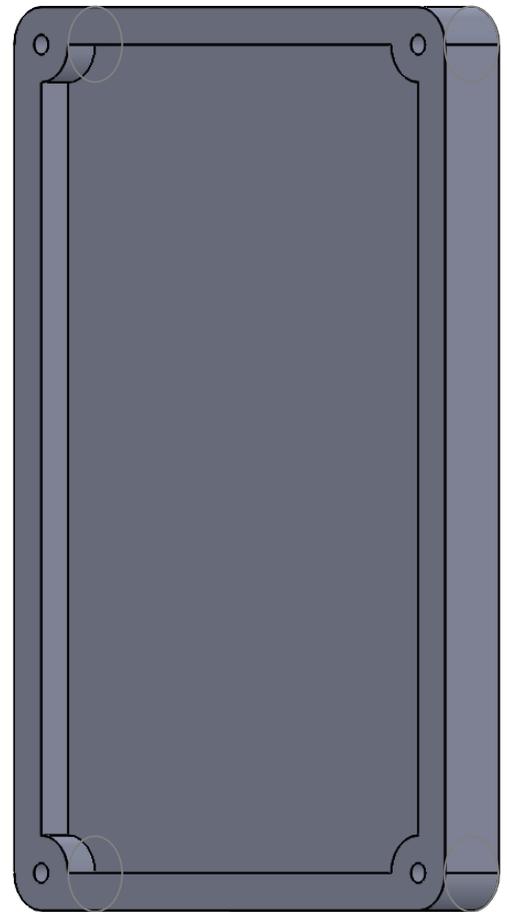
A





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ. Álvaro Antolín</td> <td></td> <td>01/08/17</td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJ. Álvaro Antolín		01/08/17	VERIF.			APROB.			FABR.			CALID.			TÍTULO: <b>Tapadera: vistas acotadas</b>		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																					
DIBUJ. Álvaro Antolín		01/08/17																					
VERIF.																							
APROB.																							
FABR.																							
CALID.																							
MATERIAL: <b>ALUMINIO</b>			N.º DE DIBUJO		A4																		
PESO:			ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1																		





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN CM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>Álvaro Antolín</td> <td></td> <td>01/08/17</td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					NOMBRE	FIRMA	FECHA	DIBUJ.	Álvaro Antolín		01/08/17	VERIF.				APROB.				FABR.				CALID.				MATERIAL: <b>ALUMINIO</b>		TÍTULO: <b>Caja: Vistas tridimétricas</b>
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																											
DIBUJ.	Álvaro Antolín		01/08/17																											
VERIF.																														
APROB.																														
FABR.																														
CALID.																														
				N.º DE DIBUJO		A4																								
PESO:				ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1																								





## Bibliografía

### Libros consultados:

- Tyler G. (2002). Introducción a la Ciencia Ambiental. Paraninfo.
- Alonso B. (2010). El láser, la luz de nuestro tiempo. Globalia.
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2013). Curso de Supervisores de Instalaciones Radiactivas. Consejo de Seguridad Nuclear.
- Plataforma Nacional I+D en Protección Radiológica. (2015). La I+D en Protección Radiológica en España. SENDA.
- Fernández F., Conejero E. y Roso L. (2012). Protección radiológica en instalaciones de láseres infrarrojos intensos. CLPU.
- Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. y Flannery B. P. (1992). Numerical recipes in C: The art of Scientific Computing. Cambridge University Press.
- Oppenheim A. V. (1999). Discrete-time signal processing. Pearson Education.
- Knoll G. F. (2000). Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons.

### Artículos científicos:

- Fernández, F. et al. (2014). Protocolos de protección radiológica en instalaciones de láseres intensos. *Higiene industrial* (No 144, p. 36).
- Gil-Loyzaga, P. et al. (2002). *Ondas electromagnéticas y salud*, AFITYS.
- Brown Jr, C. G. et al. (2008). Electromagnetic pulses at short-pulse laser facilities. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 112, No. 3, p. 032025).
- De Marco, M. et al. (2016). Measurement of electromagnetic pulses generated during interactions of high power lasers with solid targets. *Journal of Instrumentation*, 11(06), C06004.
- Brown Jr, C. G. et al. (2010). Assessment and mitigation of electromagnetic pulse (EMP) impacts at short-pulse laser facilities. *Journal of Physics: Conference Series*, (Vol. 244, No. 3, p. 032001).
- Dubois, J. L. et al. (2014). Target charging in short-pulse-laser-plasma experiments. *Physical Review E*, 89(1), 013102.
- Occupational Hazards from Non-Ionising Electromagnetic Radiation. *Occupational Safety and Health Series*, No. 53. International Labour Office, Geneva, 1985.
- Bai, Y. et al. (2015). Design and Simulation Test of an Open D-Dot Voltage Sensors. (Vol. 15, p. 23640-23652).

- Drexler, P. and Fiala, P. (2006). Methods for High Power EM Pulse Measurements. Radioengineering. (Vol. 15, No. 4, p. 43-49).

Portales web:

- Consejo de Seguridad Nuclear: <https://www.csn.es/home> (Último acceso: 26/08/2017).
- Centro de Documentación: <https://www.csn.es/centro-de-documentacion> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Protección Radiológica: <https://www.csn.es/proteccion-radiologica> (Último acceso: 26/08/2017).
- Foro Nuclear, Rincón Educativo: <http://www.foronuclear.org/es/formacion/rincon-educativo> (Último acceso: 26/08/2017).
- Organización Mundial de la Salud, Radiaciones Ionizantes: [http://www.who.int/topics/radiation\\_ionizing/es/](http://www.who.int/topics/radiation_ionizing/es/) (Último acceso: 26/08/2017).
- Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (Vol. II, Parte VI, Cap. 38): <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf> (Último acceso: 26/08/2017).
- Centro de Láseres Pulsados: <https://clpu.es/> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Sistema VEGA: <https://www.clpu.es/es/node/1386> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Divulgación: <https://clpu.es/es/bits> (Último acceso: 26/08/2017).
- AMPTEK: <http://amptek.com/> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Soporte técnico: <http://amptek.com/technical-support/> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Publicaciones: <http://amptek.com/publications/> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Recursos técnicos: <http://amptek.com/technical-resources/> (Último acceso: 26/08/2017).
  - Software: <http://amptek.com/products/dpp-mca-display-acquisition-software/> (Último acceso: 26/08/2017).
- National Instruments: <http://www.ni.com/es-es.h> (Último acceso: 26/08/2017).
  - NI-6008: <http://www.ni.com/es-es/support/model.usb-6008.html> (Último acceso: 26/08/2017).

- myRIO: <http://www.ni.com/es-es/support/model.myrio-1900.html> (Último acceso: 26/08/2017).

Normativa:

- Real Decreto 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre la Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.
- Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico.

Recursos Digitales:

- <http://www.uv.es/aprjuv/quaderns/3/Roig-RADIACIONES.pdf> (Último acceso: 26/08/2017).
- [http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Que\\_usos\\_tienen\\_las\\_radiaciones\\_ionizantes.pdf](http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Que_usos_tienen_las_radiaciones_ionizantes.pdf) (Último acceso: 26/08/2017).