

Las medidas de seguridad y protección radiológica en instalaciones de láseres intensos son un tema de importancia extrema que debe ser abordado por los organismos competentes. En este trabajo se detallan los protocolos necesarios para la aplicación de la normativa básica sobre radiación ionizante del personal expuesto en el Centro de Láseres Pulsados (CLPU), el laboratorio de referencia en España de láseres pulsados de femtosegundos.

PROTOSCOLOS DE

PROTECCIÓN RADIOLOÓGICA

EN INSTALACIONES DE

láseres intensos

Por **F. FERNÁNDEZ**. Universidad de Salamanca y Director del presente proyecto.
L. ROSO. Universidad de Salamanca y Director del CLPU. **A. IZQUIERDO**. Sociedad de Prevención de FREMAP. **J. CARRETERO**. Sociedad de Prevención de FREMAP.
S. MORETÓN. Sociedad de Prevención de FREMAP. **G. HERNÁNDEZ**. CLPU y Becario del presente proyecto. **J.M. ÁLVAREZ**. CLPU, Coordinador del presente proyecto.

Los láseres de baja intensidad no han sido relevantes en el pasado en lo que a protección radiológica se refiere. Sin embargo, conforme el desarrollo de la tecnología láser ha permitido alcanzar intensidades mayores, se ha puesto de manifiesto la necesidad de considerar la potencialidad de los láseres para generar radiación ionizante. Cuando se focaliza un pulso láser intenso

sobre un blanco (sólido o gaseoso), el campo electromagnético del láser es capaz de ionizar los átomos del material mediante mecanismos que no aparecen en los láseres comunes, produciendo un plasma de electrones. Estos electrones pueden producir a su vez, por interacción con la materia del blanco, protones, neutrones o radiación X/gamma por *Bremsstrahlung* (radiación de frenado).



Latinstock

Para saber si un láser es una fuente de radiación ionizante hay que considerar, además de la intensidad, parámetros como longitud de onda, duración del pulso o naturaleza del blanco

Las emisiones de este tipo de radiaciones hacen imprescindible el establecimiento de protocolos de protección radiológica en instalaciones de láseres intensos.

Definir la frontera a partir de la cual un sistema láser deba ser considerado fuente de radiación ionizante no es sencillo, pues si bien la intensidad del láser es uno de los parámetros más relevan-

tes, también deben ser considerados otros parámetros: la longitud de onda del láser (energía de los fotones), la duración del pulso y la naturaleza del blanco. La Figura 1 muestra un esquema de la región de riesgo radiológico en función de la intensidad del láser (para una longitud de onda de 800 nanómetros) y la densidad del blanco sobre el que se focaliza. En principio, una intensidad de

10^{16} W/cm^2 podría llegar a generar electrones de keV, por lo que eso podría ser la entrada a la zona de riesgo que debe ser considerada para protección radiológica.

Las medidas de seguridad y protección radiológica en instalaciones de láseres intensos es un tema de extrema importancia que debe ser abordado por los organismos competentes en materia de seguridad y protección radiológica, tanto nacionales –Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)– como internacionales –International Atomic Energy Agency (IAEA), International Commission on Radiological Protection (ICRP), International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)–. En este trabajo se presentan los protocolos necesarios para la aplicación de la normativa básica relativa a la radiación ionizante (RI) de los trabajadores expuestos, los trabajadores no expuestos, los usuarios y los miembros del público en general, en una instalación de láseres intensos. En particular, el estudio se ha centrado en el

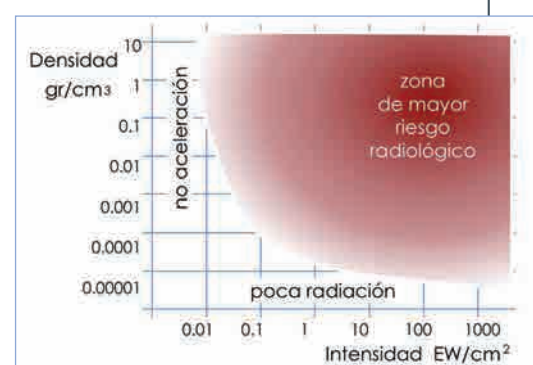


Figura 1. Esquema de la región de riesgo radiológico en función de los dos parámetros más relevantes: la intensidad del láser (con longitud de onda de 800 nanómetros) y la densidad del medio sobre el que se focaliza. Es evidente que si el blanco es de densidad muy baja apenas hay átomos con los que interaccione en el volumen focal y por ello no se genera radiación. La escala horizontal está en exavatios (10^{17} W) por cm^2 .

Centro de Láseres Pulsados (CLPU) por ser el laboratorio de referencia en España de láseres pulsados de femtosegundos con potencias de pico a nivel de gigavatios, teravatios y petavatios.

Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos (CLPU) de Salamanca

El CLPU¹ se encuentra en el edificio M5 del Parque Científico de la Universidad de Salamanca, ubicado en el término municipal de Villamayor (Salamanca). El Consorcio, formado por el Ministerio de Economía y Competitividad (anteriormente Ministerio de Educación y Ciencia), la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca, es el responsable del diseño, la construcción, el equipamiento y la explotación del centro. El objetivo de esta instalación es dar servicio internacional a la comunidad científica e industrial, proporcionando acceso a los más sofisticados láseres de alta potencia, así como asistencia científico-técnica a través de colaboraciones.

La línea principal del CLPU es un sistema láser de titanio: zafiro de 1 PW (5 J/30 fs, longitud de onda central en torno a 800 nm) operando a una tasa de repetición de hasta 1 Hz. Esta línea está dividida en tres fases de potencia creciente que pueden utilizarse simultáneamente, ofreciendo una escala de pulsos láser para las diferentes aplicaciones.

■ Fase 1: Láser VEGA-1 de 20 teravatios (500 mJ/25 fs), con frecuencia de repetición de 10 disparos por segundo (10 Hz).

■ Fase 2: Láser VEGA-2 de 200 teravatios (5 J/25 fs), con frecuencia de repetición de 10 disparos por segundo (10 Hz).

■ Fase 3: Láser VEGA-3 de 1 petavatio (30 J/25 fs), con frecuencia de repetición de 1 disparo por segundo (1 Hz).

Aunque la línea principal del CLPU sea el láser VEGA, con potencias pico de teravatios y petavatio, el centro dispone de otros sistemas láser que también ponen al servicio de la comunidad científica y técnica. Entre ellos un láser de gigavatio con una frecuencia de repetición de 1.000 disparos por segundo (1 kHz). Realizamos a continuación una breve exposición, en el contexto de la radioprotección, de estos sistemas láser de alta intensidad.

Sistemas láser de gigavatio

La potencia de una central eléctrica está en torno al gigavatio. Sin embargo, aunque pueda parecer paradójico, este tipo de sistemas podrían ser considerados en la actualidad de moderada intensidad. La tecnología en este campo está avanzando tanto que los sistemas láser de decenas de gigavatios empiezan a ser relativamente comunes. Se estima que en la actualidad hay unos 20 sistemas en ese rango de parámetros operativos en España. La radiación ionizante producida en este tipo de sistemas, compuesta por electrones y rayos X, ha sido estudiada para la interacción con blancos metálicos sólidos en el estudio previo elaborado con un proyecto de FUNDACIÓN MAPFRE (Fonseca, 2011). A pesar de la poca radiación que pueda llegar a generarse por disparo, la elevada tasa de repetición de estos sistemas láser (mucho mayor que los de potencia extrema) hace que puedan llegar a ser potencialmente peligrosos. Existen en la actualidad sistemas que buscan aumentar la tasa de repetición hasta los 10 kHz o incluso más.

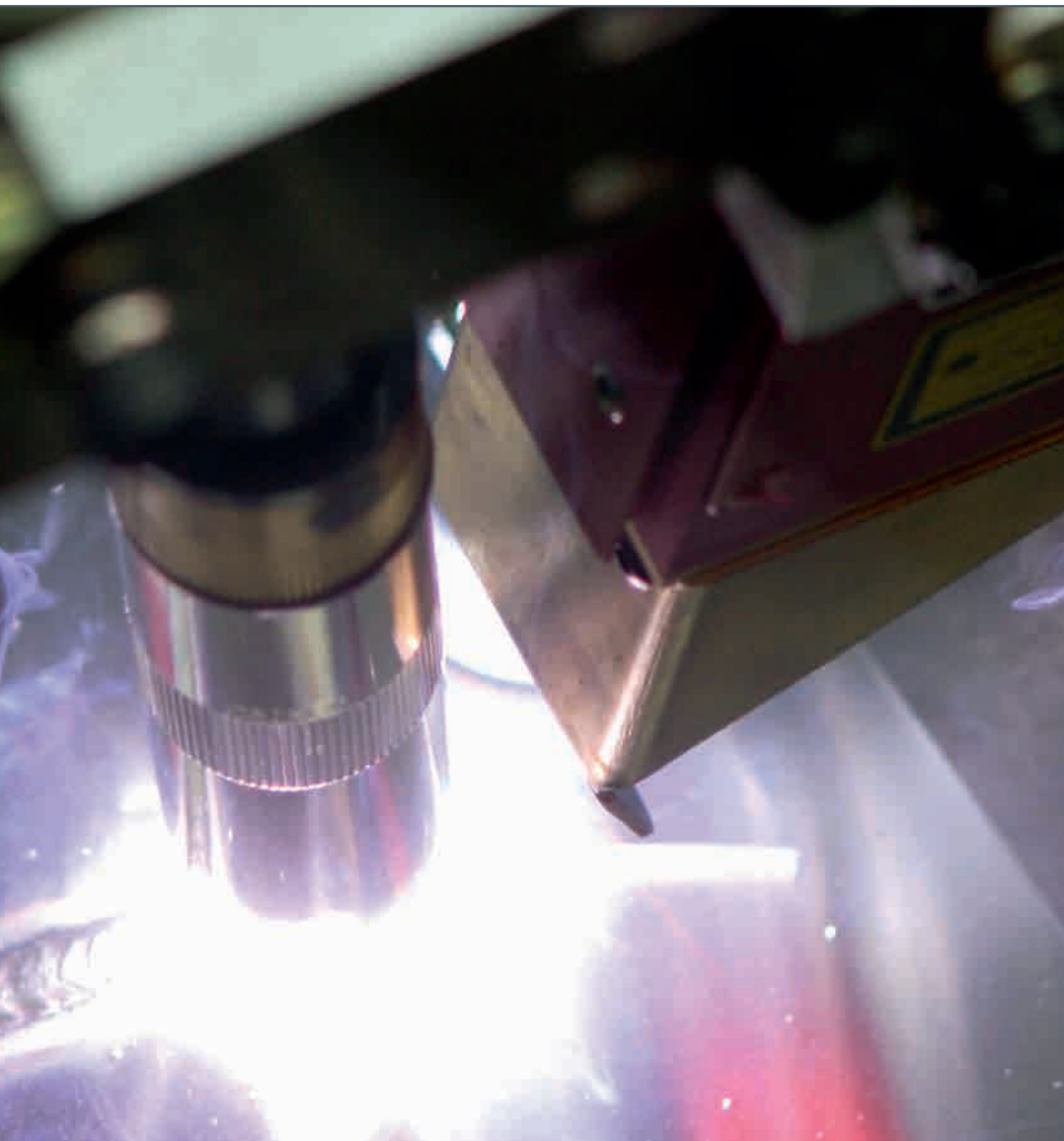
Sistemas láser de teravatio

Hace relativamente pocos años, el teravatio de potencia pico se veía como una potencia monstruosa, no en vano es del

orden de magnitud de la potencia eléctrica de toda Europa, inviable en un laboratorio de tamaño medio. La llegada de la tecnología CPA (*Chirped Pulse Amplification*) cambió radicalmente el panorama. Ahora los sistemas CPA están ya muy extendidos, son relativamente robustos y están abriendo muchas aplicaciones. Evidentemente, tener un láser de teravatio no representa ningún problema de consumo eléctrico descomunal porque el sistema es pulsado y el consumo de esta gran potencia se produce en tiempo muy reducido. En la actualidad los sistemas comerciales de teravatio (1 TW = 30 mJ/30 fs = 100 mJ / 100 fs) funcionan a tasas de repetición del orden de



(1) www.clpu.es



Latinstock

El objetivo del CLPU es dar servicio internacional a la comunidad científica e industrial, proporcionando acceso a láseres de alta potencia y asistencia científico-técnica

10 disparos por segundo (10 Hz). Hay algún sistema que llega a los 100 Hz y se están considerando sistemas que disparan a kHz. Son, en cualquier caso, sistemas de pocos vatios de potencia media.

Hemos visto que los sistemas de gigavatio ya pueden necesitar protección radiológica cuando se realiza una focalización extrema sobre un material. Por tanto, si aumentamos la potencia pico la necesidad de protección es más evidente. Una revisión bibliográfica de los estudios experimentales realizados en instalaciones de láseres de alta intensidad y publicados en los últimos años pone de manifiesto

esta evidencia. En un estudio realizado en el *Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses* (LULI), de París, un láser de 100 TW fue focalizado en diversos blancos (aluminio, oro y teflón) con intensidades que variaron entre 10^{17} y 10^{19} W/cm² (Borne, Delacroix, Gelé, Massé, & Amiranoff, 2002). En una serie de 150 disparos se detectaron niveles relevantes de rayos X, radiación gamma y neutrones, no encontrándose indicios de activación de los materiales circundantes. La radiación gamma emitida se correspondía con una radiación de energía media del orden de 700 keV, aunque la presencia de neutro-

nes producidos en reacciones fotonucleares sobre el aluminio y el oro sugiere la existencia de radiación gamma de mayor energía.

Las dosis medidas en la proximidad de la cámara de interacción (menos de 2 m de distancia) alcanzaban valores de entre 50 y 75 mSv. Estas dosis exceden el límite anual de exposición. La dosis equivalente de neutrones es 100 veces menor que la producida por radiación gamma. También se ha comprobado que la radiación se emite en un cono de 60° de apertura.

Sistemas láser de petavatio

Un petavatio es una potencia extraordinariamente alta y representa actualmente la frontera de la tecnología láser a nivel mundial. Aunque hay algunos sistemas de 10 petavatios en diseño, están todavía lejos –según nuestra información– de ser realidad y de poder servir para usos experimentales.

Existen varios sistemas de petavatio sub-picosegundo. Algunos de los pioneros se basaban en cristales con una frecuencia de disparo bajísima (pocos pulsos al día). Se puede obtener una información actualizada en el registro internacional de láseres intensos publicado por International Committee on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL)².

Para estos sistemas láser, no existe bibliografía que analice de forma sistemática los riesgos radiológicos. No obstante, en los documentos de *commissioning* del láser de petavatio Vulcan (Allot *et al.* 2000; J. D. & R.D. 2006), se puede obtener la siguiente información: para intensidades de 10^{20} W/cm² focalizadas sobre un blanco sólido se generan electrones con una energía promedio de 39 MeV, lo que produce a 1 m una dosis de radiación gamma por disparo de 0.17 mSv/J. En el régimen de 10^{21} se espera que la do-

(2) <http://www.icuil.org/events-a-activities/laser-labs.html>

sis sea de 0.6 mSv/J, lo que extrapolado a un año da lugar a una dosis de 70 Sv/año. La radiación se emite predominantemente en un cono de 40° de amplitud. No se especifica la dosis de neutrones, la cual se espera que sea importante para estas energías, así como la debida a procesos de activación.

Estimación de los niveles de radiación en el CLPU

El CLPU, como instalación radiactiva (IR), se ha propuesto el objetivo de que todas las zonas contiguas a la zona experimental sean de libre acceso. Para lograr este objetivo se ha de garantizar que la dosis recibida en las zonas contiguas no supere el valor de 1mSv/año. En la zona de experimentación se dispondrá de dos cámaras de interacción donde se encontrará localizada la fuente generadora de radiación ionizante, una multi-TW dedicada al láser VEGA-1 (20 TW) y VEAG-2 (200 TW), y otra para el láser VEGA-3 (1 PW). La Figura 2 muestra el esquema de la zona de experimentación con las cámaras de interacción, así como la zona contigua en que se sitúan los compresores de los sistemas láser.

Se exponen a continuación los pasos seguidos para la estimación de los niveles de radiación en la zona experimental donde se encuentran las cámaras de experimentación del CLPU y zonas contiguas. Para su elaboración se han considerado unas especificaciones concretas para el blindaje de la zona experimental, es decir, para las dimensiones y características de los materiales que configuran este blindaje. Como regla general, se han utilizado siempre los valores que llevarán a la adopción de las hipótesis más conservadoras.

La Figura 3 muestra un diagrama con la metodología empleada. En color rojo se indican los resultados obtenidos a través de esta metodología. Algunos aspectos relevantes de la aplicación de la metodología se analizarán a continuación:

Término fuente

Un conjunto de variables esenciales para la protección radiológica y la determinación de blindajes son las que caracterizan el término fuente (tipo de partículas generadas en la instalación, energía, número, distribución angular de emisión...). En una instalación convencional estos parámetros son fáciles de determinar a partir de las especificaciones del voltaje a que funcione el dispositivo

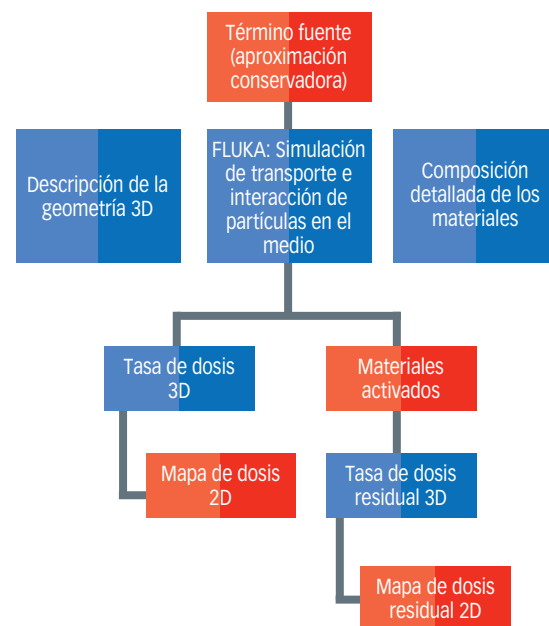


Figura 3. Diagrama con la metodología empleada para la determinación de los niveles de radiación en la zona experimental.

(caso de una instalación de rayos X) o la energía máxima de los electrones (caso de un acelerador). Sin embargo, en el caso de la radiación generada por un láser es necesario tener en cuenta más elementos. La fuente originaria de radiación es la distribución de electrones que se emiten en la interacción láser-materia. Dicha distribución depende de los distintos tipos de blancos, más específica-

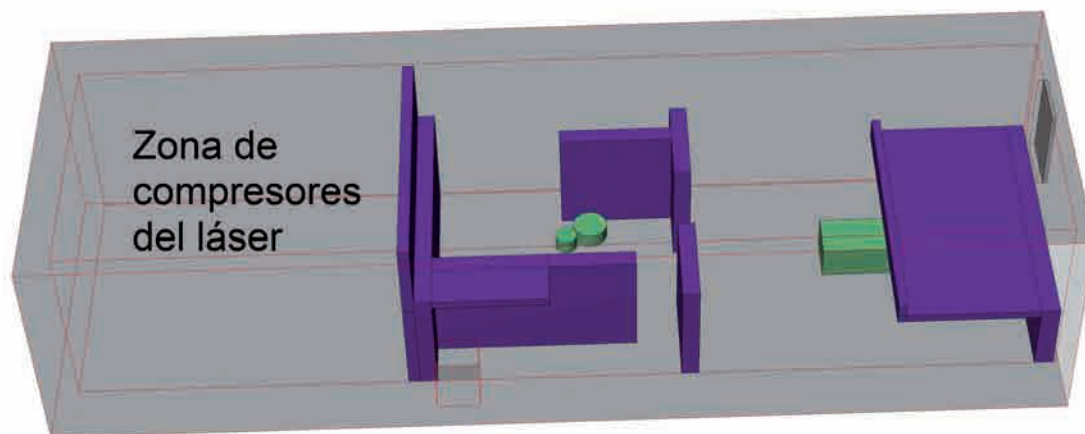
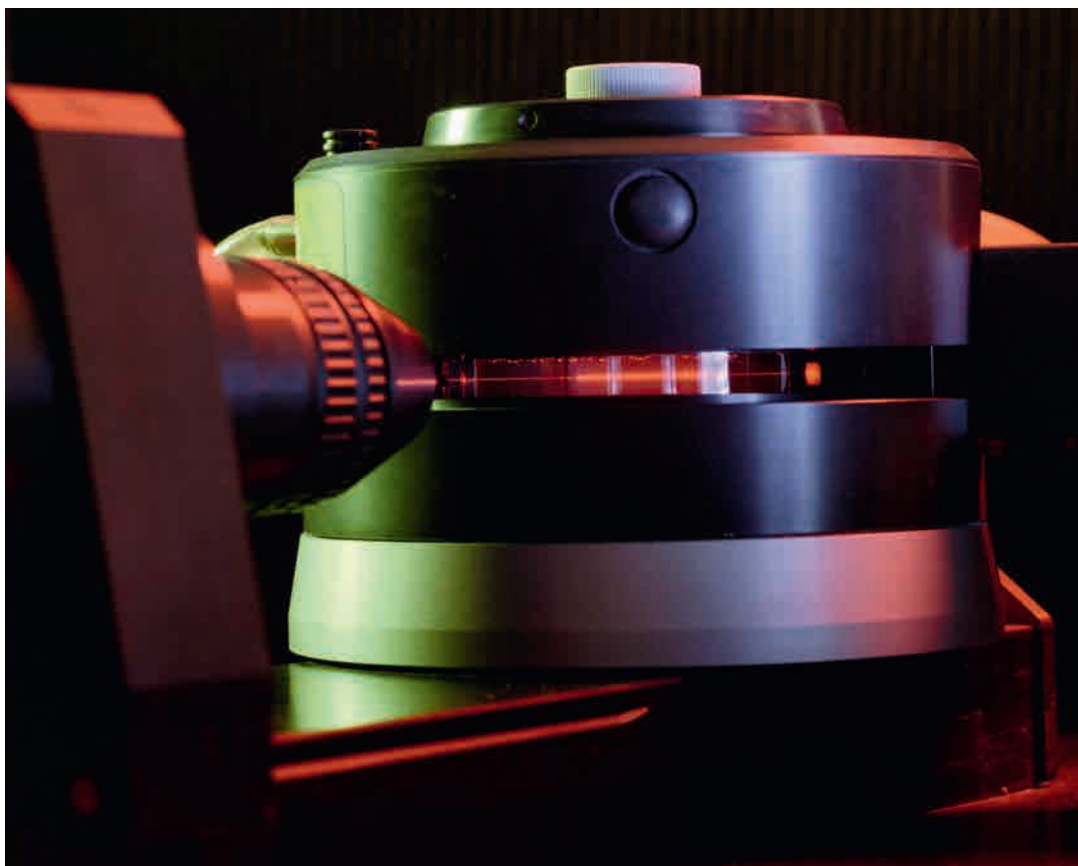


Figura 2. Esquema de la zona de radiación con las cámaras de interacción y la geometría usada para la simulación mediante el código Monte Carlo FLUKA. En color verde se ilustran las cámaras de interacción donde se producirá la aceleración láser. En morado se ilustran los muros de hormigón del interior de la zona experimental. También se ilustran los dos accesos a la zona experimental.



Latinstock

mente de las distintas densidades electrónicas de los mismos. En el caso de blancos sólidos el láser cede energía por diversos mecanismos indirectos, calentando el plasma, mientras que en el caso de blancos gaseosos el láser es capaz de acelerar directamente los electrones generados. En la bibliografía (Fernández, Conejero, & Roso, 2013; Meyerhofer, Chen, Delettrez, Soom, Uchida, & Yaakobi, 1993; Gibbon, 2005; Wilks, Kruer, Tabak, & Langdon, 1992; Gordienko & Pukhov, 2005; Lu y otros, 2006) se describen con detalle los términos fuente que corresponden a los dos tipos de blancos.

Código Montecarlo: FLUKA

A partir del término fuente, se simula el transporte y las interacciones de las partículas de éste y de las generadas por él mediante el código Montecarlo FLUKA (Battistoni y otros, 2007; Ferrari, Sala, Fassò & Ranft, 2005). Para esta simu-

lación es necesario realizar una descripción, lo más detallada posible, de la geometría de la instalación, así como de los materiales presentes en la misma. La geometría empleada para la simulación se muestra en la Figura 2.

Activación de materiales

En presencia del intenso campo eléctrico del láser, el desplazamiento de los electrones puede generar grandes campos eléctricos que produzcan la aceleración de protones o iones en función de las características del blanco. Los protones acelerados pueden producir neutrones en los elementos que rodean al punto de interacción a través de reacciones del tipo (p,n) o reacciones de

break-up. En determinados casos también pueden producirse neutrones en reacciones (γ, n), llegando a producirse típicamente 10^{-4} neutrones por cada ion. Finalmente, debido a las reacciones de tipo (p,n) pueden producirse activaciones secundarias en los materiales que rodean al blanco o en la propia cámara de reacción.

Es necesario evaluar cuidadosamente este tipo de activaciones, puesto que son las únicas que contribuyen a la dosis una vez apagado el láser, y pueden impedir el acceso al área de experimentación si son suficientemente elevadas. Existen varios métodos para reducir estas activaciones secundarias que incluyen utilizar blancos con el mayor nivel de pureza posible, una cuidadosa selección de los materiales de detección y diagnóstico, así como de los materiales que formen parte de las paredes de la cámara de interacción. En cualquier caso, en determinados experimentos, como pueden ser los de generación de radioisótopos, el blanco siempre queda activado y es necesario tener en cuenta esta activación para el acceso al área de experimentación.

Tasas de dosis

Los datos obtenidos de la simulación con FLUKA son procesados para obtener las tasas de dosis en cada punto del espacio, y de éstas, aquellas a las que está expuesto el personal que ocupa una determinada zona de la instalación.

Por otro lado, de la activación de los materiales (también simulada mediante FLUKA) se obtienen análogamente resultados relativos a las tasas de dosis que se producirán como resultado de la activación.

El CLPU, como instalación radiactiva, se ha marcado el objetivo de que todas las zonas contiguas a la zona experimental sean de libre acceso

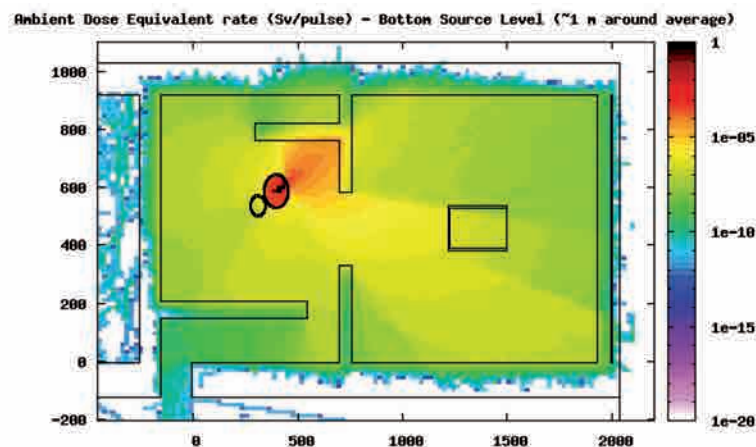


Figura 4. Estimación de la dosis ambiental del VEGA-2 (láser 200 TW). Vista de planta de la zona experimental.

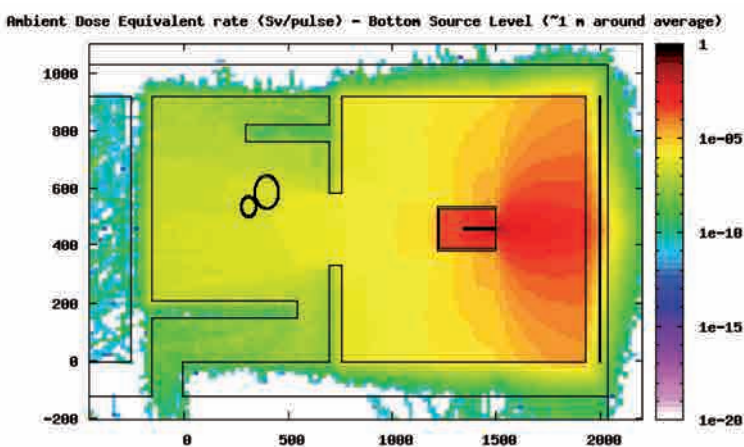


Figura 5. Estimación de la dosis ambiental del VEGA-3 (láser 1 PW). Vista de planta de la zona experimental.

A partir de la metodología presentada, se ha realizado el análisis de los niveles de radiación de los sistemas generadores de radiación ionizante del CLPU: acelerador láser plasma multi-TW y acelerador láser plasma PW. En la Figura 4 se muestra la distribución para el VEGA-2 (láser de 200 TW) y en la Figura 5 se muestra la distribución para el caso del VEGA-3 (láser de 1PW). Las dosis están dadas en Sv/pulso del láser. Es conveniente resaltar que estas representaciones muestran un cierto corte de la geometría de la instalación (y no una proyección), por lo que pueden no verse representadas partes que sí están en la simulación, como se muestra en el esquema de la Figura 2.

Se debe insistir en el hecho de que las estimaciones de los niveles de dosis ambiental se han obtenido para un disparo del láser. Es decir, se debe multiplicar por el número de disparos que se realicen para calcular la dosis ambiental en un periodo de tiempo dado.

En el CLPU se ha establecido que las zonas contiguas a la zona experimental sean de libre acceso. Por tanto, y según la legislación vigente, la dosis debe ser inferior a 1 mSv año en todas estas zonas. A partir de esta restricción, es posible determinar el número de disparos

Tabla 1. Valores máximos hallados de la dosis por pulso en la zona de compresores.

Sistema@Intensidad W/cm²	Dosis Sv/pulso	Numero de pulsos para dosis=1mSv	Pulsos diarios (dosis=1mSv) en exclusividad
VEGA-3@0,8E21	6E-11	16 x10 ⁶	150 x 10 ³
VEGA-3@1E22	2E-10	5 x10 ⁶	50 x 10 ³
VEGA-2@1E20	4E-11	25 x10 ⁶	240 x 10 ³
VEGA-2@1E21	6E-10	1,6 x10 ⁶	15 x 10 ³

del láser que garanticen una dosis inferior a 1 mSv/año en estas zonas.

En el caso concreto de la instalación del CLPU, el estudio realizado ha puesto de manifiesto que la zona que impone una restricción mayor sobre el número de disparos es la zona de compresores del láser (ver Figura 2). Los valores máximos hallados en la zona de compresores se resumen en la Tabla 1, así como alguna valoración sencilla del número de disparos posibles con el láser. Para determinar estos números se han supuesto 35 semanas de trabajo/año y 3 días de trabajo/semana. Se ha considerado que los sistemas no funcionarán simultáneamente.

Para estos cálculos se han considerado dos intensidades diferentes en el punto focal, tanto para el VEGA-2 como para el VEGA-3, que están delimitadas por

la distancia focal usada para el dispositivo experimental.

Identificación de los riesgos radiológicos asociados con la operación de la instalación CLPU

En una instalación de láseres intensos como el CLPU se han identificado dos tipos de riesgos radiológicos: irradiación externa y contaminación.

Riesgo de irradiación externa

Existe riesgo de irradiación externa en el interior de la zona experimental cuando se focalizan los disparos con el láser sobre un material usado como blanco. Con el láser apagado no existe riesgo de

irradiación mediante la radiación primaria, pero existe riesgo de irradiación si existen materiales activados en la zona experimental.

Riesgo de contaminación

Existe riesgo de contaminación debido a los residuos que se producen durante la interacción del haz del láser con el material usado como blanco. Inicialmente este material contaminable se encuentra confinado en el interior de la cámara de interacción donde se realizan los disparos.

Vigilancia y monitorización de la radiación en el CLPU

Detectores de área

Los detectores y monitores de radiación son empleados en instalaciones convencionales de aceleración de partículas (Sincrotrón, LINAC, Ciclotrón...) para vigilar y controlar las tasas de dosis durante la operación de la instalación. Sin embargo, existe una serie de prevenciones a considerar para evaluar la posibilidad del uso de los detectores empleados en aceleradores convencionales en el caso de una instalación de láseres intensos.

La peculiaridad fundamental de la radiación producida en una instalación de este tipo radica en la escala temporal de las emisiones. De forma intuitiva, para conseguir una gran potencia con un consumo de energía razonable, el intervalo temporal en que se emita la radiación láser ha de ser muy pequeño. En la práctica esto se traduce en que la escala temporal a la que se trabaja está en el orden de los femtosegundos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$).

Los diversos detectores de radiación existentes se basan en la idea de que una partícula deposita en el medio que los constituye una cierta energía, por el me-

canismo físico que sea, y esta energía depositada produce a su vez una señal eléctrica que da una medida con información de las partículas que lo han atravesado. Esos procesos físicos tienen también tiempos característicos que han de tenerse en cuenta en el diseño de un detector para conocer su comportamiento cuando ocurren sucesos «simultáneos» (*i.e.*, separados temporalmente por un tiempo mucho menor que el del proceso de detección).

Un detector «muy rápido» tiene tiempos característicos del orden de los nanosegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$), siendo aún así mucho más lento que la radiación emitida como consecuencia de las interacciones de un láser ultracorto. Así pues, es necesario que los detectores empleados estén verificados en la escala de femtosegundos y se conozca su comportamiento ante la radiación con estas características temporales.

Existen además otras dificultades para el empleo de detectores «tradicionales», como pueden ser las limitaciones geométricas y espaciales por las cámaras de vacío empleadas o por la trayectoria del láser, el elevado número de partículas producidas, el ancho energético del espectro y la posibilidad de interferencia del ruido electromagnético producido por el pulso láser con los posibles sistemas electrónicos de detección.

Dadas las características de la fuente generadora de radiación, en el CLPU se ha considerado como primera opción el uso de detectores pasivos (películas radiocrómicas y TLDs) para determinar la dosis en el interior de la zona experimental y áreas próximas.

Por otra parte, también se usarán detectores activos (gamma y neutrones)

para monitorizar de forma continua la dosis en el exterior de la zona experimental así como la tasa de dosis en el interior de la zona experimental, una vez que los disparos del láser sobre el blanco han finalizado (dosis procedente de la posible activación de materiales en la zona experimental).

Detectores personales

La vigilancia y monitorización del personal que trabaje en la zona experimental de la instalación radiactiva se realizará mediante detectores TLDs (detectores TLDs dopados con litio para la dosimetría de neutrones). Esta dosimetría personal será llevada a cabo por un servicio externo a la instalación del CLPU, como por ejemplo, el Centro Nacional de Dosimetría (CND)³.

Evaluación del impacto potencial de cada uno de los riesgos

Sobre los trabajadores

Los niveles dosimétricos causados por la radiación generada en la zona experimental en puntos exteriores a la misma se han estimado muy bajos. Por ello, el objetivo de considerar que todas las zonas contiguas a la zona experimental sean zona pública es realizable, ya sea solamente con el blindaje estructural del área de experimentación, o con blindajes locales que se vean necesarios una vez puesta en funcionamiento la instalación.

Dado que la presencia de trabajadores en el interior de la zona experimen-

(3) <http://www.cnd.es/cnd/index.php>

tal, una vez parada la operación, se realizará de manera controlada, la posible exposición de los trabajadores a zonas que hayan quedado activadas se considera que será mínima o residual.

Es por este motivo que se considera que ningún trabajador de CLPU se verá expuesto a una dosis anual superior a 1 mSv, de tal manera que todos los controles que se realicen desde el primer momento de la puesta en marcha de la instalación estarán orientados a realizar dicha comprobación, y en caso de detectar tasas de dosis totales (fotónica y neutrónica) superiores a 1 mSv/año, se procederá a mitigar el efecto causante, y si no es posible, se realizará un blindaje local que garantice la tasa de dosis pública.

Inicialmente, las zonas contiguas a la zona experimental (por ejemplo, la zona de compresores) se clasificarán como zonas vigiladas. Dependiendo de las medidas de radiación posteriores se procederá a cambiar tal clasificación.

Sobre los usuarios y el público

El impacto radiológico sobre los usuarios y el público en general debido a la operación de los aceleradores láser plasma será residual o prácticamente nulo, dado que el objetivo que se persigue es que ningún trabajador del CLPU (o cualquier persona externa) pueda recibir durante su estancia una dosis total superior a 1 mSv/año.

La probabilidad de superar los niveles anuales de dosis que se dan en el presente estudio es prácticamente cero dada la naturaleza de la radiación que origina dicha dosis: si se desconecta el sistema de acelerador láser-plasma, la radiación directa desaparece y las emisiones debidas a la activación son prácticamente residuales en el interior de la zona experimental y nulas en el exterior del mismo. Es más, si se impide la focalización del láser, es totalmente imposible la generación de radiación ionizante.

Selección y evaluación de las medidas para reducir los riesgos a niveles aceptables

Con el fin de controlar y reducir los posibles riesgos debido al funcionamiento del sistema de aceleración láser-plasma, se adoptarán tres medidas que garantizarán la reducción de los riesgos

radiológicos durante la puesta en marcha del CLPU:

- Empleo de valores mínimos de intensidad en foco mediante una focal larga, de manera que el aumento de dicha intensidad pueda ser realizada de manera controlada si se cumplen todas las garantías de seguridad.
- Reducción del número de disparos del láser a valores mínimos y muy lejanos al valor nominal del sistema láser.



El CLPU debe elaborar un Manual de Protección Radiológica que describa medidas para conseguir que las dosis individuales de radiación, el número de personas expuestas y la probabilidad de exposiciones potenciales sean lo más bajas posible

- Desalojo de las zonas contiguas a la zona experimental de todo el personal, hasta que se haya comprobado fehacientemente que no existe ningún riesgo de trabajo en las inmediaciones

del mismo. En caso de no poderse desalojar totalmente estas zonas, se controlará la presencia de personal en las mismas, minimizando la exposición de cualquier trabajador.

Con este *modus operandi* se garantizará que desde el primer día no se realice ninguna exposición innecesaria y descontrolada para ningún trabajador del CLPU o trabajador externo.

Conclusiones

En una instalación radiactiva, como es el caso del CLPU, los protocolos y procedimientos escritos son una de las herramientas básicas para la prevención de los riesgos radiológicos. Estos procedimientos estarán consensuados entre los componentes de las áreas implicadas y el servicio de protección radiológica, y refrendados por la dirección de la instalación o su representante. Una vez aprobados, serán distribuidos entre las personas implicadas y serán revisados periódicamente, no solamente cuando tenga lugar cualquier modificación de la normativa que afecte a la actividad a la que se refieren.

Los estudios realizados en el presente proyecto se han dirigido a presentar los protocolos (aplicando la normativa vigente) para la protección contra los riesgos derivados de la exposición a la radiación ionizante (RI) de los trabajadores expuestos, los trabajadores no expuestos, los usuarios, los estudiantes en prácticas y los miembros del público en general, en las instalaciones de láseres intensos. En particular, el estudio se ha basado en el Centro de Láseres Pulsados,

para el cual se han identificado los riesgos radiológicos y se han estimado los blindajes y sistemas de detección necesarios para garantizar la seguridad y la protección frente a RI, durante la puesta en marcha y funcionamiento del centro.

Aplicando la normativa vigente, el CLPU debe solicitar la autorización de funcionamiento como instalación radiactiva, dando cumplimiento al Real Decreto 1836/1999, posteriormente modificado por el Real Decreto 35/2008, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, y al R.D. 2080/1999 (BOCyL 28.01.2000), donde se han transferido a la comunidad autónoma funciones en materia de instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría. Por otra parte, la solicitud de autorización de funcionamiento de una instalación de primera categoría debe ser presentada ante el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), único órgano competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica del Estado español.

Como instalación radiactiva, el CLPU debe elaborar un Manual de Protección Radiológica (MPR) donde se describan las medidas necesarias para conseguir que las dosis individuales, el número de personas expuestas y la probabilidad de que se produzcan exposiciones potenciales sean lo más bajas posible. Los estudios realizados en el transcurso de este proyecto han proporcionado la información necesaria para la elaboración del MPR del CLPU. A continuación se describen brevemente las principales medidas de protección radiológica en la instalación del CLPU. Todas ellas serán desarrolladas en el correspondiente manual a partir del estudio realizado:

- **Clasificación del personal.** Por razones de seguridad, vigilancia y control radiológico, las personas que trabajan en la instalación del CLPU se clasifi-



Latinstock

Los protocolos de una instalación radiactiva como el CLPU deben consensuarse entre los componentes de las áreas implicadas y el servicio de protección radiológica del centro

can, en función de las condiciones en que realizan su trabajo, en:

- Trabajadores expuestos (categorías A y B).
- Usuarios y miembros del público.
- **Límites de dosis.** Se aplicarán diferentes límites de dosis para cada tipo de trabajador contemplados en la legislación vigente.
- **Clasificación de zonas.** Se clasificarán los lugares de trabajo de la instalación CLPU de acuerdo con la evaluación de las dosis anuales previstas y la probabilidad (así como la magnitud) de las exposiciones potenciales. Inicialmente

se realizará una clasificación conservadora de las zonas, que podrá ser modificada una vez se hayan comprobado fehacientemente los niveles de dosis anuales.

- **Normas generales en zonas con riesgo radiológico.** Se dictarán unas normas de acceso, procedimientos de trabajo y equipos de protección individual asociados.
- **Señalización.** Se señalarán convenientemente las diferentes zonas según su clasificación, así como los materiales o equipos generadores de radiación ionizante.



Protocolos relativos a la protección radiológica

Atendiendo al estudio realizado en este proyecto, y gracias al equipo interdisciplinar constituido para la ejecución del mismo, se concluye con una serie de protocolos de protección radiológica en el CLPU. Estos protocolos estarán consensuados entre los componentes de las áreas implicadas y el Servicio de Protección Radiológica del Centro, y refrendados por la dirección o su representante. Una vez aprobados, deben ser distribuidos entre las personas implicadas y ser revisados periódicamente.

- Protocolos de verificación de detectores, monitores de radiación y contaminación de la instalación CLPU.
- Protocolo de uso de fuentes radiactivas de verificación de los detectores.
- Protocolo de control de hermeticidad de las fuentes radiactivas.
- Protocolo de clasificación y señalización de zonas de la instalación CLPU.
- Protocolo de clasificación de personal en la instalación CLPU.
- Protocolo de control de trabajos de investigación que se vayan a realizar en la zona experimental.
- Protocolo de vigilancia de la radiación externa en la instalación CLPU.

- Protocolo de control dosimétrico del personal en la instalación CLPU.
- Protocolo de evacuación de la zona experimental previo a la puesta en marcha de algún sistema generador de RI.
- Protocolo de gestión de licencias y autorizaciones.
- Protocolo de gestión de material activado en la zona experimental.
- Protocolo de formación e información en protección radiológica.
- Protocolo de comunicación con el titular y otros servicios implicados.
- Protocolo de intervención del servicio de protección radiológica en la documentación preceptiva de las instalaciones.
- Protocolo de actuación en caso de incidente o accidente radiológico.
- Protocolo de simulación de las situaciones de emergencia.
- Protocolo de notificación de los accidentes.
- Protocolo de trabajos en zonas controladas y vigiladas.
- Protocolo de actuación en materia de vigilancia de la salud de los trabajadores.
- Protocolo de planes de mejora.



Latinstock

■ Vigilancia y control de la radiación.

Incluye la vigilancia del ambiente de trabajo, la evaluación de la exposición de los trabajadores expuestos, la vigilancia sanitaria y las normas de protección de personas en formación y estudiantes. También distingue la protección especial para usuarios y miembros del público.

■ Gestión y control del material radiactivo. Tiene como objetivo ejercer

un adecuado control sobre el material radiactivo (fuentes de calibración y material activado) para minimizar los riesgos en todos los aspectos, siendo necesaria la aplicación de normas de seguridad desde el momento de su adquisición, para el caso de las fuentes, o desde que se detecta su existencia, para el caso del material activado.

■ Procedimientos para el proyecto y aceptación de experimentos en la instala-

ción con riesgo radiológico. La instalación y aceptación de experimentos, cuya realización implique riesgo radiológico debe llevarse a cabo siguiendo criterios que no solo atiendan a objetivos técnicos y científicos perseguidos, sino también que minimicen las dosis asociadas a su uso, siempre dentro de los límites establecidos en la instalación.

■ Sistema de registros.

Se establecerán unos criterios y prácticas para la generación y conservación de registros.

■ Formación y entrenamiento en protección radiológica (PR).

Se establecerá un régimen y condiciones de formación y entrenamiento en PR.

■ Criterios de optimización.

Se establecerán una serie de criterios referentes a la exposición ocupacional y del público y unas restricciones de dosis asociadas.

■ Sistema de calidad.

Se describirá una serie de elementos del sistema de calidad destinados a fortalecer el ciclo de mejora continua.

■ Plan de emergencia.

Se describirán las contramedidas, responsabilidad, notificación y formación asociadas a cada una de las posibles situaciones de emergencia. ♦

Este trabajo ha sido financiado gracias a una Ayuda a la Investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

Referencias

- [1] Meyerhofer, D. D., Chen, H., Delettrez, J. A., Soom, B., Uchida, S. & Yaakobi, B. (1993). Resonance absorption in high-intensity contrast, picosecond laser-plasma interactions. *Phys. Fluids B*, 5 (7), 2584-2588.
- [2] Wilks, S. C., Kruer, W. L., Tabak, M. & Langdon, A. B. (1992). Absorption of ultra-intense laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 69 (9), 1383-1386.
- [3] Allot, R., Wright, P., Danson, C., Edwards, C., Neely, D., Norreys, P. y otros. (2000). *Vulcan Petawatt Upgrade: The Radiological Perspective*. Central Laser Facility
- [4] Battistoni, G., Muraro, S., Sala, P., Cerutti, F., Ferrari, A., Roesler, S. y otros. (2007). The FLUKA code: Description and benchmarking. En M. Albrow, & R. Raja (Ed.), *AIP Conference Proceedings*, 896, págs. 31-49.
- [5] Borne, F., Delacroix, D., Gelé, J. M., Massé, D. & Amiranoff, F. (2002). Radiation protection for an ultra-high intensity laser. *Rad. Prot. Dosim.*, 102 (1), 61-70.
- [6] Fernández, F., Conejero, E. & Roso, L. (2013). *Protección radiológica en instalaciones de láseres infrarrojos intensos*.
- [7] Ferrari, A., Sala, P., Fassò, A. & Ranft, J. (2005). *FLUKA: a multi-particle transport code*. CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773. Geneva.
- [8] Fonseca, C. (2011). *Generación de electrones y rayos X a partir de pulsos láser de GW y alta tasa de repetición, y su protección radiológica*. Tesis doctoral, Universidad de Salamanca.
- [9] Gibbon, P. (2005). *Short Pulse Laser Interactions With Matter: An Introduction*. Imperial College Press.
- [10] Gordienko, S. & Pukhov, A. (2005). Scalings for Ultrarelativistic Laser
- [11] J., C. R., D., N. & R.D., E. (2006). Radiological characterisation of photon radiation from ultra-high-intensity laser-plasma and nuclear interactions. *J. Radiol. Prot.*, 26 (3), 277-286.
- [12] Lu, W., Tzoufras, M., Joshi, C., Tsung, F. S., Mori, W. B., Vieira, J. y otros. (2006). Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime. *Plasma Physics*.