

La energía nuclear en México: un activo estratégico a mediano y largo plazo

*Nuclear energy in Mexico: a strategic asset in the
medium and long term*

Francisco Antonio Álvarez Echeverría

Ingeniería, Escuela Militar de Ingenieros, México.

Maestría en Ingeniería, UNAM, México.

Doctorado en Ingeniería, UNAM, México.

Investigador del Observatorio de Políticas Públicas, Universidad Francisco Gavidia.

franlve@yahoo.com.mx

Fecha de recepción: 04 de julio de 2022

Fecha de aprobación: 21 de septiembre de 2022

DOI: <https://doi.org/10.5377/ryr.v1i56.15782>



RESUMEN

En la actualidad, la energía nuclear ha cobrado gran importancia a nivel mundial dentro del portafolio de diversificación en la generación de energía en diversos países, con el objeto de alcanzar una mayor independencia energética. Sin embargo, la energía nuclear en la actualidad, es considerada como un activo estratégico que abarca un espectro muy amplio de posibilidades, en donde la república mexicana posee un potencial prometedor para su utilización con otros fines diferentes a la generación eléctrica; debiéndose considerar para ello la revisión de la operación y administración del sistema nucleoelectrico actual, con el objeto de realizar un balance–diagnóstico de los desafíos, los problemas, las expectativas, los flujos de efectivo asociados a dicha tecnología en cuestión.

Palabras clave: energía nuclear, generación eléctrica, escenarios energéticos y combustibles fósiles; clasificación JEL: O30, O38, O47.

ABSTRACT

At present, nuclear energy has gained great importance worldwide within the diversification portfolio in power generation in various countries, in order to achieve greater energy independence. However, nuclear energy at present is considered a strategic asset that covers a very wide spectrum of possibilities, which in Mexico has a promising potential for its use for purposes other than electricity generation; for this purpose, the review of the operation and administration of the current nuclear power system should be considered, in order to make a balance–diagnosis of the challenges, problems, expectations, and cash flows associated with nuclear technology.

Keywords: nuclear energy, electricity generation, energy scenarios and fossil fuels; JEL classification: O30, O38, O47.

1. Introducción

Los reactores nucleares han venido siendo desarrollados desde los años 40 del siglo pasado, y han sido clasificados de acuerdo a diversos parámetros y características, las cuales giran en torno a (Beljansky, 2014): 1) El costo por kilowatt-hora generado; 2) La seguridad en la operación (sistemas activos y pasivos); 3) La seguridad y no proliferación de material radioactivo; 4) La compatibilidad con la red eléctrica; 4) El desarrollo e incorporación al mercado comercial; y 5) El ciclo del combustible.

La primera generación de reactores (Goldberg y Rosner, 2011; Beljansky, 2014; Flores, 2001), corresponde a todos aquellos que fueron construidos entre las décadas de los años 40 y del 50, del siglo pasado (casi todos prototipos), los cuales actualmente se encuentran fuera de operación. La segunda generación de reactores (con una vida útil de 40 años aproximadamente), corresponde a aquellos que fueron construidos durante los años 1960 y 1990, como son los modelos PWR (*Pressurized Water Reactor*), BWR (*Boiling Water Reactor*), PHWR (*Pressurized Heavy-Water Reactor*), y GCR (*Gas Cooled Reactor*), los cuales fueron diseñados considerando la actuación de diversos elementos tanto mecánicos como eléctricos, y caracterizándose por poseer una cantidad limitada de dispositivos pasivos. En la actualidad existen alrededor de unos 400 reactores de este tipo en funcionamiento.

La tercera generación de reactores (Goldberg y Rosner, 2011; Beljansky, 2014; Leal, 2009), (con una vida media de 60 años), son una mejora de los reactores de segunda generación, haciéndolos más eficientes y seguros a partir de los accidentes de Three Mile Island en Estados Unidos (1979) y Chernóbil (1986), en la hoy extinta Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URRS). Son reactores modulares, con elementos de doble contención, cuyo diseño impide la liberación de material radiactivo hacia el entorno (en caso de que el núcleo se fusione), contando además con sistemas pasivos y activos de seguridad, tornando más confiable la operación. Los reactores de tercera generación pueden dividirse básicamente en dos tipos: el ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*) y el APWR (*Advanced Pressurized Water Reactor*).

La cuarta generación de reactores (Goldberg y Rosner, 2011; Beljansky, 2014; Leal, 2009), se prevé que entren en funcionamiento a partir del año 2030, los cuales tenderán a ser modulares, más seguros y estarán orientados a la sostenibilidad ambiental, a la reducción de los costos de operación, y a la reducción de residuos a través de la reutilización de estos para incorporarlos, nuevamente, como combustible en la operación de los reactores, evitando su acumulación, y convirtiéndolos en fragmentos de fisión de vidas más cortas –menos de 300 años– (González-Romero, 2012). Algunos de estos reactores utilizarán helio, gases de flúor, sodio, plomo u otro tipo de elemento como refrigerante, en lugar del agua ligera o pesada; y como combustible se espera la utilización del torio, uranio y plutonio. Entre algunos de estos tipos de reactores se pueden mencionar (Hoa *et al.*, 2019): el GFR (*Gas-Cooled Fast Reactor*), el SFR (*Sodium-Cooled Fast Reactor*), el SCWR (*Supercritical-Water-Cooled Reactor*), el LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor*), el MSR (*Molten salt reactor*) y el VHTR (*Very-High-Temperature Reactor*).

2. El ciclo del combustible nuclear

El ciclo del combustible nuclear da inicio con la extracción del material (mina), y finaliza con la disposición y confinamiento de los residuos radioactivos producidos en todo el ciclo del proceso (Baltra, 1988; IAEA, 2011; EASAC, 2014; MIT, 2011 y Kreuzsch *et al.*, 2006). Es en estos procesos donde el material extraído sufre una serie de transformaciones complejas, antes de alcanzar las propiedades requeridas, para su utilización como combustible al interior de los reactores nucleares (Baltra, 1988; IAEA, 2011; EASAC, 2014; MIT, 2011; Kreuzsch *et al.*, 2006). En este sentido, el ciclo del combustible nuclear, de forma muy general, podría describirse de la siguiente manera (IAEA, 2011; Feiveson *et al.*, 2011; Baltra, 1988):

- a. Extracción del mineral: el proceso se inicia con la extracción del uranio primario en formas diversas (pechblenda, coffinita, carnotita, uranofano, autunita, etc.), en donde este uranio se presenta como óxidos mezclados con otros elementos, como potasio, vanadio, fósforo, entre otros, los cuales contienen como máximo un 4 % de uranio, lo cual redundará en la extracción de grandes cantidades de material para obtener una cantidad útil de uranio.
- b. Producción de la torta amarilla: el material extraído se somete a diversos procesos con el fin de separar el uranio de otros elementos, dando como resultado un producto con un contenido superior al 70 % de este mineral (uranio), el cual posee un color amarillo, al que se le denomina torta amarilla (*yellow cake*). Este compuesto posteriormente debe ser sometido a procesos de refinación para alcanzar la pureza deseada para usos nucleares.
- c. Purificación del uranio: dentro del proceso de refinación la torta amarilla, esta se disuelve para obtenerse nitrato de uranio hexahidratado, una solución acuosa que es purificada, precipitada y calcinada para obtenerse trióxido de uranio (UO_3), libre de impurezas, en donde el proceso posterior dependerá si el uranio se utilizará en reactores de agua liviana o pesada.
- d. Conversión a hexafluoruro de uranio: los reactores de agua ligera requieren que la composición del uranio (^{235}U), en el isótopo a utilizar, sea mayor a la encontrada de forma natural (uranio enriquecido). Para enriquecer el uranio, este se somete previamente a un proceso de conversión a hexafluoruro de uranio (UF_6), a través de diversas fases, hasta alcanzar una pureza específica.
- e. Enriquecimiento: el uranio natural puro es una mezcla de los isótopos ^{235}U (requerido para la fisión) y ^{238}U , con un 0.71 % en peso del primero, por lo que se aumenta la relación inicial en favor del ^{235}U . Existen diversos métodos para el enriquecimiento de uranio, sin embargo, el más eficiente es aquel que se realiza a través del centrifugado en donde se adiciona el hexafluoruro de uranio gaseoso (UF_6), a una centrifugadora a altas velocidades separando los isótopos ^{235}U y ^{238}U en el proceso. Tanto el UF_6 enriquecido y el empobrecido, se envían a una etapa de reducción a sólido para su posterior manejo.

Es así que la planta de reducción recibe: UO_3 , UF_6 enriquecido, o UF_6 empobrecido; reduciéndose a metal u óxido cerámico dependiendo del caso (el UO_3 es reducido a UO_2 y el UF_6 enriquecido se reduce a UF_4), el cual es transportado hacia un almacén de uranio agotado.

- f. Fabricación del combustible nuclear: el uranio en cualquiera de sus formas (natural o enriquecido), debe de ser acondicionado y confinado de manera adecuada para su utilización como combustible en los reactores nucleares, lo cual se realiza en la etapa de la fabricación del combustible nuclear. El uranio metálico puede fabricarse a través de diversos métodos (fundición, laminado, extrusión, entre otras.). Para su empleo en el reactor, el uranio (metal) se confina en una aleación de magnesio. La fabricación del elemento combustible a partir de óxido de uranio, se realiza tomando como base su estado pulverizado, obteniéndose una especie de pastillas que son confinadas en vainas forjadas a partir de una aleación de metales conformada principalmente de circonio.
- g. Quemado del combustible en el reactor: los elementos combustibles son utilizados en el reactor donde se produce la fisión nuclear, en donde al final de su vida útil resultan ser una mezcla radiactiva que contienen elementos como el uranio (no fisionado) y el plutonio. Los residuos son retirados del reactor y almacenados de manera temporal en una piscina de enfriamiento (aproximadamente por 120 días), con el objeto de esperar que decaiga la radiactividad y el calor residual de las reacciones propias de la fisión.
- h. Reprocesamiento del combustible quemado: dado que en el interior de los elementos combustibles ya quemados existen elementos de valor comercial y militar, se somete a estos a un proceso de separación (para recuperar el uranio y el plutonio en forma de nitrato de uranio y de plutonio) de los fragmentos de fisión (residuos radiactivos), en donde los productos de fisión sin valor comercial son vitrificados y almacenados en recintos especiales para ello.
- i. Mezcla con uranio o plutonio: el flujo de nitrato de uranio se somete a un proceso de secado y calcinación, convirtiéndolo en UO_2 , que luego se mezcla mecánicamente ya sea con dióxido de titanio (TiO_2), o bien con el dióxido de plutonio (PuO_2). Esta mezcla de óxidos se recicla hacia la etapa de producción de elementos combustibles, repitiéndose el proceso completo.
- j. Reducción a metal u óxido de plutonio: la solución de plutonio proveniente de la planta de reprocesamiento se somete a un proceso para la obtención de dióxido del plutonio (PuO_2). Para obtener nuevamente plutonio (Pu) en forma metálica, se hace reaccionar el PuO_2 con calcio (Ca), el cual es posible utilizarlo para fines militares; una parte del PuO_2 producido se envía hacia la mezcla con el dióxido de uranio (UO_2) y la otra a la fábrica de combustibles de plutonio.
- k. Fábrica de combustibles de plutonio: la fábrica de combustible de plutonio, cumple los mismos propósitos que la de uranio. El plutonio es un material extremadamente tóxico debido a su

radioactividad, por lo que para su manejo se deben de tomar precauciones de seguridad mucho más estrictas durante todas las etapas del proceso.

1. Almacenamiento y disposición de residuos radioactivos: la reacción exotérmica en cadena que se produce a través de la fisión nuclear, genera productos de fisión radioactiva (elementos transuránicos), entre ellos el plutonio, en donde los isotopos decaen hasta un punto en que dicho combustible se considera como gastado; debiéndose sustituir para continuar el ciclo de generación de energía. El combustible gastado es depositado en piscinas de enfriamiento, hasta que decaiga la radiactividad y el calor residual de las reacciones. Después dicho periodo, normalmente el combustible puede ser transferido a barriles secos y refrigerados por aire, para su almacenamiento en un sitio especialmente adaptado para ello (depósitos subterráneos en medios específicos: arcilla, roca o sal), o en una instalación específica para ello. Los residuos requieren un sistema de almacenamiento bien diseñado para períodos que abarcan decenas de años para minimizar la liberación al ambiente de la radiación contenida en dichos desechos.

3. Accidentes, seguridad y medio ambiente en instalaciones nucleares

El objetivo general de la seguridad nuclear es, según Beljansky (2014), “proteger a los individuos, a la sociedad en su conjunto, y al medio ambiente de los riesgos radiológicos existentes en las instalaciones nucleares” (p. 38). Es decir, que el funcionamiento de una planta nucleoelectrónica deberá ser seguro, estable y eficiente, con el objeto de evitar cualquier tipo de afectación a la fauna y la flora circundante, que ponga en peligro la estabilidad de un ecosistema dado, a través de la exposición radiológica mediante la prevención de accidentes (considerando que la seguridad en las plantas nucleares, es un concepto dinámico que evoluciona con el tiempo), (Beljansky, 2014). Sin embargo, dentro de los eventos no deseados acontecidos en esta clase de instalaciones, los factores humanos (de forma directa o indirecta), han contribuido a la incidencia de este tipo de desastres a partir de la acción u omisión en la operación y/o el diseño dentro de este rubro. A continuación, se describen algunos accidentes graves de este tipo (como son Chernóbil y Fukushima), identificando no solo el origen, sino también las consecuencias a partir de la secuencia y de los mecanismos de falla que motivaron la ocurrencia de los eventos.

3.1 Chernóbil

El accidente nuclear de Chernóbil ha sido, a la fecha, uno de los eventos que ha afectado y seguirá afectando por muchos años más el entorno natural y la salud humana. Las consecuencias y la secuencia de falla que originaron el accidente se describen a continuación de forma sintética, a partir de los reportes de diversas fuentes de información (European Commission *et al.*, 1996; U.S.NRC, 2009; Nuclear Regulatory Commission, 1987; Beljansky, 2014; Sánchez, 2007; Atomic Energy of USSR, 1986).

La planta nuclear de Chernóbil (cuyo nombre oficial es: Central Eléctrica Nuclear Memorial V.I. Lenin), se encuentra ubicada a 18 kilómetros al noreste de la ciudad de Chernóbil, y a 160 kilómetros de la ciudad de Kiev en Ucrania. La planta nucleoelectrica en sus inicios fue concebida con fines militares, para la producción de plutonio específicamente. En las cercanías de la planta, se erigió una pequeña ciudad llamada Pripyat, en donde se alojaban las familias y los trabajadores de la central, la cual se encontraba habitada por más de 40,000 personas al momento del accidente. La central nucleoelectrica estaba conformada por cuatro reactores del tipo RBMK 1000 (Reactor de Canal de Alta Potencia –*Реактор Большой Мощности Канальный*–), los cuales contaban con una potencia nominal de 3.200 Mw (los RBMK 1000 son reactores de agua ligera en ebullición moderados por grafito), y eran movilizadas a través de uranio de bajo enriquecimiento. El agua incursiona en la parte inferior del núcleo (un cilindro de grafito de unos 7 m de altura y 12 m de diámetro), a través de canales, con la intención de servir de refrigerante del núcleo produciendo el vapor, el cual era enviado a las turbinas para producir energía eléctrica a través de estas; debido a su configuración y sus particularidades, las instalaciones debían ser lo suficientemente robustas para contenerlos, alcanzando los recintos alturas de hasta 70 metros sobre el nivel del piso.

Cabe señalar que este tipo de reactores eran inestables en su operación debido principalmente a: 1) El coeficiente positivo de reactividad hacia su interior provocaba una variación de la potencia (la potencia del reactor aumentaba cuando disminuía el nivel de agua en los tubos del reactor); 2) El sistema de paro de emergencia demoraba alrededor de 20 segundos (tiempo en que tardan las barras de control en entrar al núcleo)¹, pudiendo en algunos casos acelerar una reacción en cadena; 3) La carencia de un recipiente externo de contención como tal, es decir, la falta de elementos que pudieran resistir las sobrepresiones producto de accidentes o de eventos no deseados; y 4) El recipiente que contenía los tubos de combustible, solamente admitía una sobrepresión causada por la falla de un número limitado de tubos, después de ese número, la sobrepresión podría afectar al reactor pudiendo causar fisuras o una sobrepresión capaz de hacer colapsar la estructura, permitiendo la liberación de material radioactivo hacia el exterior.

En este contexto, el día 21 de abril de 1986, se tenía programada la realización de una prueba al reactor 4, el cual se había incorporado de forma reciente. La prueba en cuestión resultó en un detonate para la ocurrencia del evento, ya que existía una presión importante por parte de las autoridades para su realización, ya que, si no se efectuaba, dicha prueba se pospondría por al menos un año. Otro factor de coadyuvó a la ocurrencia del evento, se debió a que el ingeniero responsable de efectuar dicha prueba, solamente tenía experiencia en turbinas de generación eléctrica, más no en nucleoelectricas, careciendo por completo de la pericia necesaria en este tipo de situaciones. Bajo este contexto, la prueba de seguridad en cuestión estaba programada para: 1) Bajar la potencia del reactor entre el 22 % y el 31 % de su capacidad nominal; 2) Bloquear el sistema de refrigeración de emergencia, con el objeto de prevenir una actuación involuntaria del sistema de paro de emergencia del reactor; 3) Realignar

¹ 800 % más que sus homólogos occidentales (Nuclear Regulatory Commission, 1987)

las bombas de circulación de la línea principal, para que cuatro estuvieran conectadas al generador de la turbina, o donde la prueba se llevaría a cabo, y las cuatro bombas de circulación restantes se conectarían a la red de la estación; y 4) Cerrar la alimentación de vapor de la turbina del generador.

En este marco, el día 25 de abril de 1986 a las 01:00 horas, los operadores de la planta comenzaron a reducir la potencia con el objeto de realizar la prueba, en la turbina del generador 8. Doce horas después, el generador alcanzó una reducción del 50 % de la potencia nominal, apagándose la turbina del generador 7, para lo cual los operadores procedieron a bloquear el sistema de enfriamiento de emergencia, como indicaba el procedimiento de la prueba. Sin embargo, la reducción de potencia se suspendió debido a que el jefe del despacho eléctrico de Kiev solicitó no continuar bajando la potencia ya que el consumo aún era alto en el cinturón industrial de Kiev, reanudándose la prueba hasta las 23:10 horas; tiempo en el que permanecieron bloqueados los sistemas de enfriamiento de emergencia, incumpléndose las normas de seguridad de la planta.

Una vez decrecida la demanda, la prueba de reducción de potencia fue retomada hasta las 23:10 del mismo día, en donde debido a un error de operación dentro del sistema de control automático, la potencia cayó rápidamente hasta los 30 Mw (5 % de la potencia requerida para la prueba), lo que ocasionó que el operador retirara una cantidad importante de barras de combustible del reactor, dando como resultado el aumento de la potencia (alcanzando una potencia de 200 Mw), y la inestabilidad de este. Sin embargo, a pesar de las acciones tomadas por el equipo de operación, estos fueron incapaces de subir la potencia hasta los 700 Mw requeridos (dentro de los procedimientos de operación de la nucleoelectrónica, se especificaba la prohibición de la operación de los reactores a niveles inferiores a 700 Mw), ya que esta condición propiciaba un cambio no deseado en el volumen de vapor y por ende en la reactividad en el interior del reactor, produciendo dificultades para la operación y el control de los niveles de potencia, así como en el nivel de agua del separador de vapor.

Es por lo anterior, que se realizaron diversas maniobras y acciones para estabilizar el reactor, las cuales resultaron insuficientes ante el aumento de vapor y la disminución del nivel de agua en el núcleo (en donde el sistema de enfriamiento jugó un elemento clave en el desarrollo de la secuencia de falla del reactor), ocasionando que se fundieran las barras de combustible, aumentando aún más el volumen de vapor hacia el interior del reactor, dando como consecuencia una primera explosión (debido a la sobrepresión), la cual afectó la integridad del separador de vapor, al dejar expuestas las barras de combustible. La segunda explosión, se debió a la generación de hidrógeno a partir de las elevadas temperaturas a los que fueron sometidos algunos materiales, y a la producción de monóxido de carbono a partir del grafito del moderador, dando como resultado la expulsión de material radiactivo e incandescente a la atmósfera, debido a la destrucción del núcleo.

El accidente de Chernóbil causó diversos tipos de efectos severos, como resultado de la liberación de elementos radioactivos casi inmediatamente después de ocurrido el accidente. Entre las

aproximadamente 600 personas presentes en el sitio, al momento de la ocurrencia del evento, solamente dos perdieron la vida a pocas horas de la explosión del reactor; 134 trabajadores recibieron altas dosis de radiación y enfermaron debido a esta, de los cuales 28 fallecieron en los cuatro meses posteriores al incidente. Entre 1986 y 1987, doscientos mil (200,000) trabajadores de limpieza del sitio fueron expuestos a dosis bajas y medias de radiación en el trascurso de las labores de descontaminación del sitio (a la fecha, el número de trabajadores involucrados en las tareas antes mencionadas, rondan los 600,000, de los cuales solamente una fracción minoritaria fue expuesta a dosis altas de radiación). En total, fueron evacuadas 116,000 personas de forma inmediata, y 230,000 más de forma progresiva (en la actualidad viven alrededor de 270,000 personas en áreas que contienen algún tipo de contaminación); se estima que al menos 4,000 personas han fallecido de cáncer como consecuencia directa al accidente de Chernóbil, cuyos cuatro reactores representan todavía un problema real, debido a los riesgos a la salud y de afectación del entorno que estos generan, ya que a la fecha existe la incertidumbre sobre la idoneidad de la estructura de confinamiento de los núcleos de los reactores nucleares de la planta.

3.2 Fukushima Daiichi

Dentro del accidente ocurrido en la planta nucleoelectrónica, es posible identificar una serie de errores voluntarios e involuntarios a partir de diversos actores (The National Diet of Japan, 2012; IAEA, 2015a; IAEA, 2015b; TEPCO, 2012; Beljansky, 2014), los cuales pudieron haberse solventado en tiempo y en forma, a través del seguimiento y la ejecución de acciones tendientes a evitar la ocurrencia de uno de los accidentes nucleares más graves dentro de la historia reciente en Japón. La central eléctrica de Fukushima Daiichi, se ubica en la costa del Pacífico en la prefectura de Fukushima en Japón, y enclavada entre los pueblos de Futaba y Okuma, la cual abarca aproximadamente una superficie elíptica de 3,500,00 m²; se encuentra conformada por seis reactores del tipo BWR (al sur las unidades 4, 3, 2, 1, y al norte las unidades 5 y 6)², los cuales tenían una capacidad total de generación conjunta de 4,696 MW.

En este contexto, el día 11 de marzo de 2011 siendo las 14:46 horas (hora local de Japón), se produjo un sismo de magnitud 9.0 en la escala de Richter, conllevando a una pérdida de potencia en los reactores 1, 2 y 3, que se encontraban en funcionamiento bajo parámetros normales de operación, mientras que las unidades 4, 5 y 6 estaban fuera de operación debido a una inspección periódica. Inmediatamente después que comenzó el sismo, entró en funcionamiento el sistema de paro de emergencia (SCRAM). Cabe señalar que el paro de emergencia no requiere de alimentación externa de energía, sino que el suministro eléctrico es proporcionado por generadores diésel instalados en la planta misma (aunque el sistema entre en paro de emergencia, debe de removerse el calor residual del núcleo de los reactores para evitar riesgos o condiciones no seguras).

² Los reactores entraron en operación entre los años de 1971 –reactor 1– y 1979 –reactor 6– (TEPCO, 2012).

Sin embargo, el movimiento telúrico no solamente dañó sustancialmente las subestaciones y las líneas de transmisión externas, sino también la línea de respaldo del reactor 1, quedando la termoeléctrica sin ninguna posibilidad de suministro de energía proveniente del exterior de la planta nucleoelectrónica, comprometiendo la seguridad de las instalaciones. Posteriormente, como consecuencia del seísmo, se produjo un tsunami máximo extraordinario, de mayor proporción a los considerados para el diseño final de la planta, lo cual ocasionó que se perdieran los generadores diésel de suministro de emergencia, a excepción de los del reactor 6, originándose una interrupción de energía generalizada en los módulos 1, 2, 3, 4 y 5, provocando así mismo la pérdida de las señales y de la instrumentación necesaria para el control de las cinco unidades en el cuarto de control (aunado al colapso de instalaciones, inundación de edificios y corte de accesos a la planta y los reactores, debido a la acción del tsunami en el complejo nucleoelectrónico).

Lo anterior provocó que los equipos necesarios para el enfriamiento de los reactores colapsaran, debido al paso del tsunami por las instalaciones de la planta, dando como resultado que las bombas de recirculación alimentadas por agua proveniente del mar y destinadas a la refrigeración de los reactores, se perdieran en la ocurrencia del evento, sumándose la pérdida de las baterías de respaldo de los módulos 1, 2 y 3. Como resultado, todas las posibilidades de enfriamiento de manera convencional quedaron fuera de operación a partir del arribo del tsunami a las instalaciones. Se intentó enfriar los reactores a partir de la inyección de agua marina en el sistema contra incendio, lo cual no fue suficiente para alcanzar el fin. Sin embargo, las unidades fueron expuestas a la atmósfera y el revestimiento del combustible nuclear terminó con serios daños después de todos los eventos antes descritos, originando que el material (de las barras de combustible), se transfiriera directamente a los recipientes a presión del reactor (*reactor pressure vessels, RPV*), generando una reacción química entre el vapor y el revestimiento del combustible (aleación de circonio), produciéndose una cantidad substancial de hidrógeno, el cual se transfirió al contenedor primario, ocasionando a que se liberará material radioactivo a través de las válvulas de alivio (SRV's) y las válvulas de seguridad de presión (PSV's). Cuando la presión al interior del recipiente se incrementó de manera considerable, se generó una explosión en el reactor 1 y 3, provocándose posteriormente otra explosión en la cubierta del reactor 4. Después de una intensa labor por parte de los equipos de emergencia, las funciones de refrigeración de las piletas de enfriamiento de cada unidad, y de la piletta en común, se lograron restablecer.

Dentro del informe de la Comisión Nuclear Independiente (Nuclear Accident Independent Investigation Commission), que investigó el accidente de Fukushima, se determinó que la responsabilidad última de este era responsabilidad del organismo operador (TEPCO), los entes nucleares reguladores (NISA y NSC), y el ente gubernamental encargado de promover la energía nuclear (METI); ya que estos fallaron en desarrollar los elementos de seguridad básicos necesarios, como la estimación de la probabilidad de la ocurrencia de dichos eventos, la preparación y la contención de los daños colaterales generados por estos desastres, y el desarrollo de planes de evacuación para la población en caso de liberación de material radioactivo: a partir del año 2006, TEPCO y NISA

(Nuclear and Industrial Safety Agency), fueron advertidas por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, que las instalaciones operadas por TEPCO no se encontraban preparadas para la ocurrencia de un evento de proporciones catastróficas como el ocurrido en el año de 2011; comprobándose además que TEPCO fue negligente en la implementación de la regulación necesaria para subsanar dichas omisiones, así como su negativa en la importación de avances y conocimientos tecnológicos *ad hoc* al tipo de instalaciones que se encontraba operando, posponiendo deliberadamente las medidas de seguridad para la protección de entorno y la población, en favor de sus intereses comerciales.

A partir del accidente en Fukushima, se ha detectado un declive en la contracción de $^{137}\text{Cs}^3$ en los cuerpos de agua que circundan a las instalaciones de la planta (Kumamoto *et al.*, 2015), y más allá de éstos (los cuales tomarán varias décadas en depurarse totalmente); así mismo, en las áreas forestales y en los suelos⁴ (Koarashi *et al.*, 2016), aledaños a la zona del accidente, es posible encontrar presente dicho isótopo; sin embargo, su concentración ha decrecido a través del tiempo (Imanura *et al.*, 2017). Así mismo, se ha detectado una disminución de la contaminación de radiocesio en algunas especies de peces, no obstante, en otras se mantiene particularmente alta; sin embargo, en su gran mayoría, todos los peces que se encuentran en un área de 20 km la redonda del accidente, están dentro de una lista de riesgo, por lo que no es posible ni consumirlos ni exportarlos (Wada *et al.*, 2016).

Aunque han pasado ya algunos años desde el accidente, Japón seguirá siendo afectado por los efectos adversos de los radionúclidos (^{131}I , ^{134}Cs , y ^{137}Cs), en las próximas décadas; en donde la ingestión de alimentos y la exposición a los suelos contaminados, son los que contribuyen de forma más significativa a dicha afectación (Kim *et al.*, 2019). Cabe señalar que dicha contaminación no solo es a nivel local, ya que el transporte de esta a través del aire, ha ocasionado que se haya extendido en al menos 80 kilómetros más allá del lugar del accidente (Sanada *et al.*, 2018), provocando no solo un éxodo de alrededor de 160,000 personas (Waddington *et al.*, 2017), sino también la contaminación de alimentos y cultivos.

En síntesis, la negligencia de las autoridades regulatorias, entes gubernamentales y la empresa operadora, contribuyeron a la ocurrencia de un evento prevenible, cuyas consecuencias perdurarán por varias décadas, incluso hasta después del desmantelamiento de las instalaciones afectadas (Yamaguchi *et al.*, 2017), en donde los riesgos y efectos a la salud humana a largo plazo (derivados del accidente debido a la exposición), son a la fecha difíciles de predecir en su totalidad (Christodouleas, 2011).

3 El Cesio¹³⁷ es un isótopo altamente radiactivo y se genera normalmente tras un proceso de fisión nuclear, y posee un periodo de semi-desintegración cercano a los 30 años. Es un isótopo muy cancerígeno, siendo altamente soluble en agua y fácilmente absorbible por los seres vivos. Dicho isótopo se ha demostrado que en un determinado número de plantas y de animales pueden presentar un factor de concentración extremadamente alto (Timofeev-Resovskiy, 1957).

4 En donde al parecer el transporte de los elementos radioactivos generados a partir de la fisión durante el accidente, ha sido significativamente bajo en este medio (Koma y Ashida, 2017). Sin embargo, el suelo es un factor determinante para la exposición, absorción y transporte de la radiación en el área afectada (Kim *et al.*, 2019).

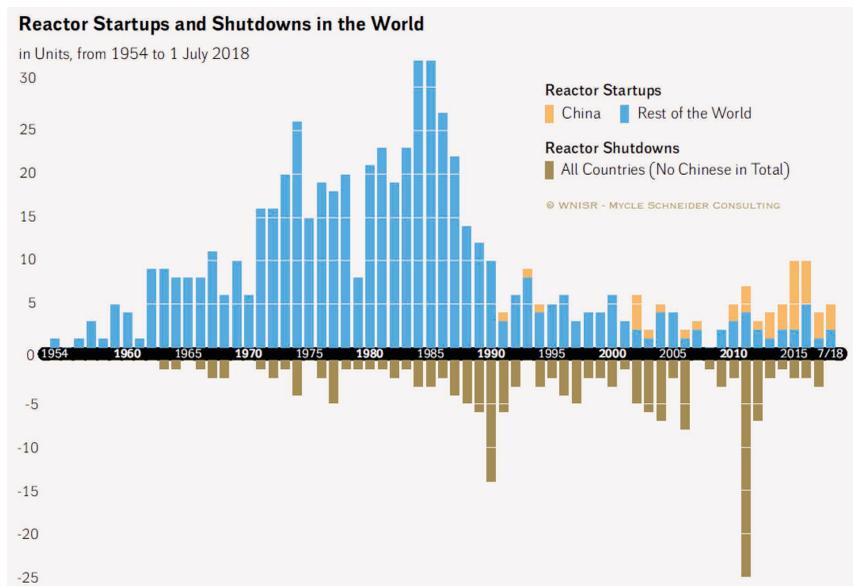
4. Capacidad global instalada

4.1 Reactores nucleares

Para el año 2018, la capacidad total instalada se situó en los 368 GW, lo que permitió generar en el año 2017 un total de 2,500 TW, debido a un incremento en la capacidad de generación de energía en la república China (Schneider *et al.*, 2018). De igual manera, hasta este mismo año (2018), existen al menos 31 países que se encuentran generando energía eléctrica a partir de 413 reactores nucleares (excluyendo aquellos que han sufrido algún tipo de interrupción a largo-pazo Long-term Outages, LTO)⁵. Así mismo, en el año 2018 hubo un incremento de diez (10) unidades en comparación con el mismo periodo del año 2017. Ese incremento se debió en parte por la incorporación de seis (06) reactores que se encontraban bajo un esquema de LTO. En las Figura 1 y 2 se puede observar, de manera gráfica, la relación de reactores a través del tiempo (incorporación y desmantelamiento), desde 1954 hasta el año de 2018. La energía nuclear en la actualidad representa una porción importante dentro de la matriz energética global, ya que esta alcanza el 10.40 % (IEA, 2019), del total a nivel mundial (ver Figura 3).

Figura 1

Puesta en marcha y cierre de reactores nucleares a través del tiempo (1954 – Julio 2018).

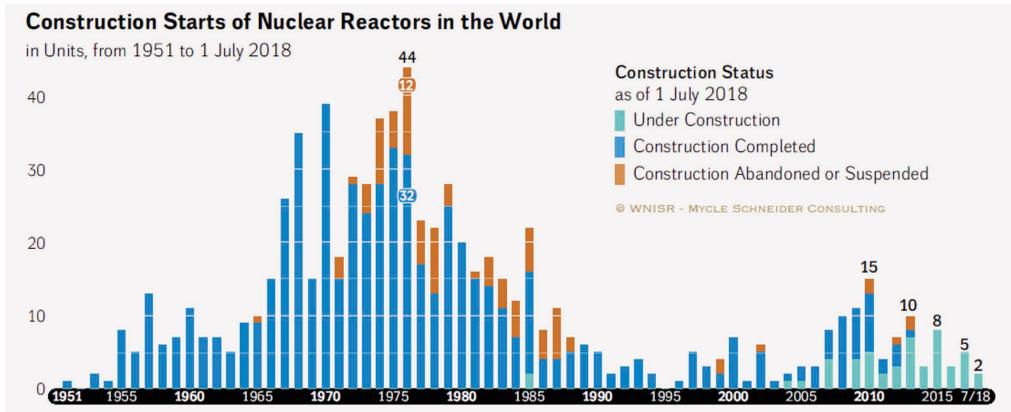


Fuente: Schneider *et al.* (2018).

⁵ Para el propósito de la codificación PRIS (*Power Reactor Information System*), la interrupción (*outage*), se define como cualquier estado de una unidad del reactor, cuando su potencia de salida real es menor que la potencia de la unidad de referencia durante un período de tiempo determinado. Según esta definición, la interrupción incluye tanto la reducción de energía como cuando la unidad se encuentra fuera de operación (Schneider *et al.*, 2018).

Figura 2

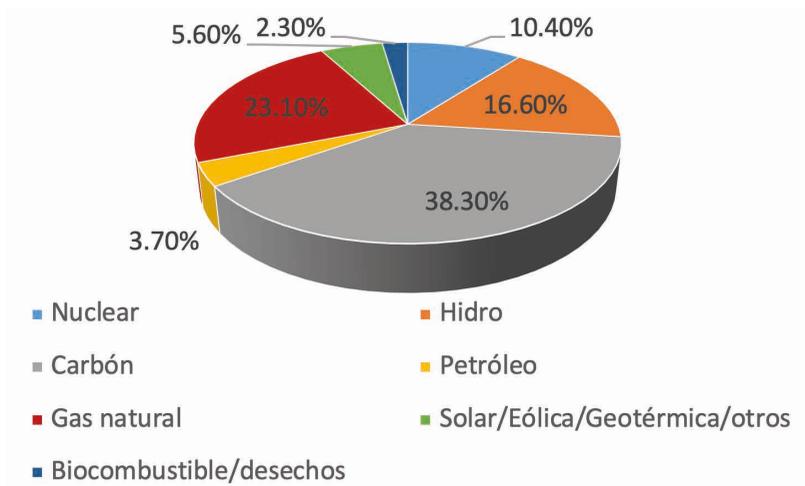
Construcción de reactores nucleares a través del tiempo (1954 – Julio 2018).



Fuente: Schneider *et al.* (2018).

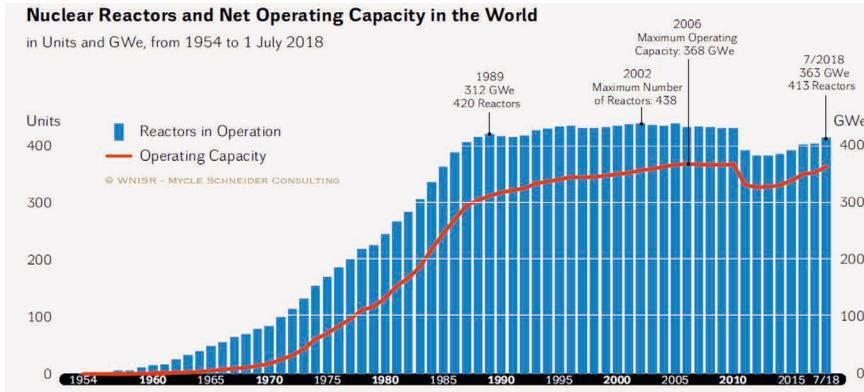
Figura 3

Porcentajes de energía bruta total producida a nivel mundial por rubro.



Fuente: IEA (2019).

De igual manera, en la Figura 4 se advierte un crecimiento de la capacidad de operación de las centrales nucleoelectricas desde el año 1954, observando un descenso pronunciado a partir del accidente de Fukushima (pudiendo deberse a la revisión y aseguramiento de las condiciones seguras por parte los organismos operadores y los entes reguladores), en donde la tendencia actual apunta a hacia un incremento de dicha capacidad a nivel global (Schneider *et al.*, 2018).

Figura 4*Reactores nucleares y capacidad neta de operación a nivel mundial.*Fuente: Schneider *et al.* (2018).

Es así que, a mediados del año 2018, quince (15) países se encontraban construyendo algún tipo de planta nucleoelectrica (dos más que en el año 2017), debido a que Turquía y Bangladesh comenzaron la construcción de sus dos primeras unidades de este tipo. Es así que, hasta el mes de julio de 2018, cincuenta (50) reactores se encontraban en construcción⁶ –16 de estos en China– (Schneider *et al.*, 2018); año en el cual hubo un incremento de diez (10) unidades en comparación con el mismo periodo del año 2017 (ver Figuras 1 y 2).

Cabe señalar que, dentro del rubro nucleoelectrico, son cinco países los que generan la mayor cantidad de energía, entre los cuales se tienen: Estados Unidos de Norteamérica, Francia, China, Rusia y Corea del Sur, los cuales generan en total el 70 % de la energía nuclear en el mundo, en donde dos países como Francia y los Estados Unidos de Norteamérica se agencian el 47.5 % de la producción global (Schneider *et al.*, 2018). Sin embargo, existe una marcada ausencia de la incorporación de nuevos proyectos en el año 2018, a excepción de la república de China (ver Figura 4), debido a diversas situaciones y contratiempos en algunos países.

Así mismo, se debe destacar que actualmente a nivel mundial la edad media de operación de los reactores se sitúa en alrededor de los 30 años (ver Figura 5), en donde más del 60 % (254 unidades) de los reactores tiene una vida de operación de 31 años o más, incluyéndose 77 unidades (18.5 %) que alcanzan los 41 años (o más) de operación (Schneider *et al.*, 2018). En este sentido, si todos los reactores fueran sacados de operación al llegar a los 40 años de vida útil (con excepción de 81 unidades las cuales se encuentran operando desde hace más de 40 años), el número de unidades operativas

⁶ El tiempo de construcción de las últimas 53 unidades sobre las cuales se tiene noticia, ha sido en promedio de 10.1 años (Schneider *et al.*, 2018).

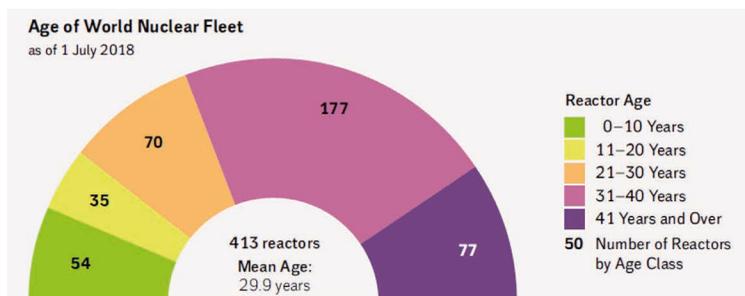
activas para finales del año 2020, serían de 12 unidades por debajo del total de las contabilizadas para el final del año 2017. Sin embargo, aunque todos los reactores que se encuentran actualmente en construcción lograsen terminarse, la capacidad total instalada disminuiría en alrededor de 2 GW. Entonces, siguiendo esta tónica, se tendrían que remplazar para la próxima década (2020 – 2030), 190 unidades (168.5 GW) una vez alcanzada su vida útil de operación (Schneider *et al.*, 2018).

4.2 Producción y demanda de uranio

En relación al combustible nuclear, el total de recursos recuperables e identificados hasta el primero de enero de 2017, ascienden a 6,142,000 toneladas de uranio metálico (tU) para la categoría de USD 130/kgU (USD 50/lb U₃O₈) –la cual ha crecido con respecto a lo reportado en el año de 2015 en un 7.4 %–; para la categoría más alta USD 260/kgU (USD 100/lb U₃O₈), el inventario se sitúa en 7,988,600 tU –el cual ha crecido en un 4.45 % en comparación a lo reportado en 2016 (NEA, 2018; NEA, 2016), reportándose también un incremento en las demás categorías–. En este sentido, los recursos asegurados (*Reasonably Assured Resources, RAR*)⁷ decrecieron de 3,255,100 tU en 2015 a 3,173,000 tU en 2017, principalmente debido a la reevaluación de los recursos probados de Kazajstán y la Federación Rusa (NEA, 2018), los cuales reportaron disminuciones significativas dentro del rubro, siendo que los países que mayoritariamente contribuyen a la producción de combustible nuclear a nivel mundial son Kazajstán, Canadá y Australia, como se deja entrever en la Figura 6.

Figura 5

Edad promedio de los reactores que conforman el parque mundial de nucleoelectricas.



Fuente: Schneider *et al.* (2018).

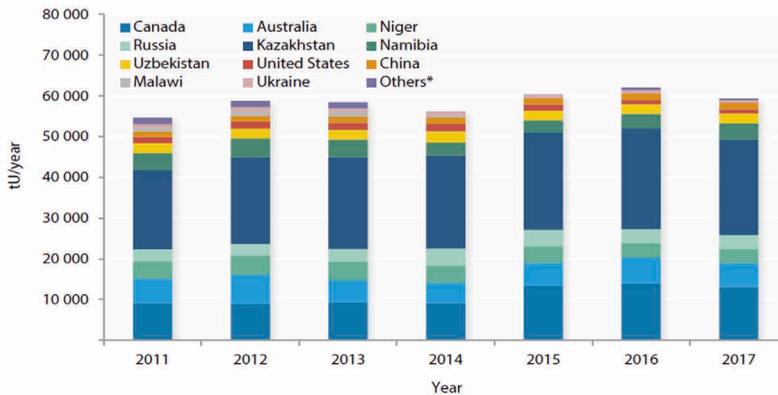
Es así que, hasta el primero de enero de 2017, la producción mundial anual de uranio ascendía a 62,071 tU. Para este mismo año, el 95 % de los requerimientos de uranio se obtuvo a partir de la producción primaria global (NEA, 2018), y el restante fue suministrado a través de las fuentes secundarias (el

⁷ Los recursos de uranio son clasificados bajo un esquema basado en la certeza geológica y el costo de producción, lo cual permite la estimación a partir de las fuentes de diversos países, de una forma global y armonizada (NEA, 2018).

suministro secundario incluye el exceso de la producción gubernamental, inventarios comerciales, del re-procesamiento del combustible gastado, uranio empobrecido –como resultado mezclas–, por mencionar algunas otras fuentes de abastecimiento). No obstante, históricamente la producción global raramente llega a suministrar el 100 % de los requerimientos⁸ de los reactores a nivel global⁹ (NEA, 2018), obteniéndose el resto a través de fuentes secundarias (excedentes) en el mercado del combustible nuclear (NEA, 2018).

Figura 6

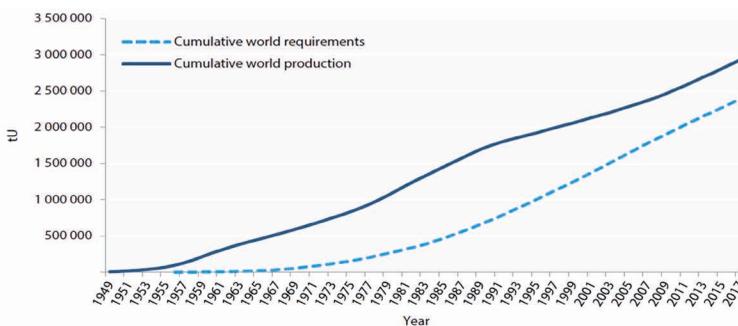
Producción mundial de uranio entre 2011 y 2017.



Fuente: NEA (2018).

Figura 7

Requerimientos y producción acumulada de uranio a través el tiempo (1949 – 2017).



Fuente: NEA (2018).

8 La capacidad de producción mundial no excede del 90 % del uranio requerido, y desde el 2003 ha variado entre el 70 % y el 95 % (NEA, 2006; NEA, 2018).

9 El suministro global fue del 90 % en 2015; del 80 % en 2013; del 75 % en 2011; del 76 % en 2007; y del 75 % en 2005, (NEA, 2018).

Es de esta forma que en la Figura 7 es posible observar los requerimientos anuales de combustible nuclear de forma global acumulada, en contraste con la producción mundial de uranio (fuentes primarias y secundarias) acumuladas, dejando entrever que a la fecha no ha existido un desabasto en el suministro de combustible nuclear. En relación al precio del combustible, este se ha mantenido en niveles aceptables y fluctuando de acuerdo al mercado, aunque en el año 2003 se produjo un incremento del precio del uranio debido a ciertos problemas específicos, como la dependencia de unas pocas instalaciones críticas en la cadena de suministro, y al encarecimiento del dólar utilizado para las transacciones internacionales para adquisición del actínido (ver Figura 8). Contribuyó a su estabilización la expansión de los programas de China, Rusia e India, así como el reconocimiento e involucramiento de diversos países productores y dependientes de la energía nuclear, como medio de aseguramiento de suministro eléctrico (e independencia energética), lo cual dio como resultado el fortalecimiento del mercado en dicho rubro (NEA, 2018). Bajo el marco anterior, resulta importante destacar que, al igual que el uranio, el torio puede ser utilizado como combustible nuclear¹⁰, ya que es posible que este sea utilizado con ese fin en algunos modelos de reactores de cuarta generación.

Figura 8

Dinámica del precio spot del uranio (2002-2017).



Fuente: NEA (2018).

El torio (Th) es un metal blanco plateado y radioactivo que se encuentra en pequeñas cantidades en la mayoría de las rocas y los suelos; se presenta con mayor frecuencia que el uranio sobre la corteza terrestre en forma de óxidos, silicatos, etc., acompañado generalmente de niobio y tantalio (NEA, 2016). Aunque no es fisiónable en sí mismo, cuando es cargado en el reactor nuclear, el ²³²Th absorbe los electrones necesarios para producir uranio ²³³U, el cual si posee propiedades fisibles (y es además de larga vida). Una gran parte del ²³³U se fisiónará en el reactor y el combustible utilizado puede ser

10 Diversos países han realizados pruebas experimentales tendientes a ello, como son: Alemania, los Estados Unidos de Norteamérica, Reunido Unido, Malasia, China y la India (NEA, 2016).

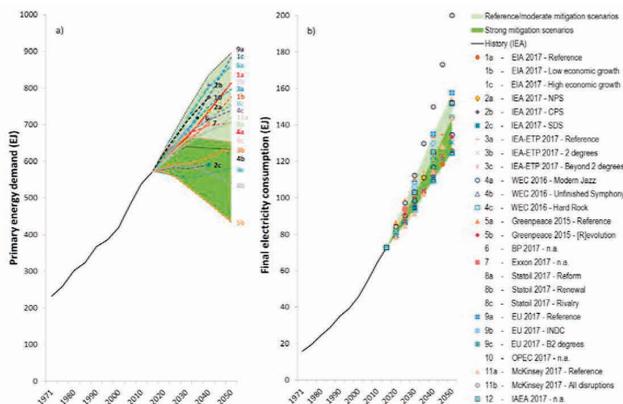
descargado del reactor y el ²³³U remanente puede ser químicamente separado del torio y utilizado como combustible en el reactor (NEA, 2016). En este sentido, el torio es o puede ser considerado potencialmente como combustible nuclear, siendo que en la práctica su proceso de extracción y transformación trae aparejados algunos beneficios y ventajas operativas; sin mencionar que, en la actualidad, al menos a nivel global hasta el año 2016, se habían identificado recursos potenciales de entre 6,355,300 y 6,372,300 toneladas de torio *in situ*.

5. Tendencias y escenarios globales

Existen diversas proyecciones sobre la demanda de energía, las cuales pronostican para el año 2020 la demanda primaria en un rango de los 430 y 900 exajoules (IAEA, 2014; IAEA, 2018) como se observa en la Figura 9. La figura muestra diversas proyecciones de la demanda futura de energía hasta el año 2050 (siendo alguno de estos más críticos que otros) partiendo de diversos años, en donde el crecimiento del consumo de electricidad se explicaría por la demanda residencial, la industria y el transporte principalmente (IAEA, 2018). Es por lo anterior, que diversos organismos se han planteado mantener de forma sostenida el aumento de la temperatura para la próxima centuria, y para que esta no rebase los 2 °C en promedio, plasmado en el acuerdo de Copenhague bajo el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IAEA, 2014), tomando como base la era preindustrial, por lo que las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), deberán controlarse a través de la utilización de fuentes de energía y/o de tecnologías cada vez menos contaminantes.

Figura 9

Proyecciones globales de demanda de: (a) Energía Primaria y (b) Consumo de electricidad.



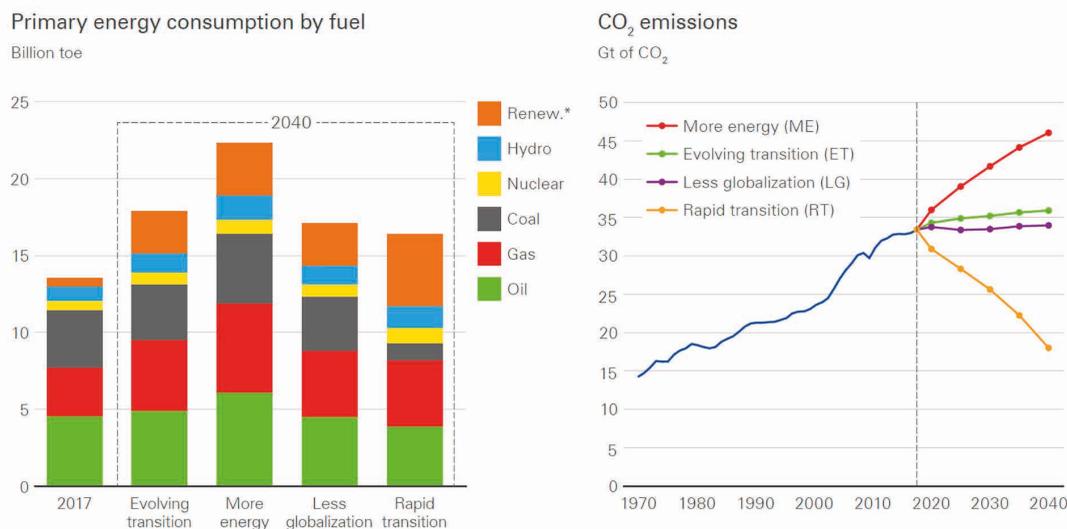
EJ — exajoule, *IEA* — International Energy Agency, *EIA* — Energy Information Administration, *NPS* — New Policies Scenario, *CPS* — Current Policies Scenario, *SDS* — Sustainable Development Scenario, *ETP* — Energy Technology Perspectives, *WEC* — World Energy Council, *EU* — European Union, *INDC* — Intended Nationally Determined Contributions scenario, *B2 degrees* — Beyond 2 Degrees scenario, *OPEC* — Organization of the Petroleum Exporting Countries, *n.a.* — not applicable.

Fuente: IAEA (2018).

De igual manera, BP (antes *British Petroleum*), desarrolló un panorama general (BP, 2019), en donde se plantean al menos cuatro escenarios para el año 2040, como son: 1) Más energía (more energy); 2) Menos globalización (*less globalization*); 3) Transición rápida (*rapid transition*); y 4) Evolucionando a la transición, lo cual es posible distinguir el porcentaje de participación en el mercado de energía por tipo de fuente generadora a partir del consumo de energía primaria (ver Figura 10, derecha). Del lado derecho de la Figura 10 se percibe la contribución en el aumento o decremento de GEI por cada uno de los escenarios, lo cual permite observar la emisión de CO₂ para cada una de las proyecciones (ver Figura 10, izquierda). Es así que, invariablemente del escenario que se analice (ver Figura 10), en todos ellos la energía nuclear presente un crecimiento en relación al año de referencia (2017). Sin embargo, BP (2019), espera en uno de sus escenarios, que decrezca drásticamente la utilización del carbón como fuente generadora de energía, previendo un crecimiento importante de las energías renovables (viento, solar, geotérmica, biomasa, biocombustibles, etc.), a través del tiempo.

Figura 10

Consumo de energía primaria por combustible.



Fuente: BP (2018).

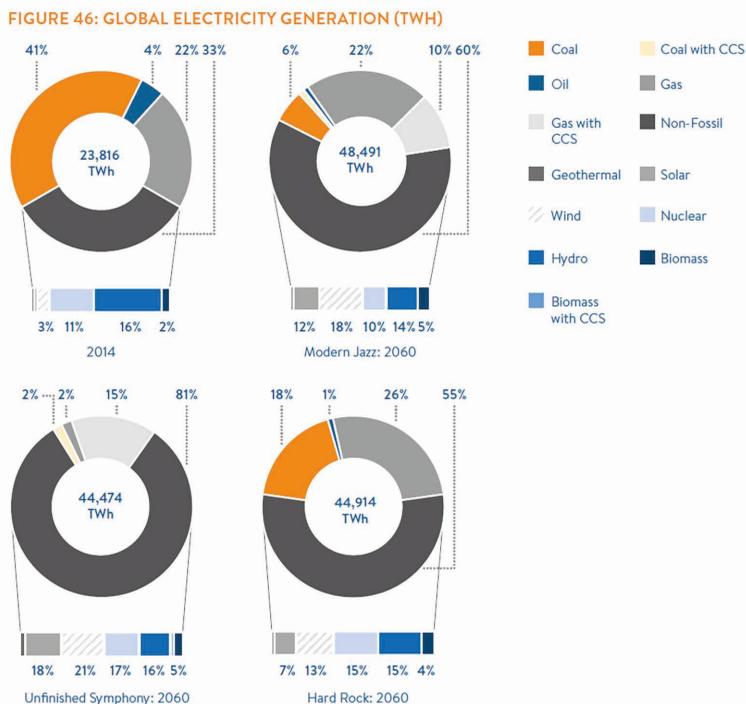
El World Energy Council (2016), desarrolló una proyección sobre el tema energético, teniendo como punto de partida el año 2014, con un horizonte de planeación de 46 años. En dichos escenarios¹¹ (Figura 11; Modern Jazz: 2060; Unfinished Symphony: 2060; y Hard Rock: 2060), fue posible

¹¹ Cada uno de estos escenarios posee ciertas particularidades y características clave que le otorgan una dinámica determinada (World Energy Council, 2016).

concluir que: 1) La demanda de energía primaria crecerá de forma sostenida en las próximas décadas; 2) La demanda de electricidad en el año 2060 podría ser de hasta el doble de la que se presentó en el año 2014; 3) La energía solar y la eólica, tendrán un crecimiento exponencial en los próximos años; 4) La demanda de carbón y de petróleo alcanzarán sus picos máximos; 5) Existirá una transformación y transición de forma global en el sector del transporte; 6) El combate al calentamiento global requerirá de grandes esfuerzos, incentivos y medidas para limitar la emisión de los GEI y no rebasar de 2° C de manera sostenida; y 7) Se requiere la cooperación global, un crecimiento sostenible económico y la innovación tecnológica para la resolución del trilema energético (seguridad energética, equidad energética y sostenibilidad ambiental). En la Figura 11 se advierte que en dos de los tres escenarios (Unfinished Symphony: 2060 y Hard Rock: 2060), se espera que el aporte de la energía nuclear se incremente en al menos seis puntos porcentuales (en promedio), en los próximos 46 años; y solamente un escenario (Modern Jazz: 2060), se proyecta no un crecimiento propiamente dicho, pero si un mantenimiento de la capacidad actual neta instalada, ya que al considerar que al ir aumentando la cantidad de energía primaria demandada, en esa misma proporción deberá ir aumentando la capacidad de generación a través del sistema nucleoelectrico como tal.

Figura 11

Generación energética global para los años 2014 y 2060 (TWh).

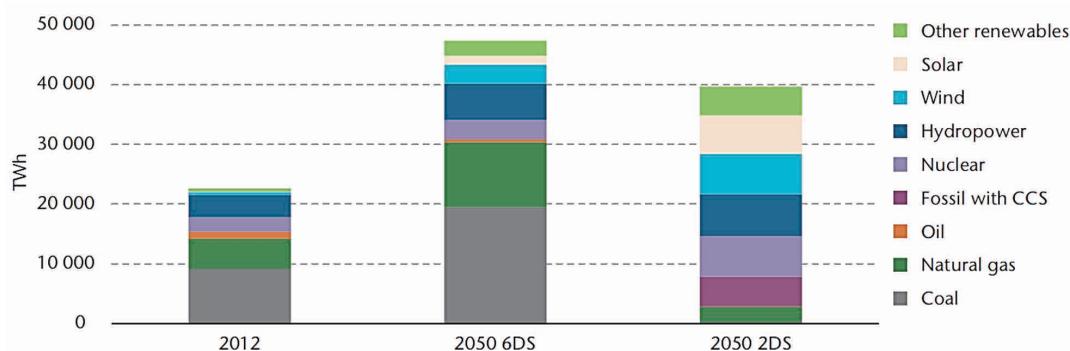


Fuente: Word Energy Council (2016).

De la misma manera, NEA (Nuclear Energy Agency) en su publicación Technology Roadmap (2015), realizó una proyección hasta el año 2050 sobre la generación eléctrica a nivel global bajo dos escenarios: el 6DS (mantener el incremento de temperatura, debido al calentamiento global, a niveles inferiores a 6° C de forma sostenida), y el 2DS (mantener el incremento de temperatura, debido al calentamiento global, a niveles inferiores a 2° C de forma sostenida); para ello propone una combinaciones de fuentes de producción (ver Figura 12), en la cual el escenario 2DS contempla que para alcanzar dicho objetivo, la generación de energía a partir de fuentes nucleoelectricas superaría los 930 GW, en donde dicha demanda se vería incrementada principalmente por países no miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE); denotándose además una utilización escasa de carbón y petróleo, para la generación de energía a nivel mundial según los escenarios planteados por la NEA (2015).

Figura 12

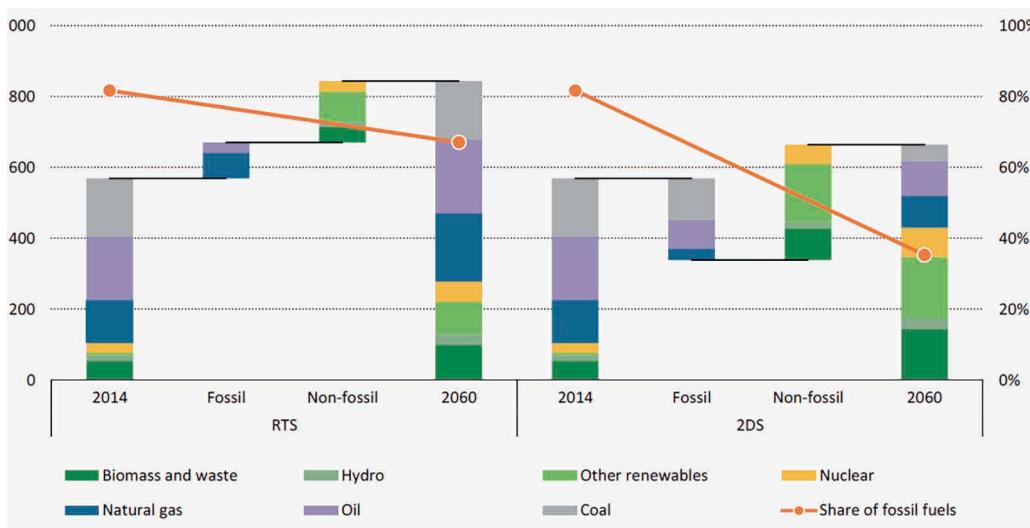
Producción de electricidad por tecnología bajo escenarios de 6DS y 2DS.



Fuente: NEA (2015).

Bajo este mismo marco, la International Energy Agency (NEA, 2015), proyecta dos escenarios posibles para el año de 2060, el RTS¹² y el 2DS, como se observa en la Figura 13. En dichos escenarios se analiza la participación de la toda la fuente de generación de energía; para el caso del escenario RTS, la energía nuclear representa el 7 % de la totalidad, sin embargo, para el escenario 2DS, esta representa el 12 % del total de la generación a nivel mundial contribuyendo en un 6% a la reducción de total de las emisiones a nivel mundial (NEA, 2015). Si se examina el escenario 2DS de la Figura 13, se verá que las fuentes renovables representan más del 50 % de la generación, en donde el rol de los combustibles fósiles decae considerablemente representando el 35 % del total, cayendo la utilización del carbón como fuente de generación de energía en un 72 %.

¹² Que incorpora las fuentes de generación actuales, considerando los intereses de los países de forma particular y tomando en cuenta las tendencias del mercado, las cuales no son consistente con los esfuerzos de mitigación del cambio climático, utilizando un enfoque “business as usual” (NEA, 2015).

Figura 13*Demanda primaria de energía en los escenarios de RTS y 2DS 2014 - 2060.*

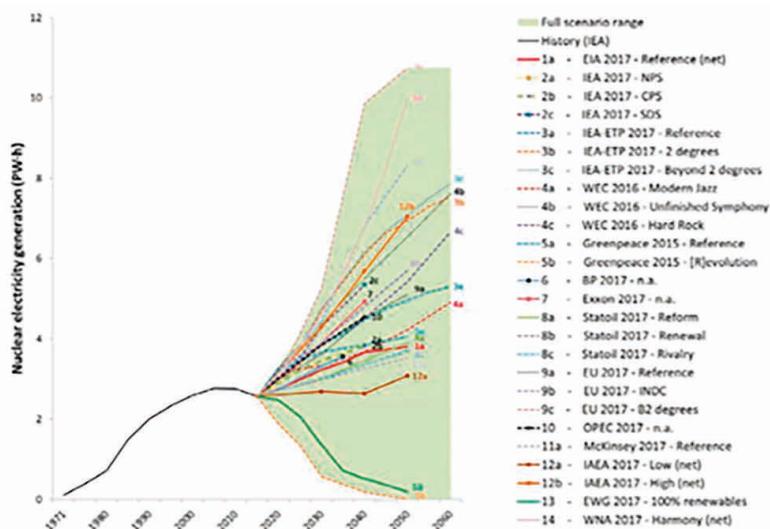
Fuente: NEA (2015).

De acuerdo a la IAEA (2018), después de plasmar diversas proyecciones y realizar un barrido de la mayoría de los escenarios de diferentes agencias e instituciones (26 proyecciones), (ver Figura 14), que consideraron diversas asunciones, políticas y expectativas sobre el desarrollo tecnológico, y la situación futura de la matriz energética a nivel global, concluye que la demanda de energía nuclear en las próximas décadas puede variar entre 0 y 11 petawatt·hora (PW·h); y que los valores extremos de las proyecciones están determinados por algunos objetivos aspiracionales que por interrelaciones y consecuencias plausibles. Así mismo, deja entrever que realmente el rango de las proyecciones es un intervalo mucho más cerrado, el cual se encuentra entre un rango de entre 3 y 7 PW·h en promedio, siendo que la IAEA (2017), pronosticó que la demanda de energía nuclear para el año 2050 se encontraría en el rango de 3.079 y 7.041 PW·h.

De todos los escenarios analizados, solamente seis agencias u organizaciones realizaron proyecciones hasta el año 2060, en donde el intervalo del pronóstico de generación eléctrica a partir de nucleoelectricas varía entre 4.98 y 7.85 PW·h. Cabe señalar que las proyecciones de estos organismos, agencias e instituciones seguirán cambiando a través del tiempo, de acuerdo a las agendas políticas y económicas globales, y a la dinámica del mercado mismo; sin embargo, el consenso del 81 % de las proyecciones, es que el rol de la energía nuclear será creciente en las próximas cuatro décadas, y que además está será una vía para contribuir a la mitigación del cambio climático y a la reducción de GEI's en el entorno mundial.

Figura 14

Generación de energía nuclear a partir de datos históricos (1971–2015) y diversas proyecciones (1971–2015).



Scenarios of nuclear electricity generation: historical data (1971–2015) and projections (2015–2060). Data sources: PW.h — petawatt-hour, IEA — International Energy Agency, EIA — Energy Information Administration, NPS — New Policies Scenario, CPS — Current Policies Scenario, SDS — Sustainable Development Scenario, ETP — Energy Technology Perspectives, WEC — World Energy Council, EU — European Union, INDC — Intended Nationally Determined Contributions Scenario, B2 degrees — Beyond 2 Degrees Scenario, EWG — Energy Watch Group, OPEC — Organization of the Petroleum Exporting Countries, WNA — World Nuclear Association, n.a. — not applicable.

Fuente: IAEA (2018).

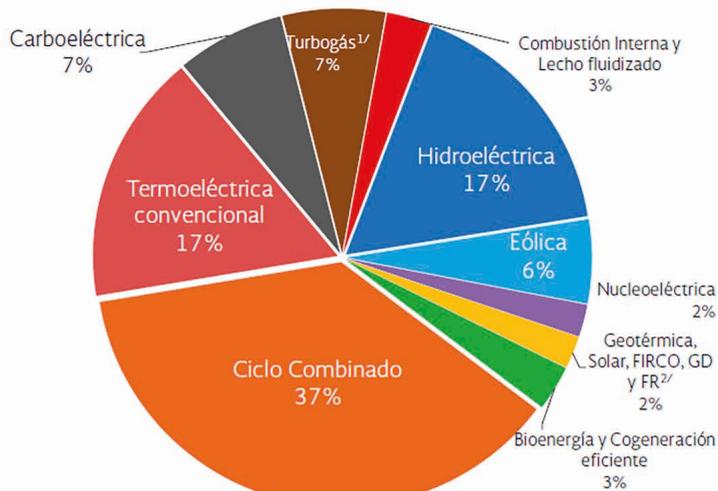
6. La energía nuclear en México

La Nucleoeléctrica de Laguna Verde se ubica sobre el golfo de México, en el municipio de Alto Lucero en Veracruz, iniciando su operación en el año de 1990. La instalación se encuentra compuesta de dos reactores (General Electric), del tipo BWR-5, con una contención tipo Mark II. Cabe destacar que en el año de 1976 se inició la construcción de la unidad I, la cual entró en operación hasta 1989; y la unidad II se inició en el año de 1977 y entró en funcionamiento hasta el año de 1995. La Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde actualmente posee una capacidad de generación total de 1.608 GW (ver Figura 15), la cual genera en promedio el 3 % de la energía eléctrica consumida a nivel nacional (SENER, 2018). Dicha capacidad de generación, deviene de un proceso de rehabilitación y modernización efectuado durante los años de 2010 y 2011, aumentando la capacidad de generación de cada una de las unidades a 805 MW¹³.

13 La potencia de las unidades se incrementó en 122.6 MW cada una (CFE, 2014).

Figura 15

Capacidad instalada por tipo de energía hasta el año 2017 (% de la capacidad total instalada).



^{1/} Incluye plantas móviles. ^{2/} Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) de varias tecnologías y Frenos Regenerativos (FR).

Fuente: SENER (2018).

En este sentido, la SENER, en su proyección hacia año 2032 (SENER, 2018), considera que la capacidad adicional para generación eléctrica se integrará por un 45 % de las tecnologías convencionales, y el restante 55 % será a través de tecnologías limpias (eólicas, solares, nucleares y cogeneración eficiente), en donde la generación energía a partir del sistema nucleoelectrico¹⁴ al menos debería de duplicarse para ese año (2032), considerando que la(s) nueva(s) central(es) se incorporarían a la red eléctrica nacional (entre 1 y 3) hasta el año 2029 (SENER, 2018; CFE, 2014), en donde la evolución de la generación de la energía eléctrica podría tener la dinámica observada en la Figura 16: viéndose un decremento en la utilización de los combustibles fósiles hacia el final del año de proyección (2032), y un aumento de la energía eólica, nuclear, ciclo combinado y la termosolar y la solar.

Así mismo, la SENER (2017), considera que la generación eléctrica a través de medios nucleoelectricos pasará de 10,925 GWh a 38,652 GWh¹⁵, representando un incremento del 353.8 % con respecto al año 2017, siendo importante recalcar que “(...) la inversión en plantas nucleoelectricas solo está

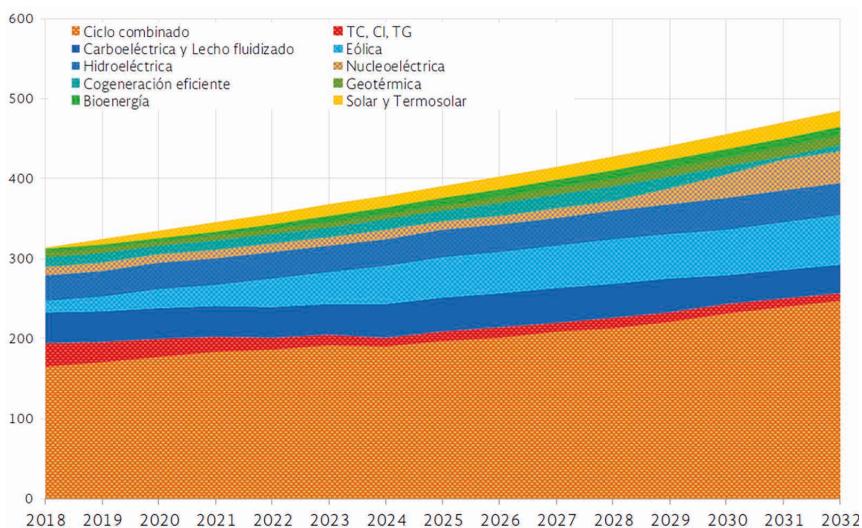
14 Una de las ventajas que poseen las nucleoelectricas, es la de tener vidas útiles de operación de hasta 60 años, lo cual permite una mejor amortización de la inversión (SENER, 2018), además que la emisión de GEI's y los valores unitarios de impacto de externalidades en la producción, poseen valor cero (CFE, 2014).

15 Generación total aportada por la generación de energía a través del sistema nucleoelectrico en el año 2017 (SENER, 2017).

permitida en las regiones de transmisión de Hermosillo, Huasteca, Veracruz y La Paz (...)", (SENER, 2017, p. 101), por lo que las regiones y la interoperabilidad de las redes podría estar de alguna forma ya definida en los planes estratégicos a largo plazo, en lo que al sector energético se refiere.

Figura 16

Proyección de la evolución de la generación de la energía eléctrica 2018-2032.



Fuente: SENER (2018).

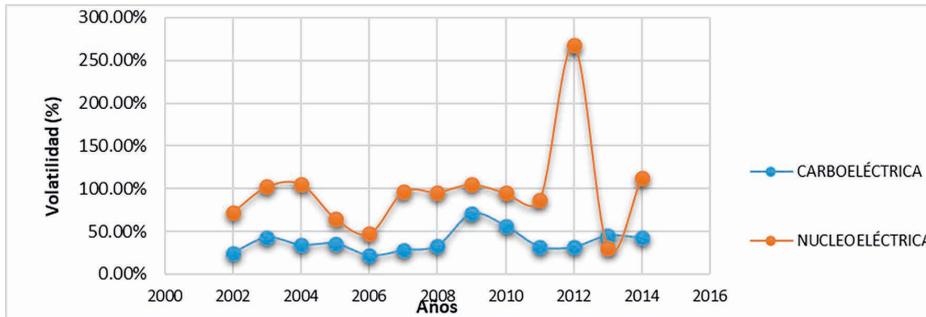
Dentro de esta dinámica, para el año 2032 de acuerdo a las proyecciones de la SENER (2017, 2018), y de la CFE (2014), lo que se espera es una reducción de la utilización de algunos combustibles fósiles dentro de la matriz energética a nivel nacional, todo ello con miras a alcanzar una mayor independencia energética de recursos, factores y agentes que puedan encarecer el precio de la energía o en determinado caso a limitar el suministro de los combustibles. La diversificación de la matriz energética conlleva también a desarrollar un balance equilibrado de los recursos renovables y no renovables con los que cuenta la nación, dando como resultado una mezcla óptima entre ingresos, recursos (inventario), sostenibilidad y la capacidad de inversión a largo plazo en función de la demanda futura de energía.

De igual forma, resulta importante recalcar que México es un país firmante de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992, cuyo objetivo es: (...) Lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático (...)" (Gobierno de México, 2019), sin que estas acciones sostenibles a través del tiempo no vayan en detrimento de los ecosistemas ni del desarrollo económico de las naciones. Además, México firmó en el año 2016, a través de la

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de esa época, el Acuerdo de París adoptado en la 21ª Conferencia de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, lo cual conlleva a considerar que la utilización y el incremento de la contribución a la generación de la energía nuclear dentro de la matriz de generación de energía nacional, resulta ser un eslabón importante dentro de los planes estratégicos dentro de un Plan de Nación a largo plazo. Sin embargo, Álvarez (2017), menciona que los flujos de efectivo de los ingresos totales por la venta de energía de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, han tenido un comportamiento irregular al momento de analizar la volatilidad anualizada en cada uno de los períodos desde el año 2002 hasta el año 2014 (ver Figura 17). Esto puede conllevar a inferir que la operación de la nucleoelectrica resulta ser irregular, y que ello podría deberse a problemas administrativos, presupuestarios y/o técnicos, es decir, la variabilidad de la volatilidad de los flujos de efectivo es un indicador que el sistema opera de forma subóptima. Así mismo, lo anterior podría estar en concordancia con el informe presentado por la World Association of Nuclear Operators (WANO), hace algunos años ante la Comisión Federal de Electricidad.

Figura 17

Volatilidad periódica anualizada de los flujos de efectivo de los sistemas de generación carboeléctrico y nucleoelectrico (2002–2014).



Fuente: Álvarez (2017).

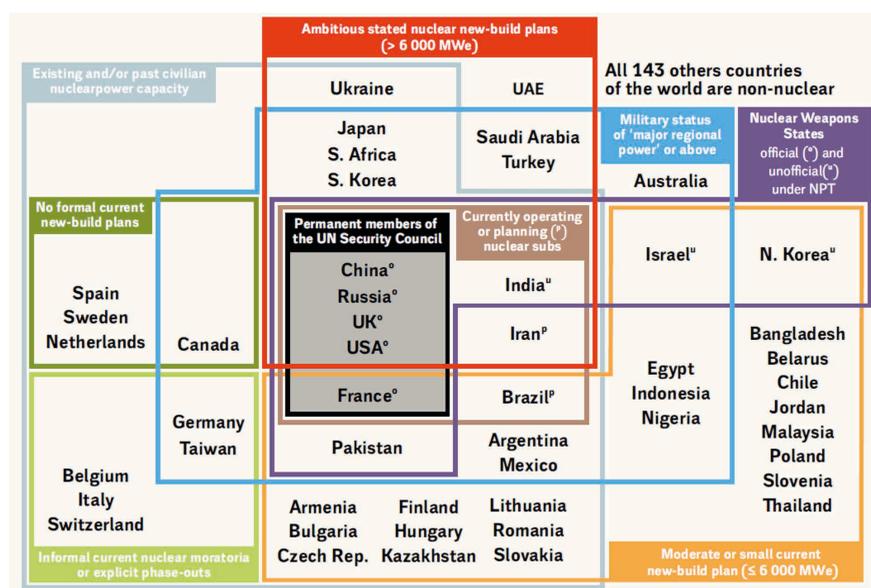
7. Consideraciones generales

La energía nuclear en México, en la actualidad resulta ser un activo estratégico de difícil remplazo, el cual es conveniente desarrollarlo y potenciarlo a largo plazo. La importancia estratégica de la que se hace referencia, se desprende de la Figura 18, ya que en esta es posible observar al menos tres elementos que resultan de especial importancia como son (ver los recuadros *Existing and/or past civilian nuclear power capacity*, *Moderate or small current new-build plan* y *Military status of major regional power or above*, en donde se enmarca la república mexicana): 1) La capacidad instalada que permite la diversificación; 2) Su potencial ampliación a mediano y largo plazo; y 3) Por su potencial uso con otros fines: militares y/o civiles.

La capacidad actual instalada (ver influencia de recuadro *Existing and/or past nuclear power capacity*, en la Figura 18), resulta de especial importancia si se considera que la matriz energética actual permite balancear las fuentes desde la generación misma, propiciando una mayor independencia energética ante los combustibles fósiles, sobre todo si se considera que la infraestructura energética de una buena parte de países en el mundo, se basa en el consumo masivo de combustibles fósiles no renovables, cuyo posible agotamiento y/o posible interrupción del suministro, y la volatilidad de su precio, obliga a realizar ajustes constantes en el precio de entrega del servicio.

Figura 18

Relaciones circunstanciales entre las ambiciones nucleares civiles reportadas por la World Nuclear Association (WNA) y diferentes categorías de estatus militar y geopolítico internacional.



Fuente: Schneider *et al.* (2018).

Desde esta perspectiva entonces resulta no solamente viable, sino también deseable, la inversión en proyectos nucleoelectrónicos que no solo propician la autonomía energética, sino que también a través del tiempo han venido presentando costos totales decrecientes en la generación¹⁶, además de reducir las emisiones de CO₂ y de materia particulada a la atmósfera, permitiendo, dicha tecnología, coadyuvar al cumplimiento de los tratados suscritos por México para la reducción de GEI's a nivel internacional.

16 USD 113.30 MWh promedio neto para 2013 según la CFE (2013); y USD 99.00 MWh promedio neto para 2015 según la CFE (2015).

En relación a su potencial ampliación a mediano y largo plazo (ver influencia del recuadro *Moderate or small current new-build plan* en la Figura 18), en el Reporte del Estatus dentro de la Industria Nuclear Mundial, Schneider *et al.* (2018), considera a México como un país que puede ser capaz de expandir su capacidad de generación de energía a través de medio nucleoelectrónicos hasta por 6 GWe (inclusive), dándose a la fecha algunos pasos para ello, tanto a nivel nacional, internacional (Schneider *et al.*, 2018). Lo anterior, entraría en concordancia con las estrategias proyectadas por la SENER (2018), tomando como base los escenarios posibles, técnicamente factibles y económicamente viables, en donde se considera que a mediano y largo plazo la inclusión de hasta tres nuevas centrales nucleoelectricas. Esto permitiría sostener no solo los acuerdos internacionales de reducción de GEI's, sino también el mantenimiento, a largo plazo, de una estrategia de no dependencia de combustibles fósiles, a través de la diversificación de la matriz de generación de energía a nivel nacional.

En referencia al uso potencial de la energía nuclear con otros fines que no sean la de generación eléctrica, ya sean estos militares y/o civiles (ver influencia del recuadro *Military status of major regional power or above*, en la Figura 18), cabe señalar que, a partir de la finalización de ciertos tratados, México ha empezado a desarrollar tecnología propia en dicho ramo, como lo son: 1) El diseño y fabricación de un fusil de asalto FX-05 *Xiuhcōatl*; 2) La construcción de embarcaciones militares de diversa índole a través de la industria naval militar; 3) La creación del Centro de Investigación y Desarrollo del Ejército y Fuerza Aérea de México; y 4) El desarrollo de la industria aeronáutica militar y su proyecto de fabricación de aviones de combate a largo plazo, por mencionar algunas. Es en esta industria militar, en donde la tecnología nuclear permitiría el desarrollo de sistemas de propulsión a través de medios nucleares (entre otros desarrollos), que darían a México una mayor ventaja competitiva y comparativa dentro del entorno geopolítico global, ya que conllevaría a ampliar su influencia y su peso específico dentro del entorno mundial, a través del desarrollo tecnológico de activos militares de difícil acceso para la mayoría de los países (ya que solamente 31 países a nivel global tienen acceso a la tecnología nuclear como tal).

Sin embargo, la incorporación de nuevos proyectos de generación de energía a través de nucleoelectricas, debe conllevar también a la revisión de la operación y administración del sistema nucleoelectrico actual, con el objeto de realizar un balance–diagnóstico de los desafíos, los problemas, las expectativas, los flujos de efectivo y las vías alternas de solución requeridas para la operación segura de dichos sistemas; debiéndose considerar de manera primordial la producción, el abastecimiento, la regeneración, el almacenamiento, la disposición, el reciclaje y la comercialización de los subproductos que giran en torno al ciclo del combustible nuclear. Todo ello con la finalidad de darle sostenibilidad a corto, mediano y largo plazo al proyecto de expansión, dentro del marco de los estándares internacionales y nacionales, y considerando a su vez el equilibrio del entorno ecológico y el bienestar de la población en general.

8. Referencias

- Álvarez F. (2017). Valuación de la viabilidad de un cambio tecnológico en México utilizando opciones reales, *Estocástica: Finanzas y Riesgo*, Volumen 7, número 1, enero - junio, pp. 89–121.
- Atomic Energy of USSR. (1986). *The accident at the Chernobyl AES and its consequences*. State Committee for Using the Atomic Energy of USSR, post accident review meeting, Moscow.
- Balra G. (1988). Ciclo del combustible nuclear. *Revista de Marina*, Año CIV, Volumen 105, Número 782, (enero–febrero), Chile.
- Beljansky A. (2014). *Centrales Nucleares, la seguridad relacionada al diseño de las mismas* (Tesis). Centro de Estudios de la Actividad Regulatoria Energética (CEARE), Argentina.
- British Petroleum, BP. (2019). *BP Energy Outlook: 2019 edition*. BP, UK.
- Christodouleas, J., Forrest, R., Ainsley, C., Tochner, Z., Hahn, S. y Glatstein E. (2011). Short-term and long-term health risks of nuclear-power-plant accidents. *The New England Journal of Medicine*, 364; 24 pp 2334 – 2341.
- Comisión Federal de Electricidad, CFE. (2013). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico*. COPAR 2013. Edición 32, México.
- Comisión Federal de Electricidad, CFE. (2014). *Programa de obras e inversiones del sector eléctrico*, POISE 2014 – 2018. México.
- Comisión Federal de Electricidad, CFE. (2015). *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico*. COPAR 2015, Edición 35, México.
- European Academies Science Advisory Council, EASAC. (2014). *Management of spent nuclear fuel and its waste*. EASAC policy report no. 23 JRC Reference Report.
- European Commission and the Belarus, Russian and Ukrainian Ministries on Chernobyl Affairs, Emergency Situations and Health. (1996). *The radiological consequences of the Chernobyl accident*. Proceedings of the first interhational conference Minsk, Belarus 18 to 22 March 1996.
- Feiveson, H., Mian, Z., Ramana, M.V. y von Hippel, F. (2011). *Managing spent fuel from nuclear power reactors: experience and lessons from around the world*. International Panel on Fissile Materials.

- Flores, V. (2011). *Estudio y caracterización de depósitos de metales nobles sobre superficies oxidadas similares a las del reactor de la Central de Laguna Verde (CNLV) U1 del tipo BWR* (Tesis). Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Gobierno de México. (2019). *Contexto Internacional en materia de cambio climático*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/contexto-internacional-17057>
- Goldberg, S. y Rosner, R. (2011). *Nuclear reactors: generation to generation*. American Academy of Arts and Sciences, Cambridge UK.
- González-Romero, E.M. (2012). *Reactores de generación IV: camino a la sostenibilidad a largo plazo de la energía nuclear*. Tecnología Nuclear Rev. 02.
- Hoa, M., Obbard, E., Burr, P. y Yeoha, G. (2019). *A review on the development of nuclear power reactors*. 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, 13–15 December 2018, Sydney, Australia, Energy Procedia 160 pp 459–466.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2011). *The nuclear fuel cycle*. International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2014). *Climate change and nuclear power 2014*. International Atomic Energy Agency, Austria.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2015a). *The Fukushima Daiichi accident: Technical volume 1/5 description and context of the accident*. International Atomic Energy Agency, Austria.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2015b). *The Fukushima Daiichi accident: report by the Director General*. International Atomic Energy Agency, Austria.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2017). *Climate change and nuclear power 2017*. International Atomic Energy Agency, Austria.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2018). *Climate change and nuclear power 2018*. International Atomic Energy Agency, Austria.
- International Energy Agency, IEA. (2019). *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
- Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko, S. y Takano, T. (2017).

Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Sci. Rep. 7, 8179. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08261-x>.

- Kim, S., Min, B., Park, K., Yang, B., Kim, J. y Suh, K. (2019). Estimation of long-term effective doses for residents in the regions of Japan following Fukushima accident. *Nuclear Engineering and Technology* 51 pp 837–842.
- Koarashi, J., Nishimura, S., Nakanishi, T., Atarashi-Andoh, M., Takeuchi, E. y Muto, K. (2016). Post-deposition early-phase migration and retention behavior of radiocesium in a litter-mineral soil system in a Japanese deciduous forest affected by the Fukushima nuclear accident. *Chemosphere*, 165, 335–341.
- Kom, a Y., Shibata, A. y Ashida, T. (2017). Radioactive contamination of several materials following the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Nuclear Materials and Energy* 10 pp 35–41.
- Kreusch, J., Neumann, W., Appel, D. y Diehl, P. (2006). Nuclear Fuel Cycle. *Nuclear Issues Papers*, No. 3, Heinrich Böll Foundation.
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Murata, A. y Kawano, T. (2015). Impact of Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific Ocean about ten months after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 140 pp 114 -122.
- Leal, C. (2009). *Análisis de expansión del sistema eléctrico nacional con la incorporación de reactores nucleares avanzados* (Tesis). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
- Massachusetts Institute of Technology, MIT. (2011). *The future of the nuclear fuel cycle, an interdisciplinary.* MIT study. Cambridge, MA, USA.
- Nuclear Energy Agency, NEA. (2006). *Forty years of uranium resources, production and demand in perspective.* Nuclear Energy Agency, Organisation For Economic Co-Operation and Development, Paris, France.
- Nuclear Energy Agency, NEA. (2015). *Technology roadmap: nuclear energy.* Nuclear Energy Agency, Organisation For Economic Co-Operation and Development, Paris, France.
- Nuclear Energy Agency, NEA. (2016). *Uranium 2016: resources, production and demand* (NEA No. 7301). Nuclear Energy Agency, Organisation For Economic Co-Operation and Development, Paris, France.

- Nuclear Energy Agency, NEA. (2018). *Uranium 2018: resources, production and demand* (NEA No. 7413). Nuclear Energy Agency, Organisation For Economic Co-Operation and Development, Paris, France.
- Nuclear Regulatory Commission. (1987). *NUREG 1250: Report on the accident at the Chernobyl Nuclear Power Station*. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Sanada, Y., Urabe, Y., Sasaki, M., Ochia, K. y Torii, T. (2018). Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192 pp 417–425
- Sánchez, C. (2007). El accidente de Chernóbil. revista de comunicación vivat academia, febrero, Año X · nº 82 · pp. 1-32. <http://dx.doi.org/10.15178/va.2007.82.1-32>.
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Johnstone, P., Katsuta, T., Ramana, M.V., Stirling, A., von Hirschhausen, C., Wealer, B. y Stienne, A. (2018). *The world nuclear industry status report: 2018*. A Mycle Schneider Consulting Project Paris, London, September.
- Secretaría de Energía, SENER. (2018). *Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional (PRODES-EN)*, México.
- Secretaría de Energía, SENER. (2017). *Prospección del sector eléctrico*. México.
- Tokyo Electric Power Company, TEPCO. (2012). *Fukushima nuclear accident analysis report*. Japan.
- The National Diet of Japan. (2012). *The official report of: The Fukushima nuclear accident independent investigation commission*. Nuclear Accident Independent Investigation Commission, Japan.
- Timofeev-Resovsky, N. V. (1957). An application of emissions and emitters in experimental biogeology. *Botanical Journal*, 42: 161-194.
- United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC. (2009). *Background: Chernobyl Nuclear Power Plant accident*. <https://www.hssl.org/?view&did=28414>
- Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Narita, K., Watanabe, M., Hatta, N., Ogata, Y., Morita, T. e Igarashi, S. (2016). Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: an update after five years. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164 pp 312–324.

Waddington, I., Thomas, P., Taylor, R. y Vaughanc, G. (2017). J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi. *Process Safety and Environmental Protection*, 112 pp 16–49.

World Energy Council. (2016). *World energy scenarios 2016: the grand transition*. Strategy and Paul Scherrer Institute, London, United Kingdom.

Yamaguchi, A., Jang, S., Hida, K., Yamanaka, Y., y Narumiya, Y. (2017). Risk assessment strategy for decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Nuclear Engineering and Technology*, 49, 442 – 449.