

Fisión y Fusión Nuclear

Cómo entender la película de Oppenheimer

Por Jesús Manuel Sáenz y Karen Yael Castrejón
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez



Figura 1. La prueba Trinity. Imagen de dominio público.

Introducción

Oppenheimer (2023) es un filme dirigido por Christopher Nolan que destaca la humanidad y el apego a los hechos históricos [1]. Está basado en la biografía *American Prometheus* del físico Robert Oppenheimer, director de los laboratorios en Los Álamos, en donde trabajó en el proyecto Manhattan sobre la construcción de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial.

“Supimos que el mundo no sería el mismo. Alguna gente rio; alguna gente lloró. La mayoría de la gente permaneció en silencio. Recordé la línea de la escritura hindú, el *Bhagavad Gita*; Visnú está tratando de persuadir al príncipe para que cumpla con su deber, y para impresionarlo, toma la forma con múltiples brazos y dice ‘Ahora me he convertido en la Muerte, el destructor de mundos’. Supongo que todos pensamos eso, de alguna manera u otra” dijo Oppenheimer en 1965 sobre la explosión de la primera bomba nuclear, en la prueba Trinity del 16 de julio de 1945.

Sobre *Oppenheimer*, Alex Wellerstein [2] sostiene que la convicción de Oppenheimer fue firme en desarrollar la bomba nuclear porque lo creía necesario. La inevitabilidad del armamento nuclear ha sido contemplada con un mal necesario: “Si los Estados Unidos no hubieran desarrollado la bomba atómica, otros lo hubieran hecho. La Alemania Nazi lo intentó, pero fracasó y los soviéticos lo consiguieron...” [3].

En este artículo presentamos los conceptos de la física nuclear y sus aplicaciones, así como algunos de los aspectos sociales y del medio ambiente relacionados con *Oppenheimer*.

La Física de Oppenheimer

-Sobre la constitución de la materia

La materia está constituida por átomos, y estos, a su vez, están formados por partículas: el electrón, con carga eléctrica negativa; el protón, con carga positiva; el neutrón, que no tiene carga. Los átomos tienen un núcleo formado por protones y neutrones. Los electrones giran alrededor del núcleo.

Muchos de los elementos de la tabla periódica tienen un núcleo estable y esto se debe a su número de masa, que se define como el número de protones y neutrones en el núcleo. Mejor dicho, la estabilidad depende de la energía que tenga el arreglo de protones y neutrones en el núcleo. Los núcleos con número de masa igual a 83 y menor son estables, debido a que tienen la suficiente

energía de enlace para mantenerlo unido. En cambio, los núcleos con número de masa mayor son inestables porque su energía es mayor a la energía de enlace, por lo que experimentan diversos procesos que los llevan hacia núcleos estables.

La radiactividad de un núcleo inestable es la emisión de partículas o de energía, a lo que se le conoce como decaimiento. Existen tres tipos de decaimiento nuclear: beta, que es la emisión de un electrón; gama, que es la emisión de un fotón (partícula asociada a los campos electromagnéticos); y alfa, que es la emisión de un núcleo de helio (formado por dos protones y dos neutrones).

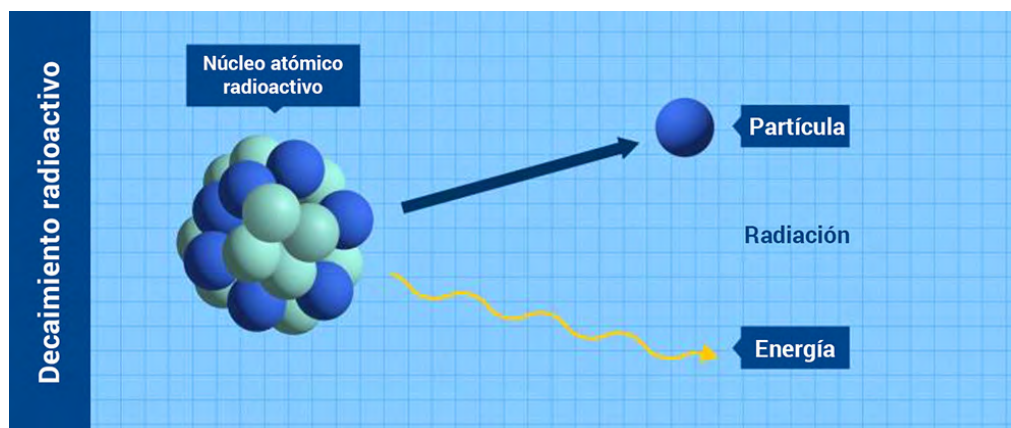


Figura 2 Decaimiento radiactivo. Tomada de [4]

Los isótopos son átomos que pertenecen a un mismo elemento, pero que tienen diferente número de masa. Por ejemplo, el uranio-235 es un átomo de uranio cuyo núcleo contiene 92 protones y 143 neutrones. Si se agrega un neutrón a este núcleo, entonces tendremos uranio-236.

-Fisión

La fisión nuclear [5] ocurre cuando la energía del núcleo es mayor que la energía de enlace. Un neutrón puede entrar al núcleo de uranio-235 para convertirlo en uranio-236, el cual tiene una energía mayor que la energía de enlace. En general, se tiene el mecanismo de fisión inducida por neutrones en uranio, plutonio y torio, siendo el uranio el combustible usado en los reactores nucleares de fisión.

En la fisión a partir de uranio-235 se producen núcleos de otros elementos, como el kriptón y el bario, y se pueden liberar varios neutrones. También, los fragmentos pueden decaer, produciendo partículas adicionales y liberando energía útil en la producción de energía eléctrica.

Los neutrones liberados en las fisiones son utilizados para inducir fisiones adicionales en reacciones en cadena, las cuales pueden detenerse eventualmente. De no hacerlo, la reacción en cadena continúa produciendo fisiones hasta terminar en una explosión, como en el caso de las bombas de fisión nuclear.

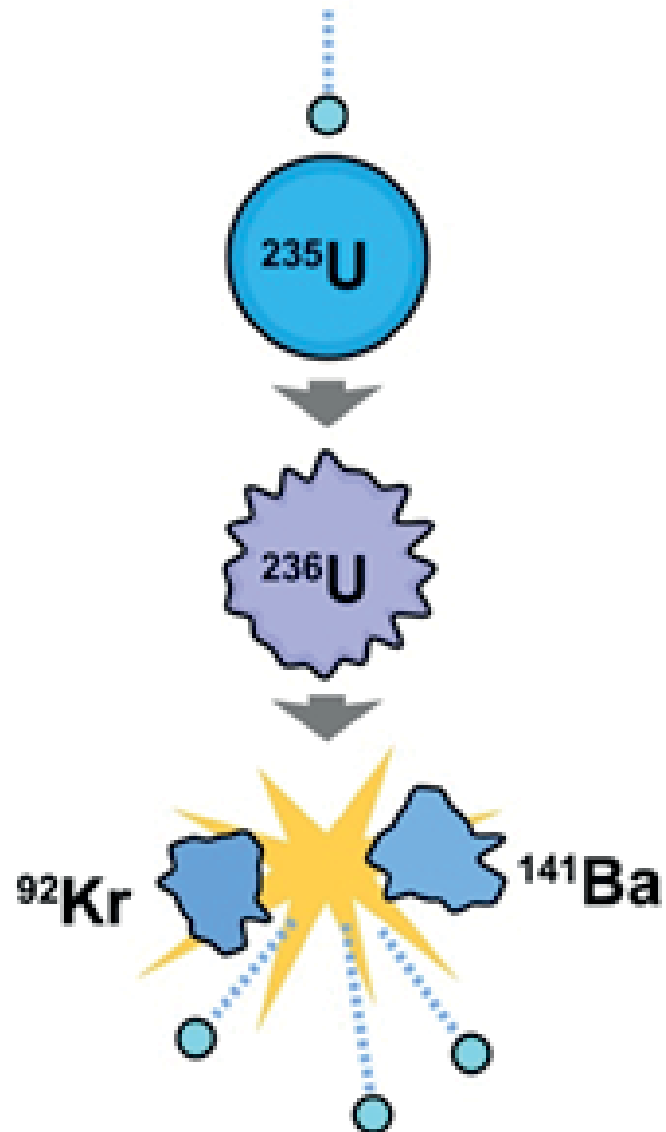


Figura 3 Fisión nuclear. Un neutrón es capturado por el uranio-235 produciendo uranio-236, que se fisiona en kriptón-92 y bario-141, liberando energía. Figura de dominio público.

-Fusión

La fusión es el proceso en que dos núcleos ligeros se unen y se libera energía de acuerdo con la diferencia de energías de enlace antes y después de la fusión [5]. La figura 4 muestra la fusión de deuterio y tritio, que son isótopos del hidrógeno.

El deuterio es el núcleo de un átomo de hidrógeno con un neutrón adicional. El tritio es similar, pero tiene dos neutrones adicionales (figura 5).

Se debe alcanzar una temperatura suficientemente alta para que el deuterio y el tritio se fusionen, por lo que hasta el momento se ha conseguido producir energía gastando aún más energía de la producida. Una de las ventajas de la fusión es que produce energía eléctrica, pero sin desechos radiactivos.

¿Cómo funciona la energía nuclear?

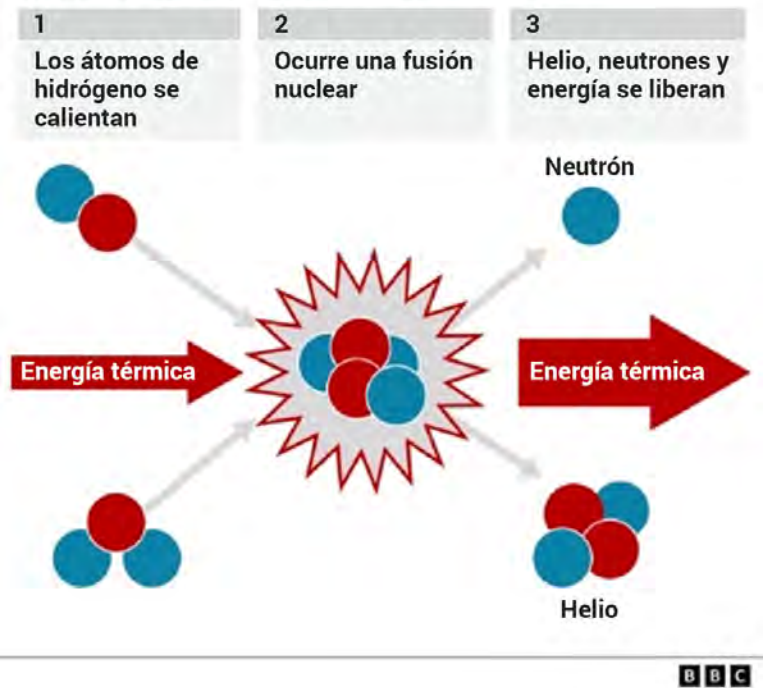


Figura 4. Fusión nuclear. El deuterio (protón en rojo y neutrón en azul) se fusiona con el tritio (protón en rojo y dos neutrones en azul) para producir helio (dos protones en rojo y dos neutrones en azul), un neutrón (azul) y liberando de energía. Tomada de [6].

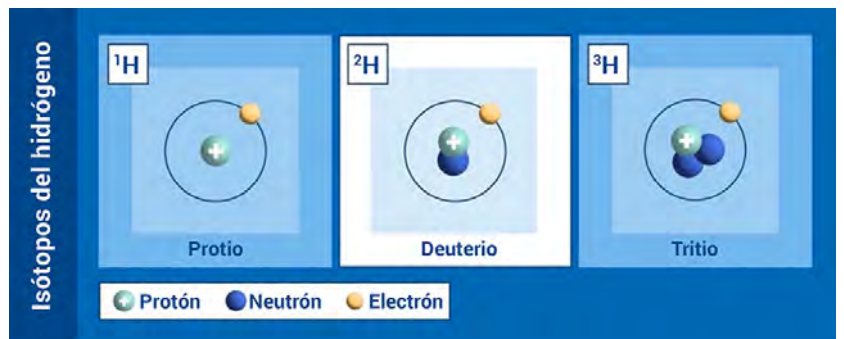


Figura 5 Isótopos del hidrógeno: protio, que es el núcleo formado por el protón en el hidrógeno; deuterio, cuyo núcleo consiste en un protón y un neutrón; tritio, cuyo núcleo consiste en dos neutrones y un protón. Tomada de [7]

Aplicaciones de la Física Nuclear

-Armas nucleares

Las armas nucleares se dividen en dispositivos de fisión y de fisión/fusión [5]. En los primeros, una forma de estimular la liberación de energía es disparar una parte de uranio-235 hacia otra parte de uranio-235. Esta fue la técnica usada en Little Boy detonada en Hiroshima. Otra forma consiste en la implosión, en donde la energía de algunos explosivos es dirigida hacia el combustible nuclear para iniciar la fisión. Esta fue la técnica usada en Fat Man detonada en Nagasaki.

La energía liberada en un arma de fisión es del orden de 25,000 toneladas de dinamita, es decir, 25 kilotones.

En los dispositivos de fisión/fusión se usa la fusión de deuterio y tritio, que requieren altas temperaturas, por lo que son conocidos como termonucleares. La temperatura puede alcanzarse al detonar primero un arma de fisión. Un arma termonuclear puede alcanzar el equivalente a 50 millones de toneladas de dinamita o 50 megatones.

-Efectos biológicos y usos médicos

Dependiendo de su energía, la radiación puede tener efectos sobre los tejidos celulares [8]. La energía depositada sobre los tejidos puede romper sus enlaces químicos y alterarlos, incluso destruyéndolos si la radiación es intensa y energética.

Se le conoce como radiación ionizante a la radiación que tiene suficiente energía para sacar electrones de los átomos. Esta radiación es capaz de dañar el ADN de las células, por lo que se altera su reproducción, potencialmente dañando el tejido.

Los efectos extremos de la radiación incluyen la muerte, el daño de los tejidos, el desarrollo de cáncer y efectos genéticos heredados [8]. Sin embargo, no todo son malas noticias: la física nuclear y de radiaciones tiene usos terapéuticos y de diagnóstico, como el uso de rayos X, que son fotones de alta energía [5].

La radioterapia es usada como tratamiento del cáncer. Una opción es la radiación con neutrones, aunque es difícil dirigirlos para depositar energía sobre el tejido canceroso para destruirlo. También existe la terapia con protones, los cuales se enfocan a la zona afectada reduciendo el depósito de ener-



Figura 6. Tratamiento de terapia con protones. Tomada de [9].

gía en el tejido sano, reduciendo los efectos secundarios [9].

Se pueden usar también radionúclidos (núcleos radiactivos) ingeridos o inyectados para ciertos tipos de cáncer localizados. La idea es que la radiación afecta el ADN de las células de tal forma que se puede reducir el tejido tumoral, aunque también puede tener efectos sobre el tejido sano.

-Producción de energía

La liberación de energía en las reacciones en cadena en los reactores permite producir energía eléctrica en las plantas nucleares. Las reacciones liberan calor y producen vapor (del agua usada para regular la temperatura) que es utilizada en turbinas para producir energía eléctrica. El edificio de contención sirve como escudo para detener algunas de las partículas liberadas en las fisiones.

La planta nuclear de Fukushima tuvo una capacidad total instalada de potencia de 4.7 miles de millones de watts [11], el equivalente a un quinto de la producción mundial de potencia de energía generada con celdas fotovoltaicas en el 2010 [12].

El uso de reactores nucleares produce desechos radiactivos, algunos de los cuales pueden ser almacenados por largos periodos de tiempo, incluso en depósitos subterráneos. Sin embargo, los elementos radiactivos longevos terminarían por contaminar los yacimientos de agua, por lo que no deben enterrarse. Una posibilidad de procesamien-

to de desechos radiactivos es el irradiarlos con neutrones para causar decaimientos hacia elementos estables.

El Reactor Experimental Internacional (ITER, por sus siglas en inglés) es un reactor de fusión que se está construyendo para producir energía mediante fusión de deuterio [13]. Se planea que el ITER produzca 500 millones de watts de energía de

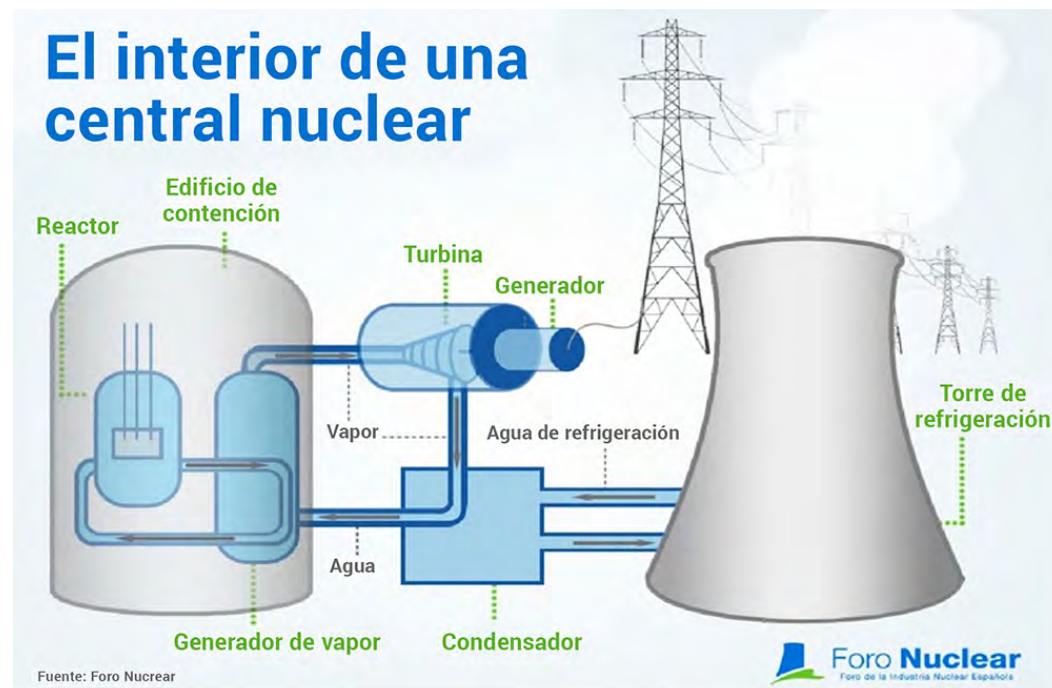


Figura 7 Diagrama de una planta nuclear. Tomada de [10].

fusión (durante intervalos entre 5 y 10 minutos), lo que equivale a un 90% de la potencia eléctrica de la planta fotovoltaica Topaz Solar Farm [12], en los Estados Unidos. Esto se logrará a partir de la inversión de 50 millones de dólares, por lo que se tendrá un factor de ganancia de 10. Las primeras pruebas comenzarán en 2025 y para 2035 se tendrán las primeras pruebas de rendimiento [13].

La Sociedad, el Medio Ambiente y Oppenheimer

-Las mujeres del Proyecto Manhattan

Uno de los puntos débiles de Oppenheimer es la escasa mención sobre la contribución que las mujeres tuvieron en el desarrollo de la bomba atómica.

Lilli Schwenk Hornig es la única científica mencionada en el filme [14]. Nació en 1921 en una familia judía que huyó de Europa hacia Estados Unidos en 1933. Hornig obtuvo un posgrado en química en 1943. A los 23 años colaboró en el desarrollo de la bomba atómica, en donde originalmente recibió una oferta laboral como mecanógrafa, la cual confesó que no podía hacer, como se muestra en una escena de la película. Hornig trabajó en el uso de plutonio como combustible de la bomba atómica.

El libro *Their Day in the Sun: Women of the Manhattan Project*, escrito por Ruth Howes y Caroline Herzenberg, cuenta las historias de aproximadamente 300 mujeres -físicas, químicas, matemáticas, biólogas, médicos y técnicos- que trabajaron en Los Álamos.

Una de estas historias es la de Kay Way. Nació en

1903 y obtuvo su doctorado en física en 1938. Originalmente trabajaba en la producción de neptunio-239, el cual es un isótopo que se crea cuando el uranio-238 absorbe un neutrón. El neptunio-239 decae a plutonio-239. En este aspecto, Way sabía cómo producir material para armas nucleares.

Un día después de la prueba Trinity, Way junto con otros 70 científicos firmaron la petición Szilard, dirigida al presidente Truman, manifestando su preocupación por las implicaciones que tendría el detonar una bomba nuclear en Japón.

Las preocupaciones de la comunidad científica no fueron escuchadas: las ciudades de Hiroshima y Nagasaki fueron devastadas luego de las explosiones de Little Boy el 6 de agosto de 1945 y de Fat Man tres días después, respectivamente. Richard Rhodes menciona una omisión en el filme [15]: los directivos de Los Álamos pensaron que la gente en Hiroshima y Nagasaki estaría en los refugios anti-bombas al detonar Fat Man y Little Boy, por lo que

la estimación del número de fallecidos (alrededor de 200,000) fue mayor a la predicha.

Way convenció a físicos como Einstein, Bethe, Compton, Bohr, Oppenheimer y Szilard para contribuir en el libro *One World or None*, editado por Dexter Masters y por Kay Way, publicado en 1946. El libro es una antología de ensayos que tratan sobre las implicaciones políticas y morales asociadas al uso de armamento nuclear.

-El desastre de Chernóbil

Además del uso deliberado de las armas nucleares, existen los accidentes nucleares.

El 26 de abril de 1986 explotó el reactor no. 4 de la planta nuclear de Chernóbil, en Ucrania [16]. La explosión se dio luego de una prueba en donde se ignoraron algunas medidas de seguridad, provocando sobrecalentamiento del reactor [17].

Cerca de 600,000 personas -bomberos, soldados, mineros y otro personal- fueron enviados a la planta luego de la explosión para las labores iniciales, como la eventual construcción de un sarcófago de concreto para contener la radiación, el cual se deterioró para 1996. El personal fue expuesto a altas tasas de radiación en los primeros días.

La construcción de un nuevo sistema protector para contener la radiación comenzó en 2010 y la instalación terminó hasta 2019. Se espera que esta medida proteja de la radiación durante los siguientes 100 años, aunque el reactor permanecerá siendo altamente radiactivo por un periodo de 20,000 años.



-El desastre de Fukushima

El poderoso terremoto del 11 de marzo de 2011 alcanzó la costa noreste de Japón, produciendo un tsunami con olas de hasta 13 metros de alto que impactaron contra la planta nuclear de Fukushima, causando daños estructu-



Figura 8 Instalación de la estructura de confinamiento del reactor no.4 de Chernóbil. Tomada de [18].

rales y en los sistemas eléctricos.

Los sistemas de enfriamiento fallaron provocando sobrecalentamiento en tres reactores, resultando en explosiones que dispersaron material radiactivo sobre las zonas circundantes [19], [20].

La respuesta fue inmediata; “...la rápida, aunque

frenética, evacuación de las áreas circundantes a los reactores probablemente limitó la exposición del público a la radiación a solo un nivel relativamente bajo...”. Sin embargo, varios trabajadores de la planta sufrieron alta exposición a la radiación. Además, aún son preocupantes los efectos sobre la salud mental de las 210,000 personas que fueron desplazadas de sus hogares, huyendo en pánico, con la preocupación ante la posibilidad de haber sido expuestos a la radiación.

Hay motivos por los cuales debemos preocuparnos por las familias desplazadas por desastres nucleares: los estudios sobre el desastre de Chernóbil han encontrado altas tasas de depresión entre los evacuados [20].

-Los desastres nucleares y el medio ambiente

Luego de las detonaciones de las bombas en Hiroshima y Nagasaki, y de los desastres en Chernóbil y en Fukushima, es entendible la preocupación sobre los efectos del uso de energía nuclear. Por otro lado, la industria energética basada en combustibles fósiles como el petróleo y el carbón ha demostrado tener efectos negativos en la calidad del aire [21].

En contraste, la producción de electricidad con plantas nucleares no contamina el ambiente: “Mientras la operación normal de plantas de carbón produce impactos significativos y medibles, el accidente de Fukushima, el segundo peor accidente nuclear de la historia, no tendrá un impacto cuantificable en la salud pública fuera de Japón o en la posible elevación en riesgo de cáncer en algunas regiones de Japón...” [21]. No obstante, Japón y Alemania planean reemplazar plantas nucleares con plantas basadas en combustibles fósiles, contribuyendo al empeoramiento de la calidad del aire.

Una de las noticias recientes es la decisión de Japón de liberar agua contaminada por radiación del desastre de Fukushima [20]. El problema en la planta nuclear se dio por el sobrecalentamiento de algunos reactores. Para enfriarlos se ha usado agua del mar, por lo que se ha contaminado con 64

elementos radiactivos, como el carbono-14 y el tritio, que son considerados como los más peligrosos para la salud [20].

El agua usada para enfriar los reactores se ha procesado para reducir la presencia de material radiactivo. El procesamiento ha sido exitoso en la remoción de 62 elementos radiactivos, siendo el carbono-14 y el tritio los que permanecen en el agua. El remedio es diluirlos con más agua, que se planea liberar al mar durante 30 años. Se espera que la concentración de materiales radiactivos sea comparable con la natural y no se espera un impacto negativo para la vida marina [20].

Una parte de la comunidad científica exige estudios adicionales para evaluar los impactos que la liberación del agua tendría en el medio ambiente, particularmente la forma en la que el tritio entraría en la cadena alimenticia [20], pudiendo afectar a las personas al consumir pescados y mariscos que tuvieran una concentración mayor a la natural. La decisión de liberar el agua se dará una vez que se hayan revisado diferentes reportes.

Conclusiones

Oppenheimer es un filme profundamente humano. Retrata los más grandes éxitos y los más grandes temores, no solo de un hombre sino de la civilización entera. Podemos ayudarnos, pero también podemos destruirnos.

El trabajo colaborativo de la comunidad científica ha traído avances tecnológicos debido a la aplicación de la física como los avances médicos. Lamentablemente, el esfuerzo individual de quienes participan no siempre es reconocido en la vida real o en la pantalla grande.

La aplicación de la física también ha traído aplicaciones que tienen consecuencias destructivas como el armamento nuclear. Los conflictos bélicos actuales no alivian la preocupación colectiva de que un desastre nuclear deliberado, por causas naturales, o por negligencia vuelva a ocurrir. Sin embargo, la búsqueda por beneficiar a la sociedad no cesa. Actualmente se trabaja en maneras de satisfacer las demandas de energía de la sociedad y en mejorar la calidad de vida, al mismo tiempo que se trata de evitar el daño al medio ambiente. En este sentido, Oppenheimer (una obra artística) pone a disposición del público los temas de la energía nuclear y su uso responsable (una obra científica), quizá con la esperanza de alentar al mundo a usar la ciencia para buscar el bien común, algo en lo que todos debemos contribuir.

Referencias Bibliográficas:

- [1] L. Benini. "A faithful but bleak portrayal." *Nature Physics*, vol. 19, no. 1224, doi: <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02194-1>
- [2] L. Billings, J. DelVisco y C. Leong. "Here's What 'Oppenheimer' Gets Right—And Wrong—About Nuclear History." *ScientificAmerican.com*. <https://www.scientificamerican.com/podcast/episode/heres-what-oppenheimer-gets-right-and-wrong-about-nuclear-history/> (acceso 7 de sep. 2023)
- [3] R.P. Gale y A. Hochhaus. "Nuclear war and physicians' social responsibility." *Leukemia*, Sep, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41375-023-02025-5>
- [4] A. Galindo, ¿Qué es la radiación?, IAEA.org, <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion> (acceso: sep. 18, 2023).
- [5] B. R. Martín y R. Shaw, *Nuclear and Particle Physics*. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley, 2019.
- [6] E. Stallard, "Fusión del deuterio y el tritio: el prometedor hito que lograron los científicos y qué significa para el futuro de la energía limpia." *BBC.com*, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-63963737> (acceso sep. 15 2023).
- [7] P. Daya, "¿Qué es el deuterio." IAEA.org, <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-el-deuterio> (acceso: sep 15, 2023).
- [8] R. A. Powsner, M. R. Palmer y E. R. Powsner, *Essentials of Nuclear Medicine Physics and Instrumentation*. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley, 2013.
- [9] "Tratamiento con terapia de protones." *Cincinnatichildrens.org*, <https://www.cincinnatichildrens.org/espanol/temas-de-salud/al-pha/p/proton-radiotherapy> (acceso: sep. 15, 2023).
- [10] "¿Qué es un reactor nuclear y qué elementos lo constituyen?" *Fornuclear.org*. <https://www.fornuclear.org/actualidad/a-fondo/que-es-un-reactor-nuclear-y-que-elementos-lo-constituyen/> (acceso sep. 15 2023).
- [11] "Fukushima Nuclear Power Station, Japan." *Power-technology.com*. <https://www.power-technology.com/projects/fukushima-daiichi/> (acceso sep. 15 2023).
- [12] Wolfram Inc., "Wolfram Alpha Inteligencia Computacional", *Wolframalpha.com*. <https://www.wolframalpha.com> (acceso sep. 15 2023).
- [13] W. Picot, "ITER: el experimento de fusión más grande del mundo." IAEA.org, <https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/iter-el-experimento-de-fusion-mas-grande-del-mundo> (acceso sep. 15, 2023).
- [14] K. Hafner y M. Tatananni. "She Helped Build the Atomic Bomb to Stop the Nazis, But Was Haunted by What It Did to Japan." *ScientificAmerican.com*. <https://www.scientificamerican.com/article/she-helped-build-the-atomic-bomb-to-stop-the-nazis-but-was-haunted-by-what-it-did-to-japan/> (acceso 6 de sep. 2023).
- [15] D. Castelvecchi. "Why Oppenheimer has important lessons for scientist today." *Nature*, vol. 620, no. 7972, pp. 16-17, ago., 2023, doi: 10.1038/d41586-023-02409-8.
- [16] Y. Cholteeva, "Making Chernobyl safe: a timeline". *Power-technology.com*, <https://www.power-technology.com/features/making-chernobyl-safe-a-timeline/?cf-view> (acceso sep. 15, 2023)
- [17] "Frequently Asked Chernobyl Questions", IAEA.org, <https://www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl/faqs#:~:text=What%20caused%20the%20Chernobyl%20accident,of%20radiation%20into%20the%20atmosphere.> (acceso: sep. 15, 2023).
- [18] VINCI Construction. "Chernobyl new safe confinement." *VINCI-construction-projects.com*, <https://www.vinci-construction-projects.com/es/realizaciones/chernobyl-new-safe-confinement/> (acceso sep. 15, 2023).
- [19] G., Brumfiel, "Fukushima: Fallout of fear", *Nature*, vol. 493, pp. 290-293, ene. 2013. doi: <https://doi.org/10.1038/493290a>
- [20] B. Nogrady, "Is Fukushima wastewater release safe? What the Science says.", *Nature*, vol. 618, pp. 894-895, jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02057-y>
- [21] M. Shellenberger, "Nuclear power: Unexpected health benefits", *Nature Energy*, vol. 2, no. 17058, abr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.58>