BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

LICENCIATURA EN FÍSICA APLICADA

Los conocimientos relevantes para la “cultura pro nuclear”: Su presencia en estudiantes de física y población general

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA

ANDRÉS DAVID GÓMEZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS

JOSIP SLISKO IGNJATOV

Puebla, Puebla, México. Diciembre 2024.

Dedicatoria

Cómo una semilla bien cultivada,
gracias por su apoyo y respaldo
para poder llegar hasta aquí,
esto es para ustedes papá, mamá.

Para Jaz, mi compañera de vida.
Esto también es para ti. Te amo.

Agradecimientos

Quiero ocupar unas líneas para poder expresar toda la gratitud que tengo para todas las personas que me apoyaron y motivaron para poder realizar este trabajo, primeramente, a mi asesor, el Dr. Josip Slisko Ignjatov, por todo su respaldo, orientación y continua supervisión durante el proceso de ser tesista bajo su tutela.

Agradecer a todos mis colegas y futuros colegas en la física, que me acompañaron en los años de carrera y a quienes tuve la fortuna de poder llamar amigos, especialmente a Ángeles Hernández, Perla Márquez, Eber Hernández, Luis Riquelme, Josseline Juárez, Ricardo Sánchez, Saulo Sánchez, Andrea Bonilla, Diana Cruz.

A los amigos que me deja la vida universitaria, que ampliaron mi panorama y conocimientos así cómo apoyarme al principio, a mitad y final de la carrera, Ingeniero mecánico Carlos Juárez, Internacionalista Frida García, Biólogo Giovani Solano, Diseñadora gráfica Paola Salazar, Negociante Internacional Christopher Aguilar, Diseñadora industrial Itzel Romero, Ingeniero mecánico Cristopher Reyes, Ingeniero mecatrónico Alán Cisneros.

Y finalmente a los pilares más fundamentales que me han traído hasta este punto, a quienes les debo lo que soy y lo que podré ser, mis padres, Andrés Gómez y Liliana Ramírez, mis hermanos Daniela y Alejandro y mi compañera de vida Jazmin Aguilar, el logro también es suyo.

A todos ustedes, gracias.

Índice

RESUMEN **7**

Introducción **8**

Capítulo 1: Implicaciones físicas **10**

1.1-Breve historia de la física nuclear **10**

1.2-Implicaciones pacificas **11**

1.3- Procesos nucleares: Fisión y Fusión **13**

- **Fisión** 13
- **Fusión** 16

1.4.-Funcionamieto de las centrales nucleares **19**

1.4.1-Tipos de reactores **20**

1.4.2- Operación de una planta nuclear 21

1.5- Aplicaciones a otros campos **22**

Capítulo 2: Implicaciones sociales y ecológicas **23**

2.1- Repercusión social **23**

2.2-Impacto ecológico, pros y contras **26**

2.2.1-Contras de las centrales nucleares: Desperdicio Nuclear 27

2.2.2-Contras de las centrales nucleares: Costos y tiempos 32

2.2.3 Pros de la energía nuclear 33

Capítulo 3: Accidentes de la energía nuclear **37**

3.1-Escala de los accidentes nucleares **37**

3.2-Three Mile Island **41**

3.2.1- Consecuencias de TMI 42

3.2 Chernóbil **44**

3.3.1 Consecuencias de Chernóbil 49

3.4 Fukushima Daichi **50**

3.4.1 Consecuencias de Fukushima Daichi 51

Capítulo 4: Presencia de la energía nuclear en la sociedad moderna; nacional e internacional **53**

4.1- Avances nucleares: Investigación en energía **53**

4.1.1-Investigación nuclear en México 59

4.2.- Información nuclear en la sociedad **61**

4.2.1.- Información nuclear: Caso mexicano 63

Capítulo 5: Cultura Nuclear, caso mexicano **65**

5.1-Encuesta del público general **65**

5.1.1-Analisis de resultados de la encuesta de población general 67

5.1.2-Conclusiones del análisis: Encuesta población general 76

5.2- Encuesta para estudiantes de la FCFM **77**

5.2.1-Analisis de resultados 78

5.2.2- Conclusiones del análisis: Encuesta FCFM 85

5.3-Estudio del área en instituciones de nivel superior **86**

5.3.1-Planes de estudio de la FCFM BUAP..... 86
5.3.2-Área nuclear en el país 89
Conclusiones de la investigación..... 90
Objetivo principal de la tesis..... 91
¿Qué consideraciones tiene esta nueva "cultura pro nuclear"?..... 92

RESUMEN

En este proyecto se pretende estudiar el panorama actual sobre la “cultura nuclear”, desde la perspectiva de la física, abordando todos los aspectos relacionado a ello, conocimientos generales, funcionamiento y aplicaciones, así como las ventajas y riesgos existentes a esta rama, con enfoque a nivel nacional e internacional. Para ello, se elabora un estudio, por medio de encuestas y entrevistas, sobre los conocimientos al respecto, enfocados en dos sectores demográficos específicos: Estudiantes de física y física aplicada de la FCFM de la BUAP y la población general universitaria no especializada en física. Por otro lado, se analiza el contexto internacional, principalmente de los países nuclearmente activos, a través de artículos de investigación y noticias relacionadas, orientados al estudio de las políticas y acciones nucleares, así como los avances en investigación y desarrollo nuclear de cara al futuro. De esta forma, se abordan todos los puntos vitales para plantear una perspectiva adecuada para estos temas, principalmente en la generación de energía eléctrica, funcionamiento, ventajas, riesgos y contexto internacional, puesto que, es un área de especial interés por sus aplicaciones presentes y sobre todo futuras, debido a las posibilidades de aplicación para la solución de diversas problemáticas, con especial enfoque en materia energética y de calentamiento global, fomentando un cambio a una opinión “pro nuclear" que busque afrontar de mejor manera los desafíos existentes por medio de las investigaciones nucleares.

Introducción

La “cultura nuclear” es un término que se refiere a las actitudes, prácticas, valores y creencias de una sociedad o grupo específico en relación con la energía y la tecnología nucleares. Incluye cómo las personas y las comunidades perciben y se involucran con el tema nuclear y la producción de energía por este medio, incluyendo todos los aspectos relacionados, como la seguridad, los riesgos, los beneficios y las implicaciones éticas, sociales, ecológicas, científicas y políticas.

Sin embargo, la percepción y construcción de la “cultura nuclear” presenta una problemática y es la existencia de la “cultura antinuclear” qué aún se encuentra presente, es decir, la negativa de la sociedad a los temas nucleares, consecuencia de accidentes y situaciones muy puntuales que han ocurrido desde que el termino se expandió por el mundo a mediados de la década de los 40´s, lo que ha generado un rechazo que prevalece a todo lo asociado al termino “nuclear”.

Por ello el propósito de esta investigación es conocer la relevancia de la “cultura nuclear” en el contexto contemporáneo y plantear un cambio, dejando detrás la “cultura antinuclear” que se generó durante el Siglo XX, pues es un eje de sumo interés qué ha ido adquiriendo relevancia en los años recientes, y se espera sea un campo central en investigación y desarrollo, por su capacidad de producción de energía y todas las aplicaciones que pueden derivar de ella. Para ello se tiene que indagar para construir las bases y atender los cuestionamientos que se presentan: ¿Qué es la física nuclear? ¿Cómo operan las plantas nucleares? ¿Cuáles son los beneficios de la energía nuclear? ¿Cuáles son los riesgos de utilizarla? ¿Se puede considerar como una opción viable para la generación de energía? ¿Estamos lejos de la fusión? ¿Es el único camino por seguir?

Esto servirá para analizar la cultura nuclear actual y sentar las bases de una nueva, que seguirá los principios del modelo PISA de la OCDE, en específico en el área de la ciencia, donde se evalúa la capacidad de utilizar conocimientos científicos para interpretar información y tomar decisiones informadas sobre temas relacionados con la ciencia, pero

aplicada a la población general y no sólo a estudiantes. Esta nueva “cultura nuclear” tendrá en cuenta los siguientes elementos:

1. Conocimiento y comprensión: La familiaridad de las personas con la ciencia y la tecnología nuclear, incluyendo su funcionamiento, aplicaciones y potenciales riesgos.
2. Actitud hacia la energía nuclear: Las opiniones y percepciones sobre el uso de la energía nuclear, que pueden variar desde el apoyo y la aceptación hasta la oposición y el rechazo.
3. Confianza en las instituciones: La medida en que las personas confían en las instituciones gubernamentales, científicas y empresariales que gestionan y regulan la tecnología nuclear.
4. Prácticas y normas de seguridad: Las prácticas y regulaciones destinadas a garantizar la seguridad en el manejo de materiales nucleares y la operación de plantas nucleares.
5. Debate público y toma de decisiones: La forma en que se discute y se toma decisiones sobre cuestiones nucleares, como la construcción de plantas nucleares o la gestión de residuos nucleares.
6. Legado histórico: Las experiencias pasadas con la energía nuclear, como desastres nucleares o éxitos tecnológicos, que influyen en las percepciones actuales.

Siguiendo esta base, se desarrollará el tema en un total de 4 capítulos teóricos y 1 analítico, donde se abordarán cuestiones históricas de la física nuclear, las implicaciones físicas, sociales y ecológicas que conlleva el desarrollo de la investigación nuclear y que buscará atender los puntos clave que han moldeado la “cultura nuclear”, entendiéndose cómo un proceso histórico científico y en conjunto al estudio de caso de los distintos países nuclearmente activos, con especial énfasis en México, se buscará llegar al objetivo final de la investigación:

- Explorar el contexto actual de la física nuclear, resaltándola cómo un área relevante y de importancia en su estudio, y así establecer perspectiva con correcto respaldo científico de los usos y procesos nucleares, atendiendo principalmente la generación de energía eléctrica por medio de proceso nucleares, atendiendo sus ventajas, desventajas y papel futuro. Impulsando una “cultura pro nuclear” responsable. -

Capítulo 1
Implicaciones físicas

Para poder contextualizar lo relacionado a la "cultura nuclear" actual, hay que conocer los hechos y momentos históricos que han marcado a esta área de la ciencia y que ha moldeado la percepción de esta, así como el tener entendimiento al respecto de los procesos nucleares, es decir, el saber qué física hay detrás de cada proceso nuclear existente ¿Cuáles son? ¿Qué implican? Esto es, cumplir el primer punto del modelo PISA que se sigue para esta investigación.

1.1. Breve historia de la física nuclear

Los principios del campo de la física nuclear se remontan al comienzo del Siglo XX, partiendo de los avances en el campo de la radioactividad, área que había sido estudiada por los esposos Pierre y Marie Curie (1898) quienes publicaron el artículo: "Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium", donde se sienta el precepto de que la radioactividad es una propiedad atómica y no molecular, conclusión a la que se llegó después de sus experimentos con rayos X y cristales de uranio. Así mismo, el nacer la mecánica cuántica con las aportaciones de Max Planck en 1900 [8] y Niels Bohr con su modelo atómico de 1913 presentan un nuevo campo de estudió. Por otro lado, el estudio de la física de partículas con las teorías de relatividad especial (1905) y general (1915) sentaron la idea de la producción de energía a partir de la masa, demarcaron el camino para el estudio de la física a niveles atómicos

Para el año 1932, Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo, en 1934, Irene Curie y su esposo Fréderic Joliot-Curie, descubrieron la radiactividad artificial al encontrar que el boro y el aluminio se tornaban radiactivos al ser bombardeados por los rayos alfa (núcleos de helio-4) emitidos por el Polonio. [1]

En 1938 un grupo de investigadores alemanes en el Kaiser Wilhem Instituto de Berlín,

integrado por Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner y Otto Frisch descubrió la fisión nuclear, esto derivado de sus experimentos, al encontrar los átomos de Bario como resultado en la división de los átomos de Uranio. En este proceso, los neutrones, al chocar con los átomos de uranio, producían una ruptura que generaba gran energía. Al mismo tiempo, se liberaban otros neutrones capaces de romper nuevos átomos, lo que causaba una reacción en cadena. Con esto, se dio inicio al campo de la física nuclear de manera formal, apoyados en la mecánica cuántica y los principios propuestos por W. Heisenberg [20].

Sin embargo, quien conseguiría un mayor avance y aprovechamiento de la energía liberada por este proceso de fisión del Uranio y otros elementos radioactivos, fue Robert Oppenheimer, líder del Proyecto Manhattan, quién en 1945, con la prueba Trinity, realizó la primera detonación de una bomba que funcionaba a partir de la reacciones en cadena de la fisión nuclear, resultando en algo nunca visto por la humanidad [9]. Con ello se abrió todo un nuevo mundo de aplicaciones físicas nunca imaginados. Del mismo modo, se hizo del conocimiento global que el término “nuclear”, y sería algo a lo que se debería poner atención. Poco a poco, se formó toda una nueva cultura.

1.2. Implicaciones pacificas

Tras su uso bélico, la energía generada por reacciones atómicas tuvo un vuelco hacia un uso diferente, buscando maneras de aprovechar esta fuente, los líderes del proyecto Manhattan, ven el uso pacífico de la física nuclear, la generación de energía eléctrica, una nueva fuente de poder que no contamina la atmósfera en su funcionamiento y se presenta segura, al menos con las condiciones apropiadas.

Así, para principios de la década de los 50´s, las centrales nucleares se ven cómo un gran negocio y el futuro de la energía y para sorpresa de todos, los soviéticos construyen en Obninsk, la primer central nuclear completamente operable y funcional. El funcionamiento de estas centrales en la teoría es muy simple, el combustible del reactor genera las reacciones nucleares que liberan calor, el mismo que se usa para calentar y evapora agua, vapor que servirá para mover turbinas y a través de trabajo mecánico, generar electricidad [15]. Estos

primeros reactores ven su primera llamada de atención con un accidente nuclear en una planta británica, que resulta ser minimizado y pronto los estadounidenses empiezan a construir sus propias centrales.

Para los 70´s ante la crisis del petróleo por los conflictos en medio Oriente y las tensiones geopolíticas, Estados Unidos debe voltear nuevamente a las centrales nucleares para lograr suministrar energía a la nación ante la falta de combustibles fósiles. De manera apresurada y en un periodo de 15 años, los reactores se empiezan a construir en masa en todo el mundo, donde resalta uno en particular la central nuclear Vladimir Ilich Lenin en Prypiat, Ucrania, mejor conocida como Chernobyl, una planta de 4 reactores, la de mayor tamaño en la URSS y el mundo.

El trabajar con esta fuente de energía presentó dos grandes retos a afrontar, la radiación y el tratamiento de los desechos nucleares. El primer problema es que estar expuesto de manera prolongada a la radiación provoca daños irreversibles a la salud desde enfermedades como el cáncer hasta llegar a la letalidad y por su lado, todo el combustible utilizado en las reacciones que ocurren dentro del reactor supone un peligro pues, sigue siendo radiactivo y toxico después de ser utilizado y disponer de él implica hacer un daño ambiental en cualquier lugar donde se deposite.

Aunado a todo ello siempre existe el riesgo de accidente. En 1979, Estados Unidos lo vive de primera mano, con el accidente nuclear de Three Mile Island en Pensilvania, una falla en una válvula crea un problema en reactor que funde el uranio, para después filtrarse alrededor la zona, dejando a 2 millones de personas expuestas a bajas dosis de radiación, siendo así el peor accidente de esta naturaleza en territorio americano [58].

Para 1986, el mundo es testigo del mayor accidente nuclear de la historia, el 26 de abril, el reactor 4 de la central de Chernobyl explota debido a una subida de potencia no se pudo controlar durante una prueba de seguridad para la que se debieron de apagar los sistemas de emergencia y las varas de control no son insertadas a tiempo, desencadenando la catástrofe, liberando grandes cantidades de material radioactivo que llega hasta Suecia y

Reino Unido donde es detectado por sus centrales nucleares. Las consecuencias en vidas humanas afectadas y daño ambiental no tienen presentes y esto genera aún más desconfianza de la energía nuclear [67].

Y el último accidente considerable ocurre en el 2011, un terremoto y posterior tsunami causan otro desastre nuclear ahora en la planta de Fukushima Daichi, Japón donde el agua del océano irrumpe en los reactores, dejando inutilizable los sistemas de refrigeración, lo que provoca que el reactor se sobrecaliente para posteriormente explotar y la misma agua oceánica termina por esparcir la radiación por la zona [69]. Todos estos desastres se abordarán con profundidad más adelante, denotando los errores físicos y de seguridad.

Sin embargo, estos incidentes no han detenido su uso, pues la generación de la núcleo-electricidad sigue vigente, con presencia en países de todo el mundo, Francia, España, Austria, Reino Unido, Japón, Australia, México entre muchos otros más, siendo así un importante eslabón en la cadena de suministro eléctrica, a tal punto que para el 2021, el 10% de toda la energía producida en el mundo provino de reactores nucleares, esto de acuerdo con el organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) [2] y en 2023 fue el 9%, según reporta el Statical Review of World Energy [110].

Dadas las crecientes necesidades energéticas y los problemas ambientales a los que se enfrenta la humanidad, el papel de la energía nuclear y todos sus usos relacionados, se ha puesto con un enfoque prioritario en las agendas internacionales, en la búsqueda de fuentes confiables y sostenibles de energía alternativas a los combustibles fósiles. Es aquí donde la relevancia de lo relacionado a temas nucleares entra al juego. Y es aquí el contexto de partida que se tomará, puesto que se perfila como una de las ramas de la física que dará de que hablar en los años siguientes, por ello es de vital importancia entrar en el área desde todas las perspectivas que la ciencia nos puede ofrecer.

1.2. Procesos nucleares: Fisión y Fusión

- **Fisión**

En física nuclear, la fisión es la partición o división de un núcleo pesado en núcleos más livianos, y en el camino también se generan algunos subproductos como neutrones libres,

fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía), y lo más importante, una gran cantidad de energía. Es además una forma de transmutación nuclear, es decir, es un proceso que convierte un nucleido en otro, dado a qué los fragmentos resultantes (átomos resultantes) no son el mismo elemento que el átomo original. Los dos (o más) núcleos producidos suelen ser de tamaños comparables, pero ligeramente diferentes, normalmente con una relación de masas de los productos de aproximadamente 3 a 2, para fisibles comunes. La mayoría de las fisiones son binarias, es decir, producen dos fragmentos cargados, pero ocasionalmente, sólo en cada 2 a 4 veces por cada 1000 eventos, se producen tres fragmentos cargados positivamente, en una fisión ternaria.

El proceso genera mucha más energía que la liberada en las reacciones químicas convencionales, en las que están implicadas las cortezas electrónicas; la energía se emite, tanto en forma de radiación gamma como de energía cinética de los fragmentos de la fisión, que calentarán la materia que se encuentre alrededor del espacio donde se produzca la fisión.

La fisión se puede inducir por varios métodos, incluyendo el bombardeo del núcleo de un átomo fisionable con una partícula de la energía correcta; la partícula es generalmente un neutrón libre. Este neutrón libre es absorbido por el núcleo, haciéndolo inestable, entonces se partirá en dos o más pedazos, generando así los productos de la fisión que incluyen los dos núcleos más pequeños, hasta siete neutrones libres (con una media de dos y medio por reacción), y algunos fotones.

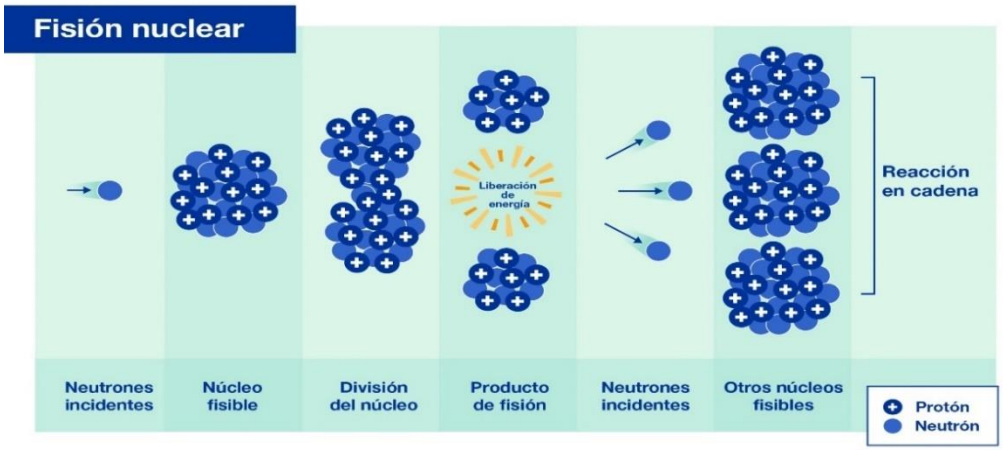


Ilustración 1: Proceso de fisión nuclear, OIEA, A. Vargas

Resultado de la liberación de energía del proceso de fisión, los productos atómicos lanzados pueden ser varios elementos químicos, donde estadísticamente el resultado más probable es encontrar núcleos con la mitad de los protones y neutrones del átomo fisionado original.

Los productos de la fisión son altamente radiactivos, no son isótopos estables; por lo que estos isótopos entonces decaerán mediante cadenas de desintegración. Los fisionables, es decir átomos que pueden generan una reacción nuclear de fisión, reciben el nombre de combustibles nucleares, donde los más comunes son el U235 (el isótopo de uranio con número de masa 235 y de uso en reactores nucleares) y Pu239 (el isótopo del plutonio con número de masa 239). Estos combustibles se descomponen en una gama bimodal de elementos químicos con masas atómicas centradas cerca de 95 y 135 u.

Para que la fisión de un núcleo pesado sea posible se requiere una energía total de entrada de unos 7 a 8 millones de electronvoltios (MeV) para superar inicialmente la fuerza nuclear que mantiene el núcleo en una forma esférica o casi esférica, y a partir de ahí, deformarlo en una forma de dos lóbulos o “gotas” en la que los lóbulos son capaces de seguir separándose entre sí, empujados por su carga positiva mutua, en el proceso más común de fisión binaria (dos productos de fisión con carga positiva + neutrones). Una vez que los lóbulos nucleares han sido empujados hasta una distancia crítica, más allá de la cual la fuerza fuerte de corto alcance ya no puede mantenerlos unidos, el proceso de su separación procede de la energía de la electromagnética de repulsión entre los fragmentos. El resultado son dos fragmentos de fisión que se alejan el uno del otro, a alta energía.

Alrededor de 6 MeV de la energía de entrada de la fisión es suministrada por la simple unión de un neutrón extra al núcleo pesado a través de la fuerza fuerte; sin embargo, en muchos isótopos fisionables, esta cantidad de energía no es suficiente para la fisión. Si no se aporta energía adicional por ningún otro mecanismo, el núcleo no se fisionará, sino que se limitará a absorber el neutrón, como ocurre cuando el U-238 absorbe neutrones lentos e incluso alguna fracción de neutrones rápidos, para convertirse en U-239. La energía restante para iniciar la fisión puede ser suministrada por otros dos mecanismos: uno de ellos es más

energía cinética del neutrón entrante, que es cada vez más capaz de fisionar un núcleo pesado fisionables a medida que supera una energía cinética de un MeV o más (los llamados neutrones rápidos

Los eventos de fisión típicos liberan unos doscientos millones de eV (200 MeV) de energía, el equivalente a aproximadamente + 2 billones de Kelvin, en cada evento de fisión. El isótopo exacto que se fisiona, y si es o no fisionable o fisible, solo tiene un pequeño impacto en la cantidad de energía liberada. Esto puede verse fácilmente examinando la curva de energía de enlace (imagen inferior), y observando que la energía de enlace media de los núclidos actínidos que empiezan por el uranio es de unos 7,6 MeV por nucleón.

La energía total de la "fisión inmediata" asciende a unos 181 MeV, es decir, a un 89% de la energía total que finalmente se libera por fisión a lo largo del tiempo. El restante ~11% se libera en desintegraciones beta que tienen distintas vidas medias, desintegraciones que se inician inmediatamente después de la generación de los productos de fisión; y en emisiones gamma retardadas asociadas a estas desintegraciones beta. Por ejemplo, en el uranio-235 esta energía retardada se divide en unos 6,5 MeV en partículas beta, 8,8 MeV en antineutrinos (liberados al mismo tiempo que las beta) y, finalmente, unos 6,3 MeV adicionales en emisiones gamma retardadas de los productos de desintegración beta excitados (para un total medio de 10 emisiones de rayos gamma por fisión, en total). Por lo tanto, alrededor del 6,5% de la energía total de la fisión se libera algún tiempo después del evento, como radiación ionizante no inmediata o retardada, y la energía ionizante retardada se divide casi por igual entre energía de rayos gamma y beta.

Una vez terminados los procesos de decadencia, que duran alrededor de 3 a 5 años, los combustibles ya no producen más liberación de energía exotérmica ni producen eventos de fisión, sin embargo, continúan liberando radiación [19, 21, 22]

- **Fusión**

Por otro lado, la fusión nuclear es el proceso inverso a la fisión, puesto que, en este en lugar de romper un núcleo pesado en otros más livianos, se utilizan átomos ligeros para unirlos en

otro más grande, es decir, fusionarlos. Usualmente los átomos fusionables son el Hidrogeno y sus isotopos, el deuterio y el tritio, liberando energía y partículas en el proceso, según si la masa de los núcleos es mayor o menor que la del hierro, respectivamente. Sin embargo, a diferencia de la fisión este es un proceso mucho más complejo y requiere de condiciones difíciles de lograr, teniendo que emular el comportamiento de las estrellas.

En este proceso que ocurre dentro del Sol, los núcleos necesitan colisionar unos contra otros a temperaturas altísimas, de más de 10 millones de grados Celsius, lo cual les permite vencer su repulsión eléctrica mutua. Una vez que los núcleos vencen esa repulsión y se encuentran a muy escasa distancia unos de otros, la fuerza nuclear atractiva entre ellos será mayor que la repulsión eléctrica y podrán fusionarse. Para que esto ocurra, los núcleos han de estar confinados en un espacio pequeño, donde se incrementarán las posibilidades de colisión. En el Sol, la presión extrema producida por su inmensa gravedad genera condiciones propicias para que se produzca la fusión. Las reacciones de fusión producen una cantidad de energía muy elevada, superior a la de las reacciones de fisión nuclear.

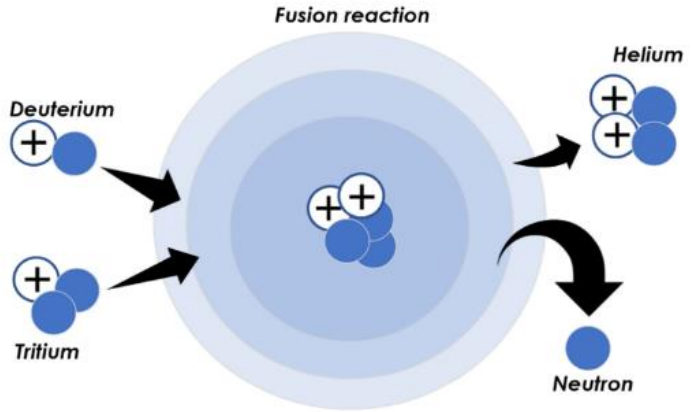


Ilustración 2 Proceso de fusión de isotopos de hidrogeno, OIEA/M. Barbarino

Para poder replicar los efectos gravitatorios y de temperatura en la Tierra, se necesitan temperaturas de más de 100 millones de grados Celsius y condiciones de presión demasiado grandes para lograr que el deuterio y el tritio se fusionen, así como un confinamiento suficiente para retener el plasma y mantener una reacción de fusión durante un lapso lo suficientemente prolongado como para obtener una ganancia de potencia neta, que se refiere a la relación entre la energía de fusión producida y la energía utilizada para calentar el plasma.

Entrando en detalle de la física tras este proceso, para lograr que una fusión nuclear sea exitosa debe superarse una importante barrera de energía producida por la fuerza electrostática. A distancias de angstroms, dos núcleos se repelen debido a la fuerza de repulsión electrostática entre sus protones, cargados positivamente. Sin embargo, si se pueden acercar dos núcleos lo suficiente, debido a la interacción nuclear fuerte, que en distancias cortas es mayor, se puede superar la repulsión electrostática.

Dado que la proporción entre superficie y volumen es mayor en núcleos más pequeños, la energía de enlace por nucleón aumenta con el tamaño del núcleo debido a la fuerza nuclear, acercándose a un límite cuando el diámetro del núcleo es equivalente al de aproximadamente cuatro nucleones. Además, la fuerza eléctrica disminuye con el cuadrado de la distancia. De esta manera, cuando se agrega un protón a un núcleo, será influenciado por una fuerza de repulsión electrostática de todos los demás protones. Así que, debido a la fuerza eléctrica, cuando los núcleos crecen en tamaño, la energía eléctrica por partícula aumenta indefinidamente. Normalmente, la energía de enlace por nucleón tiende a aumentar a medida que el tamaño del núcleo aumenta, hasta llegar a los elementos hierro y níquel, seguido de un descenso en núcleos más pesados.

Después de lograr la fusión inicial, se genera un plasma de átomos que necesita ser confinado para resistir las altas temperaturas; por tanto, se requiere un confinamiento magnético. Esto implica atrapar el plasma en una botella magnética, que es un campo magnético con una forma específica para retener las partículas del plasma. Esto se logra gracias a la fuerza de Lorentz, la cual indica que una partícula cargada que se desplaza en un campo magnético experimenta una fuerza que actúa en ángulo recto respecto al vector del campo magnético y al vector de desplazamiento, impidiendo que la partícula salga del campo.

Sí bien la teoría es conocida, se está trabajando en investigaciones a lo largo del mundo para poder sostener reacciones de fusión de manera efectiva y aprovechable, puesto que lograr cumplir todas las condiciones es un reto para la física. [14, 16, 17, 18]

1.3. Funcionamiento de las centrales nucleares

Una vez que se entendió lo elemental para entender los preceptos de la física nuclear, se puede ahondar en todo lo relacionado al aprovechamiento y uso que se la dan para la generación de energía y cómo es que esto se logra por medio de los procesos de fisión que suceden en los reactores de las centrales nucleares. A partir de este punto, siempre que se hable de una central nuclear operativa se refiere a una que opere mediante procesos de fisión.

Como lo indica el nombre, una central nuclear es una planta industrial dedicada a la producción de electricidad por medio del aprovechamiento de los procesos nucleares, principalmente el de la fisión nuclear, proporciona calor que a su vez es empleado para evaporar grandes cantidades de agua y a través de un ciclo termodinámico convencional, para producir el movimiento de alternadores que transforman el trabajo mecánico en energía eléctrica. El ciclo usado para este trabajo mecánico se logra por medio de vapor de agua, que se calienta con el propio calor proporcionado por las reacciones de fisión.

Este proceso se lleva a cabo dentro de los reactores, la estructura principal de las plantas, los cuales se conforman por [23]:

- Núcleo: consta de un contenedor o vasija en cuyo interior se albergan bloques de un material aislante de la radiactividad, comúnmente se trata de grafito o de hormigón relleno de combustible nuclear formado por material fisible
- Elementos moderadores: Se encargan de absorber los neutrones excedentes propios de la fisión, estos pueden ser agua, grafito o berilio.
- Reflector: Rodea al núcleo y cumple la función de devolver neutrones que se fugan de la reacción dentro del núcleo,
- Barras de control: Hechas normalmente de acero, boro o de una aleación de plata y cadmio que tiene gran capacidad de absorción de neutrones Se sumergen facultativamente en el reactor, sirven para moderar o acelerar el factor de multiplicación del proceso de reacción en cadena del circuito nuclear.
- Blindaje: Un recubrimiento especial que rodea al reactor, absorbe la radiactividad

emitida en forma de neutrones, radiación gamma, partículas alfa y partículas beta.

- Circuito de refrigeración externo: Corresponde a un arreglo mecánico basado en los principios de la termodinámica y mecánica de fluidos diseñado para transferir energía térmica entre dos focos, desplazando la energía térmica contenida en uno de sus focos a fin de obtener una menor temperatura en este, es decir, extraer el calor excedente.

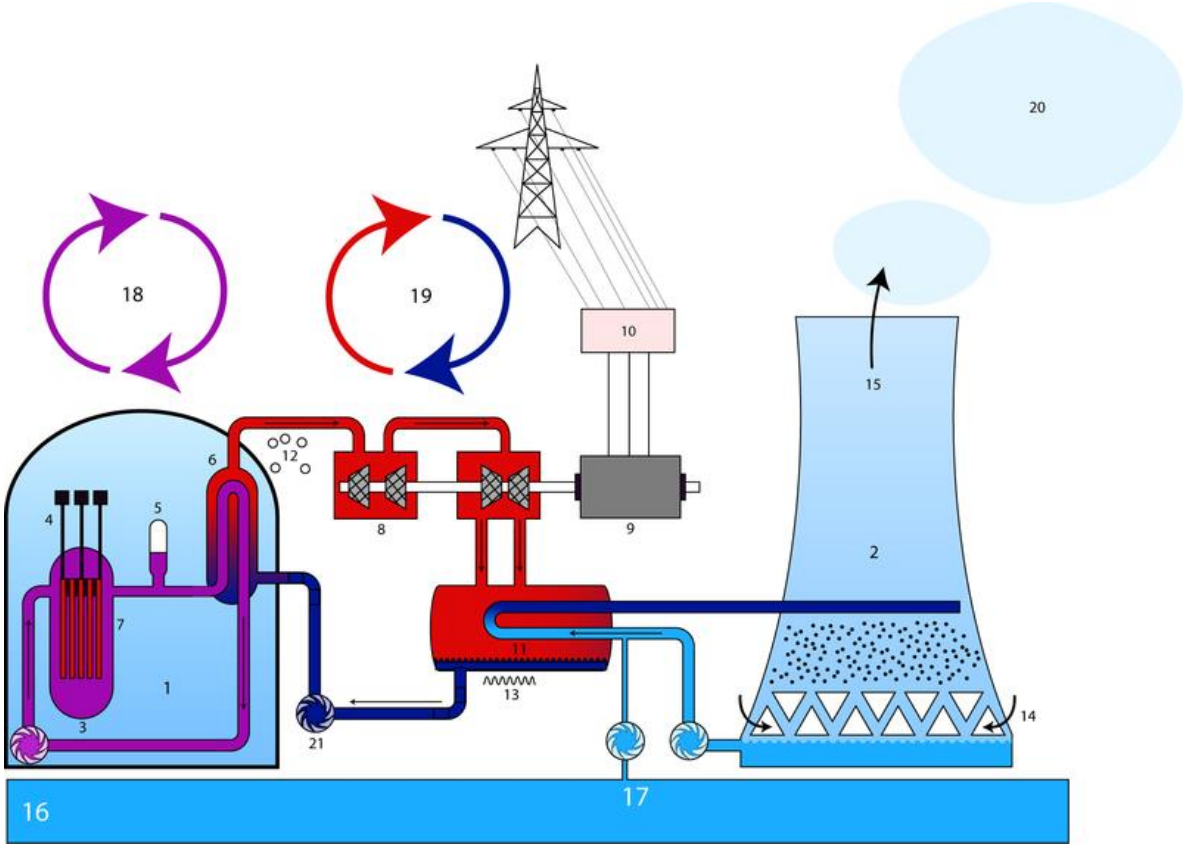


Ilustración 3: Esquema de un reactor nuclear: 1- Edificio de contención. 2- Torre de refrigeración. 3- Reactor. 4- Barras de control. 5- Acumulador de presión. 6- Generador de vapor. 7- Combustible nuclear. 8- Turbina. 9- Generador eléctrico. 10-Transformador. 11-Condensador. 12-Vapor. 13-Líquido saturado. 14-Aire ambiente. 15-Aire húmedo. 16-Río. 17-Circuito de refrigeración. 18-Circuito primario. 19-Circuito secundario. 20-Emisión de aire húmedo (con vapor de agua). 21-Bomba de vapor de agua.

Cómo se puede notar por el esquema, las plantas se suelen construir cerca de ríos o cuerpos acuíferos, de donde proviene el agua que se evapora y posteriormente regresa al ambiente utilizando el propio ciclo del agua, además de utilizarla para otros propósitos cómo lo son la refrigeración y moderación.

1.4.1. Tipos de reactores

Aunque el principio fundamental de operación es el mismo en todos los casos, existen

diferentes tipos de reactor, se clasifican según el tipo de moderador que utilicen, cada uno asociado a un tipo de combustible y de refrigerante [23]:

- Reactores de agua ligera
    - Reactor de agua a presión (PWR – Pressurized water reactor): Utilizan agua como moderador y refrigerante. El combustible utilizado es el uranio ligeramente enriquecido en forma de dióxido de uranio. Este tipo de reactor se ha desarrollado principalmente en los Estados Unidos, Rusia, Alemania, Francia y Japón.
    - Reactor de agua en ebullición (BWR – Boiling water reactor): En este tipo de reactor, una parte del agua del refrigerante (que a la vez actúa como moderador) pasa a la fase vapor en el propio reactor. Se ha desarrollado principalmente en los Estados Unidos.
- Reactores de agua pesada
    - El reactor de agua pesada utiliza el uranio natural como combustible, mientras que el agua pesada se usa como moderador y como refrigerante. Este tipo de reactor se ha desarrollado principalmente en Canadá.
- Reactor de uranio natural, gas y grafito
    - Utiliza el uranio natural en forma metálica como combustible; el grafito como moderador, y el anhídrido carbónico como refrigerante. Estos reactores se han desarrollado principalmente en Francia y Gran Bretaña.

1.4.2. Operación de una planta nuclear

El funcionamiento y obtención de energía se basa en el uso de 4 partes principales de la misma: reactor nuclear, el generador de vapor, la turbina de vapor y el condensador. Cómo ya se vio, el reactor es el corazón de la planta y es aquí de donde se aprovecha el calor para hacer operar el resto de la instalación, después se tiene el generador que es un intercambiador de calor que transmite calor del circuito primario, por el que circula el agua que se calienta en el reactor, al circuito secundario, transformando el agua en vapor de agua que posteriormente se expande en las turbinas de vapor, produciendo el movimiento de éstas que a la vez hacen girar los generadores eléctricos, produciendo la energía eléctrica.

Mediante un transformador se aumenta la tensión eléctrica a la de la red de transporte de energía eléctrica. Y finalmente después de la expansión en la turbina el vapor es condensado en el condensador, donde cede calor al agua fría refrigerante, que en las

centrales PWR procede de las torres de refrigeración. Una vez condensado, vuelve al reactor nuclear para empezar el proceso de nuevo.

1.5. Aplicaciones a otros campos

El uso principal de las reacciones nucleares se ha enfocado en la producción energética, sin embargo, la investigación ha dado pie a que se aprovechen y desarrollen tecnologías de aplicación a diversos campos, tal como lo señala el Foro Nuclear de la industria española: "Las diversas aplicaciones de la energía nuclear son fundamentales en la vida cotidiana. Además, en el futuro, serán más importantes gracias a las investigaciones que aumentan sus posibilidades de aplicación y justifican su utilización."

Algunos de las utilidades más grandes fuera de los sectores industriales y que merecen la pena estudiar es en el sector alimentario y en el médico, donde se ha trabajado para la utilización de procesos de física nuclear y de partículas buscando provechosos resultados minimizando los riesgos. En el sector alimentario, se ha propuesto la ionización de productos agrícolas para mejorar su calidad, prolongando su duración, eliminar bacterias y gérmenes patógenos, así mismo, se estudia el control de plagas y el uso de sondas neutrónicas para obtener el máximo provecho de recursos hídricos.

Por otro lado, la medicina nuclear administra al organismo cantidades pequeñas e inocuas de radiofármacos, es decir, compuestos que contienen material radiactivo, que puede utilizarse para el diagnóstico y el tratamiento. Este campo moderno es fundamental para lograr una medicina personalizada (o de precisión), lo que permite elegir un tratamiento específico que se adecúe al estado de cada paciente o a su predisposición a padecer una enfermedad. Esta medicina puede abordar la evaluación del riesgo, el diagnóstico, el seguimiento del tratamiento y la terapia con radionucleidos considerando las características distintivas del individuo, con el objetivo de mejorar su calidad de vida y, por ende, la salud pública (IAEA, 2023). Finalmente, otras menciones del uso nuclear en varios campos son en minería, exploración espacial, cosmología, hidrología, geología, entre otros. Se ha diversificado tanto que hablar sólo de la producción de energía es no contemplar todo el panorama [27]

Capítulo 2
Implicaciones sociales y ecológicas

La ciencia, así como todo lo que esta misma estudia, sigue respondiendo a las necesidades de la sociedad y el tema nuclear no es la excepción. Por lo tanto, existen implicaciones que responden y competen directamente a la sociedad. Las primeras aproximaciones de la opinión pública hacia el termino nuclear vienen desde un prejuicio negativo dado su implementación en formas destructivas. Sin embargo, hoy en día, tras 70 años de recorrido, tanto la sociedad cómo la física nuclear ha cambiado y evolucionado, lo que enfatiza la necesidad de cambiar el panorama que rodea a esta área tan importante y relevante hoy día.

De esta manera, se pretende abordar los puntos 2, 3 y 4 del esquema propuesto a seguir, evaluando, de manera rápida y desde una perspectiva histórica-social, la actitud que se tiene hacia la física nuclear, y hacia las instituciones que se encargan de su estudio, así como a la regulación a nivel nacional e internacional en materia de seguridad y atendiendo con especial énfasis el impacto ambiental, pues, es el factor que más discusión genera, ya que en tiempos de transición en los medios de producción energética este punto es uno de los pilares para estar a favor o en contra de la energía nuclear.

2.1. Repercusión social

Cómo se ha hecho mención, el primer acercamiento al poder nuclear se da en 1945 con la detonación de las primeras bombas atómicas, generando un rechazo inmediato de todo lo que se relaciona con el término “nuclear” y que sí bien esto no impidió que se desarrollara esta rama científica, logrando investigación y desarrollo a lo largo de la década de los 50´s, culminando en la construcción de plantas nucleares alrededor del mundo.

No fue hasta los 70´s que las repercusiones sociales se intensificaron, pues, en esta década se vivirían las mayores protestas y movimientos en contra de la energía nuclear, debido a la intensificación en la construcción de centrales nucleares ante la crisis energética de la época, siendo el primero en resonar el movimiento alemán, cuando en febrero de 1975 se hicieron ocupaciones para impedir la creación de la central atómica de Wyhl, en la

Republica Nacional de Alemania. Esto creo un eco de fuerza para las protestas civiles antinucleares en países como Estados Unidos, Reino Unido y Francia [28, 29].

De esta manera, los filiales de estos movimientos generan una contra cultura nuclear, siendo así qué se siembra la idea de que todo lo relacionado o asociado con el termino nuclear es dañino para el ser humano y para el ambiente. A esto se le sumaron activistas ecológicos y organizaciones no gubernamentales tales cómo Greenpeace, que se manifestaban ante la energía nuclear y en específico, contra la generación y tratado de desechos nucleares.

Este rechazo generalizado se siguió manteniendo a lo largo de los años, pasando por las últimas dos décadas del Siglo XX y perdurando hasta nuestros días, periodo de tiempo donde se han presentado iniciativas, acciones y determinaciones que han representado una merma en el camino nuclear. Para 1980, un referéndum en el Parlamento sueco propuso eliminar de manera gradual la nucleoelectricidad para el 2010 y sí bien hoy no se ha llevado a cabo, es una propuesta que se fue reevaluando y siendo un caso particular, puesto que el pueblo sueco para mediados de 1990 tenía una gran aceptación respecto a las plantas de energía nuclear, denotando así la contra parte del impacto social habitual del rechazo [30].

Más recientemente, en 2023 dos países con presencia nuclear importante tomaron determinaciones antinucleares, siendo España y Alemania. El país ibérico aprobó el 7° Plan General de residuos radioactivos, el cuál propone cerrar todas sus centrales para el 2035, mientras que el país germánico cerró su ultimó reactor nuclear en abril de 2024, en respuesta a la intensificación de los movimientos en contra de la nucleoelectricidad por los hechos sucedidos en Fukushima, Daichi durante el 2011. Siendo los últimos casos de importancia que va en contra del desarrollo y camino nuclear a nivel internacional [31,32].

Por su lado, México también ha estado inmerso en esta área puesto que desde el siglo pasado se ha investigado y desarrollado en materia nuclear, esto con la fundación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear en 1955, la cual propició la creación del Centro Nuclear “Dr. Nabor Carrillo Flores”, nombrado en honor a uno de los principales impulsores de la investigación nuclear en el país. Para 1972 la CNEN cambió de nombre a Instituto

Nacional de Energía Nuclear y en 1979 tras la llamada “Ley Nuclear”, se convierte en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) creando a la par a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) y Uranio Mexicano (Uramex) [33].

A la CNSNS se le atribuye él logró de la creación de la Central de Nucleoelectricidad de Laguna Verde, que entró en función en 1990, misma que continua activa y genera en 2023 el 3% de la energía eléctrica de todo el país, además del 33% de la energía de la región. Así mismo hoy día el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, cuenta con 11 líneas de investigación en aplicaciones de materia nuclear y de investigación [34].

El país tiene capacidad y presencia nuclear, sin embargo, la percepción y recibimiento público no son alentadores, puesto que antes del incidente de Fukushima el tema nuclear no figuraba en medios mexicanos, mucho menos en la enseñanza fuera de los ramos especializados. Y tras el incidente nuclear, las ideas antinucleares están presentes en la sociedad mexicana y esto va de la mano con las malas percepciones que se tienen respecto al cambio hacia energías renovables, pues estas no sólo involucran cambios a nivel tecnológico si no, a niveles sociales y políticos, mismos que no están siendo atendidos.
Siguiendo esta tendencia, los niveles de conocimiento y aceptación pues gran parte de la sociedad mexicana desconoce que el país es nuclearmente activo y quienes sí lo hacen cuestionan al gobierno sobre esto, preguntando sí realmente es segura de operar, lo que genera incertidumbre y desconfianza generalizada.

No obstante, el movimiento pro nuclear se ha esforzado por luchar y cambiar la cultura nuclear, buscando que más gente se sume a la causa en apoyo a este medio de generación eléctrica, a través de la divulgación de información precisa y de concientización sobre el tema tanto a nivel científico y ecológico cómo el social, haciendo uso de los medios de comunicación masiva.

Actualmente podemos encontrar que ya no sólo se queda en conferencias y ponencias de activistas cómo lo es Michael Shellenberger, miembro de Greenpeace y defensor de la

energía atómica, puesto que, con el alcance de las redes sociales y el impacto que estas pueden generar, además de la masificación del acceso a la información [38], activistas por la ecología y científicos pro nucleares tratan de promover, divulgar y enseñar respecto a los temas relacionados a las centrales nucleares: Isabell Boemeke, influencer brasileña pro nuclear, la cuenta "Jóvenes por el Clima Argentina" en Instagram, el canal de YouTube "Jóvenes Nucleares", el podcast de YouTube "The Wild Project" que ha tenido debates y conversaciones del tema al igual que el canal del Dr. Javier Santaolalla quien tiene videos del tema en su canal de "Date un Vlog". Esto denota la creciente inquietud por mejorar la percepción y comprensión de la materia nuclear y poder trazar un camino óptimo para ello.

2.2. Impacto ecológico, pros y contras

El problema ambiental actual es una de las principales situaciones en las agendas políticas de todos los países, desde el final del Siglo XX se han creado diversos proyectos y protocolos para buscar una transición hacia energías renovables y sostenibles, cómo lo es el "Protocolo de Kioto" establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992). Dicho protocolo estableció por primera vez objetivos específicos en la búsqueda de reducir la emisión de gases de efecto invernadero para las economías participes, al cual, ya pertenecen 197 países. [39]

Otro ejemplo es el "Protocolo de Montreal" que busca reducir de manera gradual la producción de sustancias químicas que deterioran la capa de ozono y generan enfermedades como el cáncer de piel, siendo el único con participación universal, entrando en vigor en 1989 y finalmente el "Acuerdo de París" establecido en el mismo marco de las Naciones Unidas de 1992 y que finalmente entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, establece como objetivo mantener el aumento de la temperatura de nuestro planeta por debajo de los 2 celcius durante el siglo actual.

Dichos esfuerzos buscan encontrar medios de producción energética que no sean contaminantes durante su funcionamiento y aprovechen las fuentes naturales. Estas llamadas "energías verdes" buscan ser eventualmente el reemplazo de las centrales convencionales

que generan electricidad a través de la quema de hidrocarburos, punto donde las centrales nucleares se presentan cómo un fuerte candidato tanto para el momento de la transición. Sin embargo, ningún proceso es completamente limpio y amigable para el ambiente, puesto que, para la construcción de estos centros energéticos cómo pueden ser turbinas eólicas, paneles de celdas fotovoltaicas, centrales nucleares y otros medios necesarios se requieren de grandes cantidades de recursos y según el caso, de terreno. Representan una importante contaminación minera para la obtención de elementos necesarios y vitales para su construcción y funcionamiento, tal es el caso del litio, mineral muy importante pero escaso. Aunado a esto, la dependencia de condiciones climáticas, la poca eficiencia en la creación de electricidad y la incapacidad de almacenamiento de esta, plantean largos trechos y problemas a resolver para que estas alternativas se vuelvan viables, circunstancias qué la nucleoelectricidad no presenta, pero no implica que sea una panacea, se tienen ventajas y desventajas.

Estos puntos a favor y en contra de las centrales nucleares se evaluarán a continuación, de tal modo que se amplifiqué el panorama actual de la forma de producción eléctrica con base en reacciones nucleares, con especial énfasis en el punto más desfavorable de la energía nuclear, el impacto ambiental por desechos nucleares.

2.2.1. Contras de las centrales nucleares: Desperdicio Nuclear

Se le llama desperdicio o desechos nucleares a todo el material remanente de una reacción nuclear, dicho material puede encontrarse en forma gaseosa, líquida o sólida para los que no está previsto ningún uso, que contienen o están contaminados con elementos químicos radiactivos (isótopos radiactivos o radionucleidos) en concentraciones superiores a las establecidas por los organismos reguladores.

Estos desechos por sí solos representan un riesgo para los seres humanos y el medio ambiente, pues la radiación ionizante que desprenden tiene serias afectaciones sobre los organismos biológicos cercanos, por lo que requieren de tratamiento y gestión especial para evitar provocar daños en el proceso de ser desechado y lograr un manejo seguro de los

mismos. Sin embargo, a diferencia de otros residuos tóxicos que se generan en otras actividades industriales, la toxicidad de los residuos radiactivos decrece con el tiempo, a medida que se desintegran los isótopos y se transforman en elementos químicos estables.

El tratamiento que se debe seguir para todos es similar a grandes rasgos, sin embargo, los desechos se clasifican en seis estratos diferentes, clasificados así por la OIEA, los cuales se establecen con base en su grado de radioactividad siendo [39, 40]:

- Residuos exentos (EW): Desechos que cumplen los criterios necesarios para la dispensa, exención o exclusión del control reglamentario con fines de protección radiológica.
- Desechos de período muy corto (VSLW): Desechos que se pueden almacenar para su desintegración durante un período limitado de algunos años como máximo. Esta clase incluye los desechos que contienen principalmente radionucleidos con períodos de semidesintegración muy cortos utilizados frecuentemente con fines médicos y de investigación.
- Desechos de actividad muy baja (VLLW): Desechos que no cumplen necesariamente los criterios de los EW, pero que no precisan un alto grado de contención y aislamiento y, por consiguiente, se pueden someter a disposición final en instalaciones de terraplenado cerca de la superficie con control reglamentario limitado.
- Desechos de actividad baja (LLW): Desechos que se encuentran por encima de los niveles de dispensa, pero que contienen cantidades limitadas de radionucleidos de período largo. Estos desechos requieren un aislamiento y contención sólidos durante períodos de hasta algunos cientos de años y se pueden someter a disposición final en instalaciones cerca de la superficie.
- Desechos de actividad intermedia (ILW): desechos que, debido a su contenido, particularmente de radionucleidos de período largo, precisan un grado mayor de contención y aislamiento que el que ofrece la disposición final cerca de la superficie. Los ILW pueden contener radionucleidos de período largo, en particular radionucleidos emisores de radiación alfa, que no se desintegrarán hasta un nivel de

concentración de la actividad que sea aceptable para proceder a la disposición final cerca de la superficie durante el tiempo en que se puede contar con los controles institucionales.

- Desechos de actividad alta (HLW): desechos con niveles de concentración de la actividad suficientemente elevados para generar cantidades importantes de calor mediante el proceso de desintegración radiactiva o desechos con grandes cantidades de radionucleidos de período largo que se deben tener en cuenta en el diseño de una instalación de disposición final de este tipo de desechos.

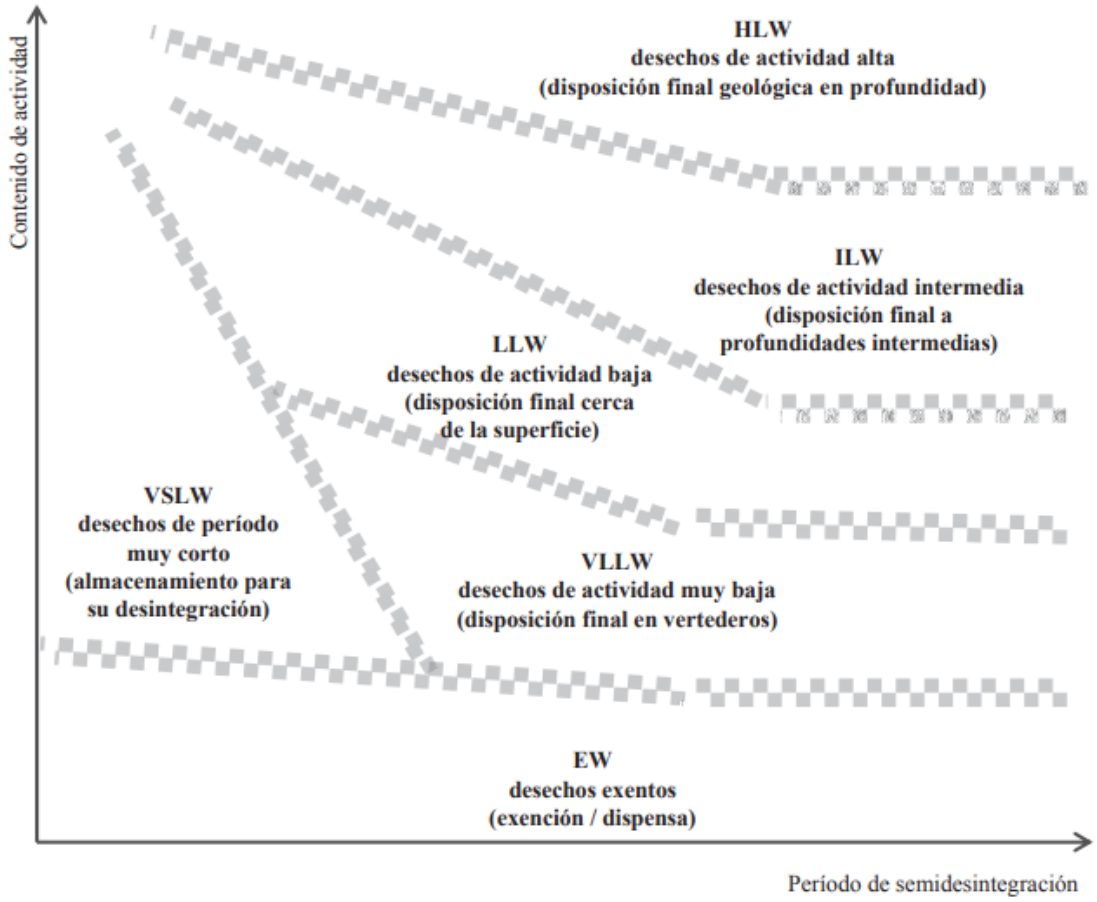


Ilustración 4. *Ilustración conceptual del sistema de clasificación de desechos. OIEA, Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente*

En el caso de las centrales nucleares actuales, los desechos generados por los núcleos de los reactores una vez que consumen todo el combustible que tenían, ya sea Uranio o Plutonio, son considerados de alta actividad, pues contienen isotopos radioactivos con un

periodo medio de desintegración mayor a 30 años. Esto representa la mayor amenaza ambiental de acuerdo con la clasificación de desechos y uno de los principales argumentos de los contrarios a la energía nuclear.

Actualmente, se generan anualmente en todo el mundo alrededor de 200 000 metros cúbicos de desechos de nivel bajo e intermedio y 10 000 metros cúbicos de desechos de alto nivel de radiactividad, además de los combustibles nucleares consumidos destinados a su eliminación definitiva, de la producción de energía nuclear [41].

El peligro y contras al respecto proviene del tratamiento original de los desechos, puesto que, durante el Siglo XX, con los inicios de la era nuclear y su uso en la producción energética, la manera de lidiar con los materiales que salían de los reactores nucleares era depositarlos en barriles contenedores sellados, mismos que posteriormente eran arrojados al océano, volviéndolo de esta forma el vertedero nuclear. De 1946 a 1993, más de 200 000 toneladas de desechos, algunos de ellos altamente radiactivos, fueron arrojados a los océanos [42].

La mayor parte de los desechos nucleares arrojados provino de Gran Bretaña y la Unión Soviética, según muestran las cifras del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Hasta 1991, Estados Unidos había dejado caer al menos 190 000 metros cúbicos de desechos radiactivos en el Atlántico Norte y el Pacífico. Otros países, como Bélgica, Francia, Suiza y los Países Bajos también eliminaron toneladas de desechos radiactivos en el Atlántico Norte en las décadas de 1960, 1970 y 1980. Alrededor del 90 por ciento de la radiación presente en el océano proviene de barriles desechados en el Atlántico Norte, la mayoría de los cuales se encuentran al norte de Rusia y en las costas de Europa occidental. [46]

Hoy, estas prácticas están prohibidas y sancionadas, se han establecido protocolos y medidas de seguridad adecuadas para evitar el impacto ambiental y humano, de forma que, de seguir al pie de la letra dichos protocolos, la seguridad de su tratamiento está garantizada. Este protocolo establece [42-45]:

1. Identificar el tipo de desecho: Antes de elegir una estrategia de procesamiento de desechos, es imprescindible conocer y entender el origen de los desechos y la tasa de generación de desechos, así como su volumen y características. La caracterización es una técnica que provee información sobre las propiedades físicas, químicas y radiológicas de los desechos, que ayuda a determinar los requisitos de seguridad adecuados y las posibles opciones de procesamiento.

2. Una vez cumplido este paso, se prosigue con 3 fases de procesamiento: tratamiento previo, tratamiento y acondicionamiento

   - Fase 1 Tratamiento previo: se preparan los desechos para su procesamiento, lo que puede entrañar la clasificación y segregación con el fin de separar los elementos contaminados de los no contaminados. A veces es necesario reducir el tamaño de los desechos, por ejemplo, troceándolos o triturándolos para optimizar su procesamiento posterior.
   - Fase 2 Tratamiento: Aquí se busca reducir el volumen de los desechos radioactivos al separar el componente radiactivo del grueso de los desechos, lo que a menudo modifica la composición de los desechos durante el proceso. La incineración de desechos sólidos y la evaporación de desechos líquidos son dos técnicas habituales de tratamiento.
   - Fase 3 Acondicionamiento: Se da a los desechos una forma segura, estable y manejable, de manera que puedan transportarse, almacenarse y someterse a disposición final. Las técnicas de acondicionamiento están diseñadas para reducir la tasa de emisión al medio ambiente de radionucleidos presentes en el bulto de desechos radiactivos sometido a disposición final. El acondicionamiento de los desechos para su disposición final a menudo se realiza mediante encapsulamiento o solidificación en cemento, bitumen o vidrio, o reenvasado en contenedores especiales.

3. Una vez que se acondiciona el material radioactivo, se prosigue con su disposición final, que depende del tipo de material será su paradero, para el caso del combustible

irradiado a gastado se tienen 3 etapas de almacenamiento:

a. Etapa 1 Almacenamiento temporal: La primera parada son las piscinas de combustible gastado, piscinas de acero y hormigón de 12 metros de profundidad donde los últimos 4 tienen bastidores para mantener los recipientes contenedores, aquí, se reduce su radioactividad y su temperatura. Aquí se pueden mantener por alrededor de 4 hasta 6 años, dependiendo la capacidad de la piscina y del flujo de combustible gastado que se trabaja, puesto que este se cambia cada 12 o 24 meses.

b. Etapa 2 Almacenamiento temporal centralizado: los elementos combustibles irradiados generalmente son transferidos a un Almacén Temporal Centralizado (ATC), donde se mantienen durante un plazo de entre 60 y 100 años hasta su disposición definitiva. Se trata de una instalación industrial pasiva en la que se almacenan en seco de forma conjunta todos los elementos combustibles irradiados producidos en las distintas centrales del parque nuclear. La tecnología empleada asegura el confinamiento mediante una ventilación por bóvedas y un aislamiento de hormigón.

c. Etapa 3 Almacenamiento definitivo: Una vez que la radiación se minimiza se trasladan los contenedores a su última parada que se realizará en el denominado Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), estructuras de ingeniería mediante pozos y túneles en formaciones geológicas estables a gran profundidad, donde pueden permanecer por miles de años sin presentar ningún riesgo.

Con el correcto tratamiento de estos desperdicios, siguiendo las norma aprobadas por la OIEA, estos pueden ser tratados para casi nulificar los efectos adversos, aunado a que se está trabajando e investigando en la forma de poder reciclar estos productos post fisión y así, acabar con esta contra de la energía nuclear [43].

2.2.2. Contras de las centrales nucleares: Costos y tiempos

Otro punto desfavorable que se presenta para la expansión del uso de la nucleoelectricidad

proviene de temas financieros y es qué, la inversión necesaria para la construcción de una central nuclear operable que cumpla con todas las normas de seguridad para obtener luz verde para su operación es demasiado alta, de acuerdo con la Sociedad Nuclear Española, una central tiene un costo promedio de 4,000 a 5,000 millones de euros, cantidad que demora en ser amortizada únicamente por los beneficios de la planta, tardando alrededor de 30 años para que esto suceda, siendo mucho más caro que la instalación de otras centrales eléctricas.

Y de la mano con la inversión, el tiempo de construcción es alto, pudiendo tardar un periodo de 5 a 10 años, siendo la media de 7,3 años de acuerdo con la OIEA, para que la central pueda entrar en operaciones totales y esto está sujeto a la experiencia nuclear de cada país. Sin embargo, esta inversión de tiempo se ve redituada puesto qué la vida útil de un promedio es de al menos 40 años, pudiendo extenderse hasta los 60, lo que representa un periodo de vita útil bastante atractivo. Desde este panorama las contras existentes si bien son de consideración, no son determinantes para echar atrás los esfuerzos en el camino nuclear [51, 52].

2.2.3. Pros de la energía nuclear

Así cómo las contras, los pros de las centrales nucleares y de la nucleoelectricidad también son muy llamativos y podrían considerarse determinantes para continuar con el uso, aprovechamiento y expansión de esta. Primeramente, se debe resaltar que a diferencia de otras alternativas de las “energías verdes” no depende de condiciones climatológicas, ya que al utilizar el mismo principio que las centrales eléctricas operadas por la quema de hidrocarburos, es decir, la generación de energía por medio de un proceso termodinámico que transforma trabajo mecánico en electricidad, sin importar las condiciones del clima y/o entorno, se sostiene una producción constante de energía y de suministro continúo puesto qué las centrales se conectan directamente a la red eléctrica principal de las ciudades y comunidades.

Aunado a esto, es la que mayor eficacia proporciona en términos de producción, puesto que un kilogramo de Uranio de combustible nuclear puede producir alrededor de

425.000 kWh[1], esto asumiendo que se trata de un reactor de una central nuclear de agua a presión (PWR) tipo de 1.000 MWe [2] de potencia instalada. Esto será dependiendo el tipo de reactor operativo de cada central, sin embargo, esto brinda un panorama más claro de la potencia que puede ofrecer. A la par, podemos notar el poco consumo de recursos para producir esta cantidad de energía, de acuerdo con el Foro Nuclear de España 5 gramos de Uranio equivaldría a quemar 1000 kilogramos de carbón o 565 litros de petróleo o 483 metros cúbicos de gas natural [54].

De la mano del punto anterior las reservas de uranio, el combustible más habitual de los reactores es de gran abundancia en todo el mundo, teniendo grandes reservas que garantizarían un uso prolongado de esta fuente de producción. De acuerdo con el Libro Rojo del Uranio 2020, un informe que publican la Agencia de Energía Nuclear y el Organismo Internacional de Energía Atómica, las reservas convencionales de uranio conocidas ascendían en todo el mundo a 8.070.400 toneladas de uranio metálico (t U) [56].

El Libro Rojo también incluye proyecciones de las necesidades de uranio para la generación de energía nucleoeléctrica hasta 2040, así como una evaluación exhaustiva de la relación entre la oferta y la demanda de uranio. Según cómo evolucione el sector de la energía nuclear, las necesidades de uranio relacionadas con los reactores podrían oscilar entre las 56 640 t U/año en un escenario de baja demanda y las 100 224 t U/año en un escenario de alta demanda para 2040.

Sí bien no todo el Uranio natural es utilizable cómo combustible de fisión puesto que más del 99% del encontrado en la naturaleza es U238 y para los reactores se precisa de U235, existe el proceso de enriquecimiento, esto es, un proceso por el cual se aumenta la proporción del isotopo 235 dentro del U238. Esto puede ir desde un 0,72% hasta un 94% de enriquecimiento cómo máximo. El uranio con una proporción de U 235 inferior al 20 % se

---

1.- Un kWh **es una unidad de energía equivalente a 1000 watts-hora (Wh).** Esta unidad se usa para medir la energía consumida durante una hora. Esta unidad se calcula multiplicando la cantidad de vatios de electricidad utilizada por el tiempo que se tarda en consumirla. Esta cantidad de electricidad se mide en términos de potencia eléctrica, que es la cantidad de electricidad que se utiliza en un determinado momento.

2.- MWe: Mega Watt eléctrico, es una medida para la potencia eléctrica producida por una planta de energía.

denomina “uranio poco enriquecido” (UPE). La mayoría de los reactores comerciales emplean UPE con una concentración de U 235 inferior al 5 %. El UPE no se degrada y puede almacenarse de forma segura durante muchos años.

Existen diferentes métodos de enriquecimiento del Uranio. El proceso suele comenzar convirtiendo el concentrado de uranio (torta amarilla) a un estado gaseoso (hexafluoruro de uranio). Este gas se dirige a cilindros que giran a gran velocidad en los que, por acción de la fuerza centrífuga, los átomos más pesados de uranio, como los de U 238, son propulsados hacia las paredes y los átomos más ligeros, como los de U 235, permanecen en la parte central. Tras separar de esta manera los isótopos, se extrae gas con una concentración mayor de U 235. El proceso se repite hasta lograr un gas con la proporción deseada de U 235, que posteriormente se convertirá en un polvo de color negro (dióxido de uranio) [58].

Además, se trabaja en la forma de reciclar el uranio gastado para volverlo “uranio reprocesado” y así reducir el consumo de uranio natural para combustible. En Francia, una potencia nuclear, donde el 68% de la producción de electricidad proviene de centrales nucleares, tiene en la política nuclear cómo uno de los pilares el reciclaje de combustible gastado y es qué de acuerdo con Orano, empresa dedicada a este trabajo, es posible recuperar hasta un 96% de los materiales reutilizables del combustible gastado. [57]

El proceso de reciclaje del combustible nuclear consiste en convertir el plutonio gastado, que se forma en los reactores nucleares de potencia como un subproducto de la quema de combustible de uranio, y el uranio en un “óxido mixto” (MOX) que se puede reutilizar en las centrales nucleares para producir más electricidad. Esto mejora la sostenibilidad de la industria de la nucleoelectricidad, reduciendo gastos y desechos nucleares finales.

Pasando al principal atractivo, las emisiones de dióxido de carbono y de gases de efecto invernadero son del 0% una vez que la central nuclear entra en operaciones, puesto que tal cómo se vio al momento de estudiar el funcionamiento de una central nuclear, el calor

necesario que se necesita para evaporar el agua que hace funcionar la turbina que genera la electricidad no se generar por la quema de un combustible que libere gases, si no, que se obtiene de las reacciones de fisión. De este modo, el único gas liberado durante todo este proceso es vapor de agua, que gracias al ciclo natural volverá a caer en forma de lluvia a los cuerpos de agua que alimentan a la central, cerrando de esta forma un funcionamiento totalmente amigable con el ambiente y volviéndose un punto clave e importante en la lucha contra el calentamiento global y la crisis energética.

Estas ventajas y puntos a favor hacen ver que la apuesta por el camino nuclear parece ser el más apropiado en la búsqueda de cambios sostenibles, sumando todo el esfuerzo y desarrollo que se está implementando en la solución de las contras, trabajando en lograr el reprocesado del combustible nuclear para minimizar los residuos generados y en la investigación para lograr la fusión nuclear, proceso mucho más efectivo y que amplificaría las ventajas del uso de la nucleoelectricidad al potenciar el uso de ambas reacciones.

Capítulo 3
Accidentes de la energía nuclear

Cuando se trata del tema nuclear, la historia demuestra que se ha avanzado en cuestiones de uso, seguridad, medidas de contención y correcto tratamiento de los desechos procedentes de las centrales que operan por medio de la fisión. Esto se ha logrado gracias al aprendizaje de los errores del pasado, así como a la constante evolución de la ciencia y la tecnología, no obstante, hay hechos muy remarcables en el histórico que han dejado una huella inmensa en la cultura y en especial dentro de la cultura del movimiento antinuclear, los accidentes nucleares.

Cómo se ha mencionado antes, los accidentes nucleares de Three Mile Island, Chernóbil y Fukushima son los antecedentes más peligrosos y riesgosos que ha tenido la nucleoelectricidad y han dejado un miedo casi innato a lo relacionado con la palabra nuclear, aunados a la bombas atómicas. Pero a partir de estos, se han mejorado los tratamientos, las medidas de seguridad y los protocolos de acción en caso de accidente, lo que demuestra que el legado histórico ha sido aprendido para apostar por un camino más seguro.

Para poder entender en que punto del contexto nuclear nos encontramos hoy día y pasando, momentáneamente, al punto 6 de nuestro modelo de trabajo, se estudiará lo ocurrido en estos incidentes de modo que se pueda comprender qué sucedió, porqué sucedió, las consecuencias y la respuesta que hubo ante ello, así cómo entender que esto es parte del aprendizaje que demarca el camino a un mejor futuro nuclear.

3.1. Escala de los accidentes nucleares

Antes de hablar de los accidentes mencionados, se debe tener presente el cómo se clasifican y evalúan las consecuencias de estos, para ello, la OIEA creó en 1990 la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES) el cual es un instrumento que permite visualizar la gravedad de los diversos incidentes relacionados a la materia nuclear y radiológica. Los Estados Miembros utilizan la INES voluntariamente para calificar y comunicar los sucesos que se producen en su territorio. No es un sistema de notificación o información que deba

usarse en una respuesta a emergencias.

La INES cubre incidentes en instalaciones y actividades con presencia de fuentes de radiación. Se utiliza para calificar los sucesos que provocan una emisión de material radiactivo al medio ambiente y la exposición a la radiación de trabajadores y la población en general. De igual forma se usa en sucesos que no tienen consecuencias reales, pero en los que las medidas que se pusieron en práctica no funcionaron según lo previsto. La escala se aplica asimismo en eventos relacionados con la pérdida o la sustracción de fuentes radiactivas y el descubrimiento en la chatarra de fuentes radiactivas no controladas. Tampoco contempla a los casos de contaminación radiológica relacionada con actividades militares pues sólo hace para calificar consecuencias por fallas en la seguridad de instalaciones [59].

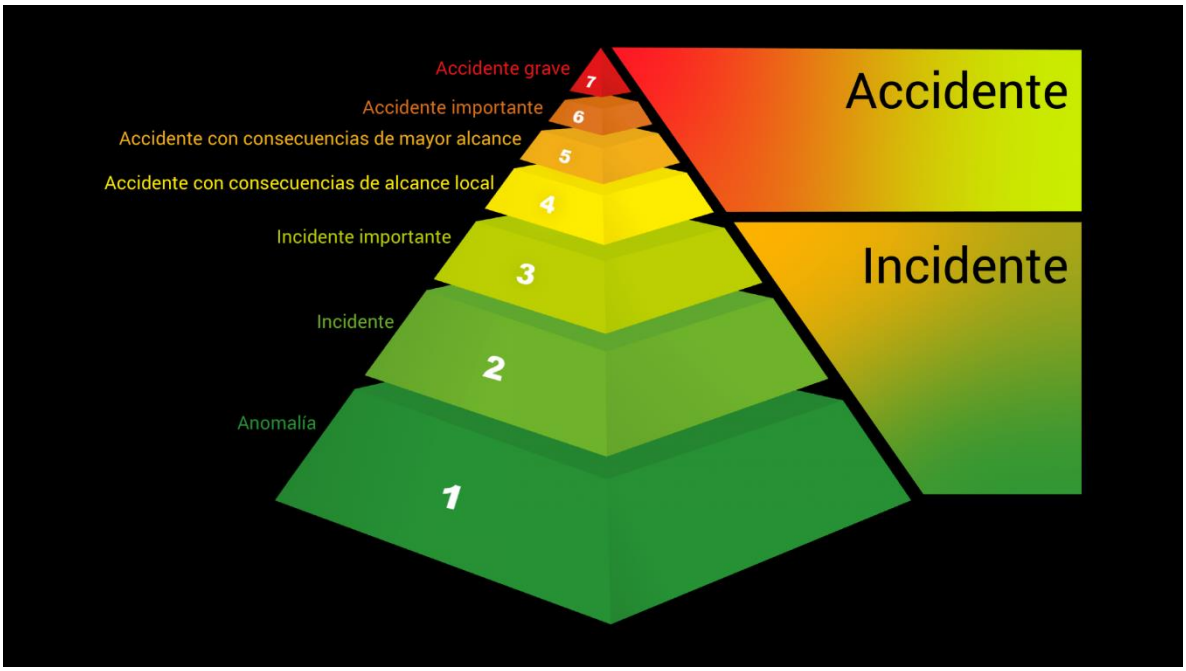


***Ilustración 5**. Pirámide representación de INES, OIEA*

Algunos puntos importantes que se deben de tener en cuenta para entender el uso de INES [60]:

- La calificación de los sucesos consta de siete niveles. La escala es logarítmica, es decir, la gravedad de un suceso es aproximadamente diez veces mayor en cada nuevo nivel de la escala.
- Al considerar los sucesos, se tienen en cuenta:

- Consecuencias para las personas y el medio ambiente: se refiere a las dosis de radiación en personas situadas cerca del lugar donde ocurre un suceso y a la liberación no prevista, en un área amplia, de materiales radiactivos fuera de una instalación

- Consecuencias en las barreras y los controles radiológicos: abarca sucesos que no tienen impacto directo en las personas y el medio ambiente y se refiere únicamente al interior de grandes instalaciones. Niveles altos de radiación no previstos y liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos confinados en las instalaciones.

- Consecuencias en la defensa en profundidad: abarca sucesos que no afectan a las personas ni al medio ambiente, pero en cuyo caso el conjunto de medidas establecidas para prevenir accidentes no funciona conforme a lo previsto.

- Los sucesos sin importancia desde el punto de vista de la seguridad reciben la calificación “Por debajo de la escala/nivel 0”.

Una vez aclarado esto, se pude seguir con la descripción de cada uno de los niveles, para comprender que consecuencias contempla cada uno para ser calificado dentro de ese nivel piramidal:

1. Anomalía: Este primer nivel sólo contempla defensas en profundidad, en este nivel existe una sobreexposición de una persona por encima de los limites anuales reglamentarios de exposición radiológica, fallas menores en componentes de seguridad y también contempla el robo o perdida de fuentes radioactivas o de dispositivos de embalaje
2. Incidente: A partir de aquí se tienen en cuenta los 3 tipos de consecuencias, se contemplan fallos importantes en las disposiciones de seguridad en sistemas de uso y transporte de material radioactivo, en el apartado de controles radiológicos,

se presentan niveles de radiación superiores a 50 mSv[3]/h en una zona de operación y contaminación importante dentro de una instalación en una zona que no debería presentarla, y finalmente la exposición de una persona a una dosis de 10 mSv.

3. Incidente importante: Es un cuasi accidente en una central nuclear sin disposiciones de seguridad pendientes, robo o perdida de fuentes de radiación alta, para los controles radiológicos tenemos tasas de exposición de 1 Sv/h y contaminación grave en una zona de la instalación no prevista para ello y las afectaciones humanas abarcan exposición 10 veces mayor al límite anual incluyendo afectaciones no letales
4. Accidente con consecuencias de alcance local: A partir de este punto ya no hay defensa en profundidad, los controles radiológicos indican que existe fusión de combustible o daño al combustible, que provoca una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo y liberación de cantidades considerables de materiales radioactivos a instalaciones con probabilidad de exposición pública y en afectaciones humanas se ve probable al menos una defunción.
5. Accidente con consecuencias de mayor alcance: Las barreras y controles han fallado, se presenta daño grave en el núcleo del reactor, con liberación de grandes cantidades de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de exposición del público. Esto implica daños a personas y medio ambiente, incluyendo liberación limitada de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de algunas de las contramedidas previstas y varias defunciones por radiación.
6. Accidente importante: En este punto ya hay daños humanos y al ambiente de manera directa, debido a que hay liberación importante de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de las contramedidas previstas.
7. Accidente grave: El peor accidente que se puede presentar con las peores consecuencias ambientales y de riesgo a la humanidad. Se presenta liberación grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio

[3] El sievert es la unidad de equivalencia de dosis de radiación ionizante del Sistema Internacional de Unidades (SI), igual al julio por kilogramo (símbolo: Sv). Por lo tanto, un mSv es la milésima parte de un sievert

ambiente, que requiere la aplicación y prolongación de las contramedidas previstas.

3.2. Three Mile Island

Ubicada al sur del rio Susquehanna, la instalación nuclear Three Mile Island, TMI para abreviar, es una central nuclear de Estados Unidos que entró en operaciones en 1974. Consta de dos reactores de agua a presión y dos generadores de vapor PWR (pressurized water reactor), con potencias instaladas de 786 MW (reactor TMI-1) y 900 MW (TMI-2).

El 28 de marzo de 1979 se suscitó el accidente nuclear más grave de la historia hasta ese momento, en el TMI-2 una avería en el indeterminada provocó un fallo en el circuito secundario del reactor provocando una falla irremediable que provocó el accidente a las 4:00 AM. Las bombas primarias de alimentación dejaron de funcionar, lo que provocó que no se pudiera realizar la retirada de calor excedente del sistema de generadores de vapor, lo que conllevo a que se apagaran tanto la turbina cómo el generador.

Cuando las bombas de agua secundarias se prendieron, tres bombas auxiliares entraron en acción, sin embargo, ya que las válvulas estaban cerradas dado un mantenimiento de rutina, no bombearon agua. Esto se considera una grave violación a lo establecido por la Comisión de Regulación Nuclear (NRC), que marca cómo regla el apagar el reactor durante los mantenimientos de la bomba, lo que a la postre se convirtió en un fallo clave del incidente. Esto provocó qué la presión y la temperatura del circuito primario, es decir, en la sección nuclear, se dispararán rápidamente sin la posibilidad de enfriarlo.

Para evitar que esa presión llegase a ser excesiva, la válvula de descarga de presión (situada en la tapa del presurizador) se abrió y una vez regulada la presión debía cerrarse, sin embargo, esto no sucedió debido a un fallo que impidió que el operador corroborara que estaba cerrada, por lo que la válvula continuó liberando presión. A la par, otro fallo de válvulas en el sistema de agua de emergencia impidió que este funcionara y es que dado una prueba 42 horas antes del accidente, se dejó cerrada, imposibilitando su uso. Tardaron 8

minutos en darse cuenta de ello y abrirla, otro punto clave del fallo final.

Una vez que se pone en marcha el sistema de agua el agua fría fluye hacia los generadores de vapor, pero, dado a qué la presión continúa disminuyendo se formaron huecos donde se formaron burbujas de vapor en varias partes del circuito, lo que desencadenó que el agua fuese redistribuida e inundó el presurizador. El problema se agravó cuando los indicadores del líquido refrigerante marcaban cómo lleno el sistema, cuando esto era incorrecto, cerrando así el paso del agua, esto provocó que el agua dejara de circular lo que propicio qué se evaporara y las tuberías empezaran a vibrar por cavitación.

Al cabo de 2 horas desde el primer fallo, la parte superior del reactor quedó al descubierto y debido a la elevada temperatura, el vapor reaccionó con el revestimiento de zirconio de las barras de combustible, produciendo dióxido de zirconio e hidrógeno. El daño en el revestimiento produjo la liberación de las pastillas de combustible en el líquido refrigerante y la formación de más hidrógeno, que provocó una pequeña explosión en el edificio de contención al ser liberado. Y tras 165 minutos, finalmente se activaron las alarmas de radiación cuando el agua contaminada alcanzó los detectores.

En ese momento los niveles de radiación en el líquido refrigerante (agua) del primario era unas 300 veces mayor que los niveles esperados, y la central había sufrido ya una fuerte contaminación. Tras mediciones manuales de los termopares se decide inyectar agua nueva al circuito primario y abrir la válvula para reducir la presión y finalmente, hasta las 16:00 horas se reactivaron las bombas del circuito primario lo que disminuyó paulatinamente la temperatura del reactor, sin embargo, gran parte del núcleo ya se había vaporizado o derretido, lo que volvió al sistema altamente radioactivo. Durante la siguiente semana el vapor y el hidrógeno fueron evacuados del reactor pasando por el recombinador para posteriormente ser liberados a la atmósfera [61,62].

3.2.1. Consecuencias de TMI

De acuerdo con la agencia de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos se calcula qué

había alrededor de 2 millones de personas en un radio cercano al TMI-2 durante el incidente, lo que los expuso a una dosis aproximada de 0.01 mSv por encima de las dosis habituales, algo mucho menor que la radiación a la que se está expuesto durante una radiografía qué es de 0.06 mSv. Sin embargo, los trabajadores sé expusieron a dosis mucho más altas. Ambientalmente no se recibieron datos de contaminación por radionucleidos en muestras de agua, aire y vegetación en los meses siguientes al incidente.

Limpiar el reactor después del accidente necesitó de un proyecto difícil que duró 14 años. Comenzó en agosto de 1979 y no terminó oficialmente hasta diciembre de 1993, con un coste total de cerca de 975 millones de dólares. Entre 1985 y 1990 se eliminaron del sitio casi 100 toneladas de combustible radiactivo. Se reinició el reactor TMI-1 en 1985.

El ámbito donde más repercusiones se tuvo es en aspecto de la seguridad, instrumentación y educación para el manejo de centrales nucleares, puesto que este incidente se cataloga cómo un escala 5 de acuerdo con la INES, sin embargo, los estudios demostraron que el incidente fue agravado por errores de los operarios de la central. Los aprendizajes obtenidos tras esto fueron estudiados y finalmente se determinaron las siguientes medidas para la prevención de estos incidentes siendo [60]:

- Actualización y fortalecimiento de los requisitos de diseño y equipamiento de la planta. Esto incluye protección contra incendios, sistemas de tuberías, sistemas auxiliares de agua de alimentación, aislamiento de edificios de contención, confiabilidad de componentes individuales (válvulas de alivio de presión e interruptores automáticos) y la capacidad de las plantas para apagarse automáticamente.
- Identificar el papel crítico del desempeño humano en la seguridad de la planta llevó a renovar la capacitación de los operadores y los requisitos de personal, seguido de una instrumentación y controles mejorados para operar la planta.
- Mejorar la preparación para emergencias, incluidos los requisitos para que las plantas notifiquen de inmediato al NRC sobre eventos significativos y un Centro de

Operaciones del NRC con personal las 24 horas del día.

- Integrar las observaciones, hallazgos y conclusiones de la NRC sobre el desempeño de los licenciatarios y la efectividad de la gestión en un informe público periódico.
- Hacer que los gerentes senior de la NRC analicen regularmente el rendimiento de la planta para aquellas plantas que necesitan una atención regulatoria adicional significativa.
- Ampliar las inspecciones orientadas al rendimiento y a la seguridad, y el uso de la evaluación de riesgos para identificar las vulnerabilidades de cualquier planta a accidentes graves.
- Fortalecimiento y reorganización del personal de cumplimiento en una oficina separada dentro de la NRC;
- Establecimiento del Instituto de Operaciones de Energía Nuclear, el propio grupo de "vigilancia" de la industria, y formación de lo que ahora es el Instituto de Energía Nuclear para proporcionar un enfoque unificado de la industria a los problemas regulatorios nucleares genéricos, e interacción con la NRC y otras agencias gubernamentales.
- Instalación de equipos adicionales por parte de los licenciatarios para mitigar las condiciones de accidentes y monitorear los niveles de radiación y el estado de la planta.
- Expandir las actividades internacionales de la NRC para compartir un mayor conocimiento de la seguridad nuclear con otros países en una serie de áreas técnicas importantes.

3.2. Chernóbil

La planta de energía nuclear “Vladimir Ilich Lenin”, ubicada a 18 km de la ciudad de Chernóbil, actual Ucrania, fue la central de nucleoelectricidad más potente de su tiempo, con 4 reactores de fisión modelo RBMK-1000, modelo soviético y con planes de construcción de otros 2 en marcha. Cada uno de ellos con la capacidad de producir hasta 3200 MW y siendo la tercer central de este tipo en todo el territorio de la extinta Unión Soviética. Empezando

su primer etapa de construcción en 1972, y entrando en operaciones para 1977 con el primer reactor, el segundo en 1978, el tercero en 1981 y finalmente el cuarto en 1983.

Para el 26 de abril de 1986, se suscitó el peor accidente nuclear de la historia, clasificado en nivel 7 por INES, cuando a las 4:00 de la mañana se desató una explosión en el reactor número 4 durante una prueba de seguridad, que desencadenaría toda una cascada de desafíos nunca vistos. Iniciando cómo un ejercicio para aumentar la seguridad de la central nuclear, se programó un experimento de simulación en donde se perdía le suministro eléctrico de la planta, esto con el fin de evaluar que tanto tiempo continuaría activa la turbina después de la perdida de energía en el reactor y también se desactivaron medidas de seguridad para esta realización.

El primer problema fue el retraso del experimento, puesto que estaba programado para realizarse durante el transcurso del 25 de abril, sin embargo, por problemas con la planta de electricidad que alimentaba a la central nuclear, se tuvo que retrasar hasta la madrugada del día siguiente, donde los operarios del turno nocturno no tenían la preparación adecuada para poder llevar a cabo este experimento, y aun así se procedió a continuar.

Con la interrupción de la corriente eléctrica se pretendía que el reactor bajara su potencia hasta los 700 MW, sin embargo, de manera natural se produjo gas xenón, gas absorbente de neutrones, lo que provocó que la potencia del reactor siguiera bajando sin que el operador hiciese nada, esto debido al fenómeno conocido como “envenenamiento por xenón”. Por error humano, se insertaron las barras de control en el reactor, que ya por los 500 MW descendió demasiado rápido, lo cual suponía un problema, llegando hasta los 30 MW.

Ante esto se decidió retirar manualmente las barras de control para qué el reactor estabilizara su potencia, pero dado el descenso drástico que se presentó, se debieron retirar demasiadas barras, lo que sumado al envenenamiento por xenón se combinó con la inestabilidad de la temperatura del reactor y el flujo refrigerante, pero las alamas termo hidráulicas fueron ignoradas con el propósito de elevar la potencia del reactor.

Una vez que se regula la potencia en 200 MW se continua con la preparación del experimento para lo cual se activaron bombas de agua adicionales, aumentando el caudal de agua. El incremento de la tasa de flujo de refrigerante a través del reactor produjo un aumento de la temperatura del refrigerante en la entrada del núcleo del reactor que se aproximó más a la temperatura de ebullición del agua, reduciendo el margen de seguridad.

De esta forma, paradójicamente, redujo nuevamente la temperatura general del reactor, y redujo los huecos de vapor existentes en el núcleo y los separadores de vapor. Dado que el agua puede absorber débilmente los neutrones y la mayor densidad del agua líquida la convierte en un mejor absorbente que el vapor, encender las bombas adicionales disminuyó aún más la potencia del reactor. Se apagaron 2 bombas de circulación y se retiraron todavía más barras de control para mediar la potencia que se necesitaba.

Esto generó una inestabilidad en el reactor demasiado grande, puesto que, de las 211 barras de control, sólo quedaron 8 insertadas siendo que el mínimo para el control del núcleo eran 30 y sumado a esto, se desactivó el inicio automático del sistema de apagado de emergencia del reactor, el botón AZ-5, quedando en un uso manual. Todo esto constituyendo graves violaciones a las normas nucleares de la URSS.

Al momento de iniciar con el experimento, las condiciones de seguridad eran altamente cuestionables y para el desarrollo de este, al reducir el caudal de agua entrante aumentó los huecos de vapor dentro del núcleo y disminuyó la absorción de neutrones, lo que hizo que el reactor entrara en un proceso de retroalimentación positiva, aumentando la potencia, por ende, la temperatura y provocando la ebullición de más agua.

Durante casi todo el experimento, el sistema de control automático contrarrestó con éxito esta retroalimentación positiva, insertando continuamente barras de control en el núcleo para limitar el aumento de potencia. Sin embargo, este sistema tenía el control de solo 12 barras, y casi todas las demás habían sido retraídas manualmente. Con los sistemas de emergencia desconectados, el reactor experimentó una subida de potencia tan extremadamente rápida que los operadores no lograron detectarla a tiempo.

Ante este aumento repentino, la computadora SKALA inició el apagado de emergencia (SCRAM), el botón AZ-5, este activaba el mecanismo de accionamiento en todas las barras de control para insertarlas en el núcleo por completo, incluyendo las barras de control manuales que habían sido retiradas imprudentemente antes. Un problema mayor era que estas tenían una punta de grafito, lo que inicialmente desplazaba el refrigerante absorbente de neutrones antes de introducir el material de boro absorbente de neutrones para frenar la reacción. Como resultado, el SCRAM aumentó la velocidad de reacción en la mitad superior del núcleo. Al entrar el grafito en contacto con el núcleo, se produjo un pico masivo de energía y el núcleo se sobrecalentó, causando que algunas de las barras se resquebrajaran cuando estas se habían insertado unos 2,5 m. Esto fungió como detonante y acelerante de las reacciones de fisión, elevando de manera abrupta la potencia, siendo la lectura final tomada en la sala de control de 33,000 MW, 10 veces la potencia de operación para la que fue diseñado el reactor.

Es aquí donde se desencadena la primera del incidente, causada por una nube de hidrogeno que se formó dentro del núcleo, volando la tapa de 2000 toneladas del reactor y provocando los primeros incendios de la planta a la que los bomberos rápidamente acudieron a sofocar, evitando una potencial segunda explosión puesto que el fuego se extendía peligrosamente hacia el reactor número 3. Pero ahora sin contención, el reactor expulsaba productos de fisión hacia la atmosfera, empezando la contaminación radiológica.

Ante esto, se les dio a los trabajadores máscaras de gas y tabletas de yoduro de potasio para combatir la contaminación que dejó la explosión, para continuar las operaciones en la planta, siendo así que para las 5:00 AM el reactor 3 fue apagado por seguridad y hasta el 27 de abril se apagaron los reactores 1 y 2, poniéndolos en refrigeración de emergencia.

Las consecuencias ambientales y a la salud no tardarían en presentarse pues los niveles de radiación en las zonas más afectadas del edificio del reactor se estimaron en 5,6 röntgens por segundo, lo que equivale a más de 20 000 röntgens por hora. Una dosis letal es de alrededor de 100 röntgens por hora, por lo que en algunas zonas los trabajadores que no

tenían protección adecuada recibieron dosis mortales en menos de un minuto. Siendo así que la mayoría de los trabajadores que permanecieron operando el reactor 4, bombeando agua para tratar de regular la temperatura morirán a causa de esto en menos de 3 semanas.

En el núcleo, expuesto a la atmósfera, el grafito ardía al rojo vivo, mientras que el combustible y otros metales se habían convertido en una masa líquida incandescente. La temperatura alcanzaba los 2500 °C, e impulsaba el humo radiactivo en un efecto chimenea a una altura considerable. Siendo este el comienzo de titánicas labores de contención para lidiar con el núcleo expuesto, que derritió el material del reactor volviéndose una masa incandescente y altamente radioactiva.

Para lidiar con el problema, el ejército soviético arrojo al reactor costales de boro, arena, plomo, arcilla y dolomita, esto tenía la finalidad de detener la actividad radiológica por medio de la absorción de neutrones, tarea que realizaría el boro, mientras que el plomo evitaría el paso de rayos gamma. la dolomita serviría como una fuente de dióxido de carbono que ahogaría al fuego, y la arena y la arcilla mantendrían la mezcla unida y homogénea, impidiendo la liberación de partículas, siendo así que se verterían 5000 toneladas de materiales. Esto no dio ningún resultado, puesto que sólo que creó un tapón que evitaba que el fuego fuese visible pero no lo extinguió y dado al peso de los materiales fundidos, la masa que se formó empezaba a descender hacia los mantos acuíferos debajo de la planta, lo que habría detonado una explosión nuclear. Para este nuevo reto se cavó un túnel desde el reactor 3 hacia el destruido reactor 4 para instalar un sistema de refrigeración que finalmente nunca se hizo y el lugar sólo fue llenado con hormigón.

Tras esto se decidió finalmente crear una estructura que contuviera a todo el reactor, fabricado en hormigón y acero que serviría para contener toda la radiación que continúa emanando del interior de reactor destruido. Las obras duraron un total de 206 días, empezando en mayo de 1986, hasta que en noviembre fue finalizado. Sin embargo, dado a la naturaleza del material contenido, se sabía que esta estructura era una medida parcial únicamente, puesto que sólo duraría 30 años antes de sucumbir a las inclemencias climatológicas y a la misma radiación que contenía. Por esta razón se construyó un segundo

sarcófago que fue instalado en 2016 por sobre el primero, fabricado para tener una vida media de l00 años antes de volver a tener que ser reemplazado [65-68].

3.3.1. Consecuencias de Chernóbil

Las consecuencias finales son increíblemente devastadoras para la zona aledaña a la central nuclear, pues lo volvió un páramo donde es imposible vivir sin tener problemas de contaminación por actividad radioactiva. La explosión provocó la muerte de 31 personas en el momento del accidente, alrededor de 135.000 personas tuvieron que ser evacuadas de los 155.000 km² afectados, permaneciendo extensas áreas deshabitadas durante muchos años al realizarse la reubicación posteriormente de otras 215.000 personas.

En materia de contaminación por gases y material en la atmósfera no se extendió uniformemente por las regiones adyacentes, sino que se repartió irregularmente en forma de bolsas radiactivas (como pétalos de una flor), dependiendo de las condiciones meteorológicas. Informes de científicos soviéticos y occidentales indican que Bielorrusia recibió alrededor del 60% de la contaminación que cayó en la antigua Unión Soviética.

Antes del accidente el reactor contenía unas 190 toneladas de combustible nuclear y se estima que más de la mitad del yodo y un tercio del cesio radiactivos contenidos en el reactor fue expulsado a la atmósfera; en total, alrededor del 3,5 % del combustible escapó al medio ambiente. Debido al intenso calor provocado por el incendio, los isótopos radiactivos liberados, procedentes de combustible nuclear, se elevaron en la atmósfera dispersándose en ellas. Esto provocó afectaciones serias a la salud de los que estuvieron expuestos de los niveles de radiación elevados.

El ecosistema también sufrió las consecuencias, siendo qué en un radio de 4 km cuadrados de pinos en las cercanías del reactor adquirieron un color marrón dorado y murieron, adquiriendo el nombre de «Bosque Rojo». En un radio de unos 20 o 30 kilómetros alrededor del reactor se produjo un aumento de la mortalidad de plantas y animales, así como pérdidas en su capacidad reproductiva y mutaciones causa de la radiación.

Este accidente ha quedado registrado cómo el de peores consecuencias ambientales y humanas de la historia, sin embargo, esto debe ser atribuido a errores humanos y no a problemas con el entendimiento y aprovechamiento de los procesos de fisión. De manera precisa se tiene que hablar de 2 puntos claves de esta catástrofe:

- El primero es la negligencia humana, puesto que cómo se vio, las decisiones en contra del reglamento de seguridad nuclear comprometieron el trabajo del reactor, que desencadenó la explosión. Además de la poca instrucción del personal designado para la realización del experimento previo al accidente, provocando la catástrofe.
- El segundo punto es el problema de diseño del reactor puesto que los modelos soviéticos no compartían los mismos estándares y especificaciones que los modelos occidentales. El RMBK fue la culminación del programa soviético para fabricar reactores refrigerados por agua, basados en sus reactores de producción de plutonio moderado por grafito. Al ser moderado por grafito, este podría fungir cómo un detonante bajo ciertas condiciones, suceso que ocurrió y provocó el accidente.

3.4. Fukushima Daichi

El último accidente de consideración en el ámbito del uso civil de procesos nucleares sucede em la central nuclear de Fukushima, una planta nuclear con un conjunto de seis reactores de agua en ebullición, situada en la villa de Ōkuma en el distrito Futaba de la prefectura de Fukushima, en Japón. Entro en operaciones en 1971 con la apertura de su primer reactor de agua en ebullición, siendo en 1979 cuando se pondría en marcha su último reactor. Mismos que trabajaron sin incidentes de consideración hasta los sucesos de 2011.

El 11 de marzo del 2011, un terremoto de magnitud 9.0 en escala de Richter sacudió el archipiélago de japonés y posteriormente propició tsunamis en las costas del país lo que pasó a afectar a la central nuclear. Una vez que es detectado el terremoto, el sistema de apagado automático se acciona, deteniendo los procesos de fisión de todos los reactores. Debido a las descargas del reactor y otros problemas de la red, el suministro de electricidad falló y los generadores diésel de emergencia de los reactores comenzaron automáticamente a funcionar. Críticamente, estaban alimentando las bombas que hacían circular refrigerante a

través de los núcleos de los reactores para eliminar el calor residual, que continúa a manar incluso después de que la fisión ha cesado.

Hasta este momento no hubo ninguna clase de problema, puesto que la central reaccionó de acuerdo con el diseño, el problema vino cuando 47 minutos después el tsunami impactó a la central nuclear. La barrera de contención de aproximadamente 6 metros de altura no pudo hacer frente a los más de 10 metros de oleaje que impactaron finalmente. Esto provocó inundaciones los terrenos inferiores de la planta alrededor de los edificios del reactor de las Unidades 1 a 4 con agua de mar, que llenó los sótanos y destruyó los generadores de emergencia. La pérdida accidental de refrigerante resultante condujo a tres fusiones de núcleo, tres explosiones de hidrógeno y la liberación de contaminación radiactiva en las Unidades 1, 2 y 3 entre el 12 y el 15 de marzo.

Ninguna de esas explosiones se produjo en los reactores por lo que no hubo ninguna explosión nuclear, cosa que además no puede suceder debido al bajo nivel de enriquecimiento del combustible Sin embargo, aunque no explotaron los reactores, sí se produjo una liberación de material radioactivo bastante considerable, llevando a que en los días posteriores al accidente, la radiación emitida a la atmósfera obligó al gobierno a declarar una zona de evacuación cada vez más grande alrededor de la planta, que culminó en una zona de evacuación con un radio de 20 kilómetros.

Sí bien, el accidente de esta central nuclear no es tan aparatoso en violencia cómo lo pudo ser Chernóbil, se suma a este mismo cómo un incidente de nivel 7 de acuerdo con INES, puesto que la liberación de material radiológico a la atmosfera y océano conteniendo radioisótopos [69,70].

3.4.1. Consecuencias de Fukushima Daichi

A este accidente no se le atribuyen consecuencias humanas directas, puesto que no se reportaron muertes asociadas a la liberación de radiación ni afectaciones a la población civil, sin embargo, las secuelas radiológicas al medio ambiente fueron demasiados notorias.

La actividad medida de los radioisótopos se reduce con el paso del tiempo debido a los procesos de desintegración física y transporte medioambiental, así como a las actividades de limpieza. Además de los radioisótopos que entraron en el océano por deposición atmosférica, hubo emisiones líquidas y descargas desde la central nuclear de Fukushima Daichi directamente al mar frente al emplazamiento. Algunos radioisótopos emitidos, como el Cesio 134 y el Cesio 137, fueron encontrados en el agua potable, en alimentos y en algunos productos no comestibles. Además de tener periodos de semidesintegración de 2.06 años y 30.17 años, respectivamente por lo que pueden permanecer en atmosfera durante más tiempo.

El mayor de los impactos se produjo en los océanos, puesto que consecuencia de la explosión e inundación de la central nuclear se contaminó el agua de mar que posteriormente regresó al océano conteniendo los radioisótopos. También se produjo una descarga directa menor de agua contaminada durante los esfuerzos de enfriamiento de emergencia. La principal fuente fue agua contaminada procedente de una zanja de la central nuclear.

Se produjeron también emisiones deliberadas en esas abril de 2011 de alrededor de 10 400 m^3 de agua con poca contaminación. Su propósito fue liberar espacio para almacenar agua con más contaminación y permitir condiciones de trabajo más seguras. El agua del mar acumulada para enfriar los reactores se empezó a tratar con el objetivo de bajar los niveles de contaminación radiactiva y así devolverla al mar o para volver a enfriar de nuevo los reactores con el agua tratada.

Las aguas utilizadas para el enfriamiento de los reactores han sido tratadas de entonces, sirviendo cómo refrigerante reutilizable, pero, en agosto de 2023, tras años de tratamiento, los niveles de la radiación se volvieron lo suficientemente bajos cómo para verter estas aguas al océano, de modo que 1.3 millones de toneladas de agua tratada fue devuelta al Pacífico incluso ante la negativa de muchas personas. Sin embargo, esta medida fue aprobada por el organismo de control nuclear de la ONU, quienes verificaron que esto sea correcto y dando luz verde a esta práctica, marcando así la descontaminación de la central nuclear [71,72].

Capítulo 4

Presencia de la energía nuclear en la sociedad moderna nacional e internacional

A lo largo de los 3 capítulos previos se ha planteado el panorama teórico necesario para poder comprender de manera científica las implicaciones que trae consigo el uso civil de las reacciones nucleares. Con esto mismo se puede ahondar en el punto 5 de nuestro modelo, la discusión pública del tema, para esto se realizará el análisis de la discusión e información que se presenta hoy día en los medios de información, es decir, las noticia a nivel internacional con respecto a avances en investigación nuclear, con ello se presenta un marco de referencia para analizar con respecto al caso de México.

Posteriormente en él capítulo5, se presentarán los resultados de las encuestas realizadas a estudiantes de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP, en concreto a la población de estudiantes de la licenciatura de física y física aplicada, del mismo modo, se estudiarán las estadísticas obtenidas respecto a la aceptación, apreciación y postura nuclear de una muestra de población mexicana no especializada en física. Esto permitirá sentar las conclusiones del panorama de la cultura nuclear en México y cómo es que se puede atacar de manera de impulsar una postura pro nuclear en población ajena a la ciencia.

4.1. Avances nucleares: Investigación en energía

Desde que se determinó el uso civil de las reacciones nucleares para la producción de energía eléctrica, los avances e innovaciones en su investigación han sido claves para llegar al punto en el que la física nuclear y en concreto, la nucleoelectricidad se encuentran hoy día.

De manera contemporánea, se han mitigado los problemas relacionados al uso de centrales nucleares, sin embargo, los esfuerzos no se quedan allí puesto que los países que se consideran nuclearmente activos continúan la ardua investigación en la búsqueda la faena nuclear, lograr los procesos de fusión. Cómo se ha aprendido, la fusión es un proceso nuclear que convierte dos átomos en uno sólo, logrando por el camino liberación de calor, mismo proceso que ocurre en el interior de las estrellas pero que, sin embargo, no ha sido posible

recrear de manera constante y efectiva en la Tierra dadas las condiciones necesarias para que esto ocurra.

Hoy en día, países como Estados Unidos, China, Corea del Sur, Reino Unido entre otros más, impulsan proyectos de investigación y designan recursos económicos en la construcción de experimentos de fusión que han tenido grandes avances en este campo, acercándonos cada vez más al pináculo de los procesos nucleares. Tal es el caso del denominado "Sol artificial chino" un proyecto de investigación que inició en 2020 cómo una apuesta importante en la búsqueda de la fusión perfecta [72].

El dispositivo llamado HL-2M Tokamak, ubicado en Chengdu, capital de la provincia de Sichuan, es un reactor de fusión tipo tokamak que produce cantidades enormes de calor, de más de 150 millones de grados Celsius, temperaturas necesarias para sostener procesos de fusión y 10 veces superiores a la emitida en el núcleo del sol.

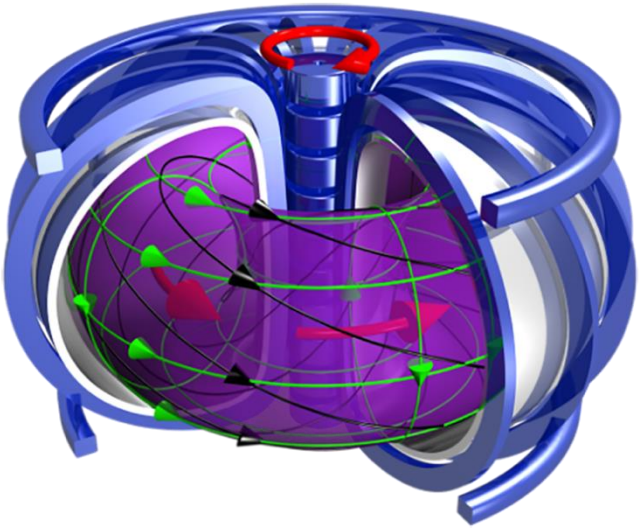


Ilustración 6. *Funcionamiento de un Tokamak de fusión El campo eléctrico inducido por un transformador conduce una corriente (flechas rojas y grandes) a través de la columna de plasma, lo que genera un campo magnético poloidal que tuerce la corriente de plasma formando un círculo (círculo vertical verde). Con ello se evitan fugas y al hacerlo en una vasija en forma de dónut se crea un vacío. El otro campo magnético que recorre longitudinalmente el dónut recibe el nombre de toroidal (círculo horizontal verde).*

La combinación de estos dos campos crea una curva tridimensional, como una hélice (representada en negro), en la que el plasma se encuentra muy confinado. -Instituto Max Planck de Física del Plasma, Alemania

Dentro del dispositivo se realizan operaciones de alto confinamiento de plasma, es decir, la contención del material plasmático de las fusiones nucleares para sostener las reacciones por un periodo considerable de vida, reteniéndolos en campos electromagnéticos para estabilizar los procesos. En 2023, el HL-2M logró el récord al sostener una reacción de 403 segundos, logrando un avance impresionante en el principal desafío de la fusión, el sostener las interacciones estables durante periodos considerables de tiempo [73,76,77].

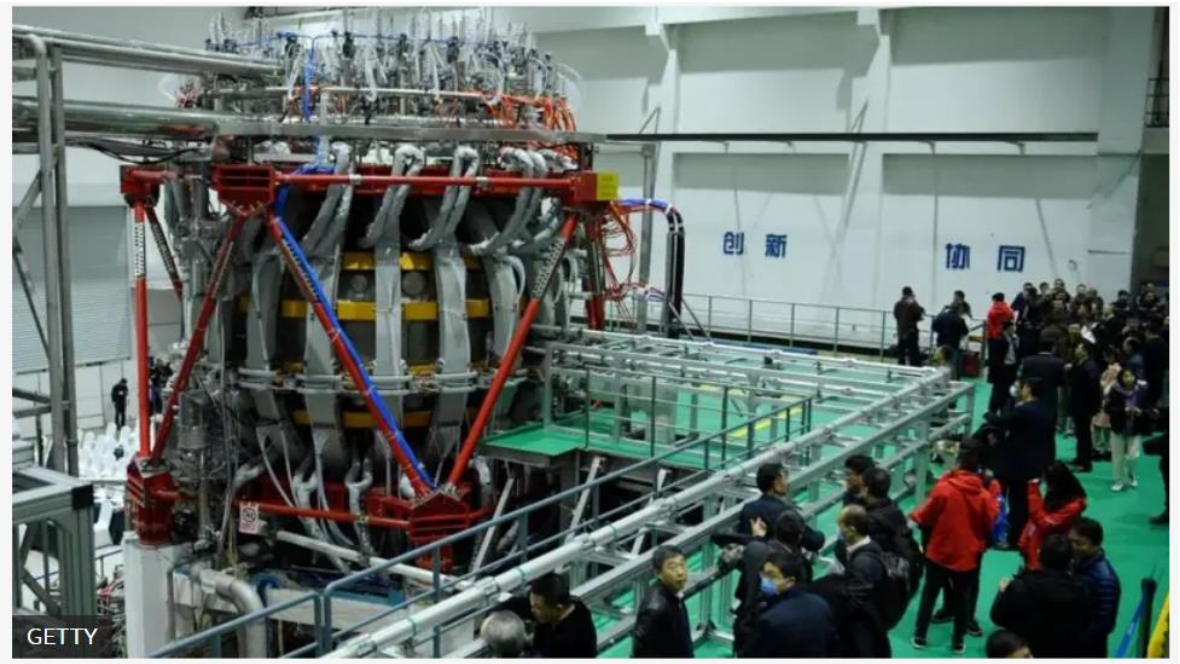


***Ilustración 7**. HL-2M Tokamak -BBC World*

Otro proyecto similar al “sol chino” es el proyecto de fusión de Japón, el **JT-60SA,** un experimento de investigación nuclear conjunto de la Unión Europea y Japón, ubicado en Naka, diseñado para la investigación de los reactores de fusión tokamak y complementario a los experimentos de investigación europeos [77].

Este fue un esfuerzo de 7 años para actualizar el JET, añadiendo bobinas toroides superconductoras para sostener las reacciones plasmáticas en su interior. Diseñado para experimentar con diferentes configuraciones de campos de contención es capaz de sostener reacciones de 100 segundos antes de entrar en estado de enfriamiento, con ello se pretende analizar la estabilidad de las reacciones con las diferentes adaptaciones de campo.

Logró su primer plasma en octubre de 2023 y después de las inversiones realizadas, se convirtió en el reactor tokamak operacional más grande del mundo, su operación se basa en la fusión de hidrogeno ligero y posteriormente se usará deuterio cómo combustible, sin embargo, se estima que pueda sostener reacciones inducidas con tritio, aunque que por menor tiempo. Además de estar preparado para sostener las condiciones de altas temperaturas, al grado de poder "moldear" el plasma, al lograr elongarlo a lo largo del toroide. Sumado a esto, es capaz de seguir los regímenes de plasma de alta densidad, a través del modo de alto confinamiento, contribuyendo así a complementar las investigaciones del proyecto ITER europeo [78, 79].

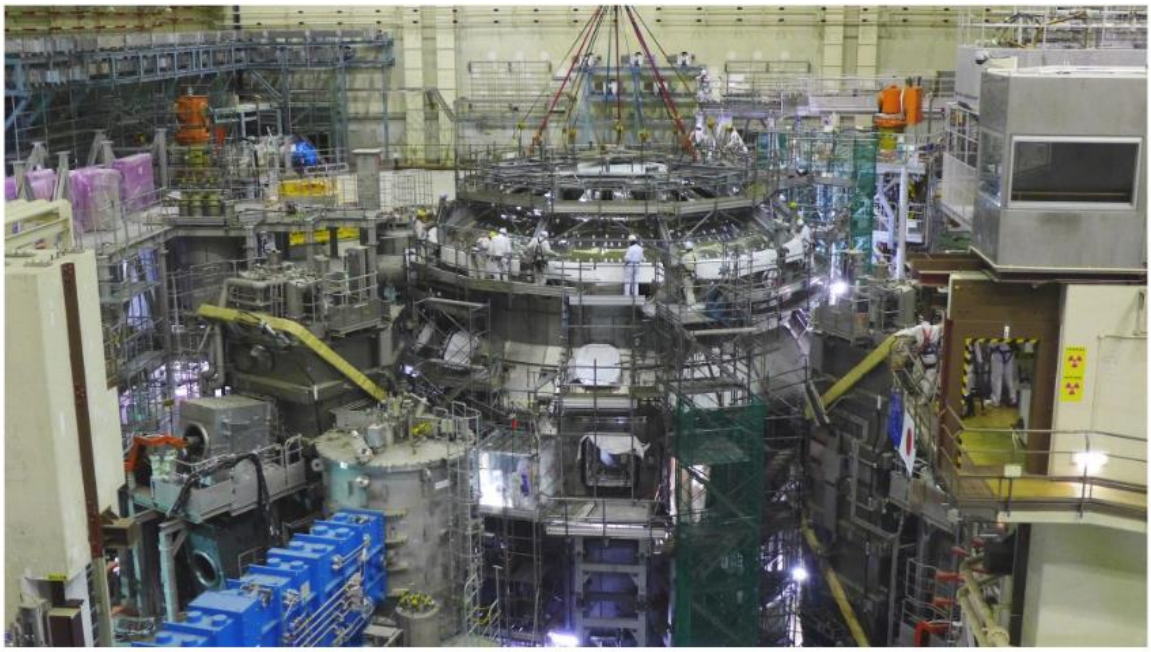


Ilustración 8. *Ensamblaje completo del JT-60SA. -jt60sa.org*

Otro líder en las investigaciones de confinamiento plasmático es el **KStar**, también conocido como el "sol artificial coreano", es un dispositivo de fusión magnética en el Instituto de Energía de Fusión de Corea en Daejeon. Destinado a ser soporte del ITER, este experimento coreano tiene los mismos principios del modelo japones, mantener reacciones de fusión de 100 millones de grados Celsius a través de diferentes configuraciones de sus campos magnéticos. Aunque las configuraciones actuales únicamente permiten operaciones durante 30 a 50 segundos, se espera que para 2026 se actualicen los tokamaks para sostener las interacciones por al menos 300 segundos antes de apagarse [81].

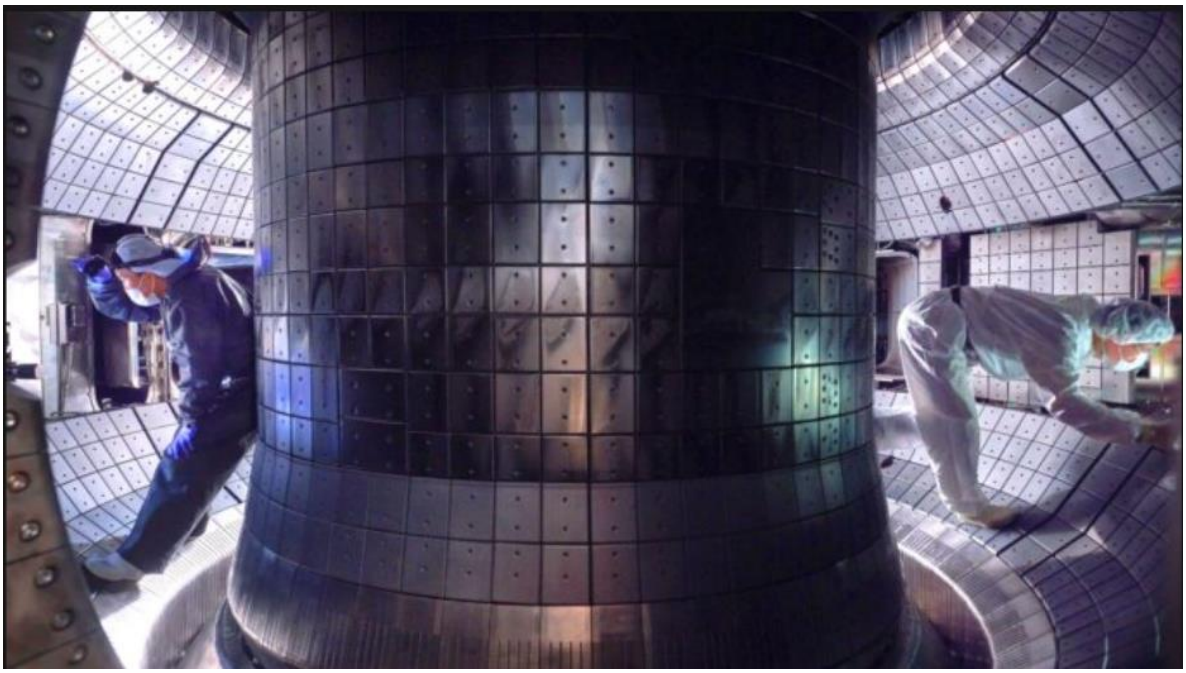


Ilustración 9. *Trabajadores dentro del recipiente de vacío del tokamak KSTAR. Foto: Korea Institute of Fusion Energy (KFE)*

El trabajo de KSTAR "será de gran ayuda para asegurar el rendimiento previsto en la operación del ITER a tiempo y para avanzar en la comercialización de la energía de fusión", dijo Si-Woo Yoon, director de operaciones del Centro de Investigaciones del KStar.

Ya mencionado, el IITER, ***I****nternational* ***T****hermonuclear* ***E****xperimental* ***R****eactor*, es el proyecto más ambicioso en la búsqueda de la fusión nuclear continua y sostenible, este proyecto nació en la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, en el año de 1986, cómo un trabajo mundial conjunto en la búsqueda de energía limpia. Actualmente se está preparando las instalaciones en Cadarache, Francia, con la participación de 35 naciones, la mayoría potencias nucleares tal cómo Estados Unidos, Reino Unido, Francia, Japón, Rusia, entre otros.

Este dispositivo tipo tokamak tiene por objetivo ser capaz de sostener plasmas ardientes de fusión de deuterio-tritio por un periodo prolongado mayor a los registrados por otros tokamaks del mundo, segundo, busca producir 500 MW de poder de la fusión del plasma, es decir, busca probar que se puede producir mayor energía que la suministrada para que estos experimentos requieren. Así mismo, busca calificar los sistemas de fusión para su

implementación en plantas nucleares operadas bajo estas condiciones y mostrar la seguridad que presenta este tipo de interacciones nucleares para su uso de manera civil y comercial.

Se estima que los primeros plasmas de este magno proyecto se presenten en 2025, fecha marcada para el inicio de experimentación con las primeras pruebas de contención magnética, mientras que la primera fusión se lograría en el año 2035, esto de acuerdo con los datos proporcionados por la dirección del ITER, KStar y JT-60SA [82,86,87].

Otro hecho histórico y destacable en la investigación del tema de fusión es aquel que se logró en el National Laboratory Lawrence Livermore, al ser el primer laboratorio en conseguir una ignición de fusión el 5 de diciembre de 2022, culminando los esfuerzos de 60 años de investigación. El experimento, realizado en la madrugada de ese día en el National Ignition Facility, constó en disparar 2.05 mega Joules de energía ultravioleta hacia un cilindro del tamaño de un borrador de lápiz que sostiene una pequeña cápsula de combustible de hidrógeno [84].

El resultado de este experimento fue que las alarmas de radiación instaladas para detectar la reacción empezaron a sonar, esto tras qué la cámara de contención registrara 1.12 x10^18 de neutrones de alta energía, lo equivalente a 3.15 mega Joules de energía, producido por una reacción termonuclear explosiva y autosostenida. Los monitores comenzaron a mostrar el rendimiento de neutrones sin precedentes capturado por una serie de instrumentos de diagnóstico [85].

Este precedente comienza con la era de las reacciones de fusión controladas por laboratorios y culmina 12 años de experimentación en la ignición de una reacción de fusión exitosa, esto quiere decir, obtener una reacción de ganancia energética y autosostenida, logrado apenas con el segundo experimento donde se suministraron más de 2.0 mega Joules de energía, abriendo el camino para futuras investigaciones respecto al control y obtención de reacciones seguras.

Estos esfuerzos, conjunto con investigaciones de instituciones universitarias cómo el

MIT en Estados Unidos, quienes a través de 6 estudios publicados en el primer trimestre del 2024 han avalado la viabilidad de las reacciones de fusión nuclear a largo plazo, esto se logró gracias a los avances de su imán superconductor, el proyecto SPARC donde se logró sostener una fusión neta, es decir, hacer que el reactor gaste menos energía que la que necesitan para funcionar. Los responsables de su desarrollo son los investigadores del **Centro de Ciencia del Plasma y Fusión del MIT** (PSFC) que trabajan en colaboración con **Commonwealth Fusion Systems** (CFS). Esta empresa norteamericana es una escisión del propio MIT y cuenta entre sus inversores con figuras tan influyentes como Bill Gates y Jeff Bezos [86,93].

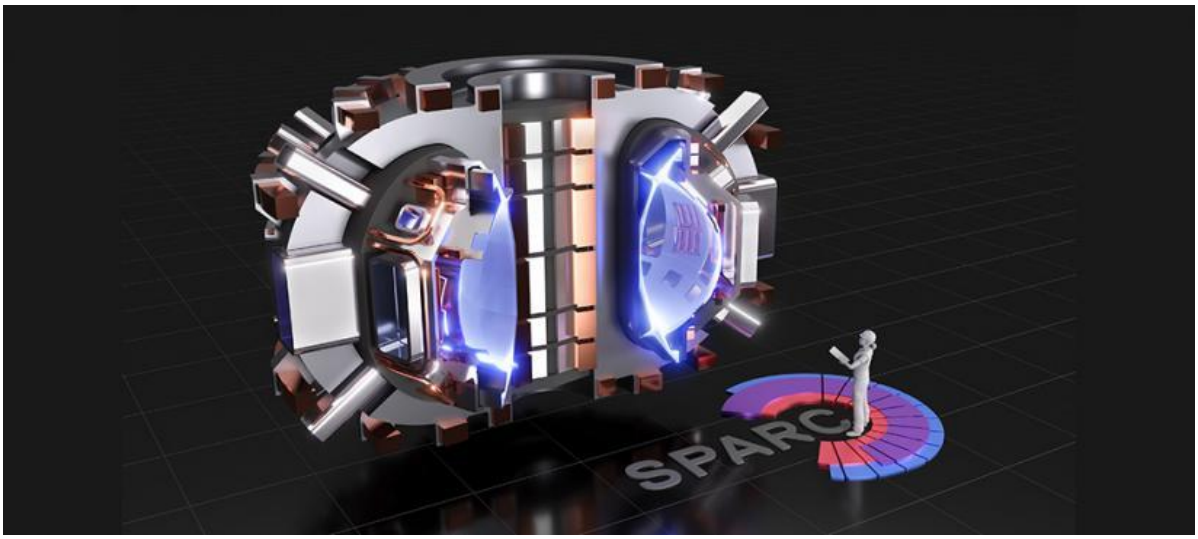


Ilustración 10. *Render del proyecto SPARC, dispositivo de contención de campos altos tipo tokamak. T. Henderson, CFS/MIT-PSFC*

Toda esta investigación demarca pasos agigantados en la rama nuclear a lo largo de todo del mundo y sólo hablando de lo relacionado a la generación de energía, dejando de lado todos los estudios e investigaciones desarrollados para otros campos de aplicación cómo medicina, industria, espacio y defensa.

4.1.1. Investigación nuclear en México

Por su lado, México ha orientado su investigación nuclear hacia ámbitos alejados de la investigación de fusión y del mismo modo, no se contempla el uso de más plantas de nucleoelectricidad a parte de la ya presente en Laguna Verde. Sin embargo, tiene

departamentos de universidades e instituciones dedicadas a investigación de radiofármacos, radiología, instrucción y capacitación de seguridad y protección radiológica.

El ININ, Instituto Nacional de Investigación Nuclear, es el máximo referente de la investigación del campo en México, contando con expertos en Seguridad Radiológica, Física Médica, Ingeniería Nuclear y Ciencias Ambientales. Tiene como misión el desarrollo en excelencia de investigación en ciencia y tecnología nuclear, coadyuvando a al logro de una economía nacional competitiva, eficiente y generadora de empleos, a la sustentabilidad del ambiente y a la seguridad energética. Dentro de sus laboratorios y experimentos podemos destacar:

- Reactor de investigación TRIGA Mark III: reactor de investigación, tipo piscina con núcleo móvil. Utiliza combustible con uranio de bajo enriquecimiento y agua natural con bajo contenido de sales y minerales. El reactor se utiliza básicamente como una fuente intensa de neutrones y de radiación gamma. El núcleo del reactor se encuentra en una piscina alargada llena de agua, está suspendido de un puente que se puede mover a lo largo de la misma y está formado por 74 combustibles de uranio, un combustible instrumentado, 34 elementos de grafito y 4 barras de control. Es utilizado para estudios nucleoquimicos, radiológicos y analizar componentes de la central Laguna Verde [91].

Ilustración 11. *Reactor TRIGA Mark III*
Foto: ININ

- Acelerador Tandem Van de Graaff: En este acelerador se producen partículas atómicas, las cuales mediante campos eléctricos son aceleradas a muy altas velocidades lo que permite producir radiación al colisionar con materiales bajo estudio. La radiación producida, es utilizada para estudiar las propiedades del átomo y también para caracterizar y analizar los materiales, siendo esto información única para su estudio en el contexto de proyectos de investigación interdisciplinarios. hace uso de las técnicas IBA (técnicas analíticas que usan un ión para analizar la composición de una muestra a través de reacciones atómicas o nucleares) en ciencia básica, como herramienta analítica en proyectos interdisciplinarios en medicina, agricultura, geología, ingeniería y ciencia de materiales, estudios ambientales, salud, energía, antropología, obras de arte, hidrología, entre otras. En él también se realizan estudios especializados en la industria que se relacionen con caracterización y propiedades de materiales [92].

Estos junto con otras líneas de desarrollo enfocados principalmente hacia la rama medica son los pilares nucleares en México, denotando así una gran desatención del ramo energético, pese a que sí se trabaja en cooperación entre ambas dependencias, no se desarrolla avance y/o innovación en el campo de la nucleoelectricidad.

4.2. Información nuclear en la sociedad

Todo desarrollo avance e implementación de la energía nuclear tiene una repercusión en la sociedad, puesto que finalmente es quienes reciben los beneficios e información de todo ello. De esta forma, los medios de información, así como las noticias que llegan a sociedad son importantes, puesto que es con ellas que la sociedad va construyendo la cultura nuclear contemporánea y ayuda a la alfabetización del tema para poder considerar la opinión popular dentro de un debate público para la toma de decisiones relacionadas al ámbito nuclear.

De esta forma, noticias de importancia se dan a través de los medios tradicionales, tal es el caso de CNN, El Confidencial, BBC, El Financiero, Expansión, El Economista entre

otros, acercando de manera continua la información hacia la población, desde explicaciones de los experimentos de investigación nuclear, pasando por decisiones políticas en materia energética hasta las actualidades de las centrales nucleares operantes y los planes de construcción a futuro.

También es importante rescatar las posturas de personajes importantes dentro de la ciencia con respecto a la actualidad nuclear, tanto a favor cómo en contra, puesto que se puede tomar cómo punto de partida o referencia para optar por una posición en el debate nuclear. Tal cómo es el caso del físico Klaus Von Klitzing, descubridor del efecto Hall por el cual recibió el premio Nobel en 1985, ha mostrado su rechazo hacia la investigación nuclear de fusión con declaraciones cómo: “No invertiría mi dinero en la fusión nuclear”, denotando así una postura no nuclear, así lo recogió el diario “La voz de Galicia” periódico español [98].

También está la postura de la conocida activista ambiental Greta Thunberg, personaje conocido por sus cambios de postura respecto a temas nucleares, pasando de ser una persona antinuclear, alegando que no es una solución realista, a defender el no cierre de las centrales nucleares de Alemania, esto sin estar a favor total de la fisión nuclear, pero si considerando su bajo porcentaje de material contaminante al ambiente [95].

Por otro lado, personajes cómo Eleonora Viezzer, física premiada, egresada de la Universidad Leopold-Franzens de Innsbruck y Universidad Ludwig-Maximilian de Múnic, doctorada por su tesis en el tokamak ASDEX Upgrade del instituto Max Planck de Física del Plasma en Garching, sostiene una postura pro nuclear, al afirmar que el camino hacia la fusión nuclear puede acabar con le dependencia energética, así lo expresó para el medio El Español, en febrero de 2024 [96]. De manera reciente, el físico nuclear Philippe de Pontcharra, con un recorrido importante en la revisión y construcción de centrales nucleares, habló para un diario español, Diario de Sevilla, donde declaró: "Chernóbil da miedo, pero la energía nuclear es segura" [94].

Inclusive, Simon Aagerter, de 85 años, quién fuera físico jefe en la sección nuclear

del Ejército Suizo antes de convertirse en empresario y su esposa Irene, de 83 años, que fue jefa de comunicación de la Asociación de Empresas Eléctricas Suizas y creó la asociación internacional Women in Nuclear, han lanzado una campaña pro nuclear en Suiza para la construcción de más centrales nucleares, puesto que las necesidades energéticas del país así lo demandan. Con la campaña "Stop de Blackout" buscan un referéndum para lograrlo [97].

Esta gran cantidad de información y posturas demuestran que la sociedad contemporánea tiene en la mesa de discusión el ámbito nuclear y se muestra cómo un tema que seguirá siendo debatible a lo largo de los años venideros puesto que se apunta a una escalada general en todos los temas relacionados a ello.

4.2.1. Información nuclear: Caso mexicano

En nuestro país, las noticias e información con respecto a la materia nuclear no presentan una visibilidad considerable, puesto que mucha de la misma no llega a la sociedad de manera adecuada, ya que en el país no existe un interés genuino para ello, esto se demuestra al hacerse consciente el hecho de que la gran mayoría de la población desconoce que se tiene una central nuclear en el país.

Pese a esto, se tienen espacios donde se logra comunicar y educar respecto al área, siendo así la presencia de Webinars y artículos de divulgación a cargo del CONAHCYT cómo: **Energía nuclear en México. ¿Respuesta o falsa solución a la crisis climática y a la seguridad energética?** Organizado en conjunto con **Programa Nacional Estratégico Energía y Cambio Climático (Pronace ECC),** realizado en abril de 2024 [99].

De la misma forma, se tiene presente el hecho de que México es un país nuclearmente activo. Sin embargo, se habla más sobre ello en medios internacionales, cómo lo son diarios tal cómo El Economista, Global Energy, Forbes o más desconocido Wired. Sin embargo, las noticias no son constantes, teniendo meses o incluso años de separación entre cada nota, lo que demuestra que no es un tema central de estudio o importancia para el medio mexicano, siendo así un importante punto de ataque para la sociedad científica mexicana [100].

Se denota un atraso en investigación e infraestructura mexicana para el cada vez más claro camino nuclear a nivel global, lo que presenta una desventaja, social, económica y científica que parece ser no acorde a las capacidades nucleares del país.

Capítulo 5
Cultura Nuclear en México: Un estudio inicial

En este capítulo, se procederá a hacer el estudio inicial del caso mexicano de la cultura nuclear en el contexto contemporáneo de la sociedad. Esto se hará contemplando dos sectores demográficos específicos:

(1) población mexicana mayor de 18 años, es decir universitarios y público general, que no cuenten con una formación o proceso de formación en física o áreas afines al tema;

(2) estudiantes de las carreras de física y física aplicada de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

El análisis de conocimiento y cultura respecto a temas nucleares se realizó mediante un proceso cualitativo y cuantitativo, efectuado por medio de encuestas, teniendo cada sector una elaboración y enfoque diferente: (a) en el del área de física más especializado y con una profundidad más compleja, donde se enfocaba en tener un panorama completo de los conocimientos respecto al área de física nuclear, (b) en el de la población general busca tener una búsqueda cualitativa del conocimiento, interés y cultura presente respecto al área.

Se revisó, también, el plan de estudios de las carreas de física de la FCFM de la BUAP para conocer qué tan presente es el área en la máxima casa de estudios de Puebla. De la misma forma se evaluó el contexto del área en la educación superior a nivel nacional, de forma que se conozca en qué instituciones se puede estudiar respecto a la física o ingeniería nuclear, lo que permitirá dar un resultado concreto de la situación contemporánea de esta área de relevancia mundial y el cómo se puede mejorar.

5.1. Encuesta del público general (público unverstirario)

La metodología seguida para la ejecución de este cuestionario fue plantear una encuesta cuantitativa, teniendo una mezcla de preguntas cerradas en conjunto con una última abierta, diseñadas para dar opinión y expresar el conocimiento respecto al área nuclear así cómo, sus posturas respecto a la presencia nuclear en el país, esto con el fin de conocer el contexto de

la cultura nuclear mexicana, y en esta aplicación no se tomó en cuenta la preparación académica detrás.

La premisa bajo la cual se presentó la encuesta fue la siguiente: “La cultura nuclear abarca una amplia gama de aspectos, desde representaciones en medios de comunicación hasta educación y conversaciones cotidianas. Desafortunadamente es poco difundida y estudiada en la sociedad mexicana, pero dada la relevancia paulatina que empieza a tomar, es importante saber que se conoce y desconoce del tema, para divulgar sobre ello con precisión. Tu participación es fundamental para comprender mejor cómo la cultura nuclear influye en la percepción pública y la toma de decisiones sobre este importante tema. Por favor, tomate unos minutos para completar este formulario de manera honesta y reflexiva.”

La forma en cómo se aplicó esta encuesta fue a través de la plataforma Google Forms y la manera en que se difundió fue por medio de las plataformas de redes sociales, en grupos de estudiantes universitarios. El conjunto de preguntas presentados en dicho formulario fue la siguiente:

- Cuándo escuchas la palabra "nuclear", ¿te vienen ideas positivas o negativas?
- ¿Cuál cree qué es la percepción general de la población mexicana hacia la energía nuclear y su uso en el país?
- ¿Cree que la cultura popular, como películas, programas de televisión o libros, influye en la percepción pública de la energía nuclear?
- ¿Sabe algo sobre el funcionamiento de una planta de energía nuclear?
- Si no lo sabe, ¿le interesa conocer sobre el tema?
- Sí su respuesta fue positiva, ¿qué le interesaría saber sobre el tema? (multirrespuesta)
- En México se cuenta una planta de energía nuclear, Laguna Verde en Veracruz. ¿Estaba familiarizado/a con esto?
- ¿Alguna vez ha escuchado sobre la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS)?
- ¿Está a favor o en contra de la expansión de la energía nuclear en México?

- ¿Cree que la energía nuclear es una solución viable en la búsqueda de un cambio sostenible?
- ¿Alguna vez ha escuchado el término "fusión nuclear"?
- La fusión nuclear es un proceso en el que se puede obtener los mismos resultados de un reactor nuclear actual, pero con una mejor eficiencia, mayor seguridad y una nula contaminación. ¿Estos desarrollos hace a la energía nuclear más atractiva?
- Frente a las problemáticas energéticas y de cambio climático, ¿cree que la energía nuclear deba ser un punto clave para afrontarlas?

Donde todas las preguntas se limitaron a una postura a favor o en contra (preguntas de sí o no), con excepción de una multirrespuesta, donde se permitió seleccionar más de una respuesta sí así se deseaba, misma que ya ha sido señalada, donde las respuestas eran:

- Funcionamiento de una planta nuclear
- Reacciones de un reactor nuclear
- Pros de la plantas nucleares
- Avances en seguridad nuclear
- Proyecciones a futuro en energía nuclear
- No me interesa conocer

La última pregunta dejó un espacio para expresar sus peticiones y dudas respecto a la materia, buscando que la información sea accesible para toda la población, atendiendo los puntos clave y de mayor interés al respecto, siendo esta:

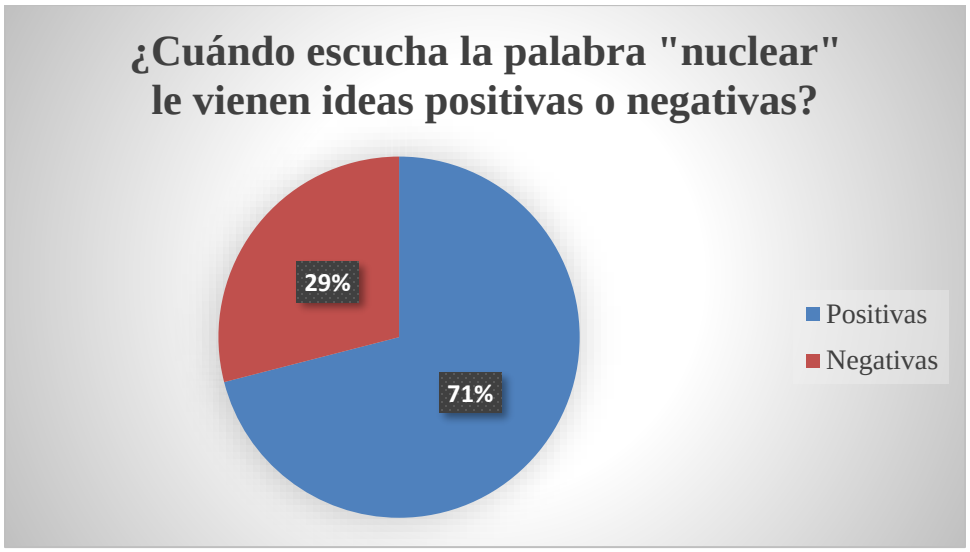
- ¿Cree necesaria la divulgación de estos temas para la sociedad en general? De ser así, comenta que quisieras que los científicos expliquen.

De esta forma, se logra abarcar el mayor espectro posible de la materia para poder analizar de manera concreta la información y entender los puntos prioritarios a atacar.

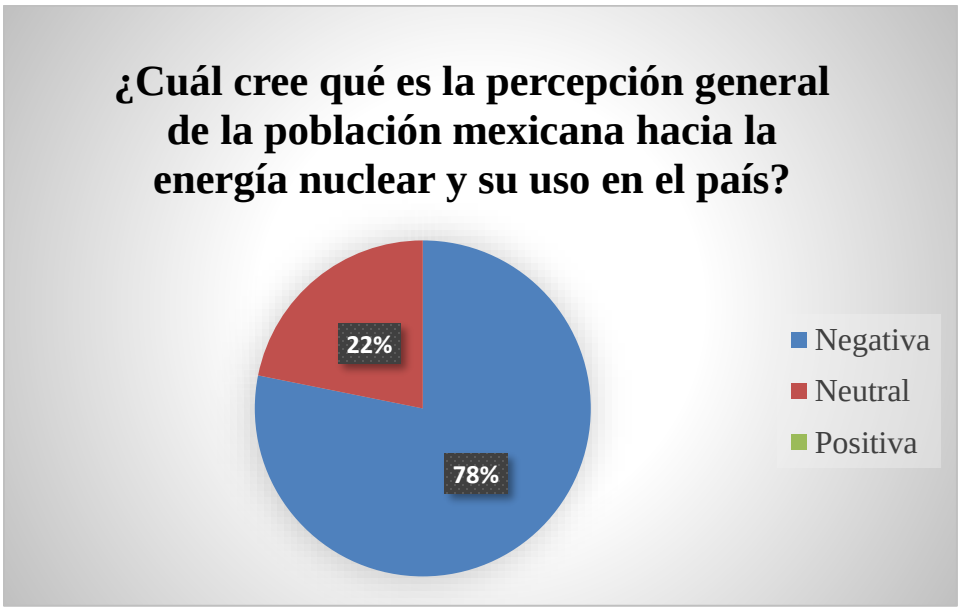
5.1.1. Análisis de resultados de la encuesta de población general

La muestra tomada para el análisis de esta encuesta es de un total de 119 personas, donde no

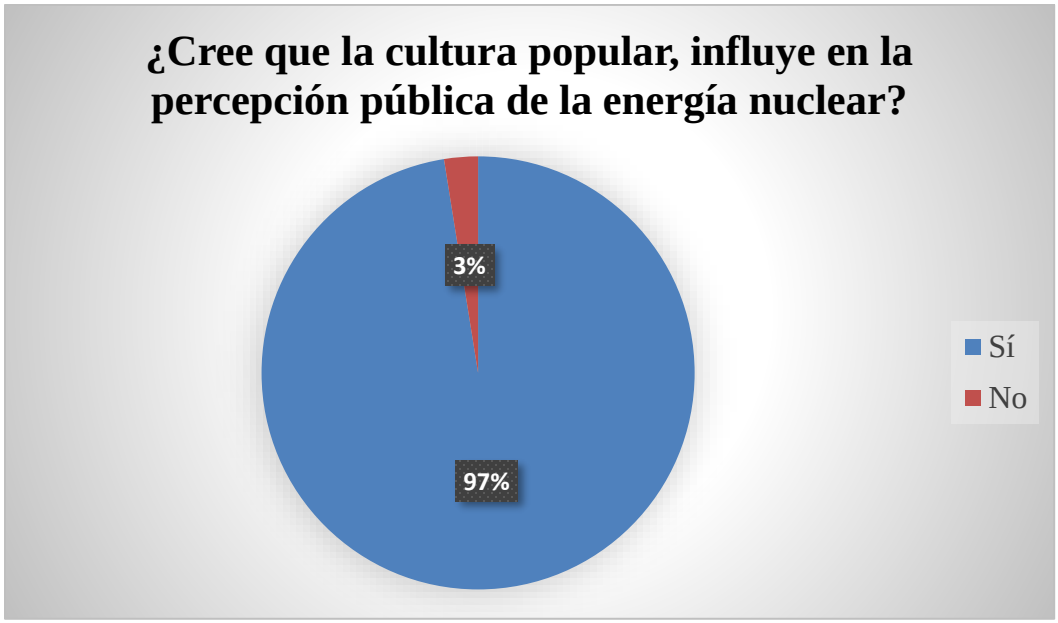
presentan abstinencia en el número de respuestas totales recibidas. La forma de analizar estos resultados será de manera descriptiva, interpretando los gráficos obtenidos y realizados para cada pregunta en específico. Esto permitirá tener una conclusión respecto a las posturas e ideas que se tienen respecto al tema nuclear en la sociedad contemporánea, misma que se realizará posterior a la publicación de todos los datos. Siendo así, se presentan los datos a continuación



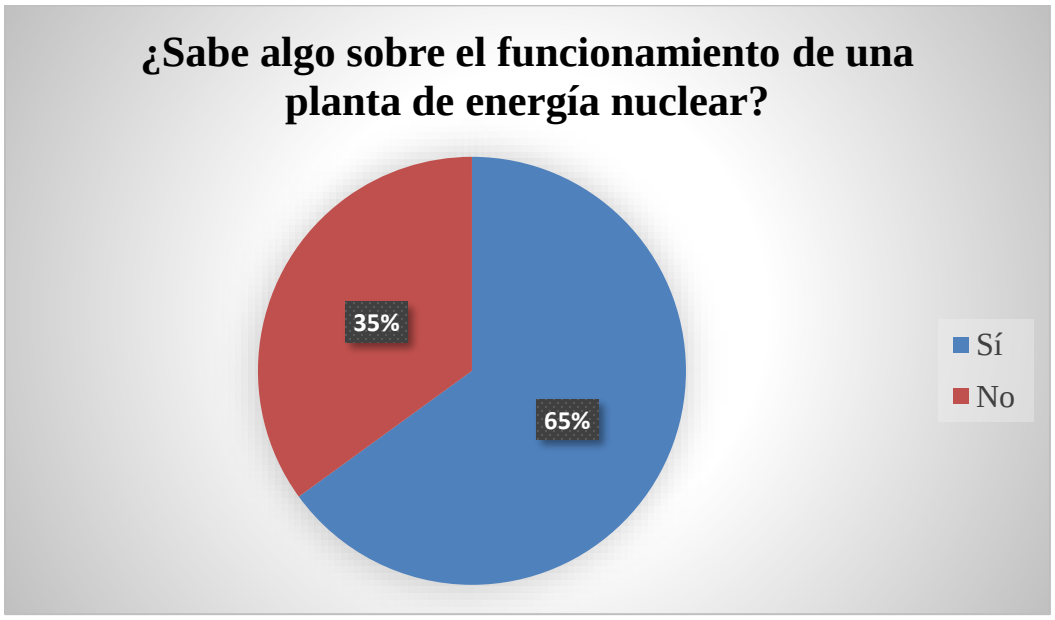
En la primer pregunta se denota una gran mayoría de respuestas positivas, siendo un total de 85 recepciones, contra 34 negativas. Denotando así qué la población joven tiene una buena apreciación respecto al tema nuclear, lo cual, se muestra favorable para los propósitos de esta tesis.



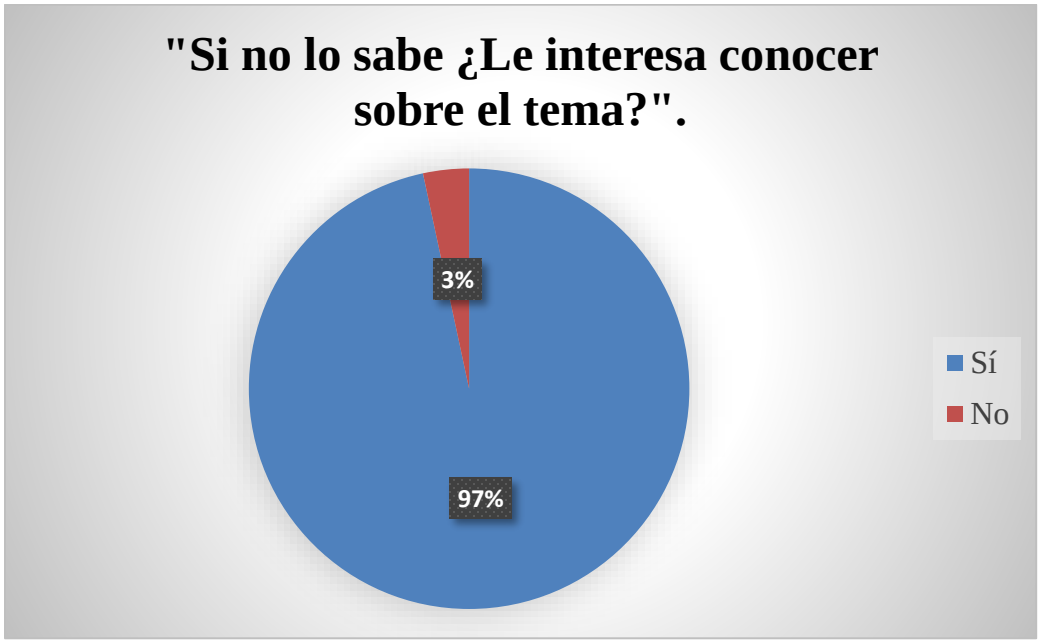
Para esta pregunta, notamos que la opción positiva no fue seleccionada por ningún participante, mientras que la negativa recibió un total de 93 participaciones por 26 de la neutral. Demarcando así que la percepción negativa general que hay en el país, lo que se puede acreditar a diversos factores entre los podemos encontrar, desinterés, desconocimiento e ideas preconcebidas.



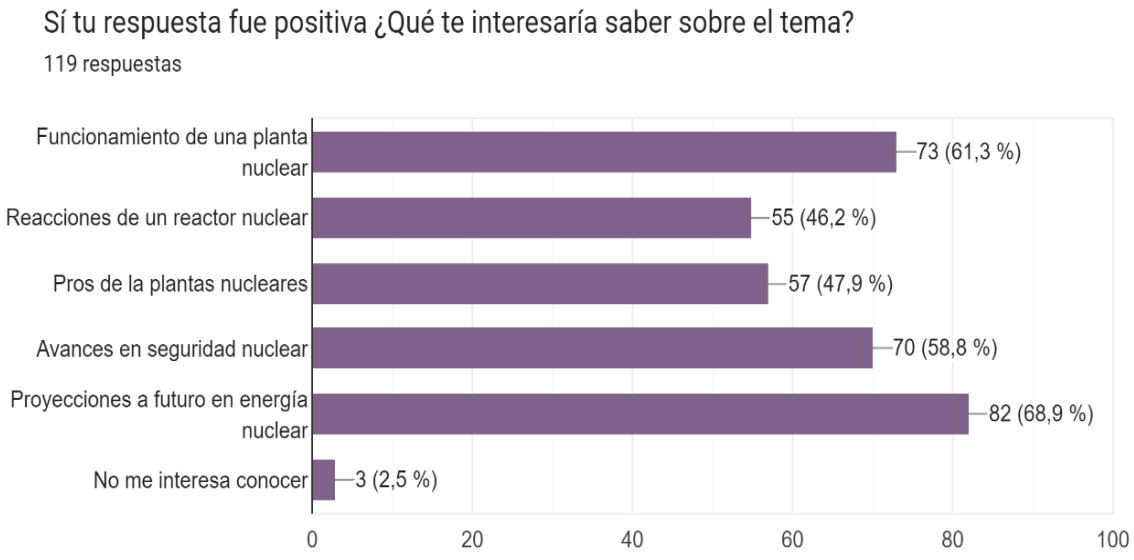
Ahora podemos apreciar una casi unanimidad en las respuestas, puesto que el "sí" tiene un conteo de 116 por únicamente 3 "no". Por lo que se puede asegurar que la mayoría de información y/o percepciones provienen de medios alejados de la riguridad científica.



Esta pregunta nos muestra un conteo total de 77 afirmaciones, que representa el 65% de la muestra, mientras que el porcentaje restante representa 42 respuestas. Y sí bien esta pregunta no refleja el nivel de conocimiento al respecto del manejo de una central nuclear, da un precedente de cierta noción al respecto del tema.



Para esta pregunta, los encuestados demarcan un gran favoritismo para el conocer respecto al tema, siendo un total de 116 respuestas positivas por sólo 3 negativas. Mostrando una gran disposición por aprender y conocer al respecto de ello, misma razón por la que se puede acercar la conclusión de que el interés fluirá para construir una mejor cultura nuclear.



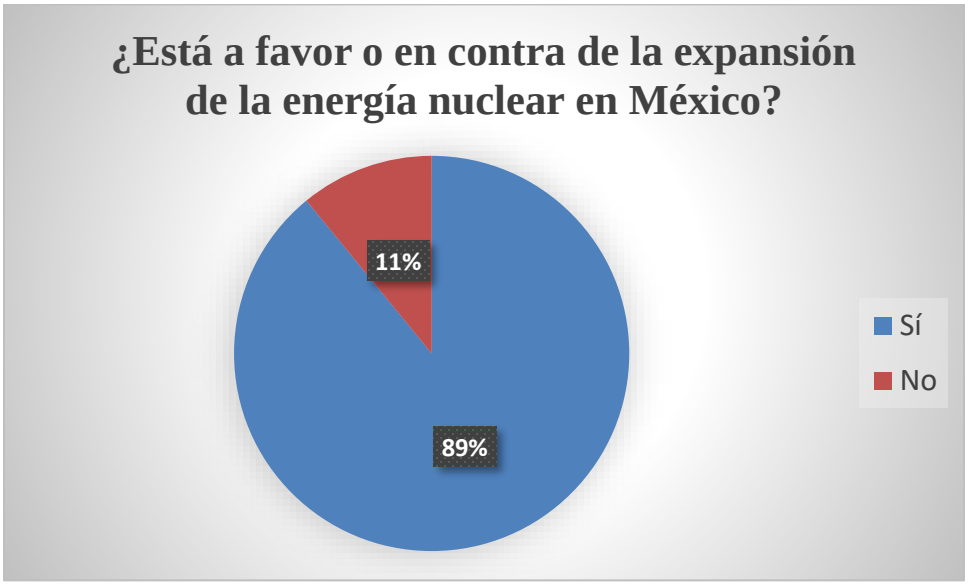
La pregunta anterior es la única del cuestionario que permite respuestas múltiples, siendo así, aquí se tiene la comparación de respuestas obtenidas de toda la muestra, donde se denotan cuantas personas eligió cada una de las opciones y el porcentaje correspondiente. Siendo las proyecciones a futuro y el funcionamiento de una planta nuclear las opciones más seleccionadas.

Y, sin embargo, el resto de las respuestas no se quedan detrás en interés, no bajando de 50 personas interesadas en los 5 puntos presentados cómo opción, siguiendo en orden descendiente el conocer los avances en seguridad nuclear, los puntos favorables de operar centrales nucleares y el conocer la física de los reactores nucleares que permiten su funcionamiento.

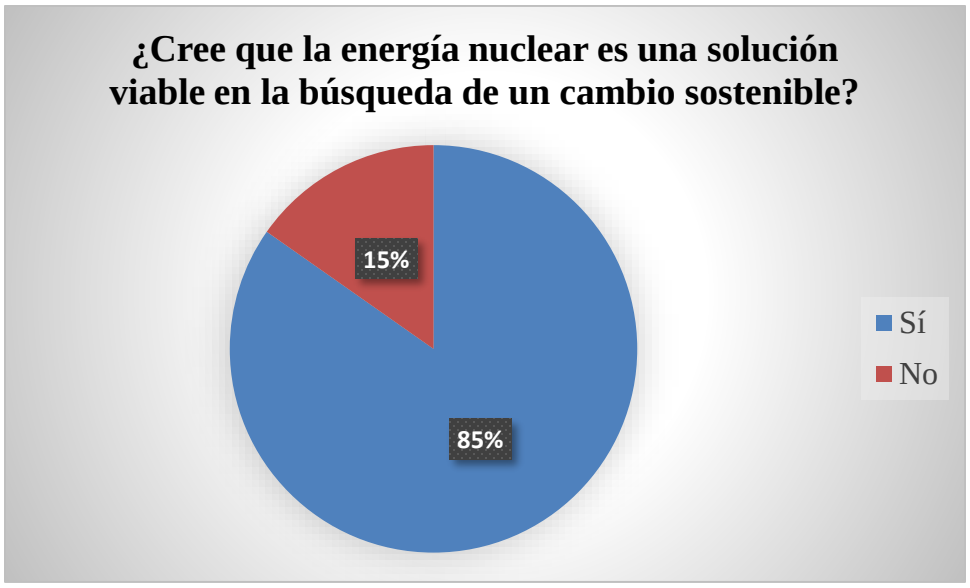
Dado esta apertura a la curiosidad por el conocer al respecto de los puntos más técnicos y especializados de la materia, es que resulta imperativo hacer accesible esta información a la sociedad mexicana.

Siendo la pregunta con mayor paridad en los resultados, en esta ocasión se contabilizan un total de 71 elecciones de “sí” contra 48 “no”. Esto aunado a las respuestas obtenidas en la pregunta 2, se puede aseverar que el desconocimiento del tema y su contexto dentro del país es un pilar central de la cultura antinuclear presente en el país.

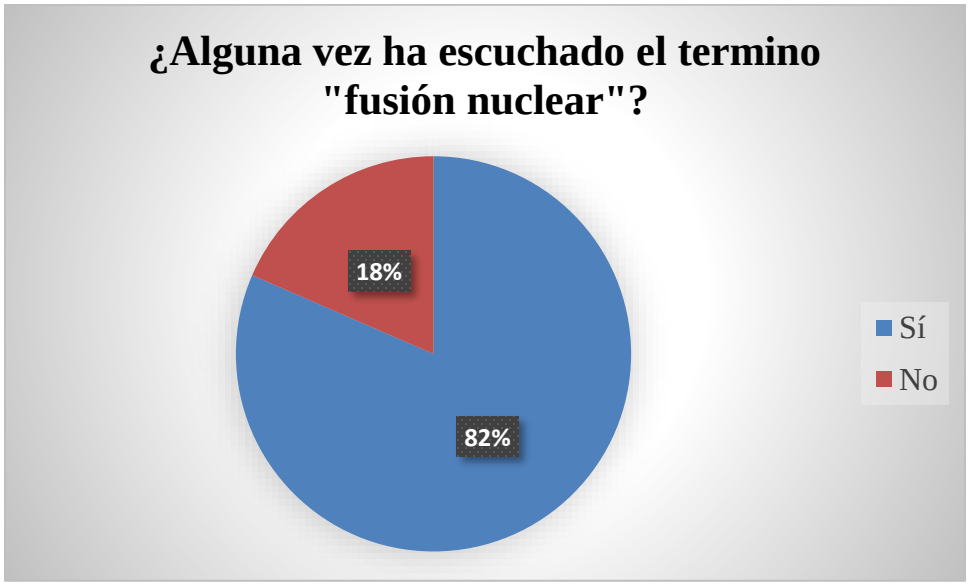
Con una notable mayoría negativa marcada por 89 respuestas contra 30 positivas, se suma a la conclusión respecto al desconocimiento sobre la presencia nuclear en el país cómo un problema central en el contexto nuclear actual de la sociedad mexicana.



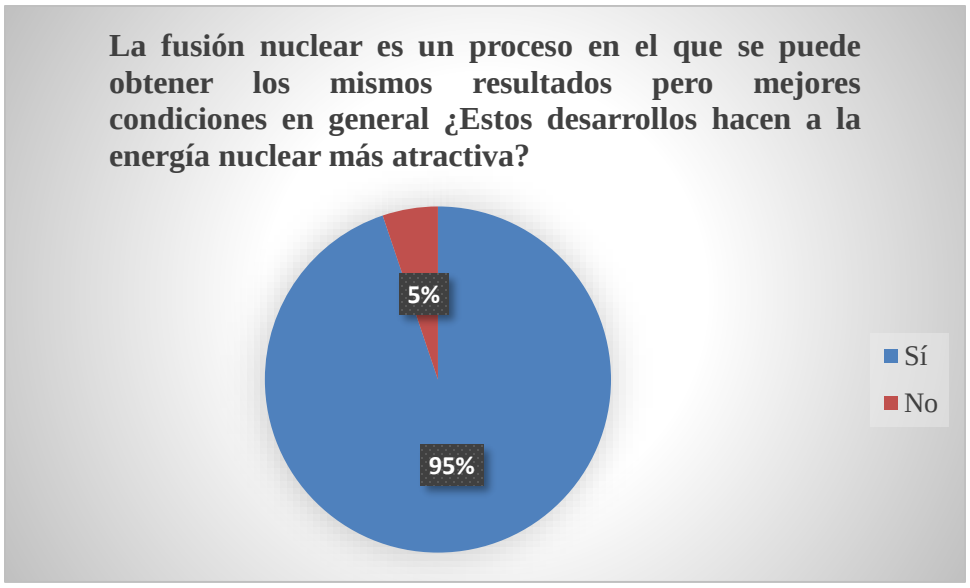
Pese a la percepción general que se tiene el país respecto a esta área e industria, se puede apreciar un notable favoritismo y aprobación para que la energía nuclear pueda expandir aún más sus operaciones en territorio nacional, contabilizando un total 107 elecciones de aprobación para que esto pueda suceder.



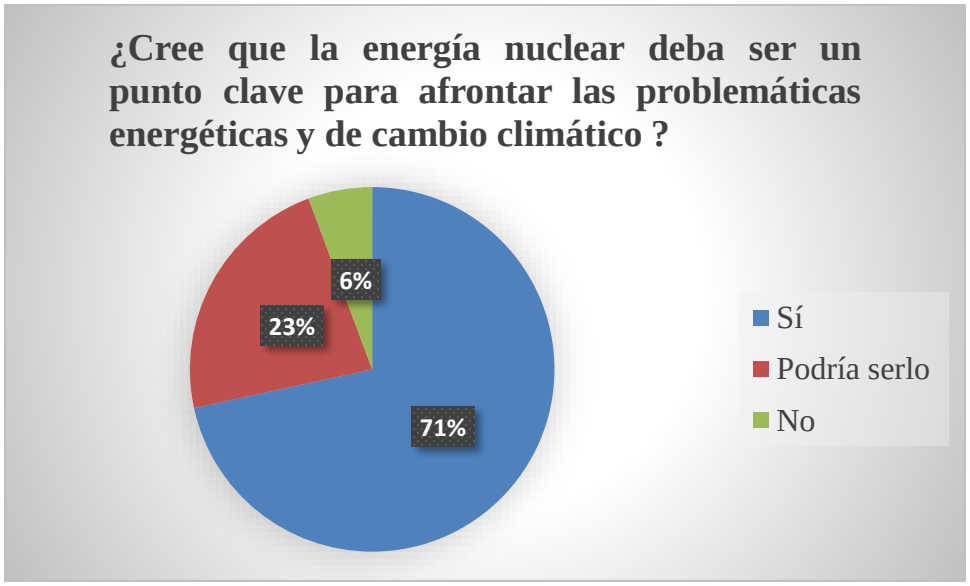
Contemplando el desarrollo del contexto global y la búsqueda de fuentes de energía sostenibles para afrontar las crisis energética y ecológica, se propuso a la nuclear cómo una opción viable para ser una solución para estas problemáticas, siendo así, que una mayoría muy notable, 101 personas, apoyan esta tendencia.



Sí bien, la gran mayoría de personas están al tanto de lo que es el terminó, esto no demuestra que tanto entendimiento se tiene al respecto del tema más, sin embargo, el tener una noción al respecto indica algún tipo de conocimiento del área y puede suponer una predisposición a informarse de manera apropiada al respecto. Teniendo el 82% de afirmaciones, siendo 97 personas en total.



Los avances y desarrollo por lograr reacciones de fusión sostenibles y eficientes se siguen incrementando y muestra todas las ventajas que tiene para ofrecer a futuro, considerando estos aspectos en mente para la elaboración de la pregunta, se cuestiona sobre la posibilidad de encontrar más viable el uso de energía nuclear, siendo casi un 100% de aprobación, representada por 113 elecciones a favor.



Siendo esta la última pregunta cerrada de este cuestionario se pregunta ahora directamente por las estimaciones a futuro de la energía nuclear y que papel pueda tomar frente a las problemáticas actuales, denotando por gran mayoría una postura favorable para esta área a futuro.

La última pregunta presentada al público fue un espacio para poder expresar las inquietudes presentes sobre el tema, contemplando dudas, cuestionamientos. Todo desde la divulgación científica como método de explicación, Teniendo así, respuestas muy variadas e interesantes a partes iguales. La pregunta en cuestión fue la siguiente:

"¿Cree necesaria la divulgación de estos temas para la sociedad en general? De ser así, comente que quisiera que los científicos expliquemos".

Pese a qué no había una respuesta predefinida, se puede encontrar una tendencia marcada. Primero, a que la correcta divulgación por parte de científicos que sepan del tema y se pueda hacer llegar a la población ajena a la física en un lenguaje entendible y accesible. Segundo, los temas o puntos que se buscan por atender siguen una tendencia que recae en los siguientes aspectos:

- Explicar qué es la energía nucleoeléctrica
- Todos los pros y contras resultantes del uso de centrales nucleoeléctricas
- El funcionamiento operacional de las plantas nucleares
- Explicación de las funciones de un reactor nuclear
- Las medidas de seguridad dentro de una planta nuclear
- El tratamiento de los residuos
- Impacto ambiental

Aunado a esto se recibieron comentarios al respecto que muestran inquietud por el temor de la sociedad mexicana al respecto de estos temas y qué este debería el principal punto a tocar a través de la divulgación para lograr cambiar los prejuicios remanentes de la cultura antinuclear presente hoy día. Dentro de todas las respuestas recibidas cabe destacar algunas de ellas, las cuales serán transcritas a continuación puesto que denotan conocimiento y una consciencia nuclear notoria:

- “Creo que saber cómo funciona y conocer las medidas de seguridad que se toman, además de que tan fácil o difícil es que ocurra un accidente al hacer uso de la energía nuclear, ayudaría a tener una perspectiva más objetiva y a reducir la difusión de la idea de que una planta nuclear es prácticamente equivalente a un accidente fatal”
- “Algo importante para motivar al desarrollo de la energía nuclear, es explicar claramente los procesos de los desechos producidos, estos necesitan de un manejo muy riguroso, desafortunadamente es esto lo que más desalienta, pues las personas no confían en que las autoridades y encargados de nuestra región sean capaces de manejarlos, aún queda en la memoria de nuestra sociedad los incidentes del "Cobalto 60" y "La leche del CONASUPO", al quedar como accidentes difíciles de explicar es inevitable que se rodeen de mitos y esto asuste más a la población con el tema de la energía nuclear, la divulgación debe enfocarse en eso, esclarecer los hechos y no simplemente hacer como que nunca pasaron, las personas que actualmente operan las plantas de energía y académicos deben sumar esfuerzos para demostrarle a la población, con evidencias, que tenemos la capacidad de garantizar la seguridad, pues llevan muchos años haciéndolo.”

5.1.2. Encuesta población general: Conclusiones del análisis

Después del análisis de los resultados de esta encuesta se puede construir un panorama apropiado respecto a lo que rodea a la cultura nuclear y al tema en general dentro de la sociedad mexicana y cómo es que esta se presenta para las personas.

Se puede apreciar un notable contraste entre los puntos centrales de lo que conforma a la cultura nuclear, el conocimiento, las posturas y la percepción. Pesé a qué se reconoce una notable cultura antinuclear en el país causada por la desinformación y miedo generalizado a los procesos relacionados a lo que lo nuclear se refiere, dadas las pocas opciones y oportunidades de acceso a información centralizada y especializada al tema, también se encuentra que hay presente una postura de apertura a la explicación, entendimiento y análisis del ámbito, para poder considerar todas las variables relevantes al

caso y así se logre propiciar el cambio a una postura más “pro nuclear”.

Por lo tanto, se puede concluir que México es un país con una cultura nuclear desfavorable, pero que muestra un camino plausible para el cambio de mentalidad y enfoque.

5.2. Encuesta para estudiantes de la FCFM

Para esta segunda aplicación de encuestas, se trabajó con un enfoque netamente cualitativo, donde deja a los encuestados un formulario de preguntas abiertas que busca conocer los conocimientos al respecto, siendo preguntas más específicas pues se trabaja con personas especializadas en la ciencia, siendo el objetivo alumnos de altos semestres de las carreras de Física y Física aplicada. De esta manera, se presentó la siguiente serie de preguntas:

1. ¿Qué entiendes por cultura nuclear?

2. En el entendido de cultura nuclear cómo el conocimiento sobre temas relacionados a la Física Nuclear, visto desde la perspectiva científica, ¿cómo calificarías tu nivel de conocimientos al respecto?

- Altos
- Moderados
- Bajos
- Nulos

3. ¿Cuáles son los 2 tipos de reacciones nucleares que existen? Explique cada uno.

4. ¿Qué diferencias hay entre los procesos de reacción nuclear? ¿Cómo se relaciona la masa con la energía en un proceso nuclear?

5. ¿Puede explicar el funcionamiento de un reactor nuclear?

6. ¿Cuáles son los efectos ambientales negativos del uso de plantas de energía nuclear?

7. ¿Estás al tanto de los avances en la investigación sobre la fusión nuclear? ¿Qué sabes al respecto?

8. Considerando que México cuenta con una planta nuclear, ¿debería de enseñarse física nuclear en universidades del país?

- Sí

- No

¿Por qué?

5.2.1. Análisis de resultados

Dado que esta fue una encuesta cualitativa la forma en la que se analizarán estas respuestas serán medidas de acuerdo con la información proporcionada por cada encuestado, teniendo cómo referencias de evaluación la información contemplada durante los capítulos 1 a 4, que permitirán tener un sistema de medición apropiado, clasificando las respuestas en:

- Tema comprendido
- Tema conocido
- Tema desconocido

De la misma forma, para tener una referencia clara, se dejará a continuación una encuesta contestada con las respuestas estándar para cada una de las preguntas, con lo cual se podrá analizar y catalogar cada respuesta obtenida en este cuestionario. Cabe aclarar que esto sólo será válido para preguntas netamente de conocimiento y no de opinión por lo que las preguntas 1, 2, 7 y 8 estarán excluidas de este sistema, mismas para las cuales se plantea otro tipo de análisis.

De esta manera, a continuación, se presentan las respuestas esperadas con respecto a las preguntas de conocimiento, partiendo del contenido del presente trabajo:

3. ¿Cuáles son los 2 tipos de reacciones nucleares que existe? Explique cada uno.

- Fisión nuclear: Partición o división de un núcleo pesado en núcleos más livianos, y en el camino también se generan algunos subproductos como neutrones libres, fotones y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa y beta y lo más importante, una gran cantidad de energía.
- Fusión nuclear: Proceso inverso a la fisión, puesto que, en este en lugar de romper un núcleo pesado en otros más livianos, se utilizan átomos ligeros para unirlos en otro más grande, es decir, fusionarlos. Usualmente los átomos fusionables son el hidrogeno y sus isotopos, el deuterio y el tritio, liberando energía y partículas en

el proceso.

4. ¿Qué diferencias hay ente los procesos de reacción nuclear? ¿cómo se relaciona la masa con la energía en un proceso nuclear?

- Las diferencias existentes son el tipo de materiales necesarios, elementos pesados o ligeros para efectuar cada proceso, el tipo de moderador necesario para cada uno así como las condiciones específicas necesarias, cómo lo son presión, presencia de campos magnéticos. Además de la diferencia en los elementos resultantes de cada proceso.
- Por otro lado, la relación entre masa y energía que se aprecia dentro de los procesos nucleares viene dada por la equivalencia propuesta por Einstein en la teoría de la relatividad: $E=mc^2$. Esto establece que la energía que posee un cuerpo con mas esta relacionada directamente con la masa de este mismo, por lo que ante mayor materia es mayor la energía que se obtiene. Es por ello por lo que las reacciones nucleares son posibles.

5. ¿Puede explicar el funcionamiento de un reactor nuclear?

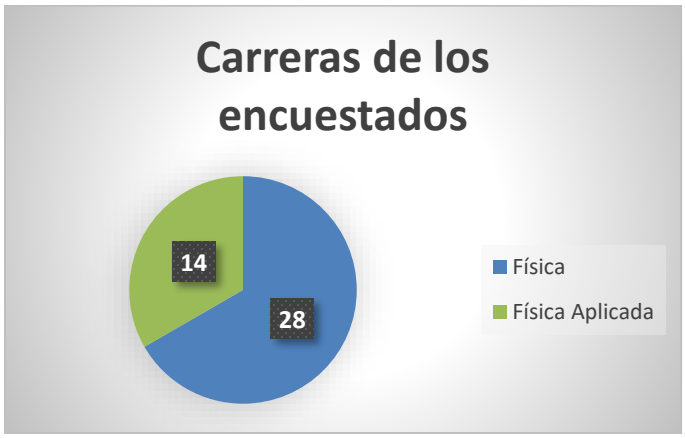
- La física del funcionamiento de un reactor es la siguiente: se desencadena una reacción de fisión dentro del reactor al bombardear átomos pesados con neutrones, lo que se genera una reacción en cadena que libera energía en forma de radiación y calor. Las reacciones nucleares generan calor que ayudan a evaporar agua, una vez hecho esto, el mismo vapor hace funcionar alternadores o turbinas que transforman el trabajo mecánico en energía eléctrica

6. ¿Cuáles son los efectos ambientales negativos del uso de plantas de energía nuclear?

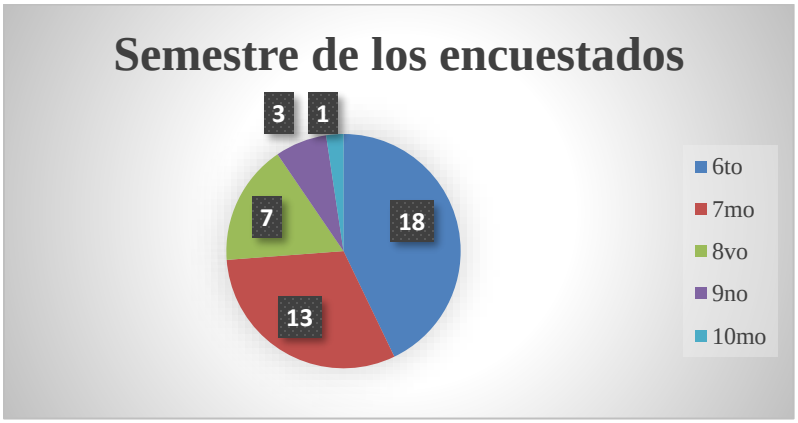
- El único efecto negativo viene dado por los desechos o desperdicios nucleares, es decir, a todo el material remanente de una reacción nuclear, dicho material puede encontrarse en forma gaseosa, líquida o sólida para los que no está previsto ningún uso, que contienen o están contaminados con elementos químicos radiactivos

(isótopos radiactivos o radionucleidos). Sin embargo, esto es sólo si presenta una fuga fuera de contención y/o una mala gestión de este.

Con este estándar establecido, se puede hacer ahora un análisis cuantitativo, de los estudiantes encuestados, siendo en total una muestra de 42 alumnos de las carreras de física y física aplicada, donde se tomará en cuenta el semestre en el que se encuentran al momento de realizarse la encuesta, el porcentaje de alumnos de cada carrera y el nivel de respuestas proporcionadas. Dejando para el final el análisis de la primer pregunta, se continua con los datos de las demás preguntas, de modo que:

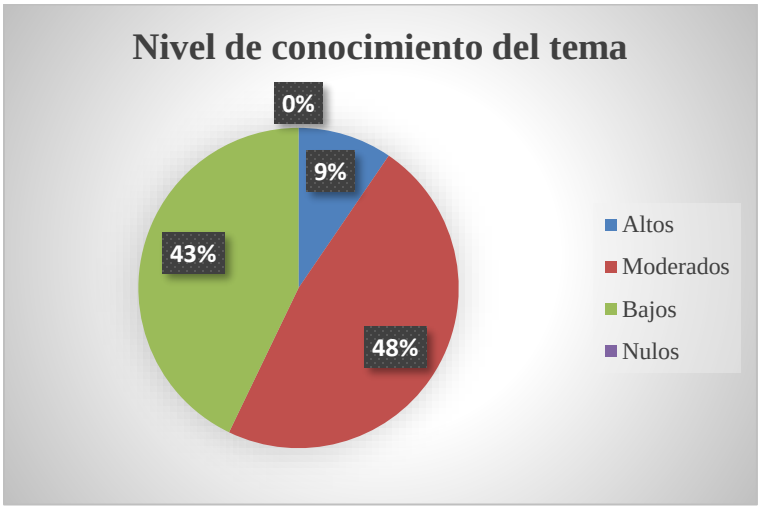


Dos terceras partes de la muestra encuestada pertenece a la carrera de Física, mientras el restante es de Física Aplicada. Esto resulta importante puesto que los planes de estudio difieren entre sí, lo cuál puede ser un potencial diferenciador al momento de responder las preguntas planteadas.

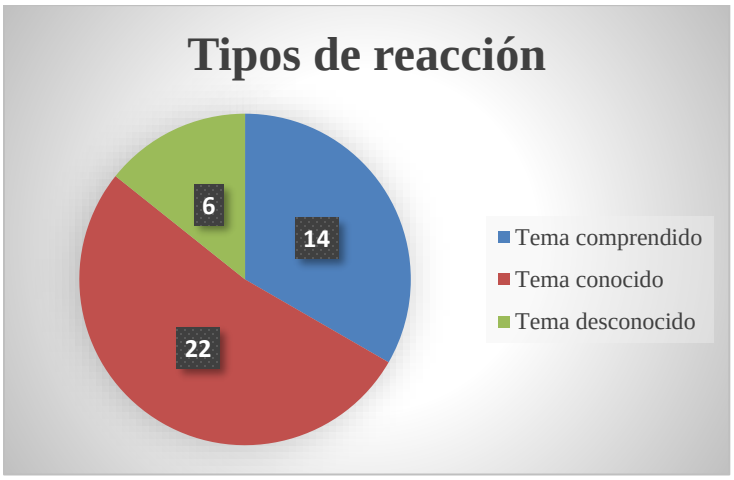


De igual manera, conocer el semestre es importante, puesto que entre más avanzados en la

carrera se encuentre un estudiante, se espera tenga mayor conocimiento respecto a las distintas área de investigación de la física.

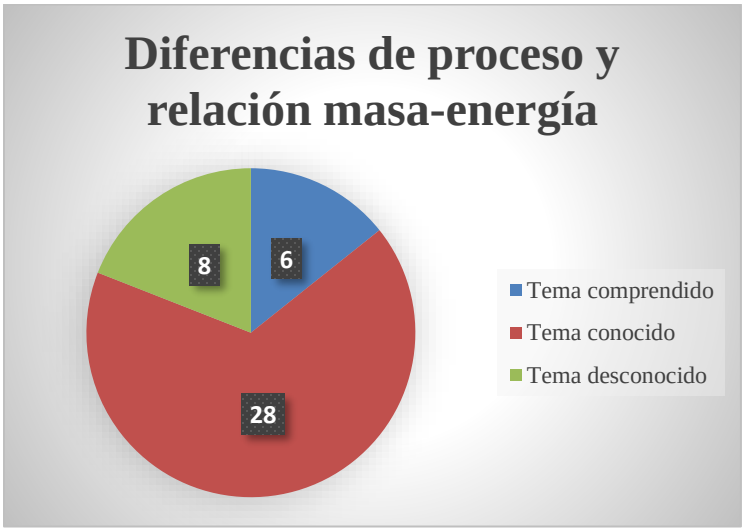


Con respecto al nivel de conocimiento se puede tener una apreciación de que hay un nivel que se puede catalogar cómo aceptable, considerando que no se cuenta con una materia o departamento de investigación del área dentro de la facultad ni dentro de la universidad.

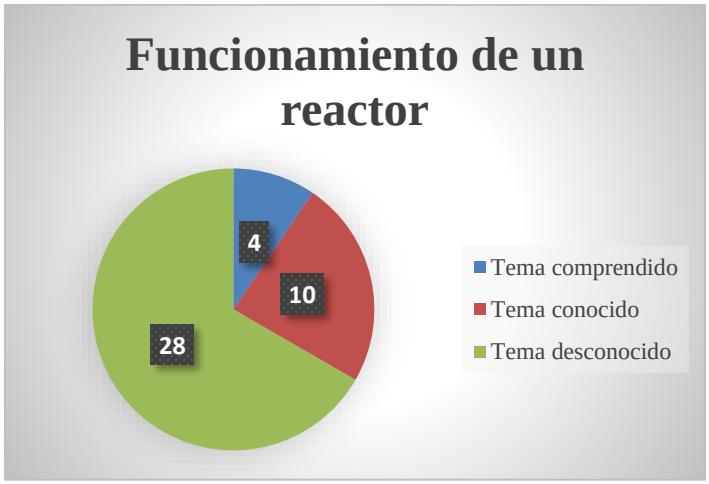


Pasando a la tercer pregunta, de las 42 respuestas recibidas, un poco más de la mitad recae en la sección de tema conocido, esto quiere decir que hay conocimiento sobre los 2 tipos de reacción nuclear existente y se puede comprender la física fundamental y básica de ambos, sin embargo, no se entra a tanta descripción del mimo. Por otro lado, 14 de los encuestados se desenvolvieron con un dominio más amplio del tema, identificando aspectos más técnicos del tema cómo el tipo de material utilizado. Mientras que 6 personas únicamente pudieron

responder con el nombre de las recciones, lo que no se considera cómo suficiente información.

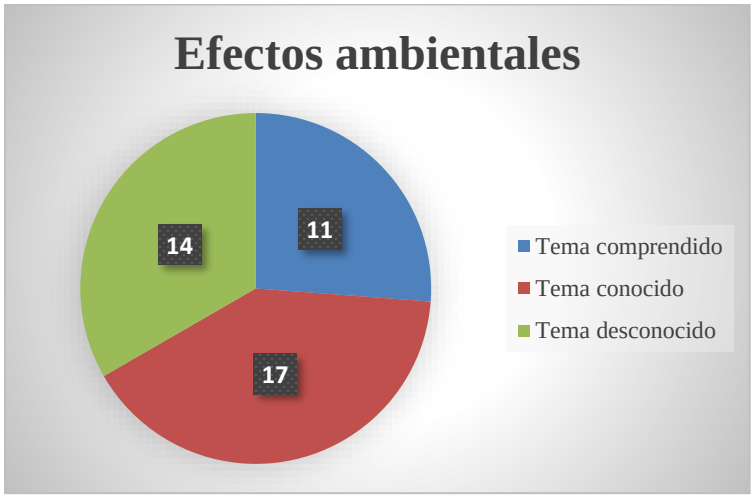


Al pasar a la pregunta 4, pese a contar con una 66% de respuestas catalogadas en el rango de tema conocido se hace la aclaración que esto sucede dado a qué lo estudiantes contestan la primer mitad del reactivo, donde saben identificar las diferencias esenciales de ambos procesos nucleares, pero donde no tienen presente la relación masa-energía propuesta por Einstein, o, bien sucedió a inversamente. Únicamente 6 alumnos contemplaron ambas respuestas mientras que 8 no tenían conocimiento al respecto de ello.



De manera sorpresiva, casi el 70 % de los alumnos encuestados desconocen el funcionamiento de los reactores nucleares, siendo varias respuestas un directo “no lo sé”, mostrando la poca información que se posee al respecto pese a tener ideas sólidas de los

procesos nucleares. Por otro lado, 10 encuestados cuentan con las nociones básicas del funcionamiento de uno y únicamente 4 alumnos explicaron de manera más profunda las operaciones que se realizan en un reactor nuclear, considerando todos los aspectos físicos.



Con lo que respecta a la sexta pregunta la cual interroga sobre los posibles efectos ambientales del uso de las centrales nucleares, se cuenta con una casi paridad en las respuestas obtenidas. Puesto que sí bien hay quienes tienen conocimiento al respecto, muchos otros alumnos presentan dificultades al momento de comprender los posibles efectos adversos que presenta el uso de las centrales nucleares. Por otro lado, junto con el entendimiento de los tipos de reacciones, es el punto donde se tiene mayor numero de estudiantes con un claro conocimiento del tema.

Al preguntar sobre los avances en investigación respecto a la fusión nuclear, alrededor del 70 % del alumnado encuestado denota el hecho de que no se está enterado al respecto de las noticias y artículos publicados al respeto. Por otro lado, los 12 alumnos que escribieron una

respuesta positiva mencionaron algunos temas de interés cómo lo son el sol artificial chino, el experimento ITER, los avances japoneses y el logro de la ignición de fusión logrado en National Laboratory Lawrence Livermore.

Con casi la unanimidad, el alumnado se muestra muy abierto al aprendizaje del área nuclear, identificando a esta área cómo una muy importante e interesante de cara al futuro, esto buscando más oportunidades en el campo de la investigación y la divulgación, siendo un área muy desatendida en el país, sumado a incentivar el desarrollo nuclear del país. Cómo parte de la pregunta se dejó espacio a expresar el porqué de su respuesta, de esta manera, se dejan algunos comentarios y razones destacados:

- “Cómo parte de la formación académica de física es importante conocer el uso de la ciencia en cada área”
- “Puede promover la divulgación sobre este tema y también la investigación de esta en tierras mexicanas. Las plantas no producen sólo energía, también puede haber otros usos de esta, pero que no se estudian”
- “Aunque el campo laboral en México específicamente en esta área de física nuclear es muy escaso considero que es importante impartir esta materia para que los estudiantes tengan más información y oportunidades al elegir esta área”
- “Primeo para culturizar a la gente y desmentir mitos y miedos sobre su uso. Además de incentivar a su estudio e implementación”
- “Es necesario para nosotros cómo físicos, ya que abriría muchas oportunidades

laborales y se podría atacar a la problemática energética del país”

- “Porqué es el futuro de las energías en el país y en el mundo, ayudando a pasar a un esquema más renovable y amigable con el medio ambiente. También enseñarla podría ayudar a desarrollar la física nuclear en el país”

Finalmente se analizan las respuestas obtenidas para la primer pregunta del cuestionario, puesto que se trata de una cuestión de perspectiva y opinión, lo que dificulta su análisis de manera cuantitativa, sin embargo, con las diferentes respuestas, se puede obtener una definición comunal sobre lo qué es la cultura nuclear para personas que directamente estudian temas de ciencias físicas.

De acuerdo con las respuestas obtenidas esta definición se construye como: “La cultura nuclear responde al nombre de la relación entre el conjunto de conocimientos y diversidad de información respecto al tema nuclear, teniendo comprensión del área. A su vez, refiere a los principios, actitudes y comportamientos de la sociedad frente al área, no sólo en concepto sino también en aplicación, considerando los usos, beneficios y repercusiones del aprovechamiento de este campo de estudio, todo el correcto con sustento”

5.2.2. Encuesta en la FCFM: Conclusiones del análisis

Tras el análisis de cada respuesta y su respectiva cuantificación, se logra llegar al consenso de que el área nuclear está presente dentro de la comunidad del alumnado de física y sí bien, no se tiene un completo domino o entendimiento del área, el panorama general es aceptable de acuerdo con los estándares planteados en esta investigación.

Lograr la unanimidad en el tema es en la práctica una fantasía, sin embargo, en su gran mayoría, existe un interés genuino para conocer y seguir con el aprendizaje de esta rama de la física que se encuentra en un punto de auge a nivel internacional, representando una importante corriente de estudio e investigación de presente y futuro.

Con la apertura de los estudiantes y el correcto impulso al área, se puede lograr

posicionar al campo cómo un eje central en la formación de físicos no sólo de la universidad, si no del país, lo que propiciaría e incentivaría el desarrollo en el ámbito nuclear de la nación, con base en profesionales preparados y especializados en área.

5.3. Estudio del área en instituciones de nivel superior

Para que la sociedad pueda avanzar en el tema nuclear es necesario contar con profesionales del área, por lo que la preparación de estos debe ser un punto clave para ello, por lo que, bajo este entendido, es necesario contemplar el panorama de la educación en física e ingeniería nuclear dentro de territorio mexicano en la actualidad, atendiendo el panorama de los programas de educación y oportunidades de estudio de esta.

Para ello se estará analizando las instituciones de nivel superior que ofertan programas de investigación y estudio en materia nuclear, así como el análisis del plan de estudios de la FCFM de la BUAP, considerada uno de los 2 mejores colegios de física junto con la UNAM de todo el territorio nacional y posicionada entre los primeros 25 lugares dentro de toda Latinoamérica [109].

5.3.1. Planes de estudio de la FCFM BUAP

Actualmente se ofertan dos licenciaturas del área de la física dentro de la facultad, orientadas al campo teórico, física, y el campo practico, física aplicada, diferenciando entre cada una de ellas la visión y perfil de egreso de los profesionales de cada carrera, esto con base en los planes de estudio vigentes dentro de la institución, denominados cómo Plan 2016.

Ambas carreras teniendo un tronco común de formación en 5 pilares de le física las cuales son: mecánica, electromagnetismo, termodinámica, óptica y mecánica cuántica. Sin embargo, no ocurre así con la totalidad de la relación de materias, así qué no comparten el mismo mapa curricular, teniendo la licenciatura en física las siguientes materias que no se encuentran presentes en la carrera de física aplicada [105]:

- Física molecular
- Variable compleja

- Funciones especiales
- Probabilidad y estadística
- Calculo diferencial y calculo integral en varias variables
- Enseñanza de la física

De la misma forma, la licenciatura de física aplicada cuenta con materias que no se encuentran en el plan curricular de física, siendo estas [106]:

- Electrónica con laboratorio
- Cálculo vectorial
- Métodos matemáticos
- Diseño y optimización de experimentos
- Adquisición y procesamiento de datos experimentales
- Simulación de sistemas físicos

Fuera de esto se comparten las mismas materias formativas tanto en el ámbito matemático como en el físico y humano, volviendo a diferir al momento de plantear las materias optativas, las cuales fungen como introducción a las especializaciones de las diferentes ramas físicas que imparten los diferentes cuerpos académicos de la institución, de modo que para el área de física las áreas a las que se pueden especializar son [108]:

- Física de Aceleradores y Nueva Física
- Física Médica
- Fisca de Materiales
- Biofísica
- Optoelectrónica
- Óptica
- Fotónica
- Educación
- Partículas, Campos y Relatividad General

- Física Térmica
- Física General

Por el lado de física aplicada, se cuentan con un número menor de áreas de investigación, limitándose únicamente a [109]:

- Modelación Computacional de Sistemas Físicos
- Enseñanza
- Instrumentación y Detectores de Radiación
- Física y Tecnología de la Luz
- Nanociencia y Nanotecnología
- Física Médica

La razón de este análisis del plan de estudio es denotar la ausencia de temas relacionados al ámbito nuclear y temas derivados, siendo la única presencia de estos tópicos en las áreas de física médica, física de aceleradores y nueva física, y el área de partículas, campos y relatividad general. Cuerpos académicos que manejan temas relacionados al área nuclear tales cómo radiación, interacción de partículas e interacciones atómicas, física de aceleradores y altas energías, pero que, sin embargo, ninguno se detiene a entender a profundidad de los temas nucleares, de la misma forma, no se cuentan con posgrados que entren en la investigación de esta área.

La finalidad de abordar esto, radica en la concientización de la falta del área de estudio de física nuclear pura dentro de los campos de especialidad e investigación de la facultad, esto con el propósito de incentivar la innovación en el plan de estudios en un futuro cercano, en pro de impulsar el campo nuclear en México así cómo mantener el posicionamiento de la facultad cómo la mejor del país en el campo de la física, promoviendo el avance científico en materias de suma relevancia internacional.

5.3.2. Área nuclear en el país

A nivel nacional, pese al gran número de universidades no se cuentan con demasiadas instituciones que se dediquen a la enseñanza de licenciaturas o posgrados en el campo de lo nuclear, siendo pocas las unidades académicas con carreras en este ámbito. Dicho esto, el panorama de profesionales en el área nuclear no parece ser el más alentador, sin embargo, las instituciones que se especializan en este campo proveen de profesionales capacitados para desenvolverse en los campos nucleares requeridos por la sociedad y no únicamente en la industria energética. Las universidades que ofertan planes de nivel licenciatura que se centran en orientar sus estudios hacia el área nuclear son:

- Universidad Autónoma Metropolitana: Ofertando la licenciatura en Energía, con su orientación a las ciencias nucleares de manera adscrita a la división de ciencias básicas e ingeniería.
- Universidad Autónoma de Nuevo León: Ofertando la licenciatura en Ingeniería mecánica y electricista, así como la licenciatura en física, la orientación hacia ciencias nucleares se propicia gracias al Grupo de Investigación de Fusión, grupo de investigación nuclear conformado por científicos de las licenciaturas antes mencionadas.
- Escuela superior de física y matemáticas del IPN: Ofertando la licenciatura en Física y Matemáticas con área de especialidad en física nuclear

Por otro lado, se cuentan con diversas instituciones que se presentan cómo opciones viables para la especialización en el campo a través de posgrados de maestría y doctorados en ciencias nucleares, las cuales son:

- Universidad Autónoma de Zacatecas: Ofertando la maestría y doctorado en ingeniería y ciencias básicas con orientación en ciencias nucleares
- Instituto de ciencias Nucleares UNAM: Ofertando la maestría y doctorado en ciencias físicas en el campo de conocimiento de Física de Altas Energías, Física Nuclear, Gravitación y Física Matemática, en asociación con el Instituto de Ciencias Nucleares.

- Instituto Politécnico Nacional: Ofertando la maestría en ciencias con especialidad en Ingeniería Nuclear.

Esto abarcaría a todas las instituciones que presentan programas con enfoque hacia lo nucleares, siendo la poca diversidad de opciones y no se aborda todo el espectro del área [101-104]. La poca oferta del área de estudio en materia nuclear también responde a la situación de mercado que se vive en México, puesto que como hemos visto, es un área desatendida en el país, con poca salida laboral, representando un área de ingreso poco atractiva.

Capítulo 6

Conclusiones de la investigación y consideraciones adicionales

A lo largo de esta investigación, el concepto de “cultura nuclear” refiere a mucho más qué sólo conocer las implicaciones técnicas y especificas respecto al tema de ciencias, engloba consideraciones políticas, sociales y económicas, sin embargo, el peso de su sustento recae en las bases físicas de la materia.

Bajo este precepto, sé realizó una investigación científica sobre los conceptos más elementales en cuestión de la física para poder comprender los preceptos de la cultura nuclear y así, siguiendo el modelo PISA de la OCDE con enfoque en ciencias, se presentan los conocimientos fundamentales para el entendimiento y construcción de una “cultura nuclear” responsable y sólida, buscando el fomentar un cambio de percepción y actitud frente a temas de esta índole, construyendo un camino hacia una “cultura pro nuclear” fundamentalmente para los científicos y miembros de la sociedad contemporánea, que será quienes vivan el presente y futuro nuclear.

Después de 3 capítulos teóricos y 2 analíticos, se llegan a diversas conclusiones, todas ellas conllevan a la creación de un nuevo esquema de interpretación en la enseñanza y divulgación de información veraz en línea para construir la nueva “cultura pro nuclear”, estas conclusiones se separan de acuerdo con el punto especifico de estudio cada subdivisión del área. Todo ello contribuye a la creación de este modelo.

6.1. Objetivo principal de la tesis

El trabajo se centró en investigar y explorar cómo se percibe y comprende la energía nuclear, tanto en el ámbito académico (específicamente entre estudiantes de física) como entre la población universitaria no especializada en temas nucleares. El propósito principal es evaluar los conocimientos, actitudes y percepciones sobre la energía nuclear y fomentar un cambio hacia una cultura pro-nuclear en México y en otros contextos.

Tras analizar los resultados de estudio, se determina qué es necesario modificar la percepción negativa que existe en torno a la energía nuclear, la cual ha sido fuertemente influenciada por accidentes como Chernóbil, Three Mile Island y Fukushima. Esta percepción forma una "cultura antinuclear", basada en miedos y desinformación. Por esto mismo, el objetivo de la tesis se asume bien abarcado, pues plantea desafiar esa postura y proponer una cultura pro-nuclear, argumentado que la energía nuclear puede ser una alternativa viable para atender los problemas energéticos actuales y futuros.

6.2. ¿Qué consideraciones tiene esta “cultura pro nuclear”?

Esta cultura pro nuclear, con base en lo presentado en este trabajo, tendrá las consideraciones benéficas, los riesgos asociados y los avances en investigación nuclear en camino hacia la fusión controlada, el cual se plantea cómo el pináculo del desarrollo del área.

Esto enfocado a resolver las problemáticas de cambio climático y crisis energética mundial, sin dejar de lado el resto de las aplicaciones nucleares. Así mismo se plantea un enfoque educativo que incentiva la expansión en el estudio de la materia, ahondando en todos los puntos cruciales de llevarse a cabo.

6.2.1. Beneficios de la Energía Nuclear

Se destaca que la energía nuclear ofrece beneficios considerables, especialmente en términos de producción de electricidad sostenible, ya que no emite gases de efecto invernadero como otras fuentes de energía convencionales.

Además, ha sido una de las fuentes de energía más redituables y aprovechadas desde su instauración, siendo un punto clave en el desarrollo científico, económico, industrial y social de muchas entidades. Su uso y aprovechamiento correcto plantean un escenario favorable para afrontar las diferentes problemáticas globales, destacando por sobre el resto de las alternativas energéticas.

- **Eficiencia energética**: Un kilogramo de uranio produce una cantidad de energía

significativamente mayor que los combustibles tradicionales (carbón, gas o petróleo). Presentándose, así como la fuente de energía con mayor aprovechamiento, sobrepasando también al resto de las llamadas energías verdes. Esta eficiencia es un factor clave en la energía nuclear, ya que permite generar grandes cantidades de electricidad con pocos recursos, lo que también reduce la necesidad de extracción intensiva de combustibles fósiles.

- **Estabilidad**: Las plantas nucleares pueden producir electricidad de manera constante, sin depender de factores climáticos, a diferencia de otras energías renovables como la solar, la eólica, mareomotriz. Esto es especialmente importante para garantizar un suministro eléctrico confiable en situaciones donde las fuentes renovables no puedan funcionar a plena capacidad. En este sentido, la energía nuclear no solo es eficiente, sino también estable, lo que permite contar con una base sólida para la producción de electricidad.

- **Combate al cambio climático**: La energía nuclear se considera como una alternativa atractiva en la lucha contra el cambio climático, ya que no emite gases de efecto invernadero durante su operación. Esto la convierte en una opción atractiva para cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones de CO2. En un momento en que la transición hacia energías limpias es crucial para mitigar el calentamiento global, la energía nuclear se posiciona como una de las soluciones más viables para sustituir a los hidrocarburos convencionales.

- **Ciclos de vida y tecnología avanzada**: El avance en eficiencia y seguridad nuclear han crecido a pasos agigantados desde su instauración cómo industria y campo de estudio, el desarrollo de nuevos reactores nucleares con mayor seguridad y capacidad de reprocesamiento de combustible ayuda a reducir el volumen de desechos nucleares y mejora la sostenibilidad del sector. Aunado al poco espacio geográfico necesario para la operación de estas, la convierten en un gran activo estratégico.

6.2.2. Riesgos de la energía nuclear

La presencia y aprovechamiento de centrales nucleoeléctricas no son una panacea, presentan retos todavía por afrontar, los cuales representan los puntos claves en la preocupación publica con los temas relacionados o asociados al termino “nuclear”, así como propiciar la resistencia social, sin embargo, tras el estudio y análisis crítico, se puede atender los riesgos y mitigarlos.

- **Accidentes nucleares:** Los principales accidentes que han impactado la percepción pública de la energía nuclear, como Chernóbil (1986), Fukushima (2011) y Three Mile Island (1979). Estos incidentes han generado un miedo generalizado a la energía nuclear debido a las graves consecuencias ambientales y humanas que tuvieron, sin embargo, se debe enfatizar que, aunque catastróficos, han llevado a mejoras significativas en seguridad nuclear. Se han implementado nuevas normativas de seguridad y se han desarrollado tecnologías avanzadas para minimizar los riesgos de futuros accidentes. Además, las probabilidades de un accidente hoy en día son muy bajas, dada la implementación de mejores sistemas de control y protocolos de respuesta ante incidentes.

- **Desechos nucleares:** El proceso de fisión nuclear genera desechos que pueden permanecer radiactivos durante miles de años, lo que plantea un desafío para su almacenamiento y eliminación segura. Sin embargo, hay que destacar los avances tecnológicos han mejorado significativamente la gestión de residuos nucleares, además de que se presenta el Almacenamiento Geológico Profundo como una solución viable para contener estos desechos de forma segura, lo que, de forma constante y paulatina, ayuda a erradicar las amenazas asociadas al mayor punto en contra que presenta el uso de la nucleoelectricidad.

6.3. Avances en investigación de fusión

Los avances en la investigación nuclear de fusión son un componente clave en el futuro de la energía nuclear, con un potencial revolucionario para superar las limitaciones de la fisión nuclear tradicional y orientando un cambio verdaderamente sostenible y sustentable a futuro.

Siendo la fusión nuclear es el proceso inverso a la fisión, donde en lugar de dividir núcleos pesados (como en la fisión), se logran combinar núcleos ligeros, como los son el deuterio y el tritio (isótopos del hidrógeno), para formar un núcleo más pesado, liberando enormes cantidades de energía en el proceso. Este es el mismo tipo de reacción que alimenta al Sol y a las estrellas. El principal desafío de la fusión nuclear ha sido lograr las condiciones extremas necesarias para que ocurra la reacción, similares a las del interior de las estrellas. Esto incluye temperaturas de más de 100 millones de grados Celsius y presiones altísimas.

- **Fisión vs fusión**
    - Capacidades energéticas: La fusión produce una cantidad de energía significativamente mayor que la fisión.
    - Seguridad: A diferencia de la fisión, la fusión genera mínimos problemas de residuos radiactivos a largo plazo. Además, el riesgo de accidentes es mucho menor, ya que una reacción de fusión es más difícil de mantener y, si se interrumpe, no se desencadenan explosiones en cadena ni fugas radiactivas catastróficas.
    - Abundancia de combustible: Los combustibles necesarios para la fusión (deuterio y tritio) son mucho más abundantes y accesibles que el uranio y el plutonio utilizados en la fisión.
- **Desafíos técnicos y avances actuales**
    - Investigación en confinamiento magnético: El principal enfoque y con mayor avance en la investigación actual es el confinamiento magnético. En este método, los núcleos de Hidrógeno se mantienen en forma de plasma dentro de un reactor llamado tokamak, utilizando potentes campos magnéticos para evitar que el plasma toque las paredes del reactor. Este tipo de tecnología está siendo desarrollado en proyectos como el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)
    - Desafíos técnicos: A pesar de los avances, hay obstáculos significativos
        - Sostenibilidad de la reacción: Aunque se ha logrado inducir la fusión

nuclear en experimentos, el principal desafío es mantener la reacción lo suficientemente estable y prolongada como para que la energía generada sea mayor que la energía utilizada para iniciar y sostener el proceso.

- Costos y tiempo de desarrollo: El desarrollo de la tecnología de fusión requiere inversiones colosales y un largo plazo de investigación. Aún estamos a décadas de ver reactores de fusión comerciales y eficientes.

6.4. Propuesta educativa

Para cambiar la percepción negativa, es crucial educar a la sociedad sobre los puntos fundamentales y relevantes de todo el espectro de lo que refiere al uso de centrales de nucleoelectricidad, esto debido a qué cómo se presentó, el papel de la sociedad es fundamental en la toma de decisiones y apoyo a la comunidad nuclear nacional e internacional.

Esto sólo se puede lograr por medio de un cambio en la propuesta educativa de los involucrados en el estudio de las ciencias, proponiendo el impulso de compartir y fomentar esta nueva cultura, por medio de las herramientas adquiridas durante la etapa formativa de la carrera en ciencias físicas. También implica una el implementar una estrategia educativa que incluya a la población general, sugiriéndose tomar como base el modelo PISA de la OCDE, que mide la capacidad de los participantes para aplicar conocimientos científicos en la toma de decisiones informadas.

- **Implementación del área de estudio:** Para poder implementar una estrategia de concientización así como impulsar la investigación y capacidades nucleares de la sociedad mexicana es necesario contar con gente preparada y especializada en este ámbito de estudio, por lo que se propone se implemente cómo uno de las puntos clave de los planes de estudio en ciencias físicas, dentro de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y esto invite y sirva de ejemplo para otras universidades del país.

- **Divulgación científica:** Un punto clave en el cambio de mentalidad colectiva e impulsar esta nueva cultura nuclear es el acceso a la información sustentada con hechos fidedignos, mismos a los cuales sólo se puede acceder por medio de la divulgación de estos temas, por lo que se insta al desarrollo de programas de divulgación nuclear masivos, siguiendo los modelos funcionales en la divulgación de otros ámbitos científicos. Para ello es imperativo el uso de todos los medios posibles, utilizando los medios tradicionales de divulgación así cómo los medios masivos de información cómo las redes sociales y plataformas digitales.
- **Fomento de la confianza en las instituciones:** Otro elemento clave para este cambio cultural es la confianza en las instituciones, puesto que uno de los mayores problemas que enfrenta la energía nuclear es la falta de confianza pública en las instituciones que regulan y supervisan su uso. La transparencia en las políticas nucleares y en los procesos de seguridad es fundamental para generar esa confianza. Las instituciones científicas, deben trabajar en mejorar la comunicación con el público sobre cómo se garantizan la seguridad y el control en las instalaciones nucleares. Aunque este punto es clave, está fuera del manejo de quienes no pertenecemos a ellas, sin embargo, esto no impide solicitar esta información de manera pública.

Con todo esto, se pretende sentar las bases de la nueva cultura pro nuclear en la sociedad mexicana, buscando aprovechar y potenciar el desarrollo del área dentro de nuestro país, a fin de también preparar especialistas en el campo para promover a México de un amplio recurso científico con capacidad de ser un gran activo para la industria nacional y contar con proyección internacional. Y recordando que la ciencia se sigue desarrollando dentro del ámbito social, se busca construir una sociedad más consciente del entorno científico y nuclear que se desarrolla en este preciso momento, siendo capaz de evaluar y tener criterio sobre la información a la que se tiene acceso por diversos medios, esto propiciará la toma de decisiones con respecto al área.

Finalmente, concentrando la información estudiada, se cierra este trabajo de investigación exploratoria planteando una nueva definición de cultura nuclear, misma que servirá de guía en el desarrollo futuro de este tema:

-La cultura nuclear se refiere al conocimiento, general y especifico al que la sociedad tiene acceso, misma que contempla todas las vertientes de esta, pasando desde las implicaciones técnicas hasta las elementales. Siguiendo una respuesta social que contempla los principios, actitudes y comportamientos frente a este campo. Además de las implicaciones éticas, sociales, ecológicas, científicas y políticas; no sólo en concepto sino también en aplicación, considerando los usos, beneficios y repercusiones, fomentando una sociedad nuclearmente responsable-

Referencias bibliográficas

[1] Couto, E. (2022, 12 enero). *¿Cuándo empezó a utilizarse la energía nuclear?* Muy Interesante.https://www.muyinteresante.es/historia/36172.html#:~:text=En%201938%2C%20un%20equipo%20liderado,causaba%20una%20reacci%C3%B3n%20en%20cadena.

[2] Marta M. Gospodarczyk, Departamento de Energía Nuclear del OIEA. (2022, 19 agosto) *Según datos de 2021, la energía nucleoeléctrica puede ofrecer seguridad energética en medio de las crisis mundiales*. (n.d.). https://www.iaea.org/es/newscenter/news/estad%C3%ADsticas-pris-energia-nuclear-2021

[3] Zárate Toledo, E. (2023). *Sociología de energías renovables y transformación energética en México. Revista de Estudios Sociales*, 41(122), 441-470

[4] Karduri, R. K. R., & Ananth, C. (2022). The Future of Nuclear Energy in a Low-Carbon World. International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST), 8(5), 1-10.

[5] United Nations. (s. f.). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro | Naciones Unidas*. https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy#:~:text=Los%20combustibles%20f%C3%B3siles%20dan%20cuenta,cada%20vez%20ganan%20m%C3%A1s%20fuerza.

[6] Cedillo, L. D. V., & Mejía, M. S. P. (s/f). *Energía nuclear: El futuro de la producción energética*. Edu.ec. Recuperado el 5 de abril de 2024, de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23611/1/Rev_Juv_Cie_Sol_1106.pdf

[7]*Crisis Energética Mundial*. (s/f). IEA. Recuperado el 5 de abril de 2024, de https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es

[8] Freire, N. (2024, febrero 5). La constante de Planck y su papel crucial en la física cuántica. *National geographic*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/constante-planck-papel-crucial-fisica-cuantica_21424

[9] Sadurní, J. M. (2024, febrero 19). Robert Oppenheimer, el padre de la bomba atómica. *National geographic*. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/oppenheimer-padre-bomba-atomica_16642

[10] Torres, R. (s/f). *Crisis energética: las respuestas de Alemania, España, Francia e Italia*. Funcas.es. Recuperado el 5 de abril de 2024, de https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2022/05/CIE-288_Torres.pdf

[11] Parrondo, J. R., Parrondo, J. R., & Parrondo, J. R. (2024, 24 febrero). Resurge el potencial atómico para reforzar la producción energética. *El País*. https://elpais.com/extra/energia/2024-02-24/resurge-el-potencial-atomico-para-reforzar-la-produccion-energetica.html

[12] González Reyes, L. (2021). Crisis energética. *PAPELES de Relaciones Ecosociales y Cambio Global*, *156*, 67-78.

[13] Álvarez Echeverría, F. A. (2022). La energía nuclear en México: un activo estratégico a mediano y largo plazo. *Realidad y Reflexión*, *56*, 2520-9299.

[14] Sampietro-Saquicela, J. L., Arboleda-Elizalde, J. K., González-Quiñonez, L. A., Bastidas-Heredia V, J. R., Villacis-Moya, C. I., Rodríguez-Portes, D. L., Espinoza-Motoche, L. D., & Izquierdo-Obando, J. E. (2022). Fusión nuclear: estado del arte y futuras tendencias. *Revista Científica*, *8*(1), 675-698. https://doi.org/10.23857/dc.v8i1.2597

[15] Galindo A., Oficina de Información al Público y Comunicación del OIEA, 17/04/2024, ¿Qué es la energía nuclear? La ciencia de la energía nucleoeléctrica. (s. f.). https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica

[16] Irena Chatzis, Matteo Barbarino, *¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr?* (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/que-es-la-fusion-y-por-que-es-tan-dificil-de-lograr

[17] M. Kikuchi, K. Lackner; M. Q. Tran (2012). Fusion Physics. International Atomic Energy Agency. https://www.iaea.org/publications/8879/fusion-physics

[18] R.K. Janev, ed. (1995). Atomic and Molecular Processes in Fusion Edge Plasmas ISBN 978-1-4757-9319-2

[19] Amorocho Cortés, Enrique; Oliveros Villamizar, Germán (2000). Apuntes sobre energía y recursos energéticos. UNAB. ISBN 9789589682111

[20] Sánchez Ron, José Manuel (2010). Descubrimientos: Innovación y tecnología siglos XX y XXI. Editorial CSIC - CSIC Press. ISBN 9788400092115

[21] Marion Brünglinghaus, ENS, European Nuclear Society. (s. f.). *Nuclear fission*. https://web.archive.org/web/20130117002723/http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-fission.htm

[22] J. Byrne (2011) *Neutrones, núcleos y materia*, Dover Publications, Mineola, NY, p. 259, ISBN 978-0-486-48238-5

[23] Villela, J. M. S., & Castrejón, K. Y. (2023). Fisión y Fusión Nuclear: Cómo entender la película de Oppenheimer. *Ciencia Vital*, *1*(1). https://doi.org/10.20983/cienciavital.2023.01.bas.01

[24] *Aplicaciones no eléctricas*. (s. f.). https://www.iaea.org/es/temas/aplicaciones-no-electricas#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20nuclear%20tiene%20el,urbana%20y%20diversas%20aplicaciones%20industriales

[25] *Elmundo.es | ENERGÍA NUCLEAR. ¿SÍ o NO?* (s. f.). https://www.elmundo.es/especiales/2006/04/ciencia/energia_nuclear/debate/debate.html

[26] *Centrales nucleares*. (s. f.). Endesa. https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/que-es-la-radioactividad

[27] *¿Cuántas aplicaciones tiene la tecnología nuclear? - Foro Nuclear*. (2020, 29 mayo). Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/cuantas-aplicaciones-tiene-la-tecnologia-nuclear/#:~:text=Entre%20ellas%2C%20la%20m%C3%A1s%20conocida,cient%C3%ADficas%2C%20exploraci%C3%B3n%20espacial%20y%20cosmolog%C3%ADa.

[28] Antinuclear, M. I. (2023, 15 abril). *Alemania está de fiesta: adiós a 60 años de electricidad nuclear*. Movimiento/Movimento Ibérico Antinuclear. https://movimientoibericoantinuclear.com/2023/04/15/alemania-esta-de-fiesta-adios-a-60-anos-de-electricidad-nuclear/

[29] *Cuatro décadas de movimiento antinuclear*. (2017, 7 febrero). dw.com. https://www.dw.com/es/cuatro-d%C3%A9cadas-de-movimiento-antinuclear/g-39508788

[30] Wikdahi C. *Suecia: Política nucleoeléctrica y opinión pública*, Informe Especial de la Organización Internacional de Energía Atómica, https://www.iaea.org/sites/default/files/33104792933_es.pdf

[31] León, J. G. S. (2024, 2 Abril.). *El cierre de las centrales nucleares en España, ¿una decisión acertada?* The Conversation. https://theconversation.com/el-cierre-de-las-centrales-nucleares-en-espana-una-decision-acertada-223660

[32] Thurau, J. (2024, 28 enero). ¿Volverá la energía nuclear a Alemania? *dw.com*. https://www.dw.com/es/volver%C3%A1-la-energ%C3%ADa-nuclear-a-alemania/a-68105905#:~:text=La%20canciller%20Angela%20Merkel%20anunci%C3%B3,finalmente%20en%20abril%20de%202023

[33] *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares | Gobierno | Gob.mx*. (s. f.). https://www.gob.mx/inin/que-hacemos

[34] *Cultura Nuclear | Aplicaciones nucleares*. (s. f.). gob.mx. https://www.gob.mx/inin/galerias/cultura-nuclear-aplicaciones-nucleares#carousel-custom

[35] Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (25 de agosto de 2011). «Laguna Verde está operando normalmente bajo los parámetros establecidos por la normatividad nacional e internacional: CNSNS». *cnsns.gob.mx*.

[36] *Nuclear Power in Mexico - World Nuclear Association*. (s. f.). https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico

[37] *Portal CFE*. (s. f.). https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2074

[38] Villarreal, A. (2019, 3 marzo). Michael Shellenberger, ecologista peculiar: "La solar es más radiactiva que la nuclear" *elconfidencial.com*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2019-02-25/michael-shellenberg-ecologista-nuclear_1846926/

[39] Planet, Z., & Planet, Z. (2021, 4 julio). *Protocolos Ambientales: ¿Qué son y cuáles son los Principales?* Zys Planet. https://zysplanet.com/cambio-climatico/protocolos-ambientales-que-son-y-cuales-son-los-principales/#:~:text=Los%20protocolos%20ambientales%20son%20una,general%20y%20salvar%20al%20mundo.

[40] *¿Cómo se clasifican los residuos radiactivos? - Foro Nuclear*. (2020, 18 mayo). Foro Nuclear.https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-residuos-radiactivos/como-se-clasifican-los-residuos-radiactivos/#:~:text=Los%20residuos%20radiactivos%20son%20materiales,establecidas%20por%20los%20organismos%20reguladores.

[41] *División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas*. (s. f.). https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter22.htm#:~:text

=Se%20generan%20anualmente%20en%20todo,la%20producci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa%20nuclear.

[42] Badillo-Almaraz V., Perez J., (2004) *Los desechos nucleares: ¿de dónde vienen y hacia dónde van?*. Revista Ciencia, Academia Mexicanca de Ciencias, https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_2/desechos_nucleares.pdf

[43] *Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente, Clasificación de desechos radiactivos,* Organismo Internacional Energía Atómica, Viena, 2015 ISBN: 978–92–0–307414–8.

[44] *Procesamiento*. (s. f.). https://www.iaea.org/es/temas/procesamiento

[45] *Residuos radiactivos de alta actividad - CSN*. (s. f.). https://www.csn.es/residuos-radiactivos-de-alta-actividad

[46] Schauenberg, T. (2020, 11 marzo). Más allá de Fukushima: los océanos como basureros nucleares. *dw.com*. https://www.dw.com/es/m%C3%A1s-all%C3%A1-de-fukushima-los-oc%C3%A9anos-como-basureros-nucleares/a-52727320#:~:text=De%201946%20a%201993%2C%20m%C3%A1s,fueron%20hundidos%20durante%20este%20tiempo.

[47] *¿Cómo se gestionan los residuos radiactivos? - Foro Nuclear*. (2022, 28 enero). Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/como-se-gestionan-los-residuos-radiactivos/

[48] *Spent fuel pools*. (s. f.). Nuclear Regulatory Commission Web. https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/pools.html

[49] *Almacenamiento temporal - CSN*. (s. f.). https://www.csn.es/almacenamiento-temporal-centralizado1#:~:text=El%20almacenamiento%20temporal%20centralizado%2C%20a,pa%C3%ADs%20por%20un%20per%C3%ADodo%20determinado.

[50] *Almacenamiento geológico profundo (AGP) - CSN*. (s. f.). https://www.csn.es/almacenamiento-geologico-profundo

[51] *¿Cuánto tiempo puede funcionar una central nuclear?* (s. f.). www.elsaltodiario.com. https://www.elsaltodiario.com/desconexion-nuclear/cuanto-tiempo-puede-funcionar-una-central-nuclear

[52] *Ciclo de vida de las centrales nucleares*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/temas/ciclo-de-vida-de-las-centrales-nucleares

[53] *Cuando los desechos nucleares son un recurso valioso en lugar de una carga*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/bulletin/cuando-los-desechos-nucleares-son-un-recurso-valioso-en-lugar-de-una-carga

[54] *¿Cuánta energía en kWh se extrae de un kilo de uranio y qué rendimiento tiene cada kilo? - Foro Nuclear*. (2020, 8 julio). Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-combustible-nuclear/cuanta-energia-en-kwh-se-extrae-de-un-kilo-de-uranio-y-que-rendimiento-tiene-cada-kilo/#:~:text=Sobre%20combustible%20nuclear-,%C2%BFCu%C3%A1nta%20energ%C3%ADa%20en%20kWh%20se%20extrae%20de%20un%20kilo%20de,mismo%2C%208.500.000.000%20kWh.

[55] Factorenergia, E. T. E. (2023, 20 noviembre). *¿Qué es un kilovatio-hora (kWh)? | factorenergia*. Factorenergia. https://www.factorenergia.com/es/blog/factura-luz/que-es-un-kilovatio-hora-kwh/

[56] *Según un informe reciente de la AEN y el OIEA, los recursos mundiales de uranio son suficientes para atender las necesidades en un futuro próximo*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/newscenter/pressreleases/recursos-mundiales-de-uranio-son-suficientes

[57] *Lecciones de la gestión eficiente del ciclo del combustible nuclear por parte de Francia*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/newscenter/news/lecciones-de-la-gestion-eficiente-del-ciclo-del-combustible-nuclear-por-parte-de-francia

[58] *Nuclear fuel cycle overview - World Nuclear Association*. (s. f.). https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview

[59] *Cuando los desechos nucleares son un recurso valioso en lugar de una carga*. (s. f.-b). OIEA. https://www.iaea.org/es/bulletin/cuando-los-desechos-nucleares-son-un-recurso-valioso-en-lugar-de-una-carga

[60] *Backgrounder on the Three Mile Island Accident*. (s. f.). NRC Web. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html#effects

[61] Greenpeace. «El accidente nuclear de Three Mile Island (Harrisbug, EE.UU., 1979)» https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/nuclear/110327%20que%20paso%20en%20el%20accidente%20nuclear%20de%20Three%20Mile%20Island.pdf

[62] Redacción. (2019, 21 septiembre). *Three Mile Island: cómo fue el mayor accidente nuclear en la historia de EE.UU. y por qué se cerró 40 años después la planta donde ocurrió*. BBC News Mundo. https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-49763206

[63] *Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES)*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/recursos/escala-internacional-de-sucesos-nucleares-y-radiologicos-ines

[64] OIEA, Escala International de Sucesos Nucleares y Radiológicos (PDF) https://www.iaea.org/sites/default/files/ines_sp.pdf

[65] Richard Wakeford (2011), *The silver anniversary of the Chernobyl accidente: Where are we now?* Official Journal of the Society of Radiological Protection

[66] *Chernóbil, ¿cómo fue el accidente? - Foro Nuclear*. (2020, 17 junio). Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-proteccion-radiologica-y-radiacion/chernobil-como-fue-el-accidente/

[67] *El accidente de la central nuclear de Chornóbil de 1986*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/temas/el-accidente-de-la-central-nuclear-de-chornobil-de-1986

[68] Calcines Pedreira, A. (2021). Chernobyl as 'Post-Normal Accident'. Critical Review of its Technological Causes. *ArtefaCToS. Revista De Estudios Sobre La Ciencia Y La tecnología*, *10*(2), 101–123. https://doi.org/10.14201/art2021102101123

[69] *Accidente nuclear de Fukushima Daiichi*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/temas/accidente-nuclear-de-fukushima-daiichi

[70] *El accidente de Fukushima Daiichi*. (s. f.-b). OIEA. https://www.iaea.org/es/10-anos-de-avances-tras-fukushima-daiichi/el-accidente-de-fukushima-daiichi

[71] *National Geographic España*. (2024, 4 octubre). National Geographic. https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2021/03/el-tragico-legado-de-fukushima-10-anos

[72] Sample, I., & Branigan, T. (2017, 2 febrero). Fukushima nuclear plant blast puts Japan on high alert. *The Guardian*. https://www.theguardian.com/world/2011/mar/12/fukushima-nuclear-blast-japan-alert

[72] Carlos Serrano (2020, 7 diciembre). *Energía nuclear: cómo es el poderoso «sol artificial» con el que China busca generar energía limpia a partir de la fusión*. BBC News Mundo. https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-55220554

[73] Redacción. (2023, 22 abril). *El «sol artificial» chino da un paso más hacia el milagro de la fusión nuclear*. El Periódico de la Energía. https://elperiodicodelaenergia.com/el-sol-artificial-chino-da-un-paso-mas-hacia-el-milagro-de-la-fusion-nuclear/

[74] *Plasma en condiciones de quemado*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/plasma-en-condiciones-de-quemado

[75] *Fusión por confinamiento magnético con tokamaks y estelarators*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/fusion-por-confinamiento-magnetico-con-tokamaks-y-estelarators

[76] L. Xue *et al* 2020, *Integrated plasma scenario analysisfor the HL-2M tokamak Nucl. Fusion* **60** 016016 **DOI** 10.1088/1741-4326/ab4c65

[77] *¿Cómo es el "sol artificial" de China? - Foro Nuclear*. (2021, 8 marzo). Foro Nuclear. https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/como-es-el-sol-artificial-de-china/

[78] *Main Research Objectives – JT-60SA*. (s. f.). https://www.jt60sa.org/wp/main-research-objectve/

[79] *EU and Japan celebrate start of operations of the JT-60SA fusion reactor and reaffirm close cooperation on fusion energy*. (2023, 1 diciembre). Energy. https://energy.ec.europa.eu/news/eu-and-japan-celebrate-start-operations-jt-60sa-fusion-reactor-and-reaffirm-close-cooperation-fusion-2023-12-01_en

[80] Posch, M. (2023, 6 diciembre). *Japan's JT-60SA generates first plasma as world's largest superconducting Tokamak fusion reactor*. Hackaday. https://hackaday.com/2023/12/06/japans-jt-60sa-generates-first-plasma-as-worlds-largest-superconducting-tokamak-fusion-reactor/

[81] KOREA INSTITUTE OF FUSION ENERGY. (s. f.). *KSTAR Project | About KSTAR | KSTAR | Research : KOREA INSTITUTE OF FUSION ENERGY*. https://www.kfe.re.kr/menu.es?mid=a20202030100

[82] RTVE. (2016, 26 septiembre). *ITER el reactor de fusión nuclear* [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=TTeIxHTLbHY

[83] *Ignition*. (s. f.). Lawrence Livermore National Laboratory. https://www.llnl.gov/news/ignition

[84] *Designing for Ignition: Precise changes yield historic results*. (s. f.). Lawrence Livermore National Laboratory. https://www.llnl.gov/article/49536/designing-ignition-precise-changes-yield-historic-results

[85] *Star Power: Blazing the path to fusion ignition*. (s. f.). Lawrence Livermore National Laboratory. https://www.llnl.gov/article/49501/star-power-blazing-path-fusion-ignition

[86] *MIT and newly formed company launch novel approach to fusion power*. (2018, 9 marzo). MIT News | Massachusetts Institute Of Technology. https://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309

[87] *ITER: el experimento de fusión más grande del mundo*. (s. f.). OIEA. https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/iter-el-experimento-de-fusion-mas-grande-del-mundo

[88] ITER In a few lines, (s. f.). ITER https://www.iter.org/proj/inafewlines

[89] ¿Quiénes somos? *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*. (s. f.). https://www.inin.com.mx/views/inin/quienes_somos.cfm

[90] *Misión y visión | ICN-UNAM, México*. (s. f.). https://www.nucleares.unam.mx/mision.php

[91] De Investigaciones Nucleares, I. N. (s. f.). *Reactor TRIGA Mark III*. gob.mx. https://www.gob.mx/inin/acciones-y-programas/reactor-triga-mark-iii-

73351#:~:text=El%20TRIGA%20Mark%20III%20es,neutrones%20y%20de%20radiaci%C3%B3n%20gamma.

[92] De Investigaciones Nucleares, I. N. (s. f.-a). *Acelerador Tandetron*. gob.mx. https://www.gob.mx/inin/acciones-y-programas/laboratorio-tandetron

[93] Kardoudi, O. (2024, 8 marzo). Seis estudios científicos avalan la viabilidad del revolucionario reactor de fusión del MIT. *elconfidencial.com*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2024-03-08/cientificos-reactor-nuclear-del-mit-fusion-comercial-2030_3844448/

[94] De Sevilla, D. (2024, 22 septiembre). Philippe de Pontcharra | Físico nuclear: «Chernóbil da miedo, pero la energía nuclear es segura». *Diario de Sevilla*. https://www.diariodesevilla.es/entrevistas/chernobil-da-miedo-energia-nuclear_0_2002424849.html

[95] Bloomberg. (2022, 11 octubre). Greta Thunberg dice que Alemania debería mantener abiertas sus plantas nucleares. *Diario la República*. https://www.larepublica.co/globoeconomia/greta-thunberg-dice-que-alemania-deberia-mantener-abiertas-sus-plantas-nucleares-3467415

[96] Hernández, N. (2024, 25 febrero). Eleonora Viezzer, la premiada física que cree en la fusión nuclear para «acabar con la dependencia energética». *El Español*. https://www.elespanol.com/invertia/disruptores/grandes-actores/investigacion/20240225/eleonora-viezzer-premiada-fisica-cree-fusion-nuclear-acabar-dependencia-energetica/834167007_0.html

[97] Martín, M. R. (2024, 3 octubre). Una pareja de físicos jubilados lidera una revolución pronuclear en Suiza y lanza un aviso a España. *Libre Mercado*. https://www.libremercado.com/2024-04-17/una-pareja-de-fisicos-jubilados-lidera-una-revolucion-pronuclear-en-suiza-y-lanza-un-aviso-a-espana-7117944/

[98] Montero, T. (2024, 12 septiembre). Klaus vVn Klitzing, premio Nobel de Física: "No invertiría mi dinero en la fusión nuclear". *La Voz de Galicia*. https://www.lavozdegalicia.es/noticia/sociedad/2024/09/11/klaus-vonklitzing-premio-nobel-fisica-invertiria-dinero-fusion-nuclear/00031726062502790358869.htm

[99] Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. (2024, 27 marzo). *Energía nuclear en México. ¿Respuesta o falsa solución a la crisis climática y a la seguridad energética? – Conahcyt*. Conahcyt. https://conahcyt.mx/evento/energia-nuclear-en-mexico-respuesta-o-falsa-solucion-a-la-crisis-climatica-y-a-la-seguridad-energetica/#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20nuclear%20tiene%20ventajas,una%20densidad%20energ%C3%A9tica%20muy%20alta.

[100] Cruz, E. G. (2024, 3 octubre). México necesita energía, ¿la nuclear es una opción? *WIRED*. https://es.wired.com/articulos/mexico-necesita-energia-nuclear-esta-preparado

[101] Remecin: Universidades con programas nucleares(s. f.). *REMECIN*. REMECIN. https://remecin.mx/educaci%C3%B3n

[102] *Universidad Nacional Autónoma de México - Grupo de Ingeniería Nuclear*. (s. f.). http://lairn.fi-p.unam.mx/

[103] *Instituto Politecnico Nacional*. (s. f.). Portal del Instituto Politecnico Nacional. https://www.esfm.ipn.mx/unidades-aprendizaje.html#LFM

[104] *UAEN – Unidad Académica de Estudios Nucleares*. (s. f.). https://estudiosnucleares.uaz.edu.mx/

[105] Plan de Estudios de la Licenciatura en Física Aplicada Generación 2016 (Marzo 2017) FCFM BUAP, https://www.fcfm.buap.mx/docencia/licenciatura-fisica-aplicada

[106] Plan de Estudios de la Licenciatura en Física Generación 2016 (noviembre 2016) Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP, https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/licFisica/2016/planEstudios.pdf

[107] Listado de Optativas Plan de Estudios 2016: Licenciatura en Física Aplicada, Vicerrectoría de docencia, https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/licFisAp/2016/optativas-FA-2018.pdf

[108] Listado de Optativas Plan de Estudios 2016: Licenciatura en Física, Vicerrectoría de docencia, https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/licFisica/2016/optativas-F-2018.pdf

[109] *BUAP, primer lugar nacional en Física y segundo como Mejor*. (2020, 27 octubre). Boletines BUAP. https://boletin.buap.mx/node/1809

[110] Energy Institute. (s. f.-b). *Home*. Statistical Review Of World Energy. https://www.energyinst.org/statistical-review