



# ENERGÍA ELÉCTRICA Y RADIOPROTECCIÓN

Abel J. González<sup>1</sup>

*La generación de electricidad puede ser causa de exposición a las radiaciones ionizantes tanto de los trabajadores involucrados como de miembros del público; de allí que la energía eléctrica y la radioprotección están relacionadas. La población en general, sus representantes y muchas organizaciones y núcleos pensantes, presumen que la única fuente de energía eléctrica que ocasiona exposición a la radiación es la energía nuclear. Sin embargo, un informe relativamente reciente del prestigioso Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (conocido por su acrónimo inglés, UNSCEAR) ha presentado una imagen diferente y de alguna manera sorprendente. UNSCEAR ha concluido que, entre las fuentes de energía disponibles para generar electricidad, la energía nuclear no es la que más contribuye a la exposición a la radiación. Cuando se evalúa la exposición en términos de energía generada, el mayor contribuyente es la generación de electricidad mediante la combustión de carbón; cuando se lo hace en términos de potencia instalada, el mayor contribuyente son las plantas solares seguidas de las eólicas. Lo que sigue es un resumen de los elementos principales que conllevaron a esas conclusiones y un epílogo sobre sus posibles implicaciones para la radioprotección.*

Palabras clave:

Keywords:

## LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD

La electricidad se ha convertido en una mercancía de consumo masivo, tan esencial para la humanidad como la comida y el agua. Se produce a partir de diversas fuentes de energía, por ejemplo, la combustión de combustibles fósiles tales como el carbón, el gas natural y el petróleo, y de biocombustibles; el uso de las llamadas fuentes "limpias", como la energía hidroeléctrica, geotérmica, eólica y solar; y por la explotación de la energía nuclear. La Figura 1 presenta las tendencias en la generación eléctrica mundial de estas diversas fuentes desde 1980 hasta 2014.

El amplio suministro de electricidad es esencial para el bienestar de las personas. La disponibilidad de electricidad aumenta la prosperidad general y reduce la pobreza. Sin embargo, a medida que aumenta la disponibilidad de energía eléctrica también aumenta la contaminación ambiental generada por la construcción y operación de las fuentes de energía necesarias para la generación de electricidad. Por lo tanto, la reducción de la contaminación atribuible a la generación de electricidad mediante una disminución de su disponibilidad podría ocasionar un aumento de la pobreza.

## ELECTRICIDAD Y CONTAMINACIÓN

Está universalmente aceptado que el mayor impacto ambiental derivado de la generación de energía eléctrica es causado por la descarga de gases de efecto invernadero (tales como el dióxido de carbono) desde las centrales eléctricas de combustibles fósiles. La Figura 1 muestra que el dominio de los combustibles fósiles, principalmente carbón, en la generación de electricidad es evidente y continuado. Sin embargo, existen otros impactos ambientales atribuibles a la producción de electricidad, incluida la contaminación por todo tipo de elementos químicos. Entre ellos se encuentra el impacto atribuible a la radiación ionizante y su influencia en la radioprotección.

## RADIACIÓN

La radiación es un fenómeno bastante extraño para el público en general: no se puede sentir, es decir no se puede ver, ni palpar, ni oler, ni oír y, sin embargo, el público percibe que la exposición a la radiación puede dañar su salud y el medioambiente. Se sabe que se debe proteger a las personas contra este fenómeno, previniendo la ocurrencia de altas

<sup>1</sup>Abel Julio González es miembro de la Academia Internacional de Energía Nuclear y de las Academias (argentinas) de Ciencias de Buenos Aires, de Ciencias del Medio Ambiente y del Mar. Es representante en el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, miembro de la Comisión de Normas de Seguridad del OIEA y asesor principal de la Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina. Ha sido vicepresidente de la Comisión Internacional de Protección Radiológica y vicepresidente de la Asociación Internacional de Protección Radiológica y director del OIEA. Es miembro honorario de la Sociedad Española de Protección Radiológica y miembro fundador de la Sociedad Argentina de Radioprotección.



dosis de radiación, las que pueden ocasionar serios daños inmediatos en la salud humana, y limitando la exposición a la radiación en general debido a que puede aumentar a largo plazo la incidencia de enfermedades malignas.

La Tierra y sus habitantes han estado desde su origen expuestos niveles relativamente bajos de radiación provenientes del espacio exterior y de elementos radiactivos constitutivos de la corteza terrestre. A esta radiación se la denomina general (y confusa)mente “radiación natural” como opuesto a la radiación generada por las actividades humanas (aunque esas actividades también pueden aumentar la exposición a la así llamada radiación natural).

Si bien no se tiene constancia si bajas dosis de radiación (por ejemplo dosis similares a las recibidas por exposición a la radiación natural) son perjudiciales para la salud, se ha adoptado un paradigma prudente y precautorio de protección contra la radiación. Es un modelo que extrapola los conocimientos objetivos que se disponen sobre los efectos de la radiación a altas dosis y postula que incluso pequeños aumentos en la exposición a la radiación a bajas dosis podrían ser perjudiciales para la salud. De este paradigma se deduce uno de los principios fundamentales de la protección, el de optimización, que demanda que la protección debe ser la mejor bajo las circunstancias prevalecientes, manteniendo las dosis de radiación tan bajas como sea razonablemente obtenible.

La exposición a la radiación causada por la generación de electricidad generalmente se atribuye, únicamente, a la energía nuclear y se encuadra en la característica de exposición a bajas dosis. De hecho, aunque la generación de electricidad por medios nucleares sufre detractores, se beneficia de defensores y no se ve afectada por personas indiferentes; todos ellos, críticos, simpatizantes y personas despreocupadas, parecen coincidir en una premisa: el problema de la generación de electricidad por medio de la energía nuclear es que expone a las personas a la radiación. Si la radiación no existiera, todos estarían de acuerdo en que la electricidad generada por la energía nuclear sería una panacea. Es así que todos los esfuerzos reguladores de radioprotección en relación a la generación de energía eléctrica se han concentrado casi exclusivamente en la energía nuclear.

Sin embargo, el prestigioso Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) ha producido recientemente un informe que libera a la energía nuclear de este manto de culpa solitaria y que quizás debería reencauzar los esfuerzos de radioprotección en relación con la generación de energía eléctrica.

## UNSCEAR Y SUS CONCLUSIONES

En 1955 la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció el UNSCEAR, un comité de científicos al que se

le requirió estimar los niveles y efectos de la radiación en el mundo. Hace poco tiempo, y en respuesta a una solicitud específica de la República Argentina reiterada por la Asamblea General, este acreditado cuerpo científico, en su sexagésimo tercera reunión ordinaria, llevó a cabo un estudio exhaustivo sobre la exposición a la radiación atribuible a las diversas fuentes de energía utilizadas en la generación de electricidad<sup>2</sup>.

Para sorpresa de muchos, el UNSCEAR concluyó que la mayor exposición a la radiación en la que incurre la humanidad para generar electricidad no proviene de la operación de centrales nucleares, sino de la de plantas de combustión de carbón. Además, el UNSCEAR concluyó que incluso fuentes de energía “limpias” como la solar y la eólica son responsables de niveles significativos de exposición a la radiación debido a la construcción de sus plantas y dispositivos generadores de electricidad. A continuación se incluye una descripción resumida de estos sorprendentes hallazgos del UNSCEAR.

Es de hacer notar que la Asamblea General de las Naciones Unidas en su Resolución 71/89 del 6 de diciembre del 2016, interalia, acogió con beneplácito la evaluación científica sustantiva realizada por el UNSCEAR sobre las exposiciones a la radiación generadas por la electricidad.

## CICLOS DE COMBUSTIBLE PARA GENERAR ELECTRICIDAD Y ESTIMACIONES

UNSCEAR evaluó toda la exposición a la radiación ocurrida durante las actividades realizadas durante el ciclo completo de cada fuente necesario para la generación de electricidad; es decir, evaluó la exposición a la radiación incurrida durante la secuencia completa de acciones requeridas para generar electricidad por las diferentes tecnologías, desde la adquisición de los materiales básicos necesarios para construir y operar las plantas hasta la eliminación de los desechos generados en el proceso.

El estudio de UNSCEAR es muy completo para la energía nuclear y (parcialmente) para la combustión de carbón porque son las únicas fuentes que tienen una base de datos confiable y completa. Respecto a todas las otras tecnologías, se evaluó la exposición a la radiación dentro de la limitación de los datos disponibles. No obstante, no se evaluó el impacto de la radiación causado por la construcción de plantas de energía hidroeléctrica debido a la falta de homogeneidad general entre las centrales hidroeléctricas

<sup>2</sup>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Radiation exposures from electricity generation. In: Sources, effects and risks of ionizing radiation – UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes.; Annex B. United Nations Publication: Sales No. E.17.IX.1. ISBN: 978-92-1-142316-7. ISBN: 978-92-1-060002-6. United Nations, January 2017.

y las dificultades relacionadas para encontrar parámetros representativos.

Para el ciclo del combustible nuclear, UNSCEAR analizó la exposición a la radiación atribuible a la extracción y mollienda de uranio, a la fabricación de combustible nuclear, a la operación de las centrales nucleares y a las actividades de reprocesamiento, desmantelamiento y disposición de residuos radiactivos. En cuanto al ciclo asociado a la combustión del carbón, el UNSCEAR analizó las exposiciones debidas a la extracción de carbón, su combustión en centrales eléctricas (tanto modernas como convencionales) y la deposición de las cenizas resultantes de la combustión del carbón.

Para comparar los niveles de radiación incurridos, se evaluaron las dosis de radiación incurridas por el público afectado así como la de los trabajadores involucrados. Las dosis evaluadas fueron la suma de todas las dosis individuales incurridas, es decir la colectiva. No se llevó a cabo ninguna ponderación en relación al nivel de dosis individuales, pero debe destacarse que las dosis individuales asociadas a todo el ciclo de vida de las instalaciones de generación de energía (cuando operan con normalidad) se pueden calificar de relativamente bajas.

Las dosis ocupacionales pudieron estimarse directamente, particularmente las del ciclo nuclear para el cual existen datos de monitoreo ocupacional individual. Para estimar la dosis del público se evaluaron las principales descargas radiactivas al medioambiente asociadas a cada ciclo y se emplearon modelos de cálculo elaborados por el UNSCEAR.

Se realizaron dos estimaciones básicas: la exposición global a la radiación durante un año a partir de cada tipo de tecnología de origen y la exposición global por unidad de electricidad producida por cada tecnología. El año de referencia utilizado para hacer las comparaciones fue el 2010, pero las conclusiones generales son extrapolables a los años recientes.

### IMPACTO DE RADIACIÓN DE LOS CICLOS DE COMBUSTIBLE PARA GENERAR ELECTRICIDAD

El UNSCEAR concluyó que el ciclo del carbón contribuye con más de la mitad de la exposición a la radiación incurrida por la población mundial debido a la producción universal de electricidad, mientras que el ciclo del combustible nuclear representa menos de una quinta parte. La estimación para el carbón se basó en la suposición de que todas las descargas provenían de plantas de carbón modernas, de lo contrario, el balance habría sido aún mucho más favorable para la energía nuclear.

Obviamente, estos valores totales dependen de la proporción de cada una de las tecnologías involucradas en la producción total de electricidad y, como se muestra en la Figura 1, debe destacarse que en 2010 el ciclo del carbón

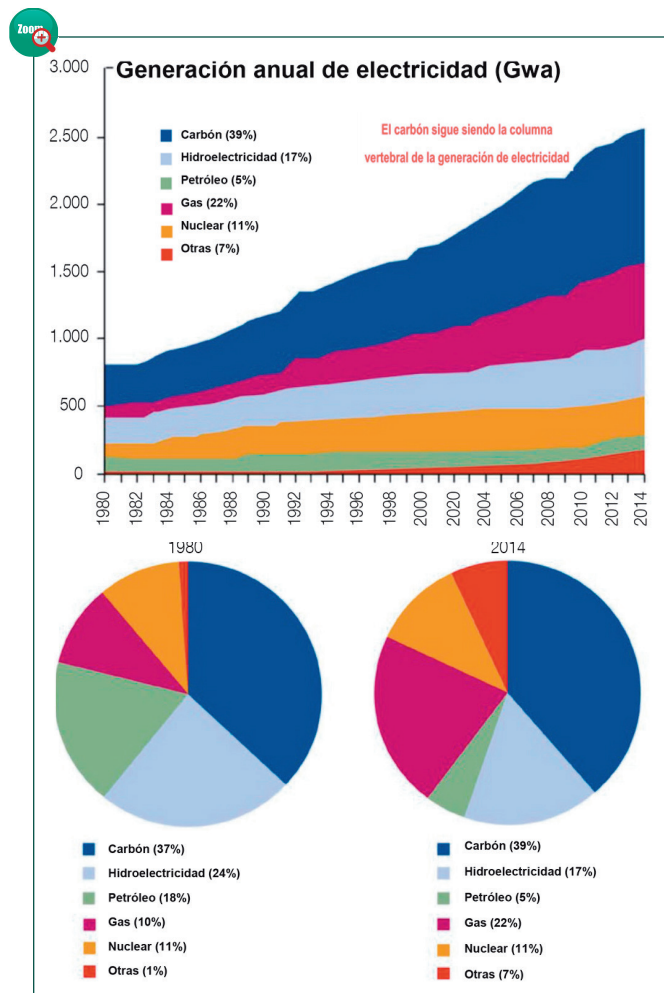


Figura 1. Tendencias en la generación eléctrica mundial (en GW año) de 1980 a 2014<sup>2</sup>.

tuvo una contribución mayoritaria que llegó a aproximadamente el 40% a la generación eléctrica mundial. Por lo tanto, para completar el cuadro, UNSCEAR también calculó la exposición a la radiación atribuible a cada unidad de energía eléctrica producida por cada tecnología y concluyó que la contribución del carbón también es dominante en este caso. La radiación atribuible a cada unidad de electricidad producida a partir del ciclo del carbón es mayor que la del ciclo nuclear, y también a la producida por otras tecnologías evaluadas. La excepción a esta conclusión es la energía geotérmica: se estimó que la exposición a la radiación atribuible a esta fuente de energía era muy considerable y posiblemente aún mayor que la del carbón; sin embargo, no fue posible evaluar con precisión el impacto de la energía geotérmica debido a la escasa información disponible sobre los efluentes evacuados por estas plantas.

La contribución significativa del ciclo del carbón (y también la del ciclo geotérmico y la de todos los ciclos de combustibles fósiles) proviene principalmente de la exposi-



CARBÓN			NUCLEAR		
Fuente	Dosis colectiva [sievert persona]	Dosis colectiva normalizada [sievert persona/GW año]	Fuente	Dosis colectiva [sievert persona]	Dosis colectiva normalizada [sievert persona/GW año]
Extracción del carbón	370	0.4	Extracción del uranio	53	0.2
Operación de plantas viejas	780	0.8	Operación de Centrales Nucleares	68	0.2
Operación de plantas nuevas	60	0.1			
Depósitos de cenizas	240	0.2	Reprocesamiento	7.6	0.03

**Tabla 1.** Exposición a la radiación atribuible a las tecnologías generadoras de electricidad basadas en el ciclo del carbón y el ciclo del combustible nuclear<sup>2</sup>.

ción a dos elementos radiactivos: el radio y el gas radón, generados por el decaimiento de elementos radioactivos primogénitos contenidos en la corteza terrestre. Las exposiciones al radio y el radón ocurren a causa de la extracción de carbón, de las emisiones de la combustión del carbón en las centrales eléctricas y de los depósitos de las cenizas resultantes de la combustión.

Si bien la exposición a la radiación debido al ciclo nuclear es mucho menor cabe destacar que, sorprendentemente, la mayor contribución no proviene de las operaciones de las centrales nucleares sino de la exposición al radio y al radón durante la extracción del combustible de las centrales – el uranio.

Hay una creencia generalizada en el público no especializado que dado que el radio y el radón son “naturales”, no son peligrosos, pero existe extensa evidencia de la radiotoxicidad de estos nucleídos.

La Tabla 1 presenta una comparación de las exposiciones del público a la radiación atribuibles a las tecnologías generadoras de electricidad basadas en el ciclo del carbón y el ciclo del combustible nuclear. Se presentan en términos de dosis colectivas totales para el público y de dosis colectivas normalizadas por unidad de energía eléctrica generada. Las dosis fueron integradas a lo largo de 100 años, para una población promedio dentro de un radio de 1.500 km desde cada fuente.

### IMPACTO DEBIDO A LA CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD

El resultado de la evaluación del UNSCEAR sobre la exposición a la radiación resultante de la fase de construcción de las tecnologías generadoras de electricidad fue extremadamente sorprendente. Los cálculos pertinentes se resumen en la Tabla 2 que presenta los resultados expresados como dosis colectivas incurridas para la construcción de plantas o dispositivos generadores de electricidad, normalizados a la unidad de energía que se espera generar. La mayor exposición a la radiación especialmente incurrida por los trabajadores involucrados en la construcción (ya sea por unidad de potencia eléctrica instalada o por uni-

Tecnología utilizada para la generación de electricidad	Dosis colectiva normalizada debida a la extracción y procesamiento de los minerales necesarios para la construcción de las plantas y los generadores de electricidad [por orden decreciente, en persona sievert/GW año]
Solar	0.8
Eólica	0.1
Nuclear	0.02
Carbón	0.01
Gas Natural	0.01
Biomasa	0.01

**Tabla 2.** Dosis colectiva atribuible a la construcción de plantas o dispositivos generadores de electricidad, normalizada a la unidad de la que se espera generar<sup>2</sup>.

dad de energía eléctrica que se espera generar), proviene de la construcción de plantas de energía solar, seguidas por plantas de energía eólica. Esto se debe al hecho de que estas tecnologías requieren grandes cantidades de materiales de construcción por unidad de potencia instalada, en particular metales del grupo de “tierras raras”. La extracción de los minerales necesarios para estos materiales causa exposición a la radiación, principalmente a los trabajadores involucrados pero también al público. Los minerales de baja ley necesarios para obtener los metales de tierras raras son el mayor contribuyente.

### ACCIDENTES

Las estimaciones de UNSCEAR se limitaron a las operaciones “normales” en las diversas tecnologías de generación de energía eléctrica. El Comité había analizado exhaustivamente las consecuencias de los accidentes nucleares ocurridos, particularmente los de Chernobyl y Fukushima, pero no incluyó en su evaluación comparativa el impacto de los accidentes atribuibles a las demás tecnologías. Ello es debido a que los accidentes pueden tener diversas consecuencias y sólo las relacionadas con la radiación están dentro de la competencia estatutaria del UNSCEAR.

Sin embargo, los impactos de los accidentes son de particular interés público y procede hacer referencia a los mismos en este resumen.

Los impactos de los accidentes se pueden conmensurar en función de muchos parámetros; por ejemplo, por las vidas humanas perdidas, por el daño ambiental causado o por las consecuencias económicas, sociales y políticas atribuibles al accidente. Estos parámetros, de características tan disímiles, son muy difíciles de comparar entre sí; y dependiendo de cual se elija, la comparación "por accidentes" de cada tecnología de generación de energía eléctrica puede ser muy dispar.

Es bien sabido que, medido en vidas perdidas de trabajadores involucrados, la tecnología de generación eléctrica que causa más accidentes es la de combustión de carbón. Año tras año se producen accidentes en las minas de carbón, por derrumbes y explosiones, que ocasionan enormes pérdidas de vidas.

En términos de vidas de miembros del público los accidentes más severos han sido los causados por fallas en represas hidroeléctricas (sólo la falla de la presa Banqiao en China en 1975 provocó alrededor de 26.000 muertes por inundación, 145.000 por inanición y subsecuentes epidemias, dejando a 11 millones de personas sin hogar (además, muy recientemente, una posible falla de la presa de Oroville en los Estados Unidos llevó a la evacuación de 180.000 personas).

Si el impacto accidental fuera conmensurado en términos de daños al medioambiente (entendiendo como medioambiente el conjunto de circunstancias o condiciones en las cuales una persona o comunidad vive, trabaja, se desarrolla, etc., y las condiciones externas que afectan la flora y fauna), las consecuencias de los accidentes asociados a las tecnologías de combustibles fósiles, particularmente gas y petróleo, son dominantes. Los combustibles fósiles –carbón, petróleo y gas natural– causan daños ambientales significativos, los que incluyen contaminación del aire y el agua, pérdida de vida silvestre y hábitats, y, notablemente, emisiones que causan efecto invernadero y calentamiento global. Verdaderas catástrofes ambientales han ocurrido durante la explotación de combustibles fósiles. Sólo a título de ejemplo, la explosión de la plataforma *Deepwater Horizon* en el Golfo de México en 2010 causó el mayor desastre ambiental en la historia de los Estados Unidos de América.

Los impactos de accidentes asociados con la producción de energía a partir de fuentes renovables distintas a la hidroeléctrica, tales como la eólica, solar, geotérmica y biomasa han sido imperceptibles. Sin embargo todas han tenido cierto impacto ambiental cuyo tipo exacto e intensidad varían según la tecnología específica utilizada, la ubicación geográfica y otros factores.

Los tres accidentes ocurridos en centrales nucleares, Three Mile Islands, Chernobyl y Fukushima, se caracteri-

zaron por ocasionar un extraordinario impacto político, económico y social, con amplísima cobertura mediática. Sin embargo el impacto medido en pérdida de vidas humanas fue muy bajo. En Three Mile Islands ni siquiera se excedieron las dosis límite establecidas para la operación normal de la planta. En el caso de Fukushima el estudio internacional sobre su impacto concluyó que no se observó ningún efecto temprano de la radiación en la salud de los trabajadores o de los miembros de la población que pudiera atribuirse al accidente y no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia. Chernobyl fue el único accidente con consecuencias medidas en vidas humanas: tres decenas de trabajadores murieron a causa del accidente y un centenar incurrió en síndromes agudos de radiación, y se contabilizaron alrededor de siete mil cánceres pediátricos no letales de tiroides atribuibles al accidente; pero la población en general incurrió en dosis de radiación relativamente bajas, comparables a las recibidas por prácticas médicas de radiodiagnóstico.

### EPÍLOGO

Los hallazgos del UNSCEAR sobre el impacto de radiación atribuible a las diversas tecnologías empleadas para generar electricidad, que fueran acogidos con beneplácito por la Asamblea General de la ONU, posiblemente sorprenderán a muchos organismos gubernamentales involucrados en la planificación energética, en la salud pública, en la protección ambiental y en la seguridad en el trabajo, así como a organizaciones no gubernamentales, y por supuesto al público en general. No debe olvidarse que las evaluaciones fueron hechas por el UNSCEAR, un cuerpo de gran prestigio científico e indiscutible independencia.

Pero el mayor impacto debería ocurrir sobre las preocupaciones y normativas relacionadas con la protección contra las radiaciones ionizantes. Este epílogo no pretende dejar la impresión que el sistema de protección contra radiaciones ionizantes es erróneo. Lo que aspira es a cuestionar su alcance. El sistema está muy centrado en las actividades o instalaciones que utilizan directamente las radiaciones ionizantes, aunque no produzcan incrementos sustanciales de dosis, y no tanto en aquellas basadas en otros fenómenos (como la combustión o la presión eólica), pero que dan lugar a un incremento de la exposición a radiaciones ionizantes como producto secundario.

El tiempo parece oportuno para que los especialistas en radioprotección incluyan en sus esfuerzos la protección de trabajadores y miembros del público contra las radiaciones ocasionadas por las fuentes de energía eléctrica no nucleares.