



EL CENTRO DE LÁSERES PULSADOS DE SALAMANCA

El Centro de Láseres Pulsados Ultracortos (CLPU) de Salamanca es una Infraestructura Científico Técnica Singular (ICTS), cuyo objetivo es dar servicio a la comunidad científica e industrial, proporcionando acceso a los más sofisticados láseres de alta potencia (multi-teravatios y petavatio). El desarrollo de fuentes de radiación ionizante generadas por láser (fotones, electrones, protones/iones y neutrones) ha despertado gran interés en múltiples sectores. Aunque quedan muchos problemas por resolver parece un progreso imparable, dado el rápido desarrollo de la tecnología láser y las ventajas intrínsecas en términos de bajo coste y reducido tamaño.

INTRODUCCIÓN

En Salamanca, más concretamente en el término municipal de Villamayor, a unos 30 Km de Juzbado, se encuentra el Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultrainensos (CLPU). El CLPU es la Infraestructura Científico Técnica Singular (ICTS) española especializada en láseres ultrapotentes. Es un consorcio público del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, la Junta de Castilla y León y la Universidad de Salamanca. El CLPU es el primer centro de nuestro país en llegar a unas intensidades tan extremas que los

fenómenos originados en la interacción de la luz del láser con la materia hacen necesario la protección radiológica en la instalación. No en vano, el CLPU es la primera instalación láser en obtener una licencia del CSN como Instalación Radiactiva de 2ª Categoría con fines de investigación.

LÁSERES PULSADOS ULTRACORTOS ULTRAINTEOSOS

Láser es un acrónimo que proviene de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, el proceso de amplificación de la luz por emisión



Figura 1. Edificio M5, sede del Centro de Láseres Pulsados (CLPU), donde se encuentra el láser VEGA, uno de los láseres más potentes y avanzados del mundo.



JOSÉ MANUEL ÁLVAREZ PASTOR

Jefe del Servicio de Protección Radiológica

CENTRO DE LÁSERES PULSADOS ULTRACORTOS (CLPU)

Doctor en Física por la Universidad Autónoma de Barcelona.



LUIS ROSO FRANCO

Director del CLPU

CENTRO DE LÁSERES PULSADOS ULTRACORTOS

Catedrático de Física de la Universidad de Salamanca.

THE SPANISH CENTER FOR PULSED LASERS IN SALAMANCA

The Spanish Center for Pulsed Lasers (CLPU) in Salamanca is a Unique Research and Technology Infrastructure (ICTS), whose purpose is to serve both the scientific community and the industry by providing access to state-of-the-art high power lasers (multi-Terawatt and Petawatt). The development of radiation sources driven by laser (photons, electrons, protons/ions and neutrons) has aroused great interest in many sectors. Although many unresolved issues remain it seems like an unstoppable progress, given the rapid development of laser technology and the intrinsic advantages in terms of low cost and small size.

estimulada de radiación. Desde la construcción del primer láser en 1960, cuando Theodore Maiman consiguió amplificar por primera vez la luz, los láseres se han desarrollado y especializado de múltiples formas. Una de estas líneas de desarrollo ha desafiado constantemente los límites de amplificación impuestos por la tecnología existente en cada momento, dando lugar a los láseres ultraintensos.

Los láseres pueden trabajar de manera continua o de forma pulsada, concentrando la energía en un pulso de luz con una determinada duración. La potencia de un láser, los vatios que proporciona (energía por unidad de tiempo), no depende únicamente de la energía, sino también de la capacidad de concentrar esta energía en el tiempo. El añadir más y más fotones en un pulso, es decir, el añadir más energía (más julios), rápidamente se encontró con el obstáculo del daño en los materiales. Los elementos ópticos o los propios medios materiales usados como amplificadores imponen unos ciertos límites.

La primera estrategia seguida para continuar incrementando la energía, es ensanchar el haz del láser. Se evita alcanzar el umbral de daño de los materiales distribuyendo la energía espacialmente. Como contrapartida, las dimensiones de los láseres se hacen enormes y es necesario construir grandes instalaciones para alcanzar energías elevadas (kilojulios o megajulios). Sin embargo, y gracias al desarrollo de la técnica CPA (*Chirped Pulse Amplification*) propuesta por Gerard Mourou y Donna Strickland, en la Universidad de Rochester, Nueva York,



Figura 3. Compresor de pulsos del haz de PW del sistema láser VEGA.

hacia 1985, se abrió la posibilidad de amplificar hasta límites extraordinarios, sin necesidad de construir grandes instalaciones. De manera análoga a la estrategia anterior, para poder amplificar por debajo del umbral de daño, la técnica CPA reparte la energía del pulso, pero en este caso se hace temporalmente en lugar de

espacialmente, y luego se comprime nuevamente el pulso hasta su duración inicial.

Hoy en día es posible, y relativamente sencillo, generar pulsos láser de pocas decenas de femtosegundos de duración. El femtosegundo es la unidad de tiempo que equivale a la milbillonésima parte de un segundo o, dicho de otra manera, en un segundo hay mil billones de femtosegundos (un uno seguido de 15 ceros). Para hacernos una idea clara de esta escala, caben tantos femtosegundos en un segundo como segundos en 100 millones de años (algunos más en este caso). Tampoco está mal pensar estos tiempos tan cortos como distancias (la distancia que la luz recorre en vacío durante esos tiempos). Por ejemplo, los 30 femtosegundos en los que trabajamos habitualmente en el CLPU corresponden a 10 micras (imagina el tiempo que la luz necesita para atravesar una fina hoja de papel). Cuando en esta escala de tiempo se concentran unas decenas de julios, se alcanza potencias extremas, como el petavatio de Salamanca.

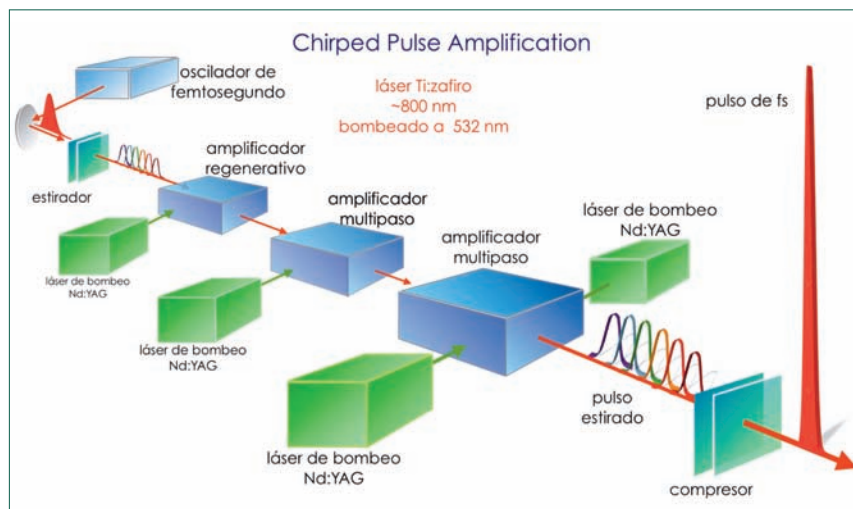


Figura 2. Esquema del sistema CPA similar al del VEGA de Salamanca.



En el CLPU se encuentra el láser VEGA, uno de los láseres más potentes y avanzados del mundo. VEGA es un láser de titanio-zafiro, el medio activo es titanio que está actuando como dopaje de un cristal de zafiro sintético (el zafiro es corindón, óxido de aluminio Al_2O_3). Detalles aparte, es un láser que emite en torno a los 800 nanómetros de longitud de onda (en el infrarrojo cercano al visible) en pulsos con una duración de 30 femtosegundos. Si bien es un láser basado en la técnica CPA, para poder amplificar sin destruir la óptica a cada disparo, el haz del petavatio de Salamanca tiene 24 centímetros de diámetro. Con estos tamaños de haz, la óptica empleada en el compresor implica disponer de redes de difracción de más de medio metro de anchura. Lejos de la imagen de un puntero láser, podemos imaginar el haz del petavatio como un disco de luz de 10 micras de espesor y 24 centímetros de diámetro que solamente puede propagarse en alto vacío.

Petavatio es una potencia que puede impresionar. La red eléctrica española son unos 50 gigavatios, por lo que estamos hablando de 20.000 veces esa potencia. Sin embargo, lo que marca la interacción con la materia es la intensidad (potencia/superficie), la capacidad que tenemos de concentrar—o focalizar—el disco de luz en un área (o spot) de unas pocas micras de radio. Cuando ponemos energías de decenas de julios en volúmenes de micras, es cuando alcanzamos límites realmente impresionantes. Un láser de teravatio se puede enfocar por encima de los 10^{18} W/cm² y uno de petavatio, se puede enfocar por encima de los 10^{20} W/cm² (para hacernos una idea, esta intensidad es equivalente a concentrar toda la luz del Sol que incide sobre la Tierra, en un punto focal de algo menos de 0.2 mm²), o incluso 10^{22} W/cm², que es el récord mundial de intensidad actualmente. Eso es un valor realmente extremo, por ello los láseres extremos han marcado un cambio radical en nuestra evolución de la interacción luz materia. Obsérvese que la unidad que empleamos es energía/tiempo/superficie, ya que es la mejor forma de apreciar cómo concentramos la energía en espacio-tiempo. Los vatios divididos por centímetro cuadrado (W/cm²) son una unidad un poco extraña, pues

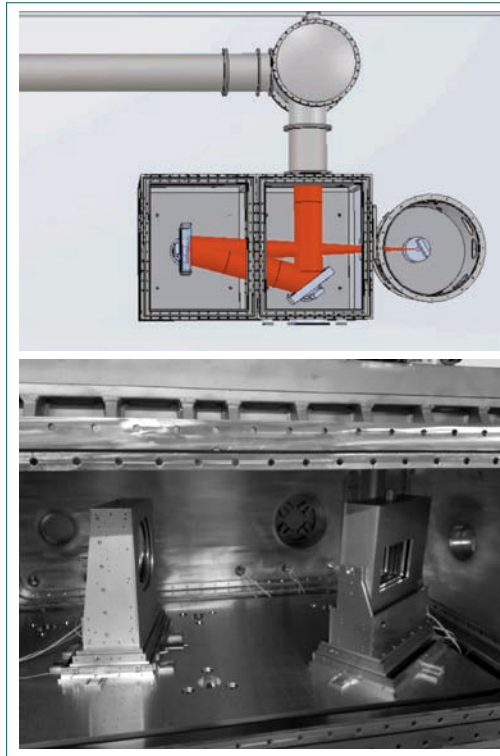


Figura 4. Cámara de vacío donde se encuentra el espejo parabólico que focaliza el haz VEGA de PW. El haz del láser, de 24cm de diámetro llega desde el compresor en un tubo de alto vacío y se focaliza hasta unas pocas micras de radio.

debería ser en el Sistema Internacional: vatios divididos por metro cuadrado. Sin embargo, la comunidad de láseres intensos ha adoptado esa unidad.

LOS LÁSERES ULTRAINTENSOS Y LA ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS

Cuando consideramos intensidades por encima de los 10^{16} W/cm², el campo eléctrico del láser es tan intenso que la barrera coulombiana que liga un electrón atómico con su núcleo queda suprimida. En pocos femtosegundos se genera un paquete de electrones muy compacto. Tanto es así, que se está considerando seriamente este efecto para inyectores de electrones en los aceleradores. Esta supresión de barrera ocurre para una intensidad relativamente moderada según los límites actuales, y muchos órdenes de magnitud por debajo del récord mundial mencionado. A continuación, veremos cuál es la fenomenología que tenemos para estas intensidades extremas.

El láser, como luz que es, es una onda electromagnética. Los campos eléctricos y magnéticos del láser ejercen una fuerza sobre cualquier partícula cargada (electrón o protón). Para intensidades superiores a los 10^{18} W/cm² el movimiento de los electrones se puede calcular fácilmente a partir de la expresión de la fuerza de Lorentz. La fuerza es directamente proporcional a la carga (igual y de signo contrario para electrones y protones) y la aceleración producida inversamente proporcional a la masa. Como la masa es mucho mayor en el

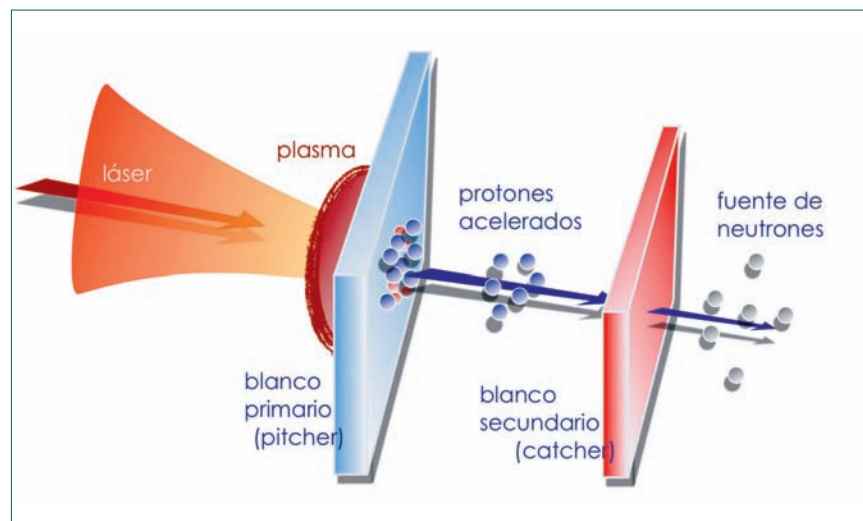


Figura 5. Esquema de uno de los mecanismos de generación de neutrones mediante la aceleración de protones (en el blanco primario) por efecto del láser. Los protones inciden sobre un blanco secundario donde se inducen reacciones nucleares que originan la producción de neutrones.

caso de los protones (casi 2000 veces mayor) la aceleración de los electrones será mucho mayor y en pocos femtosegundos pasarán a tener una velocidad muy significativa. El movimiento será oscilatorio, con una forma compleja típica en forma de ocho, debido a los efectos relativistas. La aceleración que produce un láser de este tipo es enorme, posiblemente la más violenta que se pueda lograr en un laboratorio. Lo cual es lógico al producirse los campos eléctricos más intensos que se pueden conseguir (para intensidades de 10^{20} W/cm² son del orden de megavoltios/micrómetro). Es este sentido, se puede decir que los láseres son los aceleradores por excelencia. Sin embargo, a diferencia que ocurre en los aceleradores convencionales (por ejemplo, en el CERN) la aceleración ultravioleta producida por una láser dura poco tiempo y por ello las velocidades (energías) finales son menores. Evidentemente, la dinámica es válida para cualquier partícula cargada, pero debemos tener presente la masa. Por ejemplo, para tener la misma dinámica con un protón que con un electrón se necesitan

unas (2000)² veces más de intensidad. Por eso la dinámica relativista de electrones empieza a 10^{18} W/cm² mientras que para protones empezará a 10^{24} W/cm², una intensidad a la que no se ha llegado, todavía.

Las consideraciones descritas son válidas para una única partícula cargada. Sin embargo, cuando hacemos incidir el láser en el laboratorio sobre un blanco, se ionizan muchos átomos instantáneamente (en pocos femtosegundos) generando un plasma de electrones e iones. Los electrones se moverán mucho más rápidamente que los iones y en el plasma se produce una dinámica muy peculiar, con campos inducidos muy intensos, todo ello en escala de femtosegundos. Los efectos de plasma comienzan a poder controlarse, gracias a lo cual se pueden obtener aceleradores muy sofisticados y muy compactos. Se ha demostrado; por ejemplo, que un láser de petavatio permite acelerar electrones a energías de giga-electronvoltios y protones a energías de centenares de megaelectronvoltios (en condiciones óptimas).

Por lo dicho, los láseres se están empezando a consolidar como los aceleradores de partículas del siglo XXI. Quedan muchos problemas por resolver, pero es un progreso que parece imparable. El más importante de ellos es el flujo de partículas, la corriente. Los láseres son cada día más pequeños, potentes y baratos, y permiten considerar nuevos conceptos de aceleradores ultracompactos, aceleradores con una baja corriente promedio, pero con un pico de corriente absolutamente inalcanzable con sistemas convencionales.

Por ello, la comunidad de los láseres está identificando aquellas aplicaciones de los aceleradores donde los láseres presenten ventajas cualitativas respecto a sistemas convencionales. Una de ellas es el flujo instantáneo y posibles efectos nuevos por acumulación de partículas. Otra de ellas es la protección radiológica. Al ser un sistema óptico en el infrarrojo cercano, la protección radiológica está limitada sólo al sistema de focalización, lo que facilita su instalación en entornos complejos como hospitales (aplicaciones médicas) o aeropuertos (aplicaciones en seguridad).

El enorme flujo pico, permite analizar nuevos conceptos. Por ejemplo, la terapia con protones cuando todos los protones necesarios para llegar a la dosis prescrita en un punto se reciben de golpe - subpicosegundo - en lugar de recibirse de forma continua. Se está avanzando mucho en analizar las diferencias entre un haz de protones acelerado convencionalmente o un haz de protones acelerado por láser. Aunque la energía y su dispersión sean las mismas, en el caso convencional van llegando poco a poco al tejido a tratar, mientras que en el caso láser llegan de golpe. Los láseres también presentan muchas ventajas para fabricar dosis individuales in situ de radiofármacos de vida muy corta.

DIVISIÓN DEL NÚCLEO CON LUZ LÁSER

La capacidad de los láseres para inducir transiciones nucleares fue predicha teóricamente hace casi treinta años, pero no fue hasta el año 2000 cuando pudo demostrarse experimentalmente, con los primeros resultados obtenidos con grandes láseres en Reino Unido y Estados Unidos, operando con pulsos de picosegundos y energías de kilojulios, a una tasa de repetición muy limitada (pocos disparos al día). Pocos años después se obtuvieron los prime-

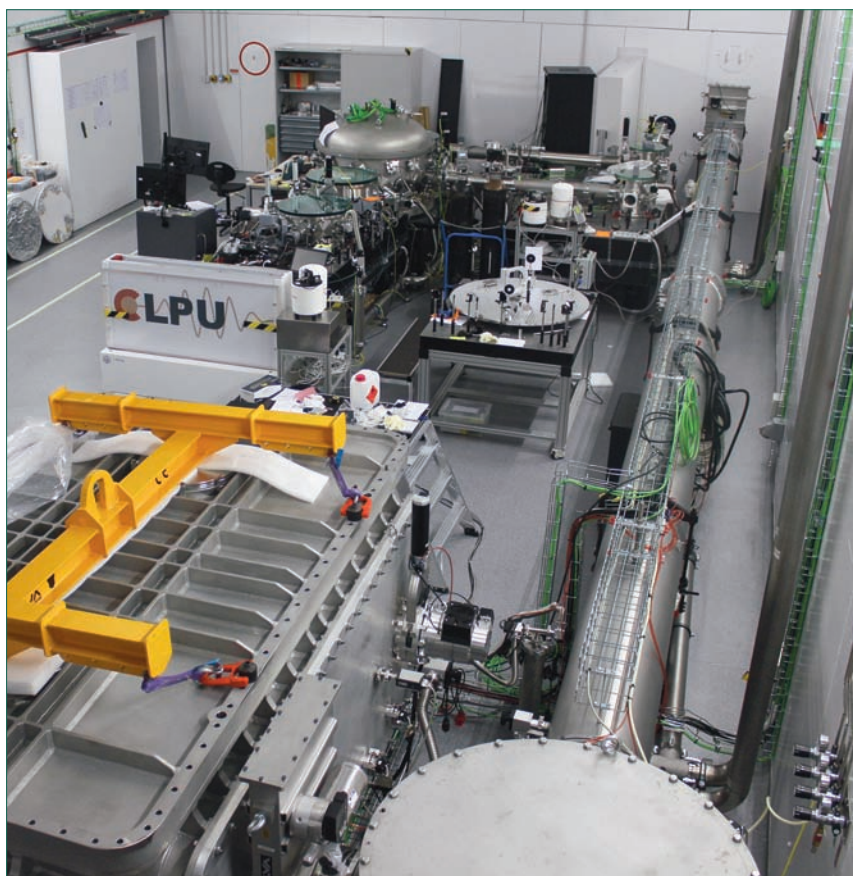


Figura 2. Esquema del sistema CPA similar al del VEGA de Salamanca.



ros resultados en Alemania, operando a alta tasa de repetición, con pulsos de femtosegundo y energías de julios (un láser de menor potencia que el láser VEGA del CLPU).

Una manera de inducir reacciones nucleares, a partir de las intensidades alcanzables con los láseres actuales, es mediante la aceleración de partículas cargadas (electrones y protones, o iones) que hemos comentado anteriormente. Si un haz de electrones acelerados por la acción del láser a velocidades relativistas se hace impactar sobre un material de elevado número atómico, la abrupta deceleración producirá la emisión de radiación electromagnética (radiación de *bremsstrahlung*). Estos fotones (con energía de decenas de megaelectronvoltios y mayores) pueden ser usados para inducir reacciones de fisión en los núcleos de un blanco situado junto al primero (los blancos usados en los primeros experimentos fueron de uranio y de torio). Estas reacciones fotonucleares (absorción de un fotón y emisión de un neutrón) están siendo exploradas para obtener fuentes de neutrones. De manera análoga, si un haz de protones (o iones) acelerados mediante láser se hace incidir sobre un blanco secundario, se pueden inducir reacciones nucleares (este esquema también está siendo considerado para la generación de neutrones).

Con esta capacidad de inducir reacciones nucleares, no podemos pasar por alto la propuesta de usar los láseres ultraintensos para la transmutación de isótopos como vía de reducir los residuos nucleares, especialmente aquellos productos de fisión con alta radiotoxicidad y vida muy larga. Este es, por ejemplo, el caso del yodo-129, con una vida media de 15 millones de años es un elemento de alta radiotoxicidad, corrosivo y volátil. Las primeras investigaciones realizadas con un láser ultraintenso han mostrado que es posible transformar el yodo-129 en yodo-128 que posteriormente decae (con una vida media de 25 minutos) hasta xenón-128 (gas inerte y estable).

La aplicación de los láseres ultraintensos para la reducción de residuos nucleares es una vía en exploración y son muchas las dificultades que deben resolverse. Sin embargo, a la luz del rápido desarrollo de la tecnología láser y de las ventajas intrínsecas en términos de bajo coste y reducido tamaño, parece indicar que los láse-

res tienen algo que aportar en este tema de gran interés público.

FUENTE DE NEUTRONES GENERADA POR LÁSER

La producción de neutrones con láseres ultraintensos ha despertado un gran interés debido al número limitado y al alto coste de las grandes instalaciones para la producción de neutrones y la creciente demanda de fuentes de neutrones.

En los últimos años, se están estudiando diferentes esquemas para la obtención de fuentes de neutrones generadas por láser. Evidentemente el láser no acelera neutrones, ya que al ser estos eléctricamente neutros no se ven alterados por los campos electromagnéticos del láser. Sin embargo, además de los procesos indirectos mencionados anteriormente, se pueden generar neutrones por fusión deuterón-deuterón. Esa fusión se puede realizar con relativa facilidad por encima de los 10 TW disparando el láser sobre dianas deuteradas. Aun así, la producción actual de neutrones por los láseres ultraintensos se basa principalmente en los métodos secundarios.

En la actualidad, el flujo de neutrones de las fuentes generadas por láser, en particular los sistemas láser de sobremesa, pueden ser algo inferiores a los requeridos para aplicaciones convencionales de neutrones. Sin embargo, el avance es extraordinario y los flujos medidos experimentalmente comienzan a ser relevantes para las aplicaciones. A su vez, estas fuentes tienen el potencial de suministrar haces de neutrones con un alto brillo, direccionalidad y duración ultracorta. Junto con las ventajas adicionales que ofrece una fuente compacta, en términos de confinamiento y de reducción de blindajes radiológicos.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, las características de una fuente de pequeño tamaño y de emisión pulsada de muy corta duración, pueden mejorar la actual resolución espacial y temporal de las mediciones basadas en neutrones, abriendo nuevos campos como las imágenes con puertas temporales (*time-gated imaging*). Las aplicaciones en la industria pasan por la radiografía de materiales, bien para realizar ensayos no destructivos que permitan inspeccionar el estado de ciertas partes críticas en una estructura, o para el control de un proceso de fabricación (como puede ser la preparación del

combustible nuclear). Por otra parte, disponer de una fuente de alto brillo con estas características, permite realizar estudios sobre los materiales que se utilizarán para futuros reactores (como el demostrador de reactor de fusión ITER), así como probar los muchos detectores necesarios para operar tales reactores. Las fuentes de neutrones generadas por láser también son candidatos potenciales para terapias de captura de neutrones con boro.

LOS LÁSERES EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

Los láseres de alta potencia (aunque no los láseres extremos) han sido considerados por la industria nuclear desde hace años. De hecho, durante la última década, el proceso de corte por láser ha sido investigado más que ningún otro método para su aplicación en el desmantelamiento de una instalación nuclear. Un láser puede realizar dos importantes trabajos de desmantelamiento: corte de tubos para reducción de tamaño y tratamiento de superficies para retirar capas superficiales contaminadas (bien sea en hormigón u otro tipo de superficies). Un láser permite realizar estas operaciones de manera segura, remota y eficiente. Además, el corte por láser es preferible respecto a otros procesos por su inferior emisión de aerosoles. Todo esto ha motivado la realización de numerosos ensayos y el desarrollo de diferentes prototipos usando láseres de Nd:YAG y CO₂, acoplados a fibra óptica y operando con una potencia de varios kilovatios. Es un valor de potencia pequeño si lo comparamos con un petavatio. Sin embargo, en este caso estamos hablando de potencia media y no de pulsos de femtosegundos.

PERSPECTIVAS

Los láseres pulsados ultracortos y ultraintensos plantean una serie de posibilidades nuevas e insospechadas. Hoy en día, el desarrollo de fuentes de radiación ionizante generadas por láser (fotones, electrones, protones/iones y neutrones) ha despertado gran interés para su uso en múltiples aplicaciones de gran impacto social. A la luz del rápido desarrollo de la tecnología láser, es posible que veamos cómo estas aplicaciones entran a formar parte de nuestras vidas. Sin embargo, las aplicaciones más interesantes aún están por imaginar. ■