

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Una caja para el Sol

Karina Galache · Thursday, March 7th, 2019

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

Uno de los problemas más apremiantes de este siglo es el suministro sustentable de energía, pues actualmente más del 85% de la producción de energía primaria en el mundo se origina a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, el número de candidatos no fósiles concebibles que los podrían reemplazar es muy limitado: energías renovables, fisión y fusión nuclear. En particular, el desarrollo de la tecnología de fusión nuclear, proceso mediante el cual el Sol y las estrellas generan su energía, se está desarrollando para producir energía eléctrica de manera controlada y sostenible en la Tierra. La fusión será segura al no producir desechos radiactivos, ecológicamente atractiva y su combustible, el deuterio, existe en cantidad suficiente en el agua ordinaria como para satisfacer las necesidades de energía eléctrica del mundo a la tasa actual de consumo durante millones de años. Sin embargo, los retos científicos y tecnológicos para construir y poner en operación un reactor de fusión nuclear son complejos, y su desarrollo lleva más de siete décadas de esfuerzo a nivel internacional. Tal como dijo el laureado con el premio Nobel de Física, Pierre-Gilles de Gennes, sobre la fusión nuclear: *Decimos que pondremos el Sol en una caja. La idea es hermosa, el problema está en que no sabemos cómo, ni de qué hacer la caja.* En este trabajo se revisan los conceptos fundamentales y los desafíos actuales alrededor de la fusión nuclear, y a continuación se describen algunos de los nuevos materiales avanzados propuestos para la construcción de reactores de fusión, en especial los que se usarían cerca de la cámara de combustible, que permitirán en principio contener el poder energético del Sol en una caja.

Introducción

La población mundial actual es de siete mil millones de personas, quienes consumimos 14 TW de potencia anualmente -la mayoría generada a partir de combustibles fósiles- y para 2050 se espera que este consumo energético se duplique, con dos mil millones más de personas poblando el planeta [1]. De continuar la tendencia de demanda mundial de energía y de crecimiento en su producción a partir de combustibles fósiles, se predice una gran afectación negativa a escala planetaria que comprometería incluso el desarrollo de la propia civilización humana a medio plazo [2].

La fusión nuclear es la fuente que mantiene el Sol y las estrellas. Si pudiera ser reproducida de forma controlada en la Tierra y desarrollarse a escala industrial, resolveríamos al menos en gran parte nuestro problema energético sin generar emisiones de gases dañinos para el medio ambiente debidas al uso de combustibles fósiles, o sin los residuos radiactivos que genera el combustible

agotado procedente de los reactores actuales de fisión nuclear.

Para comprender mejor el funcionamiento de los futuros reactores de fusión y sus ventajas, hay que revisar los dos tipos de procesos nucleares a partir de los cuales se obtiene energía, comparados en la Figura 1.



Figura 1. Procesos de (a) fisión nuclear de un isótopo de U-235 y una posible combinación de fragmentos de fisión y (b) fusión nuclear de dos isótopos pesados de hidrógeno, el deuterio y el tritio.

El más conocido y usado en la actualidad en los reactores nucleares a nivel industrial es la fisión, que se basa en la ruptura de isótopos pesados como el uranio-235, el plutonio-239 o el torio-232 al ser bombardeados con neutrones térmicos, haciendo que se descompongan en dos isótopos más ligeros, lo que conlleva a un gran desprendimiento de energía, debida a la diferencia en masa entre el U-235 y el neutrón inicial y los productos generados, y la emisión de dos o tres neutrones de alta energía. Usando la energía generada por la reacción, se calienta agua en estado líquido que actúa como medio refrigerante y moderador de los neutrones generados en la reacción de fisión. El vapor generado a partir del agua de refrigeración se aprovecha en turbinas para producir electricidad. De este tipo es el reactor de Laguna Verde en México y todas las centrales nucleares del mundo, incluidas Chernóbil y Fukushima. Los principales problemas de la fisión como fuente de energía sustentable son el uso de combustibles fisibles no renovables, la seguridad de los reactores y los desechos nucleares que permanecen radiactivos durante miles de años [3].

Al contrario, la energía producida mediante fusión nuclear se refiere a la que es obtenida a partir de la unión de dos isótopos ligeros para formar uno más pesado. La energía liberada durante el proceso es proporcional a la diferencia de masa entre productos y reactivos y es 4 veces mayor que la liberada en la fisión. Los elementos más ligeros que los isótopos del Fe y Ni pueden tener reacciones de fusión con liberación de energía durante el proceso, mientras que los más pesados que el Fe se pueden usar para producir energía a partir de reacciones de fisión. Los combustibles que se plantea utilizar para los reactores de gran escala son los isótopos pesados del hidrógeno (deuterio, $D = {}^2\text{H}$ y tritio, $T = {}^3\text{H}$), debido a la gran cantidad de deuterio que hay disponible naturalmente en el agua de mar, en una cantidad aproximada de 33 gramos por cada metro cúbico [4], la gran cantidad de energía que produce por cada reacción de dos isótopos, uno de deuterio y otro de tritio. En los experimentos actuales, y en especial en los futuros reactores de fusión nuclear, se planea utilizar la reacción D-T ya que presenta la tasa más alta de reacciones de fusión debido a la sección transversal nuclear de reacción. En comparación a otros elementos a temperatura más bajas es el par de isótopos que requiere de menor temperatura para alcanzar un alto rendimiento de fusión nuclear y porque produce una cantidad de energía considerable en comparación con otras relaciones de los isótopos de hidrógeno, como se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1. Reacciones de fusión nuclear asociadas a los isótopos del hidrógeno y energía (en MeV) que produce la reacción [5].

En 1991 en el JET (Joint European Torus), en Oxfordshire (Reino Unido), tras cuarenta años de preparación y experimentos preliminares, se intentó controlar una reacción nuclear de fusión por primera vez en la historia. Los científicos hicieron girar una mezcla gaseosa equimolar de deuterio y tritio dentro de una cámara en forma toroidal mientras lo calentaban mediante corrientes eléctricas inducidas de 3 millones de amperios, hasta que el gas se convirtió en un flujo estable de plasma. Imanes gigantes proporcionaban el enorme campo magnético necesario (2.8 Tesla) para mantener el plasma

girando en mitad del espacio vacío, sin tocar las paredes de la cámara toroidal. Entonces, se inyectaron menos de 0.2 gramos de tritio en el plasma y ocurrió la “magia”: por una fracción de segundo, la producción de energía se disparó hasta el nivel de los mega watts (MW) [6]. El puñado de neutrones calientes (o neutrones rápidos) que se habían producido durante la fusión nuclear llevaban energía suficiente (1.7 MW) como para generar la electricidad de un pueblo pequeño. La energía nuclear por fusión controlada de deuterio-tritio (D-T) ya era una realidad, salvo por el pequeño “detalle” de que se había producido menos energía que la que fue necesaria para conseguir llegar a las temperaturas de al menos 100,000,000°C para generar el plasma e inducir la reacción.

La única manera de generar mucha más energía que la que es invertida en producir reacciones de fusión nuclear, es calentando el combustible (H, D, T) a temperaturas de centenas de millones de grados; es decir, más caliente que el centro del Sol (15 millones de Kelvin). Sólo así se podría tener una gran cantidad de reacciones nucleares durante el movimiento térmico del plasma, pues se debe vencer la repulsión eléctrica (fuerza de Coulomb) que naturalmente ocurre entre los isótopos deuterio y tritio con cargas eléctricas positivas y de igual magnitud. A estas temperaturas, cualquier material se convierte en un plasma, como se le llama al estado del gas ionizado, en el cual los átomos han perdido sus electrones. Pero ya que ningún material conocido es capaz de soportar temperaturas como las requeridas para la fusión, es necesario confinar el plasma a una región separada de las paredes del reactor; los dos modos de confinamiento en fase de desarrollo a escala internacional son el confinamiento inercial y el confinamiento magnético.

En la fusión por confinamiento inercial (ICF por sus siglas en inglés “Inertial Confined Fusion”) esquematizada en la Figura 2, se dispone de una microesfera criogénica compuesta por D y T, las partículas son aceleradas hacia el centro de la misma esfera por medio de irradiación directa por láser (conducción directa) o mediante rayos X (conducción indirecta) [7], lo cual produce sobre la microesfera un trabajo de presión sobre la región central interna de baja densidad la cual es denominada como “punto caliente”. Esto provoca que el combustible implote, incrementando así la temperatura por lo cual se genera un plasma en el punto caliente el cual alcanza temperaturas entre los 45 y 80 millones de °C y presiones de 100 a 500 Gbar, lo cual induce una gran cantidad de reacciones de fusión en el combustible.



Figura 2. Proceso de fusión nuclear por confinamiento inercial.

El confinamiento magnético, en el cual se basa el JET mencionado anteriormente, consiste en contener el plasma termonuclear usando una serie de campos magnéticos que guían el movimiento del plasma en una trayectoria helicoidal y evitan que toque las paredes del reactor, aprovechando que al tener carga eléctrica, el plasma sigue la fuerza de Lorentz bajo un campo magnético [8], como se esquematiza en la Figura 3. En este tipo de confinamiento se inyecta el combustible (D y T) en forma gaseosa y se calienta por medio de ondas electromagnéticas hasta llegar a la temperatura en que la mezcla cambia al estado de plasma termonuclear. Teóricamente con este tipo de configuración es posible obtener 17.6 MeV de energía a partir de la reacción entre el D y T [1].



Figura 3. Confinamiento magnético del plasma en un Tokamak A) y en un Stellarator B).

El confinamiento magnético es el que ha sido estudiado más exhaustivamente y se ha demostrado que la configuración más favorable es el llamado reactor Tokamak presentado en la Figura 4: una cámara en forma de dona (*toroide*) con corrientes eléctricas en el exterior y en el interior del plasma. El nombre de Tokamak surge de las siglas en ruso de su descripción: cámara toroidal con

bobinas magnéticas.



Figura 4. a) Vista interior de la cámara de vacío del Tokamak del JET (Joint European Torus). (Izquierda) la cámara vacía, (derecha) en funcionamiento con parte del plasma visible (Foto: EFDA-JET); b) Interior del Tokamak Alcator C-Mod que opera en el MIT (Estados Unidos), antes de ser llenado con plasma [9].

Otro tipo de reactor de confinamiento magnético es el Stellarator [10] que se muestra en la Figura 5, pero a pesar que su diseño pudiera resolver los problemas técnicos del reactor Tokamak para llevar a cabo una reacción de fusión con buenos rendimientos energéticos, y poder obtener la cantidad teórica de energía, desde el punto de vista de diseño, los desafíos técnicos para implementarlo y sus costos hacen al reactor Tokamak más atractivo que su primo el Stellarator [11].



Figura 5. a) imagen esquemática del Stellarator W 7-X de Alemania, el más grande del mundo, con un corte mostrando el plasma del interior [11]. b) Stellarator Wendelstein 7-X en el laboratorio del Instituto Max Planck de Física del Plasma donde es operado actualmente [12].

¿Qué es el ITER?

Se han construido varios reactores Tokamak alrededor del mundo para estudiar el comportamiento del plasma, incluidos dos en México. Actualmente, se está desarrollando en Cadarache (Francia) el mayor de todos los Tokamak a partir de una colaboración internacional de 35 países, el llamado Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER por sus siglas en inglés). En la Figura 6 (a) se muestra un modelo de lo que será el reactor real, con el cual se espera demostrar que es posible construir un reactor de fusión nuclear con un rendimiento energético esperado próximo a 10 ($Q \approx 10$); sin embargo, será hasta el año 2035 que se tenga la total operación del reactor y se conozca si tuvo éxito, en la Figura 6 (b) se muestra el estado de avance de la construcción de las instalaciones del ITER.



Figura 6. (a) Modelo del ITER en la Exposición de Los Logros de Cinco Años [13], (b) Estado de construcción del ITER a julio del 2018, en el centro se puede apreciar la estructura de hormigón que se eleva alrededor del bio-escudo, una masiva estructura cilíndrica de 30 metros de altura que rodea la máquina y protege a los trabajadores y al ambiente de la radiación generada por las reacciones de fusión (Foto: ITER Organization/EJF Richie).

Los objetivos de ITER son tan fáciles de entender como difíciles de alcanzar: construir el primer reactor de fusión nuclear de 500 MW capaz de funcionar de manera sostenida e ininterrumpida durante 8 minutos, es decir, producir durante ese tiempo más energía que la consumida. Ahora mismo, controlar una reacción termonuclear para generar electricidad representa un reto económico y tecnológico tan titánico que ninguna nación puede conseguirlo por sí misma. Tal y como ocurre en el bestseller de ciencia ficción *Contact* (de Carl Sagan), construir una máquina gigante parece ser una de las pocas maneras de hacer que la mayoría de los países industrializados del mundo se pongan de acuerdo y cooperen: China, la Unión Europea (EU), India, Japón, Corea, Rusia y EEUU, han firmado el acuerdo de colaboración y llevan años trabajando juntos en una única dirección. En realidad, y por increíble que parezca, el proyecto se remonta a un acuerdo entre EEUU y la Unión Soviética en 1985.

Participación de México en materia de fusión nuclear.

En investigación sobre fusión nuclear México no ha tenido tradicionalmente una gran participación activa, pues no parece haber despertado gran interés entre científicos e ingenieros, principalmente por el alto costo implicado en las instalaciones necesarias para realizar los experimentos. No obstante, las primeras actividades en fusión nuclear se remontan a los años setenta. En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se diseñaron y construyeron dos pequeños tokamaks: el “Novillo” y el “TPM-1”. El primero se construyó y operó en el propio ININ, en las décadas 80 y 90 del siglo pasado, hasta que fue cancelado a finales de los noventa (Figura 7). El segundo fue montado en el Instituto Politécnico Nacional por el Ingeniero Mario Vázquez Reyna, pero sus resultados no se hicieron públicos. Por otro lado, en la UNAM (en el entonces Centro de Estudios Nucleares) el Doctor Julio Herrera empezó a formar un grupo, principalmente de trabajo teórico, que en los ochenta realizó también un experimento de fusión, conocido como Foco de Plasma Denso (FPD), bautizado “Fuego Nuevo”, el cual fue seguido por otro FPD de mayor potencia, el “Fuego Nuevo II”, que estuvo en operación hasta 2013. Por otro lado, un experimento de fusión fue construido en la UAM-Azcapotzalco, basado en un concepto llamado “Z-pinch”.



Figura 7. Exterior del Novillo, el tokamak mexicano que operó en el ININ, en la década de los noventa [14].

La mayor cantidad de los estudios realizados en México en cuanto a fusión nuclear ha sido en el entendimiento de la física del plasma en presencia de campos magnéticos. En los reactores tokamak hay un problema de gran interés que consiste en entender por qué se observa una reducción repentina en la pérdida del calor contenido en el plasma, pues, este proceso puede ser clave para lograr la adecuada operación de un reactor. En esta dirección hemos propuesto en México diversas maneras de lograr tal reducción. También se ha estudiado la forma de mantener el plasma en equilibrio y estable, con campos magnéticos toroidales producidos por imanes superconductores.

Una caja para el Sol

Los reactores de fusión nuclear consisten en una cámara toroidal que en los albores de la investigación eran de vidrio, porcelana o cuarzo y sustituidos posteriormente por acero inoxidable no magnético, dentro de las cuales se ubicaban las cámaras de trabajo, constituidas por paredes gruesas de cobre, los cuales eran denominados como forros.

Los materiales estructurales en los reactores de fusión nuclear sufren daños al estar expuestos a las altas temperaturas locales, alto estrés termo-mecánico, erosión, y radiación debido a las especies energéticas presentes o generadas en el plasma. Huecos y burbujas de gas (H, He) son uno de los problemas más acuciantes de los materiales estructurales en la proximidad del plasma, en especial debido a la interacción de los materiales con los isótopos calientes de He-4 y neutrones productos de la reacción de fusión entre el D y T; estas burbujas y huecos inducen cambios perjudiciales en la microestructura, dimensiones del material, y afectan de forma negativa a la integridad estructural de los componentes del reactor, como la hinchazón, endurecimiento y fragilidad (Figura 8). Lo anterior nos refiere a la cita de de Gennes con la que se abrió este artículo, respecto a *qué hacer la caja para contener al Sol*.



Figura 8. Morfología de superficie de muestras de W puro y aleación de W-Ta grado ITER expuestas a pulsos de plasma de 0.3 y 0.9 MJ m⁻² [15].

El material que actualmente es propuesto como pared principal frente al plasma en los reactores

modernos es el tungsteno (W) debido a su alto punto de fusión (3420 °C), alta estabilidad térmica, y baja tasa de erosión por iones. Sin embargo, es un metal intrínsecamente frágil tanto a baja como alta temperatura [16], por lo cual su uso como material de contacto primario con el plasma solo resuelve en parte la problemática, ya que los núcleos de He y los neutrones que se proyectan hacia las paredes de W causan erosión (*sputtering*, en inglés) de la superficie, y también penetran en el material e interaccionan con sus átomos constituyentes causando daño estructural a nivel atómico, lo cual termina por diezmar la estructura del W al fragilizarlo más. Para dar solución a los problemas de fragilidad que presenta el W se han estudiado diversas aleaciones con metales que le provean ductilidad y resistencia adicional al daño por irradiación. Además se han hecho recientemente intentos de preparar materiales tungsteno-cobre (W-Cu), con el fin de aprovechar la alta conductividad térmica del Cu y el elevado punto de fusión del W para formar un material compuesto que sea resistente a los altos flujos de calor y bombardeo iónico que se presentan [17]. Se ha estudiado la aleación tungsteno-vanadio (W-V) al 5% en peso de V, respecto a la modificación de la superficie del material a temperaturas altas al ser irradiada con iones de He a diferentes fluencias. Dependiendo de las diferentes zonas de enriquecimiento de V y las regiones de soluto sólido de W-V, la irradiación forma una estructura tipo coral (tungsteno difuso) en la superficie, lo cual disminuye la penetración de los núcleos de He en las paredes además de disminuir la erosión de la superficie por el bombardeo con los mismos isótopos de He-4 [18].

Al no ser concluyentes los estudios de las aleaciones del tungsteno con vanadio para resolver estos problemas debido a la falta de control en la homogenización zonas de soluto sólido de W-V, se realizan a la par estudios de metales de la familia del vanadio que equilibren las propiedades de resistencia térmica y mecánica para ser usados como materiales de contacto primario al plasma.

Recientemente, materiales compuestos de cobre-niobio (Cu-Nb) han sido obtenidos por métodos como la unión por rolado acumulativo (ARB) [19]. Este método se realiza al colocar cuidadosamente una lámina de cobre sobre una lámina de niobio previo tratamiento superficial (pulido mecánico y/o electroquímico). Posteriormente, las dos capas de material se unen entre sí mediante laminación como en un proceso de rolado convencional, después el material resultante se divide en dos y las láminas seccionadas son nuevamente tratadas superficialmente, apiladas y laminadas por rolado como se ilustra en la Figura 9. Este proceso se repite veces hasta conseguir que el espesor de los laminados sea de orden nanométrico, este proceso permite obtener materiales laminados con granos ultra finos, y estructura nanocristalina y potencialmente con alta resistencia al daño por irradiación debido a la gran cantidad de interfaces Cu-Nb [20].



Figura 9. Esquema del proceso de unión por rolado acumulativo (ARB), para la obtención de materiales nanolaminados de Cu-Nb [21].

Se han reportado experimentos de irradiación de materiales compuestos de Cu-Nb nanolaminados con un grosor de hoja de 300 μ m y cada capa un espesor entre los 16 y 58 nm. Los resultados muestran los efectos de la radiación sobre la distribución de cavidades inducidas por la penetración de núcleos de He en la estructura y sobre el endurecimiento de las capas como efecto posterior a la irradiación, dependiendo de las temperaturas locales alcanzadas. Se han obtenido resultados prometedores [22], aunque aún falta realizar estudios sobre los efectos mencionados en función del espesor de las capas y las condiciones de irradiación.

Por otro lado, los nanomateriales base carbono como el grafeno, han sido propuestos para una diversidad de aplicaciones, entre ellas, como integrantes de materiales estructurales en reactores nucleares [23]. El grafeno es un material bidimensional cuya estructura laminar se muestra en la Figura 10, que consta de una sola capa de átomos de carbono (0.1 nm) densamente empaquetados

en hexágonos acomodados como un panal de abejas. Fue obtenido por primera vez en 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov de la Universidad de Manchester mediante exfoliación micro-mecánica del grafito [24]. Métodos como el depósito de vapores químicos, permiten obtener grafeno de gran calidad en áreas mayores, pero aún lejos de lo requerido para aplicaciones a gran escala.



Figura 10. Estructura laminar del grafito (izquierda), cada lámina de grafeno es una capa de átomos de carbono (derecha) [25].

Las hojas de grafeno pueden ser producidas a gran escala por expansión térmica del grafito o por reducción química del óxido de grafeno (GO). En este último caso, desde que se inventó el proceso de oxidación del grafito en el siglo XIX, se han propuesto varias rutas químicas, como las de Brodie, Staudenmaier, y Hummers [26, 27, 28], que involucran una oxidación del grafito en presencia de ácidos minerales y oxidantes. El nivel de oxidación puede variar en base al método, las condiciones de la reacción y el grafito precursor utilizado. Ante las desventajas de los métodos pioneros, como la generación de gases explosivos, se han innovado varios métodos entre los que destaca el de Hummers [29], en el que la oxidación del grafito a óxido de grafeno está basada en el tratamiento del grafito en una mezcla de agua con ácido sulfúrico concentrado, nitrato de sodio y permanganato de potasio como se ilustra en la Figura 11. El proceso entero requiere menos de 3 horas para su elaboración a temperaturas inferiores a 98°C.



Figura 11. Esquema de la síntesis de óxido de grafeno por el método de Hummers.

En la Figura 12 se presenta la estructura típica del óxido de grafeno preparado por el método de Hummers. La superficie laminar del óxido de grafeno es polar por sus grupos funcionales oxigenados adjuntos (C=O, C-O, -OH y epóxidos). Además, la presencia de estos grupos funcionales, hace a las láminas de GO fuertemente hidrofílicas, haciendo que se hinchen con facilidad y se dispersen en el agua. La cantidad y distribución de estos grupos funcionales depende de las condiciones experimentales de preparación [30]. A partir del óxido de grafeno es posible preparar óxido de grafeno reducido (rGO), que tiene propiedades similares a las del grafeno e incluso grafeno dando un tratamiento térmico al óxido de grafeno a temperaturas elevadas en una atmósfera reductora.



Figura 12. Estructura de una lámina de óxido de grafeno.

Entre las propiedades más destacadas del grafeno se pueden mencionar su alta conductividad térmica y eléctrica, alta elasticidad y resistencia mecánica. El óxido de grafeno puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades antes de su reducción, lo que dota a este material de gran potencial de desarrollo. Es muy ligero, como la fibra de carbono, pero más flexible, menor efecto Joule, por lo que se calienta menos al conducir los electrones y resistencia a la radiación ionizante.

Esta última propiedad da la pauta para la utilización de este material como barrera superficial a la radiación generada en el plasma en los reactores de fusión, al ser utilizado como recubrimientos en película delgada sobre los materiales que están en contacto directo con el plasma; también se propone para aumentar la resistencia a la penetración de iones en las paredes del reactor, debido a la interfase adicional que se genera entre el grafeno y el material estructural a recubrir, aunado al tamaño de poro de la red del grafeno del orden de los Angstroms [31]; por su alta conductividad térmica, se propone también como disipador de calor, y por su enorme dureza, para reducir el

sputtering de la superficie de los materiales en contacto con el plasma [32].

En nuestro grupo de investigación, conformado por químicos en materiales, metalúrgicos y físicos en radiación nuclear, se están desarrollando métodos para depositar óxido de grafeno sobre materiales compuestos nanoestructurados, partiendo de vanadio, niobio y tungsteno, en combinación con láminas de cobre, y probar los recubrimientos de grafeno en estos materiales en ambientes simulados de radiación nuclear, como se esquematiza en la Figura 13.



Figura 13. Esquema de la ruta propuesta para desarrollar recubrimientos basados en óxido de grafeno sobre materiales nano-estructurados para paredes primarias de reactores nucleares.

El proyecto, que se espera de medio a largo plazo, requerirá de la cooperación de instituciones repartidas en México y en el Reino Unido, creará nuevos conocimientos y probablemente nuevos desarrollos tecnológicos, y formará recursos humanos especializados en materiales dedicados a aplicaciones nucleares. Durante el desarrollo del proyecto, se estudiarán diferentes condiciones de depósito del GO por medios electroquímicos para encontrar espesores y condiciones de reducción óptimas, con el fin de evitar que el contenido residual de oxígeno contamine el plasma; se ensayarán materiales compuestos de Cu-(Nb, V, Ta) preparadas por rolado acumulativo y de W-Cu preparadas por moldeado a presión para estudiar el efecto del número de capas acumuladas y del espesor de las capas al ser irradiadas. Se estudiarán también las interacciones interfaciales del sustrato nano-estructurado con el GO depositado, ya que las estructuras de los recubrimientos y de los metales deben ajustarse para evitar desprendimientos del recubrimiento o sitios de falla por donde pudiera haber caminos preferentes para la penetración de iones; se irradiarán los materiales simulando las condiciones existentes en un reactor termonuclear, para finalmente evaluar y proponer los mejores materiales nano-estructurados y los recubrimientos con mayor resistencia y durabilidad a la irradiación, *lo que permitirá disponer de nuevos materiales, hechos de casi nada, para construir la caja que contenga el poder del Sol.*

Conclusiones

El desarrollo de una tecnología de energía de fusión nuclear viable depende entre otras cosas, de la resolución de los problemas de confinamiento del plasma y de encontrar materiales de contacto primario con el plasma dentro del reactor, evitando el cese de la reacción a causa de impurezas provenientes de la erosión de los materiales, así como daños causados por la interacción de los materiales con los isótopos de He o H, alargando la vida funcional de dichos materiales estructurales. Los materiales nanolaminados de metales de la familia del vanadio o su combinación con tungsteno se perfilan como candidatos para tales aplicaciones, además de que nanomateriales como el grafeno pueden potenciar las propiedades térmicas de los nanolaminados y servir como escudo a la radiación en forma de recubrimiento en película delgada. La propuesta de nuestro grupo de investigación, de estudiar recubrimientos de grafeno sobre estas aleaciones, permitirán incursionar en esa área de investigación para formar recursos humanos especializados en ciencia y tecnología de fusión nuclear, y con ello fomentar el desarrollo de equipos y líneas de investigación con el Reino Unido, y llevar a México a tener mayor presencia en este campo a nivel internacional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SIP-20194931, una beca del CONACYT y una beca del programa BEIFI del IPN.

Referencias

- [1] F. Dobran, *Fusion energy conversion in magnetically confined plasma reactors*, Progress in Nuclear Energy, 60, (2012). 89–116. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2012.05.008>
- [2] M. Franchini, P. M. Mannucci, *Impact on human health of climate changes*. European Journal of Internal Medicine, 26, (2015). 1–5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejim.2014.12.008>
- [3] E.N. Tsyganov, *Cold nuclear fusion development*, Nucl. Instr. Meth. B (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.158>
- [4] F. F. Chen, *Introduction of plasma physics and controlled fusion*. Springer International Publishing, third ed., 2016.
- [5] A. Piel, *Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas*. Springer Science & Business Media, 2010
- [6] J. Team, *Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak*. Nuclear Fusion, 32, (1992). 187–203. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/32/2/I01>
- [7] A. R. Christopherson, R. Betti, A. Bose, J. Howard, K. M. Woo, E. M. Campbell, B. K. Spears, *A comprehensive alpha-heating model for inertial confinement fusion*. Physics of Plasmas, 25, 012703 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.4991405>
- [8] J. Ongena, R. Koch, R. Wolf, H. Zohm, *Magnetic-confinement fusion*. Nature Physics, 12, (2016). 398–410. <https://doi.org/10.1038/NPHYS3745>
- [9] File:Alcator C-Mod Fisheye from Bport.jpg. (2018, January 25). Wikimedia Commons, the free media repository. Retrieved 07:02, October 23, 2018 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Alcator_C-Mod_Fisheye_from_Bport.jpg&oldid=282694556.
- [10] P. Helander, C. D. Beidler, T. M. Bird, M. Drevlak, Y. Feng, R. Hatzky, P. Xanthopoulos, *Stellarator and tokamak plasmas: a comparison*. Plasma Physics and Controlled Fusion, 54 (2012). 124009. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/54/12/124009>
- [11] T Klinger et al, *Performance and properties of the first plasmas of Wendelstein 7-X*, Plasma Phys. Control. Fusion 59, (2017), 014018. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014018>
- [12] File:Wendelstein7-X Torushall-2011.jpg. (2017, October 3). Wikimedia Commons, the free media repository. Retrieved 20:05, October 23, 2018 from https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Wendelstein7-X_Torushall-2011.jpg&oldid=261427365
- [13] File:Model of ITER at the Five-Year Achievements Exhibition (20171015151734).jpg. (2017, November 5). Wikimedia Commons, the free media repository. Retrieved 22:42, October 24, 2018 from [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Model_of_ITER_at_the_Five-Year_Achievements_Exhibition_\(20171015151734\).jpg&oldid=266199651](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Model_of_ITER_at_the_Five-Year_Achievements_Exhibition_(20171015151734).jpg&oldid=266199651).
- [14] Julio J. Martinel Benito, *Fusion Nuclear en México*, Ciencia y Desarrollo 2017, <http://cienciaydesarrollo.mx/?p=articulo&id=253>
- [15] Y. Kikuchi, I. Sakuma, D. Iwamoto, Y. Kitagawa, N. Fukumoto, M. Nagata, Y. Ueda, *Surface cracking and melting of different tungsten grades under transient heat and particle loads in a*

- magnetized coaxial plasma gun*. *Journal of Nuclear Materials*, 438, (2013), S715–S718. <https://doi.org/10.1016/J.JNUCMAT.2013.01.151>
- [16] J. Marian, C. S. Becquart, C. Domain, S. L. Dudarev, M. R. Gilbert, R. J. Kurtz, K. Nordlund, A. E. Sand, L. L. Snead, T. Suzudo, B. D. Wirth, *Recent advances in modeling and simulation of the exposure and response of tungsten to fusion energy conditions*, *Nuclear Fusion*, 57, 092008 (2017). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5e8d>
- [17] Y. Ueda et al, *Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion*. *Nuclear Fusion*, 57, (2017) 57 092006. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b60>
- [18] J. Wang, C. Li, Y. Yuan, H. Greuner, L. Cheng, G. H. Lu, *Surface modification of W-V alloy exposed to high heat flux helium neutral beams*. *Nuclear Fusion*, 58, 096001 (2018). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac72c>
- [19] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, *Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process*. *Acta mater*, 47, (1999). 579–583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)
- [20] M. Naseri, M. Reihanian, E. Borhani, *A new strategy to simultaneous increase in the strength and ductility of AA2024 alloy via accumulative roll bonding (ARB)*. *Materials Science and Engineering: A*, 656, (2016), 12–20. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.01.020>
- [21] T. Nizolek, N. A. Mara, I. J. Beyerlein, J. T. Avallone, J. E. Scott, T. M. Pollock, *Processing and Deformation Behavior of Bulk Cu–Nb Nanolaminates*. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 3, (2014). 470–476. <https://doi.org/10.1007/s13632-014-0172-2>
- [22] L. X. Yang, S. J. Zheng, Y. T. Zhou, J. Zhang, Y. Q. Wang, C. B. Jiang, N. A. Mara, I. J. Beyerlein, X. L. Ma, *Effects of He radiation on cavity distribution and hardness of bulk nanolayered Cu-Nb composites*, *Journal of Nuclear Materials*, 487, (2017), 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.02.022>
- [23] Y. Kim, J. Baek, S. Kim, S. Kim, S. Ryu, S. Jeon, S. M. Han, *Radiation Resistant Vanadium-Graphene Nanolayered Composite*. *Scientific Reports*, 6, (2016). 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep24785>
- [24] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, “Electric field effect in atomically thin carbon films,” *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666 – 669, 2004
- [25] File:Graphen.jpg. (2015, November 14). Wikimedia Commons, the free media repository. Retrieved 01:46, October 26, 2018 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Graphen.jpg&oldid=179124989>.
- [26] B. C. Brodie, *Ann. Chim. Phys.* 45 (1855) 3.
- [27] L. Staudenmaier, *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* 31 (1898) 1481-1487.
- [28] J. W. S. Hummers, Preparation of graphitic acid, Google Patents, 1957.
- [29] W. S. Hummers, R. E. Offeman, *Journal of the American Chemical Society* 80 (1958) 1339-1339.
- [30] J. Guerrero-Contreras, F. Caballero-Briones, *Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method*. *Materials Chemistry and Physics*, 153, (2015), 209–220. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2015.01.005>
- [31] M. X. Navarro, R. R. Delgado, M. G. Lagally, G. L. Kulcinski, J. F. Santarius, Implantation of 30 keV helium into graphene-coated tungsten. *Fusion Science and Technology*, 72, (2017), 713–718. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1350481>
- [32] C. Herbig, T. Michely, Graphene: The ultimately thin sputtering shield. *2D Materials*, 3, 025032 (2016). <https://doi.org/10.1088/2053-1583/3/2/025032>

AUTORES: Rafael Valentín Tolentino Hernández*, **Cesia Guarneros Aguilar**, **Francisco A. García-Pastor**, **Enrique Jiménez-Melero**, **Felipe Caballero Briones***

**Autores de correspondencia: raffless.th@gmail.com; fcaballero@ipn.mx*

This entry was posted on Thursday, March 7th, 2019 at 3:40 pm and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.