

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA NUCLEOELECTRICIDAD COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN

Beatriz HERNÁNDEZ MÉNDEZ*
Sergio SUÁREZ CONTRERAS**

SUMARIO: I. *Introducción.* II. *Antecedentes.* III. *Fisión nuclear.* IV. *Nucleoelectricidad.* V. *Nucleoelectricidad en el mundo.* VI. *Riesgos inherentes a la tecnología.* VII. *Nucleoelectricidad en México.* VIII. *La energía eléctrica y su contribución al cambio climático.* IX. *La nucleoelectricidad como energía limpia.* X. *Conclusiones.* XI. *Bibliografía.*

I. INTRODUCCIÓN

A partir del descubrimiento de la radiactividad y, posteriormente, de la fisión nuclear (en la cual se liberan grandes cantidades de energía mediante una reacción nuclear en cadena y controlada), la utilización de estos conceptos se ha aprovechado enormemente en múltiples aplicaciones de beneficio al ser humano, entre ellas la generación de electricidad. Ante el reconocimiento científico internacional del calentamiento global y la certeza en un 95% de que el ser humano es “extremadamente responsable” de ello, se han planteado objetivos globales, como los del desarrollo sostenible, y acuerdos internacionales entre países, como los establecidos en la COP 21 de París, enfocados a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y lograr un incremento de temperatura por debajo de los 2 °C al final del si-

* Maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Veracruzana; ingeniera industrial en Química por el Instituto Tecnológico de Veracruz; investigadora en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

** Maestro en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM); biólogo por la misma UAEM; profesionista en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

glo. Ya que el sector eléctrico es uno de los principales emisores de GEI, en este trabajo se presentan y analizan aspectos favorables y desfavorables de la energía nucleoeléctrica y su planteamiento como una opción viable para satisfacer los alcances en los plazos requeridos para la mitigación de emisiones de GEI, reconocida por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones del sector energético.

Lo anterior, a pesar del aumento en el desmantelamiento de los reactores más antiguos, la desfavorable percepción pública en ciertos estratos de algunos países y la necesidad del cese temporal ante el accidente de Fukushima, Japón, en 2011, el cual afectó para que el porcentaje de participación de la tecnología nuclear en la generación de electricidad disminuyera; sin embargo, éste se ha ido recuperando a partir de 2012 y el crecimiento en capacidad instalada ha sido prácticamente constante. La nucleoelectricidad es plenamente reconocida como una tecnología con emisión de CO₂ casi nula y de generación continua.

En materia de emisiones de GEI, diferentes análisis del ciclo de vida reportan una emisión promedio del orden de 15 gCO₂eq/KW, sólo mejorada por la tecnología hidroeléctrica y eólica; no obstante, estas mismas presentan factores de planta de 0.28 y 0.36, respectivamente, a diferencia de la nucleoeléctrica, en la cual el factor es de 0.8, lo que refleja que su operación no depende de recursos naturales variables por factores climáticos, como las renovables (hidroelectricidad y eólica). Por otro lado, el desarrollo científico y tecnológico en materia de reactores nucleares ha llevado a una tecnología conocida como “reactores rápidos”, que se encuentran dentro de la Generación IV. Estos reactores emplean el combustible usado para reducir sustancialmente en volumen los radionúclidos de vida larga en los productos de desecho, disminuyendo con esto las prácticas de almacenamiento geológico profundo y la intensidad de extracción y enriquecimiento del mineral de uranio, factores que hasta ahora le han restado bondades ambientales. Con ello, la nucleoelectricidad se presenta y discute como una opción de generación de energía limpia que requiere evaluar diferentes aspectos, los cuales se exponen en este capítulo, para su auge en México.

II. ANTECEDENTES

Demócrito (siglo V a. C.) estableció que la naturaleza está formada por partículas muy pequeñas e indivisibles llamadas “átomos”; muchos siglos después, Dalton, en 1808, formuló la teoría atómica, donde uno de los principios es

que la materia está formada por partículas indivisibles que no pueden crearse ni destruirse. Los átomos están constituidos por electrones, protones y neutrones, también llamadas “partículas subatómicas”; los neutrones y los protones se localizan dentro del núcleo y orbitando alrededor de él están los electrones. Por naturaleza, hay átomos donde el número de neutrones para un mismo elemento químico puede ser diferente; a cada una de estas variedades se les llama “isótopo”; un ejemplo es el uranio, con número atómico 92 e isótopos uranio 238 y uranio 235, que indican una masa atómica diferente entre sí y, por lo tanto, un número diferente de neutrones. Para este tipo de isótopos, la inestabilidad de su núcleo provoca que su masa emita energía, lo que se conoce como “radiactividad”,¹ la cual puede ser de tipo alfa, beta y gamma.

La radiación ionizante que se libera tiene suficiente energía para desplazar a los electrones fuera de la órbita, dando lugar a la “radiación beta”. Otro tipo de emisión puede ser de dos protones y dos neutrones, la cual se denomina “desintegración alfa”. Con frecuencia, el núcleo inestable (nucleido) está en un estado tan excitado que la emisión de partículas no es suficiente para estabilizarlo; entonces, genera una emisión intensa de energía en forma de radiación electromagnética, constituida por fotones, que se denomina “rayos gamma”.

En la actualidad, sabemos que la energía de la radiación puede dañar los tejidos vivos; en este sentido, la cantidad de energía que se deposita en el tejido vivo se expresa en términos de una magnitud denominada “dosis”, y la cantidad de dosis que se absorbe por kilogramo de tejido se denomina “dosis absorbida”, la cual se expresa en una unidad llamada gray (Gy).² Sin embargo, como los diferentes tipos de radiación pueden provocar mayor o menor daño, la dosis debe ser ponderada en función del tipo de daño biológico provocado; a esto se le llama “dosis equivalente” y se expresa en sievert (Sv).³

Una vez mencionado lo anterior, podemos ver en la tabla 1 y en la figura 1 los rangos de niveles de dosis absorbida y equivalente que presenta el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR, por sus siglas en inglés) y una comparación de dosis recibidas por diferentes fuentes.

¹ La radiactividad es el número de transformaciones nucleares de energía por unidad de tiempo, que se miden en desintegraciones por segundo, y se expresa en bequerelios (Bq).

² El gray (Gy) se usa para representar la dosis de radiación absorbida por unidad de masa en un determinado punto. La unidad es el julio por kilogramo (J kg⁻¹).

³ El sievert (Sv) es la unidad de medida de la dosis efectiva de la radiación ionizante, que toma en cuenta la sensibilidad relativa de distintos tejidos y órganos expuestos a la radiación. 1 Sv es equivalente a un julio entre kilogramo (J kg⁻¹), y un millisievert (mSv) es la milésima parte de un sievert (IAEA, Magnitudes y unidades de radiación).

TABLA 1

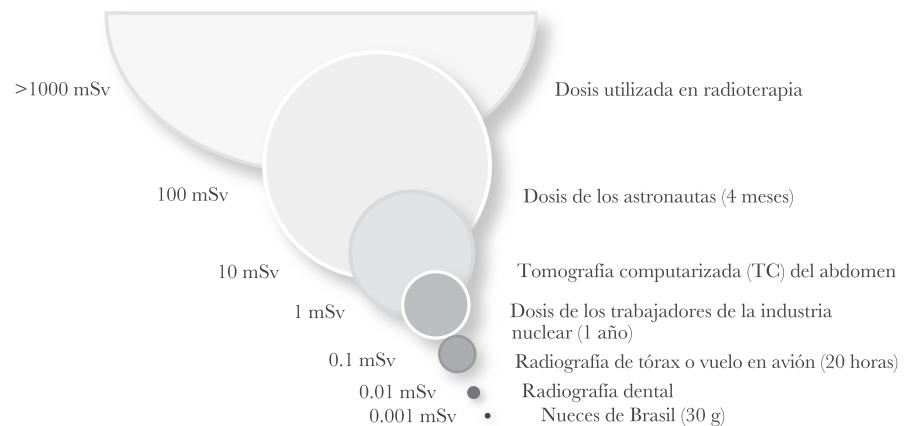
NIVELES DE DOSIS QUE ESTABLECE EL UNSCEAR

Rangos dosimétricos utilizados por el UNSCEAR		
Dosis alta	Más de ~ 1 Gy	Accidentes radiológicos graves (por ejemplo, el accidente de Chernobyl y sus efectos en los bomberos).
Dosis moderada	~ 100 mGy a ~ 1 Gy	Trabajadores de la operación de recuperación después del accidente de Chernobyl.
Dosis baja	~ 10 mGy a ~ 100 mGy	Múltiples tomografías computarizadas (TC).
Dosis muy baja	Menos de ~ 10 mGy	Radiografía convencional (es decir, sin TC).

FUENTE: PNUMA, 2016.

FIGURA 1

DOSIS RECIBIDAS POR DIFERENTES FUENTES



FUENTE: PNUMA, 2016.

Al quedar descubierto el fenómeno de la radiactividad, se le han dado diversas aplicaciones médicas en industria, agricultura, construcción e investigación.

III. FISIÓN NUCLEAR

Para poder obtener energía manipulando los núcleos de uno o varios átomos, podemos hacerlo de dos formas distintas, ya sea uniendo núcleos de átomos distintos (fusión nuclear) o partiendo núcleos de un mismo átomo (fisión nuclear); aquí el núcleo se divide en fragmentos con una masa casi igual a la mitad de la masa original más dos o tres neutrones.⁴

La suma de las masas de estos fragmentos es menor que la masa original. Esta “falta” de masa (alrededor del 0.1% de la masa original) se ha convertido en energía, según la ecuación de Einstein.⁵

En la fisión nuclear, provocada de manera artificial y controlada, a un átomo de un elemento químico de grandes dimensiones se le dispara un neutrón (partícula muy pequeña) a una cierta velocidad, lo cual provoca que el núcleo del átomo se rompa. Dado que los enlaces entre neutrones y protones dentro del núcleo son muy energéticos, se genera una reacción nuclear exotérmica (desprende energía térmica) en cadena.

Una reacción en cadena es un proceso mediante el cual los neutrones que se han liberado en una primera fisión nuclear producen otra fisión en, al menos, otro núcleo, el cual, a su vez, produce neutrones, y el proceso se repite (Fisión Nuclear, 2017).

Estas reacciones pueden ser controladas, como las que ocurren en las centrales nucleares, donde el objetivo es generar energía eléctrica de forma constante (Fisión Nuclear, 2017).

IV. NUCLEOELECTRICIDAD

El plutonio y el uranio 235 son materiales fisionables. De forma natural, el uranio 235 se encuentra presente en una pequeña fracción (menor al 1%) en el mineral de uranio. Un reactor puede funcionar tanto con uranio natural (con escaso contenido de material fisionable) como con uranio enriquecido,

⁴ Para cualquier elemento químico, dentro de su núcleo están los neutrones (n^0) y los protones (p^+), que sumados dan la masa atómica. Orbitando alrededor de él, están los electrones (e^-). Los p^+ y los e^- son de carga eléctrica positiva y negativa, respectivamente, y de igual número (número atómico); esto da un balance para que el átomo sea de carga eléctrica neutra. El núcleo es alrededor de la cienmilésima parte del tamaño de todo el átomo, pero es tan denso que su masa representa casi toda la masa del átomo.

⁵ $E=mc^2$. En esta ecuación, “E” corresponde a la energía obtenida; “m” es la masa de la que hablamos, y “c” es una constante, la de la velocidad de la luz: 299.792.458 m/s² (Fisión Nuclear, 2017).

el cual es uranio mineral que se ha tratado especialmente para aumentar su rendimiento concentrando el U-235. Como se ha mencionado, la fisión comienza cuando un neutrón a gran velocidad (neutrones térmicos con energías de milielectronvoltios⁶ y velocidades de 2,200 m/s) choca con el núcleo del uranio, provocando una reacción en cadena, que genera tres neutrones con energía del orden de megaelectronvoltios y velocidades de 1.4E⁰⁷ m/s; la energía disipada en forma de calor ocurre en fracciones de segundo. Esto ocurre en el núcleo del reactor, el cual se encuentra rodeado de una sustancia llamada “moderador”, que se utiliza para frenar la velocidad de los neutrones a 3,700 m/s, aproximadamente, y controlar la temperatura a 290 °C. Ello aumenta la probabilidad de choque con otros núcleos de uranio, ya que, como se mencionó, los neutrones provenientes de la fisión tienen una gran velocidad, que les dificulta chocar en contra de otros núcleos. Por lo tanto, es necesario frenarlos mediante el impacto con otras sustancias capaces de extraerles energía sin absorberlos (Energía Nucleoeléctrica, 2017).

En los reactores que emplean uranio enriquecido como elemento combustible, se utiliza agua común o grafito como moderador; en cambio, en los reactores que usan uranio natural (menos cantidad de núcleos fisionables), se utiliza agua pesada⁷ (Energía Nucleoeléctrica, 2017). Estos elementos constituyen un sistema de seguridad de la operación.

Otro sistema más, dentro del núcleo del reactor, son las barras de control, cuya función es controlar la potencia de la fisión. Estas barras son generalmente de boro o cadmio, un material que absorbe los neutrones que chocan en contra de ellas durante el proceso de fisión, evitando así que progrese la reacción en cadena.

El calor producido por la reacción nuclear evapora el agua, la cual, una vez convertida en vapor, pasa a una turbina que al girar permite que un alternador produzca la energía eléctrica. Este proceso es similar en cualquier planta termoeléctrica que use carbón, combustóleo o gas. A diferencia de ellas, en las nucleoeléctricas no se liberan emisiones de gases de efecto invernadero en la etapa de generación de electricidad, ya que no existe una combustión.

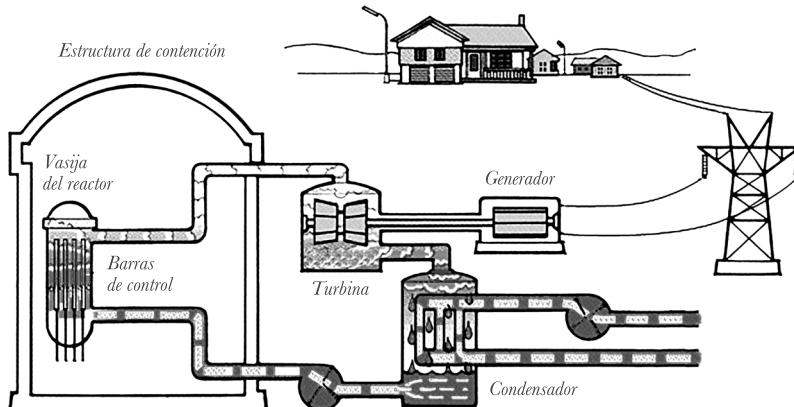
⁶ El electronvoltio es la energía que un electrón adquiere al pasar a través de una diferencia de potencial de exactamente un voltio y equivale a $1,602\,176\,565 \times 10^{-19}$ J. Un milielectronvoltio (meV) es la milésima parte de un electronvoltio (NASA, 2001).

⁷ El agua pesada está formada por dos átomos de deuterio 1 y un átomo de oxígeno (el deuterio es un isótopo del hidrógeno que posee un neutrón más en su núcleo; por lo tanto, es más denso) y es 100 veces más absorbente que el agua normal; por eso, se le emplea con uranio natural, el cual es deficiente en U-235. El agua ligera es el agua común (Aprea, 2013).

Durante la fisión de un átomo de U-235 se liberan en promedio 3 neutrones y del orden de 200 millones de electronvoltios de energía. Esto equivale a 50 millones de reacciones químicas de combustión. Cada combustión es del orden de 4 eV¹ (Energía Nucleoeléctrica, 2017).

Hablando específicamente del reactor, existen los que usan agua ligera, que también son conocidos como Boiling Water Reactor (BWR), y su funcionamiento se esquematiza en la figura 2.

FIGURA 2
ESQUEMA DE UN REACTOR BWR TRADICIONAL



FUENTE: Energía Nucleoeléctrica, 2017.

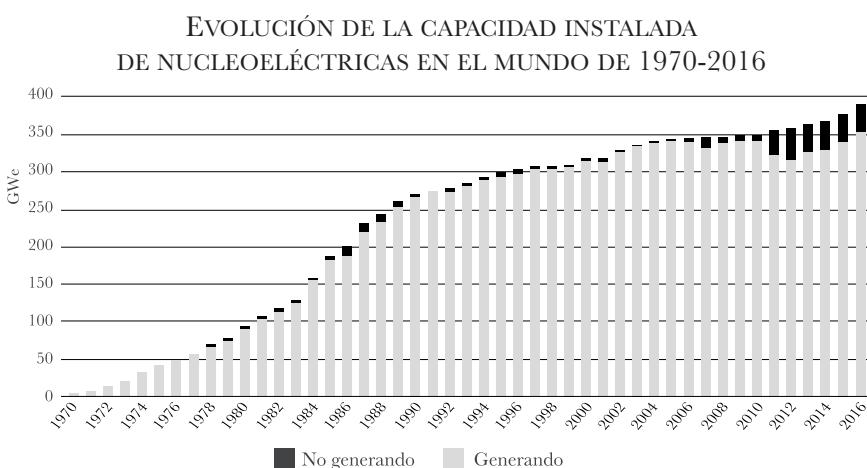
Aquí, el agua está a una presión aproximada de 75 veces la atmosférica y ebulle a 285 °C. Opera, como ya se ha mencionado, con las particularidades de la circulación que tiene el agua en el proceso (Energía Nucleoeléctrica, 2017).

V. NUCLEOELECTRICIDAD EN EL MUNDO

Los primeros reactores nucleares iniciaron su operación en la década de los cincuenta. En el mundo, la capacidad instalada de nucleoeléctricas ha crecido cada año desde su inicio hasta 2016, alcanzando 391 GWe.⁸ En la gráfica 1 se muestra esta evolución (WNA, 2017).

⁸ El gigawatt eléctrico (GWe) es la unidad de potencia en el Sistema Internacional de Unidades equivalente a mil millones de vatios (1,000,000,000 W) (Agencia Andaluza de la Energía, s.a.).

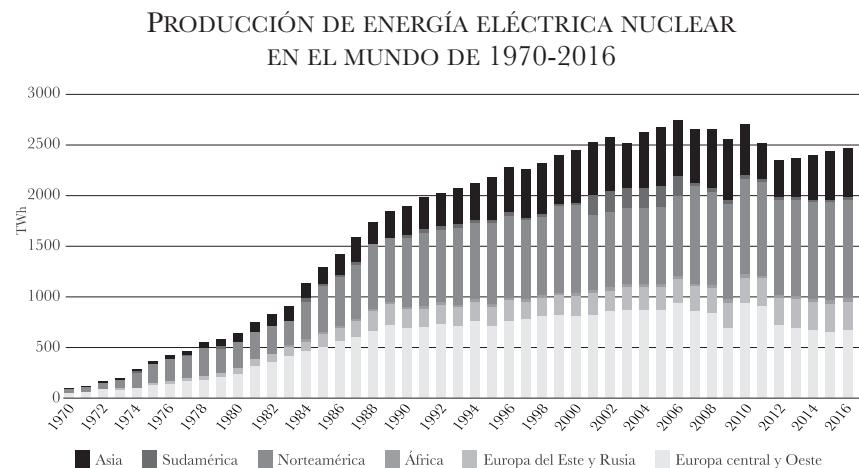
GRÁFICA 1



FUENTE: WNA, 2017a.

En cuanto a la producción global neta, ésta cayó drásticamente con el accidente en la Planta de Fukushima en Japón, en 2011; posterior a él, ha sido ascendente a partir de 2012, alcanzando los 2,476 TWh⁹ de electricidad (gráfica 2) (WNN, 2017).

GRÁFICA 2



FUENTE: WNA, 2017a.

⁹ El terawatt hora (TWh) es la unidad de potencia en el Sistema Internacional de Unidades equivalente a un trillón de vatios (1,000,000,000,000 W) (Agencia Andaluza de la Energía, s.a.).

Al 31 de diciembre de 2016 existían en el mundo 448 reactores operables y 61 en construcción, como se muestra en la tabla 2 (IAEA, 2017a).

TABLA 2
REACTORES OPERABLES Y EN CONSTRUCCIÓN
AL 31 DE DICIEMBRE DE 2016

País	Reactores operacionales		Reactores en paro a largo plazo		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2016	
	Número de unidades	Capacidad neta MW(e)	Número de unidades	Capacidad neta MW(e)	Número de unidades	Capacidad neta MW(e)	TW(e)-h	% Total
Argentina	3	1632			1	25	7.7	5.6
Armenia	1	375					2.2	31.4
Belarus					2	2218	NA	NA
Belgium	7	5913					41.4	51.7
Brazil	2	1884			1	1245	15.0	2.9
Bulgaria	2	1926					15.1	35.0
Canada	19	13554					95.7	15.6
China	36	31384			21	21622	197.8	3.6
Czech Rep.	6	3930					22.7	29.4
Finland	4	2764			1	1600	22.3	33.7
France	58	63130			1	1630	386.5	72.3
Germany	8	10799					80.1	13.1
Hungary	4	1889					15.2	51.3
India	22	6240			5	2990	35.0	3.4
Iran, Isl. Rep.	1	915					5.9	2.1
Japan	42	39752	1	245	2	2653	17.5	2.2
Korea, Rep. of	25	23077			3	4020	154.3	30.3
Mexico	2	1552					10.3	6.2
Netherlands	1	482					3.7	3.4
Pakistan	4	1005			3	2343	5.4	4.4
Romania	2	1300					10.4	17.1
Russia	35	26111			7	5520	184.1	17.1
Slovakia	4	1814			2	880	13.7	54.1
Slovenia	1	688					5.4	35.2
South Africa	2	1860					15.2	6.8
Spain	7	7121	1	446			56.1	21.4
Sweden	10	9740					60.6	40.0
Switzerland	5	3333					20.3	34.4
UAE					4	5380	NA	NA
UK	15	8918					65.1	20.4
Ukraine	15	13107			2	2070	76.1	52.3
USA	99	99869			4	4468	804.9	19.7
Total	448	391116	2	692	61	61264	2476.2	NA

FUENTE: IAEA, 2017a.

De la tabla anterior resalta que los países de Asia dominan el mercado de la construcción de reactores nucleares. De acuerdo con la World Nuclear Association, de diez reactores que entraron en operación durante 2016, ocho están localizados en Asia, incrementando la generación de energía eléctrica

en 11.5% con respecto a 2015 y 35% con respecto a 2012; estos incrementos significan dos veces más que hace treinta años. Para la India y Pakistán se ha aumentado más del doble en los últimos diez años y para China más del triple, siendo éste el país con el programa nucleoeléctrico más ambicioso, invirtiendo fuertes sumas de dinero para este tipo de energía, pero menos que para energías renovables (IAEA, 2017a; WNA, 2017a).

Actualmente, la región de Asia contribuye con el 18% de la generación de nucleoelectricidad a nivel global. Japón, con posterioridad al accidente de 2011, suspendió la actividad nuclear, reiniciándola en 2015, de tal manera que hoy en día operan sus 42 reactores y se consideran dos para construcción. No obstante, países como Alemania han interrumpido esta tecnología, y actualmente en esta nación sólo operan ocho reactores. Francia y España han anunciado el cese de algunos reactores; sin embargo, esta acción aún no figura en los datos que reporta la Agencia Internacional de Energía Atómica, órgano regulador a nivel mundial. Por otro lado, en la actualidad 16 países generan al menos 25% de su electricidad a través de plantas nucleares. Francia genera electricidad por esta tecnología en un 75%. Por su parte, Bélgica, República Checa, Finlandia, Hungría, Eslovaquia, Suecia, Suiza, Eslovenia y Ucrania generan más del 30%, al igual que el Sur de Corea y Bulgaria. Japón generaba más del 25% antes del accidente y se espera que regrese a este nivel. Algunos países nuevos que han incorporado nucleoeléctricas son Turquía, Bielorrusia, la Federación de Rusia, Bangladesh, Polonia y los Emiratos Árabes Unidos, este último reconocido como potencia petrolera. En conclusión, al 2016 el balance entre cierres y aperturas de reactores nucleares para generación de energía eléctrica ha sido positivo a partir de 2013 (WNN, 2017; WNA, 2017b).

VI. RIESGOS INHERENTES A LA TECNOLOGÍA

Actualmente, además de la seguridad en los procesos, es prioritario el aspecto ambiental en la generación de electricidad. En el caso de la nucleoelectricidad, el diseño, construcción, explotación y evaluación de la seguridad de las centrales se basa en ciencia y tecnología modernas, que requieren personas e instituciones con capacitaciones específicas y de alto nivel, lo que demuestra la expansión y establecimiento de esta tecnología en países con un sólido desarrollo científico y tecnológico.

La nula liberación de GEI (dióxido de azufre, monóxido de carbono y metano) deja de ser un atributo importante en la percepción pública, sub-

jetiva y ligada en muchos países ante peligros y consecuencias a la salud, los cuales generalmente se consideran como costos externos (cuantificables, pero no transmitidos al consumidor, sino que son sufragados por la sociedad en general). Cabe mencionar que la producción de electricidad a partir de cualquier forma de energía primaria tiene algún efecto ambiental y algunos riesgos. Una evaluación equilibrada y justa de la energía nuclear requiere una comparación de sus efectos ambientales con otras opciones, considerando los costos de los desechos y el desmantelamiento internalizados en la economía de la tecnología.

Desde el punto de vista ambiental, las distintas aproximaciones tecnológicas a la problemática de los residuos aún suscitan controversias científicas, el reprocesado de combustibles sólo acorta el periodo de riesgo y el almacenamiento geológico tiene serios cuestionamientos técnicos. No obstante, el bajo volumen de residuos que se generan en la nucleoeléctrica, en comparación con algunas otras tecnologías, sigue siendo un aspecto importante y, además, costoso desde el punto de vista de gestión. “La ciencia y la tecnología se encaminan hacia un tipo novedoso de reactores conocidos como reactores rápidos que funcionan en un ciclo de combustible cerrado, con la expectativa de proporcionar energía durante miles de años y aliviar las preocupaciones sobre los desechos”, dice Stefano Monti, jefe de equipo de la Sección de Desarrollo de Tecnología de Reactores Rápidos del OIEA en el Departamento de Energía Nuclear. Los reactores rápidos consumen el material que de otro modo se consideraría como “combustible gastado” y con ello se reduce el volumen total de material nuclear que debe considerarse y, por lo tanto, gestionarse como desecho.

Además de los prototipos y reactores en prueba, existen seis operando en el mundo y, en la actualidad, en la Federación de Rusia opera el reactor rápido comercial más potente (BN-600 en Beloyarsk). Recientemente lanzó un “Programa Federal Objetivo”, titulado “Tecnologías de energía nuclear de nueva generación para 2010-2015” con Outlook hasta 2020, destinado al desarrollo de varias tecnologías de reactores rápidos, así como a los ciclos de combustible relacionados. Existen programas para desarrollar e implementar sistemas innovadores de energía nuclear rápida en China, Francia, India, Japón, la República de Corea y la Federación de Rusia, entre otros países (IAEA, 2013).

En cuanto a los riesgos para la salud ocupacional, tradicionalmente se han medido en términos de accidentes inmediatos, en especial en tasas de mortalidad. Sin embargo, hoy en día, y particularmente en relación con la energía nuclear, se hace mayor hincapié en los efectos menos obvios o re-

tardados de la exposición a sustancias inductoras de cáncer y radiación.¹⁰ Tomando en cuenta estadísticas de accidentes de trabajo en los últimos 50 años de energía nuclear en América del Norte y Europa, comparada con la generación de electricidad a partir de carbón y otros, se muestra que la energía nuclear es más segura, como se observa en la tabla 3.

TABLA 3

COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES
EN PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA

Combustible	Fatalidades inmediatas 1970-1992	¿Quién?	Muertes normalizadas por TWy*
Carbón	6,400	Trabajadores	342
Gas natural	1,200	Trabajadores y público	85
Hidro	4,000	Público	883
Nuclear	31	Trabajadores	8

* Base: por millón de MWe operando en un año. El dato en esta columna fue publicado en 2001. FUENTE: WNA, 2013.

Por otro lado, en cuanto a los efectos de la radiación, la exposición personal se mide en millisieverts (mSv). En la mayor parte del mundo, los niveles de exposición de fondo por persona alcanzan hasta 3 mSv/año. Los ciudadanos de Cornwall, Reino Unido, reciben un promedio de aproximadamente 7 mSv/año. Cientos de miles de personas en India, Brasil y Sudán reciben hasta 40 mSv/año.

Se conocen varios lugares en Irán, India y Europa en donde la radiación de fondo natural representa una dosis anual de más de 50 mSv, y en Ramsar, Irán, puede ser hasta de 260 mSv. Las dosis de por vida de la radiación natural pueden llegar hasta varios miles de millisieverts. Sin embargo, no hay evidencia de un aumento de cánceres u otros problemas de salud derivados de estos niveles naturales. Por su parte, la dosis de radiación cósmica varía

¹⁰ Un accidente es todo suceso involuntario, incluidos errores de operación, fallos del equipo u otros contratiempos, cuyas consecuencias, reales o potenciales, no sean despreciables desde el punto de vista de la protección o de la seguridad tecnológica. Por otro lado, un accidente nuclear es todo accidente relacionado con instalaciones o actividades que ocasione, o sea probable que ocasione, una emisión de material radiactivo, y que resulte, o pueda resultar, en una emisión transfronteriza internacional que pueda tener importancia desde el punto de vista de la seguridad radiológica para otro Estado.

con la altitud y la latitud: la tripulación aérea puede recibir hasta 5 mSv/año de sus horas en el aire, mientras que los viajeros frecuentes pueden obtener un incremento similar. En contraste, los ciudadanos del Reino Unido reciben aproximadamente 0.0003 mSv/año por parte de la generación de energía nuclear.

En el accidente de Chernóbil, un gran número de personas estuvieron expuestas a niveles de radiación fuera de orden, pudiéndose conocer valores muy aproximados de las dosis reales. En el accidente de Fukushima, pocos trabajadores estuvieron expuestos a niveles altos de radiación. Después de 18 meses del accidente, los hallazgos preliminares del UNSCEAR muestran que no se han observado efectos de radiación en la salud derivados del accidente de Fukushima entre el público o los trabajadores.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency [IAEA]) establece una Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (International Nuclear Events Scale [INES]), que es un instrumento a nivel global para comunicar al público información sistemática acerca de la importancia de los sucesos nucleares y radiológicos desde el punto de vista de la seguridad (IAEA, 2016a).

La escala INES aplica para una amplia gama de actividades, como el uso industrial y médico de fuentes de radiación, instalaciones nucleares y transporte de materiales radiactivos. Con base en esta escala, los sucesos se clasifican en siete niveles: del uno al tres se denominan “incidentes”¹¹ y del cuatro al siete se habla de “accidentes”. Cada ascenso de un nivel a otro en la escala indica una gravedad diez veces superior. Cuando los sucesos no son importantes desde el punto de vista de la seguridad se les denomina “desviaciones” y se clasifican debajo de la escala, o sea, en el nivel 0 (IAEA, 2016a). La escala INES considera tres áreas de impacto:

- 1) *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.

¹¹ El incidente es todo suceso no intencionado, incluidos los errores de funcionamiento, los fallos del equipo, los sucesos iniciadores, los precursores de accidentes, los cuasiincidentes y otros contratiempos, o acto no autorizado, doloso o no, cuyas consecuencias reales o potenciales no son despreciables desde el punto de vista de la protección o la seguridad tecnológica. Por su parte, el incidente nuclear es cualquier hecho o sucesión de hechos que tengan el mismo origen y que hayan causado daños nucleares o que, sólo con respecto a las medidas preventivas, hayan creado una amenaza grave e inminente de causar tales daños (IAEA, 2007).

- 2) *Barreras y controles radiológicos.* Se refiere únicamente al interior de grandes instalaciones. Se alude a niveles altos de radiación no previstos y liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos confinados en las instalaciones.
- 3) *Defensa en profundidad.* Se refiere a las medidas establecidas para prevenir accidentes que no funcionen conforme a lo previsto (IAEA, 2016a).

En el mundo sólo dos accidentes han alcanzado el nivel siete en la escala INES, aunque con diferentes características: Chernóbil en 1986 y Fukushima en 2011. El nivel 7 establece “impacto en las personas y el medio ambiente” (IAEA, 2017b).

De 1944-2000, antes de Fukushima, 417 accidentes de radiación por diferentes actividades, incluido el sector nucleoeléctrico, produjeron la sobreexposición significativa de al menos una persona; esta sobreexposición es cuando la dosis absorbida en todo el cuerpo es superior a 0.25 Gy, 6 Gy a la piel, o 0.75 Gy a cualquier otro órgano. Entre 3,000 personas sobreexpuestas se registran 127 muertes en 57 años. Aquí se incluye a 28 operadores y bomberos que tuvieron una exposición fatal en Chernóbil en abril de 1986 (Turai y Veress, 2001).

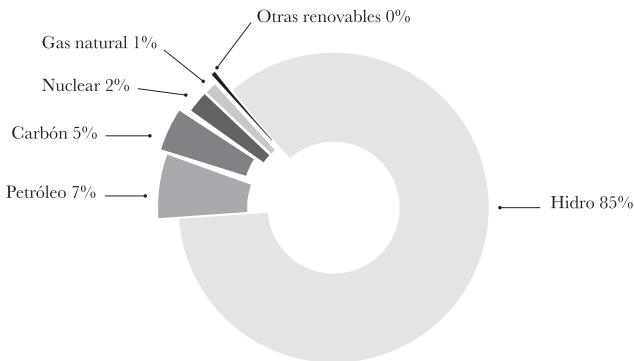
Por otro lado, para el caso de Fukushima, las muertes son atribuidas al tsunami y no al accidente en la planta nuclear. El UNSCEAR cita que “no se han observado muertes o enfermedades graves relacionadas con la radiación entre los trabajadores y la población general expuestos a la radiación a raíz del accidente” (IAEA, 2015; ONU, 2013).

Un estudio reciente evaluó el riesgo de accidentes utilizando un conjunto de datos históricos de 1874-2014 para 11 sistemas de energía: biocombustibles, biomasa, carbón, geotermia, hidroelectricidad, hidrógeno, gas natural, energía nuclear, petróleo, energía solar y energía eólica. El estudio mostró que de un total de 1,100 accidentes resultaron más de 210,000 muertes y casi 350,000 millones de dólares en daños a la propiedad. El estudio reveló lo siguiente: la energía eólica fue la más frecuente en suceder en un accidente; las represas hidroeléctricas fueron los lugares donde más accidentes fatales ocurrieron, representando el 85% de las muertes, y los accidentes de energía nuclear son, con mucho, los que resultaron más caros, representando el 70% en costo de los daños (gráficas 3 y 4).

GRÁFICA 3

PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN DE DIFERENTES
TECNOLOGÍAS EN ACCIDENTES CON MUERTES

Muertes ($n=211,529$)

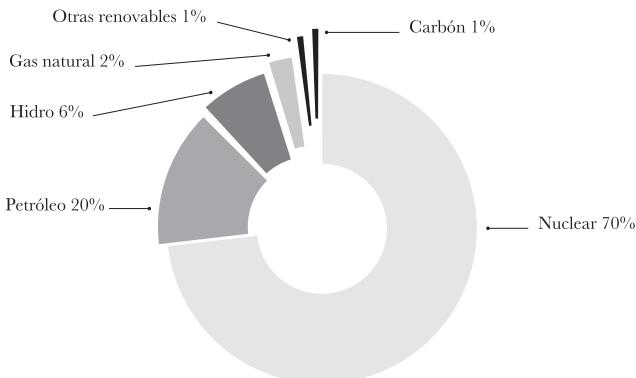


FUENTE: Sovacool *et al.*, 2015.

GRÁFICA 4

PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN DE TECNOLOGÍAS
EN COSTOS DE ACCIDENTES

Total de daños ($n=\$344.4$ billion)



FUENTE: Sovacool *et al.*, 2015.

Con los argumentos citados parecería que las centrales nucleares son suficientemente seguras; sin embargo, la sociedad no lo percibe así y los expertos advierten que la bondad de los resultados obtenidos depende de las incertidumbres de los datos de entrada y del conocimiento de los fenómenos que desencadenan los accidentes graves. Reducir las incertidumbres es tarea difícil y costosa.

VII. NUCLEOELECTRICIDAD EN MÉXICO

La Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) fue establecida en 1956 para allanar el camino en la introducción de la energía nuclear y las aplicaciones nucleares en México. La CNEN abarcaba todas las actividades nucleares en el país (exploración de uranio, investigación nuclear, regulación, etcétera), pero la generación de electricidad por medios nucleares es y ha sido responsabilidad exclusiva de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (IAEA, 2016b).

Más tarde, la CNEN se transformó en el Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN), que redefinió los atributos, pero con muy pocos cambios. En 1979, el INEN fue reemplazado por tres organizaciones: el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), a cargo de todos los aspectos relacionados con la investigación; Uranio Mexicano (Uramex), a cargo de la exploración y producción de uranio, y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), a cargo de la regulación y salvaguardas nucleares. En 1985, Uramex se disolvió y todas sus funciones pasaron a la Secretaría de Energía (IAEA, 2016b).

El interés de México en la energía nuclear se remonta a principios de los sesenta. Los primeros pasos concretos se tomaron en 1966, cuando se llevó a cabo una investigación preliminar de sitios potenciales para centrales nucleares, y, al final de la década, el gobierno concluyó que las plantas de energía nuclear podrían jugar un papel importante. Así, en 1976 se inició la construcción de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV), hasta ahora la única en su tipo, situada en la costa del Golfo de México, en el municipio de Alto Lucero, en el estado de Veracruz. La CNLV cuenta con una capacidad instalada de 1,608 MWe, que en 2016 generó el 3% de la energía eléctrica total nacional, esto es, 10,567 GWh. La primera unidad entró en operación comercial en julio de 1990 y la segunda lo hizo en abril de 1995. Los reactores de Laguna Verde tenían una capacidad original de 654 MWe cada uno, pero en 2010 se actualizaron a 805 MWe. En 2014 se

generaron 9,677.208 GWh, equivalente al 3.2% de la generación total en el país, y se evitó la emisión nacional de 6 a 8 millones de toneladas de CO₂ (IAEA, 2016b).

Actualmente, el uranio se compra como hexafluoruro o como un concentrado que se convierte en hexafluoruro por la empresa Tenex de la Federación de Rusia, a través de un contrato a largo plazo; el enriquecimiento es proporcionado por la empresa Nukem en el Departamento de Energía de los Estados Unidos, también a través de un contrato a largo plazo, y la fabricación de combustible se realiza en Estados Unidos de América por Global Nuclear Fuels American.

CFE ha sido autorizado por la Secretaría de Energía para negociar compras y enriquecimiento de uranio, así como fabricación de combustible (IAEA, 2016b).

En cuanto al combustible nuclear gastado, éste se almacena en las piscinas de los reactores, y se planea utilizar una instalación independiente de almacenamiento de combustible gastado; también cuenta con un depósito provisional de sus desechos radiactivos de nivel bajo operado por la misma Central (IAEA, 2016b).

La CNLV es propiedad de CFE y su personal realiza la operación y el mantenimiento. En el pasado, la capacitación de operadores del reactor se llevó a cabo en varias instalaciones similares en España y Estados Unidos de América. Hoy en día, la capacitación se realiza principalmente a nivel local, utilizando el simulador de la operación de los reactores con fines de capacitación; este simulador se encuentra instalado dentro de la planta y funciona bajo las mismas condiciones operativas de los reactores reales (IAEA, 2016b; Fernández de la Garza *et al.*, 2009).

México no produce uranio debido al bajo costo que presenta en el mercado mundial; en este sentido, se han identificado unas 1,300 toneladas de reservas de uranio en el país, pero la explotación es económicamente inviable (IAEA, 2016b).

VIII. LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y SU CONTRIBUCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La energía es un factor clave para el desarrollo económico de la sociedad; las estrategias en este sector que se toman en los países se encuentran alineadas con los Acuerdos de París de noviembre de 2016, que marcan esfuerzos para combatir el cambio climático (IEA, 2016; IEA, 2017a).

El crecimiento en la demanda energética está relacionado directamente al incremento de la población, la cual, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, se proyecta que pase de 7.3 billones en 2015 a 9.2 billones de habitantes en el mundo en 2040 (IEA, 2016; IEA, 2017a).

La producción total de energía primaria en el mundo pasó de ser de 6,100.99 a 13,647.37 MMTep (millones de toneladas equivalente de petróleo) de 1973 a 2015, lo que representa un 111.8% de incremento. Por otro lado, el consumo mundial de energía pasó de ser de 4,661.19 a 9,383.6 MMTep; en este consumo, la electricidad participó de 9.4% a 18.5% (un incremento del 98.4%) (IEA, 2016; IEA, 2017a).

En este sentido, México requerirá para 2040 un total de 10,000 millones de dólares anuales para cubrir el aumento de 85% de la demanda de electricidad, por lo que, además de la inversión, el impacto económico se prevé más suave si se cuenta con un sistema eléctrico más eficiente (IEA, 2017b). La producción nacional de energía primaria en 2015 fue de 8,261.03 PJ; de esta cifra, sólo el 1.46% es por energía nuclear, cuya participación tuvo un incremento de 2014 a 2015, pasando de 100.6 PJ a 120.41 PJ, lo que significó un 19.69% de incremento. El consumo nacional de energía en 2015 fue de 8,528.87 PJ; de ahí, el 30.75% fue por el sector energético (IEA, 2017b).

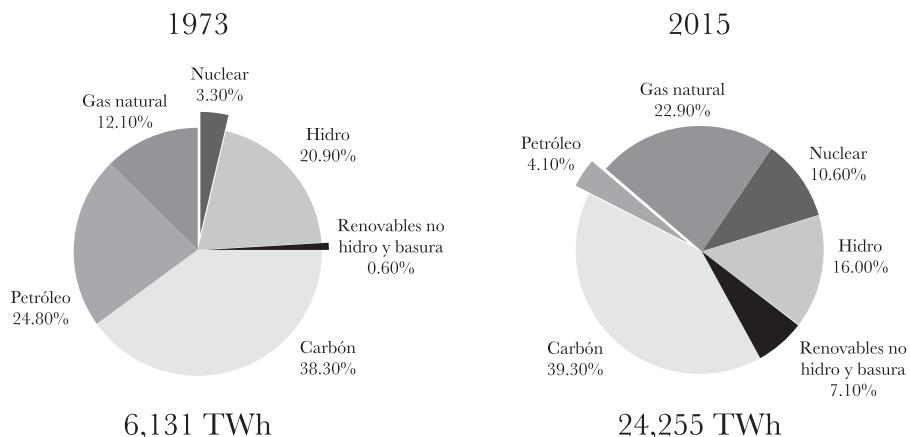
Dentro del sector energético, la generación de electricidad juega un papel importante. Esta actividad tuvo un aumento de la producción bruta mundial entre 1974 y 2015, pasando de 6,287 TWh a 24,345 TWh, con una tasa de crecimiento anual promedio del 3.4%.

Para la producción más reciente de la cual se tiene reporte (British Petroleum en 2016), la generación de electricidad anual global fue de 24,816.4 TWh, esto es, un 2.2% más que en 2015, y para México, según el Prodesen (Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional) 2017-2031, fue de 319.36 TWh en 2016, con un incremento del 3.2% respecto a 2015 (IEA, 2017b; Sener, 2017).

A nivel mundial, la participación de los combustibles fósiles en la generación de electricidad ha pasado de 1973 a 2015 del 75.2% al 66.3%, y la participación nuclear, del 3.3% al 10.6%, como se puede mostrar en las gráficas 5a y 5b.

GRÁFICAS 5A Y 5B

PARTICIPACIÓN DE LOS DIFERENTES COMBUSTIBLES EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN 1973 Y 2015



FUENTE: IEA, 2017a.

Entre 2015 y 2016 hubo una disminución en la producción de electricidad con combustibles fósiles, siendo 7.1% para el carbón y 7.0% para el aceite; asimismo, hubo una ligera disminución para la energía nuclear del 0.8% debido al periodo de mantenimiento de las plantas. Por el contrario, la producción de energía eléctrica por gas natural creció en un 5.8% y también las energías renovables, incrementándose la eólica 7.7%, la solar 19.2% y la hidroeléctrica 1.9%, la cual resurgió, ya que en 2015 tuvo una declinación debido al fenómeno del Niño, lo que ocasionó condiciones severamente secas. Las cifras anteriormente mencionadas muestran una estabilidad de la energía nuclear (IEA, 2017b).

Para México, en la generación de energía eléctrica, la participación de las tecnologías limpias es del 20.3% y no se ha incrementado de 2015 a 2016; sin embargo, algunas de estas tecnologías limpias emplean combustibles fósiles (gas natural), al igual que las tecnologías convencionales, las cuales aportan el 79.7%. Por ello, la dependencia de combustibles fósiles es de al menos el 79.7%, cantidad que supera a la participación en 1973 de estos combustibles a nivel mundial (Sener, 2017).

En México, en cuanto a la energía nuclear, ésta se ha incorporado al portafolio de energías limpias y representó para 2016 el 3% de la generación

total de energía (10,567 GWh), con una disminución de 2015 a 2016 del 8.7%, disminución que supera a la reportada a nivel mundial. Con respecto a las energías renovables, las cuales, al igual que la nuclear, forman parte de las energías limpias, variaron de 2015 a 2016 de la siguiente manera: eólica 19.6%, solar 104.6%, hidroeléctrica 0.1% y geotérmica -2.9%. De acuerdo con estas cifras, la participación de las hidroeléctricas se mantiene casi constante; esta tecnología, considerada como de recursos renovables, representa el 47.6% de las energías limpias y aporta el 10% en la matriz de generación total de energía eléctrica del país. Los cambios en la geotérmica y en la solar, aunque en una sea de tipo negativo y en otra sea superior al 100%, respectivamente, no resultan de gran impacto en la matriz energética, ya que sumados representan menos del 2% en la generación total. Sin embargo, la aportación de la energía eólica sí se refleja en la matriz energética nacional, pues actualmente contribuye con el 3%. El aumento en GWh de energía eólica fue de 1,718, pasando de 8,745 a 10,463, lo cual es casi 11 veces más que la generación de energía solar y el equivalente de generación por bioenergía (IEA, 2017b; Sener, 2017).

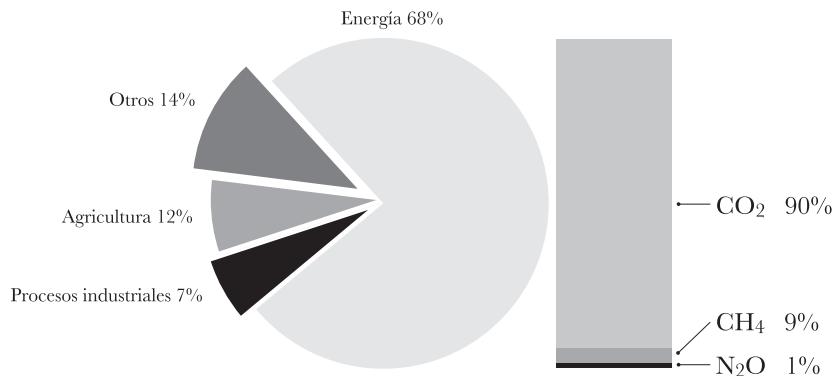
Con relación al cambio climático, en 1869, Tyndall descubre que algunos gases de la atmósfera bloquean la radiación infrarroja y sugiere que el cambio en la concentración de los gases puede llevar a un cambio climático. Con el reconocimiento científico de este hecho en el siglo XIX, detectando cambios naturales en el paleoclima (el clima que existía hace muchos años antes de que el ser humano empezara a usar instrumentos para su medición y registro) e identificando, por primera vez, el efecto invernadero natural en los decenios siguientes (1950-1960, 1960-1970 y 1970-1980), se recogieron datos que demostraron que las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera estaban aumentando muy rápidamente; al mismo tiempo, las investigaciones sobre los núcleos de hielo y los sedimentos lacustres revelaron que el sistema climático había sufrido otras fluctuaciones abruptas en el pasado.

En 1990, el IPCC presentó un primer informe de evaluación, en el que se reflejaban las investigaciones de 400 científicos; en éste se afirmaba que el calentamiento atmosférico de la Tierra era real y se pedía a la comunidad internacional que tomara cartas en el asunto para evitarlo. En su informe más reciente, el IPCC ha establecido que el calentamiento del planeta Tierra es inequívoco y que el promedio global de la temperatura de la superficie terrestre ha aumentado desde la Revolución Industrial, más notablemente en los últimos 50 años, y se atribuye con un 95% de nivel de confianza a las

actividades humanas, siendo la quema de combustibles fósiles y la deforestación entre las actividades que más aportan a las emisiones. En 2016, la concentración promedio de CO₂ fue aproximadamente un 40% mayor (403 ppm) que a mediados de 1800, con un crecimiento promedio de 2 ppm/año en los últimos diez años (IEA, 2017c).

Cabe señalar que ya en 1977 un informe de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos concluía que “el principal factor limitante en la producción de energía a partir de los combustibles fósiles en los próximos siglos podrían ser los efectos climáticos de la liberación de dióxido de carbono”. En la actualidad, esto es sabiduría convencional. En la gráfica 6 se puede observar la participación del sector energía en la producción de GEI (IEA, 2017c).

GRÁFICA 6
PARTICIPACIÓN GLOBAL ANTROPOGÉNICA
DE GEI EN 2014

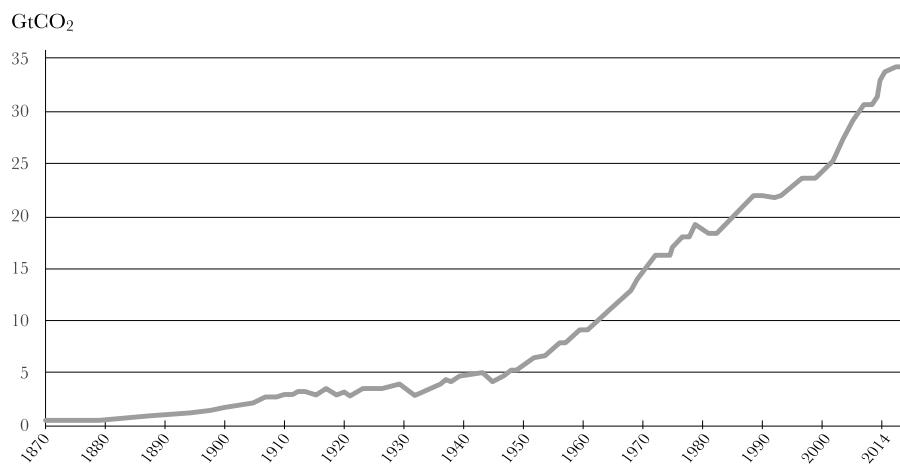


FUENTE: IEA, 2017c.

El incremento en la demanda de energía desde la Revolución Industrial ha contribuido a las emisiones de CO₂, lo que se refleja en un crecimiento que parte de casi cero en 1870 hasta 33 GtCO₂ emitidas en 2015 derivadas del uso de combustibles fósiles, como se muestra en la gráfica 7 (IEA, 2017c).

GRÁFICA 7

TENDENCIA DE EMISIÓN DE CO₂ DE LA COMBUSTIÓN
DE COMBUSTIBLES FÓSILES (1870-2014)

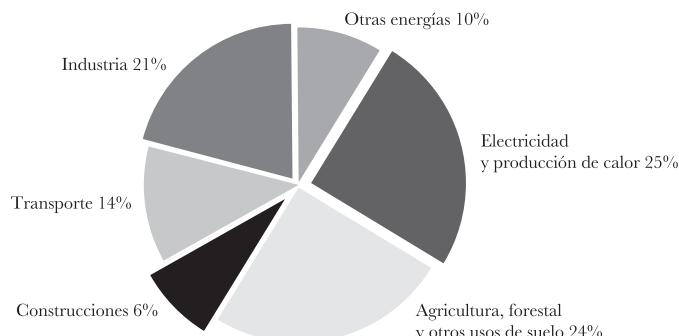


FUENTE: IEA, 2017b.

Actualmente, el sector energía aplicado a la generación de electricidad y calefacción es el mayor emisor a nivel global, como se muestra en la gráfica 8 (USEPA, 2017).

GRÁFICA 8

EMISIONES DE GEI POR SECTOR ECONÓMICO EN EL MUNDO



FUENTE: USEPA, 2017.

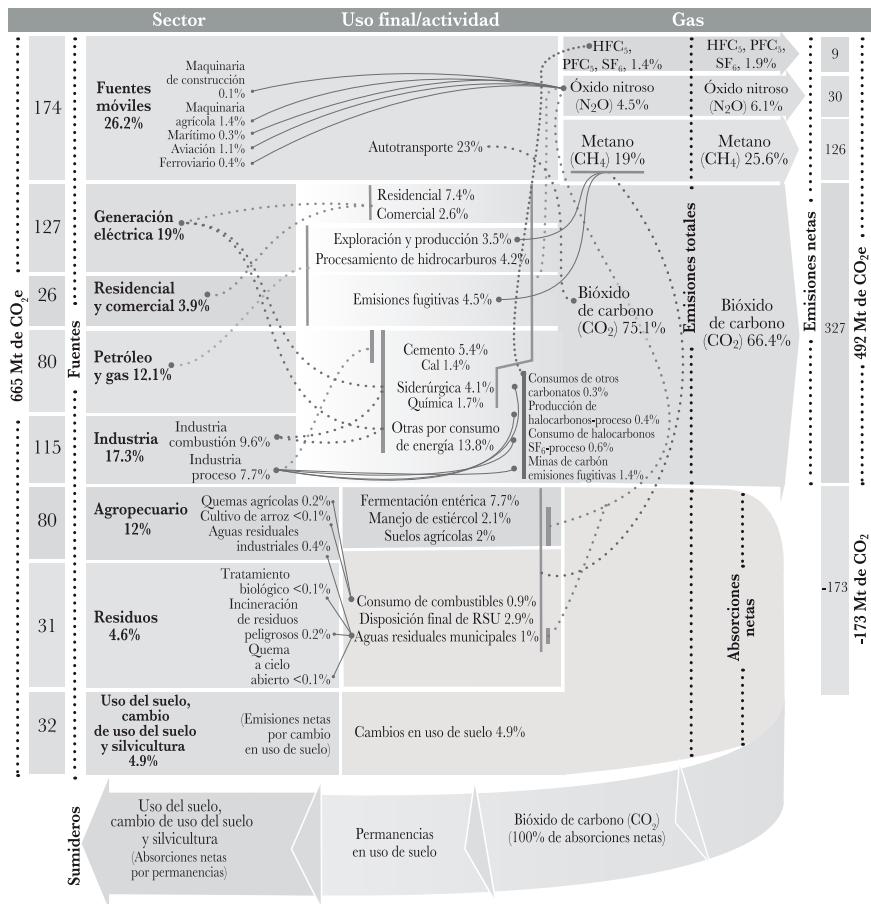
En 2014, las emisiones de CO₂ por estos dos combustibles, es decir, carbón y petróleo (35.9 GtCO₂), alcanzaron el nivel más alto en la historia de la humanidad y fueron un 60% más altas que en 1990 (IAEA, 2016c).

En cuanto a las emisiones per cápita, éstas varían considerablemente dependiendo del país. Así, en 2015 se reportan desde 1.6 TCO₂ para India hasta 6.6 TCO₂ para China y 15.5 TCO₂ para Estados Unidos. Globalmente, la emisión per cápita se ha incrementado un 13% entre 1990 y 2015.

Por su parte, México genera 665 MtCO₂e, de los cuales la generación de energía eléctrica es la segunda fuente de contribución (figura 3).

FIGURA 3

CONTRIBUCIÓN DE CO₂E DE MÉXICO POR FUENTE Y TOTALES



FUENTE: INECC, 2013.

México, tras el Acuerdo de París en 2015, fue el primero en presentar sus contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional (INDC). La meta no condicionada fue reducir las emisiones de GEI en 22% para 2030, con relación a una línea base, lo que equivale a 210 millones de toneladas de bióxido de carbono (MtCO₂e). El sector de generación de electricidad apoya esta meta con una reducción de 63 MtCO₂e, aproximadamente la tercera parte de la meta nacional no condicionada (Gobierno de la República, 2015).

Con el objetivo de alcanzar esta meta, se establece que la generación de electricidad con energías limpias (fuentes renovables más energía nuclear y otras tecnologías) deberá alcanzar una participación del 35% en 2024 y del 43% hacia 2030. Por otro lado, el sector eléctrico, a través de su Ley de Transición Energética, establece metas escalonadas, donde la más cercana es del 25% de energías limpias para 2018. Básicamente, las energías limpias han mostrado un crecimiento en las referidas a los recursos renovables, en los cuales México ocupa el lugar 20o. en capacidad eólica y el 5o. en capacidad geotérmica a nivel mundial.

De acuerdo con las proyecciones del sector, se estima que la reducción para 2030 será de 43 MtCO₂e, es decir, el 71% de la meta establecida, y para 2031 se llegará al 100% de la meta comprometida.

IX. LA NUCLEOELECTRICIDAD COMO ENERGÍA LIMPIA

Para 2040, de acuerdo con el Escenario de Nuevas Políticas de la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se proyecta que las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía aumenten un 16%, sin los incentivos de descarbonización que aún no se han puesto en práctica. El ritmo para mitigar las emisiones de CO₂ del sector de la energía difiere en cada país, dependiendo del nivel de desarrollo económico, las tecnologías, la disponibilidad de recursos fósiles nacionales baratos, los potenciales de energía renovable, el acceso a financiamiento y la existencia de políticas y estándares.

Para tener un 66% de probabilidad de mantener la temperatura promedio global por debajo de los 2 °C, se tiene que considerar que existe un remanente de CO₂ desde 2014 de 903 Gt. Según las actuales tasas de emisión, esta cuota se consumirá en alrededor de 20 años, de acuerdo con el Global Carbon Project.

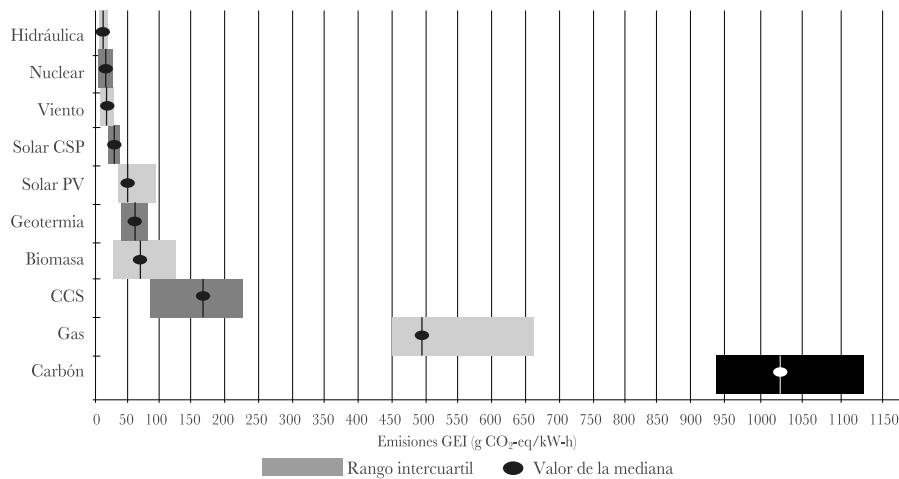
La esencia del Acuerdo de París 2015 es modificar las tasas de emisión actuales a los niveles más bajos y, esencialmente, descarbonizar el sector energético mundial.

Dado que se espera que la demanda mundial de energía aumente, se requieren tecnologías energéticas que emitan menores cantidades de CO₂ por unidad de servicio, a fin de satisfacer las necesidades de las poblaciones, que crecen en tamaño y riqueza (especialmente en los países en desarrollo y en aquellos que son menos desarrollados), como es el caso de México. Al comparar las emisiones de GEI de todas las tecnologías energéticas existentes y futuras, la energía nuclear proporciona servicios de energía con muy pocas emisiones de GEI y se considera justificadamente una tecnología baja en carbono.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la forma razonable y justa de comparar las emisiones de las tecnologías es a lo largo del ciclo de vida de cada una de ellas, de manera que se incluyan las emisiones durante la obtención de materiales de construcción, procesamiento, manufactura y construcción de la planta, proceso operacional (operación de la planta, mantenimiento, extracción, proceso y transporte del combustible, gestión de los desechos) y procesos de desmantelamiento (transporte y disposición de los desechos del desmantelamiento, gestión del material de reuso).

Este enfoque queda considerado en la gráfica 9, que resume las bases de datos de evaluación de ciclo de vida obtenidas por diferentes proyectos analizados por Estados Unidos y Japón (IAEA, 2016c).

GRÁFICA 9
BASES DE DATOS DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA
DE DIFERENTES PROYECTOS EN ESTADOS UNIDOS Y JAPÓN



FUENTE: IAEA, 2016c.

De la gráfica anterior se puede apreciar que el carbón es la tecnología de mayor emisión en todo el ciclo de vida y el gas es la segunda más importante, y se resalta que la captura y almacenamiento de carbono reduce las emisiones; sin embargo, no se coloca en el nivel de las energías renovables o, mejor dicho, se considera una opción intermedia para un cambio entre la adopción de energías tradicionales (fósiles) a las renovables. Por otro lado, en el grupo de más baja emisión se encuentran las tecnologías de viento, nuclear e hidroeléctrica, de las cuales la tecnología nuclear es la única no sujetada a las condiciones geográficas y climáticas de la región.

En resumen, las emisiones de CO₂ por generación nuclear están entre las más bajas y se esperan reducciones por cambios en los siguientes aspectos:

- Nuevas mejoras en las tecnologías de enriquecimiento de uranio, pasando de difusión gaseosa intensiva en electricidad a tecnologías centrífugas o láser, que requieren menor electricidad.
- Una mayor participación de la electricidad utilizada para el enriquecimiento basado en tecnologías bajas en carbono.
- Mejoras en el diseño y fabricación de combustible nuclear, que permitan una reducción de emisiones por unidad de electricidad en la parte de suministro de combustible durante el ciclo de vida.
- Prolongar la vida útil de la central nuclear de 40 a 60 años, extendiendo las emisiones asociadas con la construcción y el desmantelamiento durante un periodo más largo, mientras que se genera más electricidad.

Por otro lado, la estabilidad en la generación de electricidad se ve reflejada con factores de planta por encima de 0.8, a diferencia de las energías renovables, cuyo factor está por debajo de 0.5, a excepción de la geotermia, que presenta un factor de 0.78. Otro aspecto ambiental destacable es que el terreno necesario para una planta nuclear de 1,000 megawatts (MW) es entre 0.5 y 2.4 kilómetros cuadrados (km²), mientras que una central solar requiere entre 20 y 50 km² y una eólica ocupa entre 40 y 150 km² (IAEA, 2016b; Fernández de la Garza *et al.*, 2009).

X. CONCLUSIONES

La tecnología nuclear emite aproximadamente un 3% y 1.5% de las emisiones de GEI empleando combustibles fósiles (gas natural y carbón, respectivamente); además, es una tecnología de generación continua de electricidad que no depende de las condiciones climáticas (como la hidroelectricidad y

otras renovables). Estas características permiten que se considere como la tecnología más robusta en un “mix eléctrico” en los países que buscan la mitigación de GEI y eficiencia energética.

En México se requiere un análisis y discusión matizada del futuro energético en materia nuclear que permita generar decisiones informadas que presenten honestamente las ventajas y los riesgos de la tecnología.

La energía nuclear puede ser la fuente más eficiente y limpia de que se disponga, pero presenta un reto en la gestión de sus desechos y residuos nucleares que requieren resolver problemas desafiantes de ingeniería.

Las nuevas tecnologías de reactores pueden disminuir de manera impactante la necesidad de gestión de residuos y el impacto por explotación del mineral, por lo que el enfoque nacional de incorporación de centrales nucleares debe analizarse tomando en cuenta las nuevas tecnologías.

El gas natural está reemplazando cada vez más al petróleo en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, nos preocupa que México es un importador neto de gas natural que hoy en día lo surte Estados Unidos, país con cuyas negociaciones actualmente son complicadas.

Es innegable el potencial energético y sustentable que posee la tecnología nuclear, así como la dependencia de un personal calificado y de un sistema de seguridad que brinde la confianza necesaria a la población para aprovechar esta tecnología. Por lo tanto, se debe trabajar en ambos aspectos para contemplar a futuro el potencial de energía y la escasa a casi nula contribución al cambio climático de la tecnología nuclear. En México no se parte de cero, pues en la actualidad se cuenta con un grado de madurez en materia de nucleoelectricidad para ciertos tipos de reactores.

Una sola tecnología no resuelve todas las necesidades energéticas del país, por lo que los desarrollos e infraestructura con los que ya cuenta México en térmicas convencionales, así como los potenciales recursos energéticos renovables, pueden llevar a un adecuado “mix” energético, aprovechando la estabilidad y eficiencia de la tecnología nucleoeléctrica.

La percepción pública es uno de los puntos principales a resolver para la nucleoelectricidad; esto amerita una evaluación metodológica que vaya construyendo una sociedad informada capaz de incidir en decisiones nacionales con fundamentos basados en información veraz.

XI. BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA (s.a.), “Glosario de términos”, disponible en: <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/nav/glosarios/listadoGlosario.jsp?id=121>.

- APREA, José Luis (2013), “Una mirada al agua pesada”, *Hojitas de Conocimiento*, Argentina, núm. 13 “Energía”.
- ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA (2017), “Temas nucleares”, disponible en: http://www2.cnea.gov.ar/temas_nucleares/energia_nucleoelectrica.php.
- FERNÁNDEZ DE LA GARZA, Rafael *et al.* (2009), *La nucleolectricidad, una oportunidad para México. Reporte final*, México, Academia de Ingeniería de México.
- FISIÓN NUCLEAR (2017), disponible en: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fision-nuclear>.
- GOBIERNO DE LA REPÚBLICA (2015), “Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030”, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO (INECC) (2013), *Inventario de gases y compuestos de efecto invernadero*, México, INECC.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2007), *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA. Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica*, Viena.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2013), “Fast Reactors Provide Sustainable Nuclear Power for «Thousands of Years»”, IAEA, Division of Public Information.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2015), *The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General*, Viena.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2016a), *The International Nuclear and Radiological Event Scale*, Nuclear Safety & Security.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2016b), *Country Nuclear Power Profiles*, México-Viena.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2016c), *Climate Change and Nuclear Power 2016*, Viena.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2017a), *Nuclear Power Reactors in the World. 2017 Edition*, Viena.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2017b), *Fukushima Nuclear Accident Update Log*.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2016), *Mexico Energy Outlook*, París, World Energy Outlook.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2017a), *Key World Energy Statistics*, Francia.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2017b), *Electricity Information: Overview*, Reino Unido-Francia.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2017c), *CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview*, Francia.

- MARKANDYA, Anil y WILKINSON, Paul (2007), “Electricity Generation and Health”, *Energy and Health* 2, vol. 370.
- NASA (2001), disponible en: https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/comment2_ast15jan_1%20electron%20voltr.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU) (2013), *Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas*, Nueva York, Naciones Unidas.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNU-MA) (2016), *Radiación: efectos y fuentes*, Viena.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER) (2017), *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031*, México.
- SOVACOOL, Benjamin K. et al. (2015), “Profiling Technological Failure and Disaster in the Energy Sector: A Comparative Analysis of Historical Energy Accidents”, *Energy*, vol. 90.
- TURAI, István y VERESS, Katalin (2001), “Radiation Accidents: Occurrence, Types, Consequences, Medical Management and Lessons to be Learned”, *CEJOEM*, vol. 7, núm. 1.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) (2017), *Global Greenhouse Gas Emissions Data*, disponible en: www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA) (2013), *Environment and Health in Electricity Generation*, Londres.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA) (2017a), *World Nuclear Performance Report 2017*, Inglaterra-Gales.
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA) (2017b), *Nuclear Power in the World Today*, Londres.
- WORLD NUCLEAR NEWS (WNN) (2017), “Asia Remains Biggest Area for Nuclear Growth, Says Report”, 24 de octubre.