

# EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDOS POR LAS CADENAS DE GENERACION DE ELECTRICIDAD EVALUACION DE LA DIFERENCIA

POR JOSEPH V. SPADARO, LUCILLE LANGLOIS Y BRUCE HAMILTON

**D**urante el pasado decenio se han venido generalizando en todo el mundo los debates sobre el impacto de las actividades humanas en el régimen climático mundial a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG). Hasta ahora, esos debates se han centrado principalmente en las liberaciones antropógenas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y compuestos halogenados que contienen flúor, cloro y bromo. Las concentraciones de estos gases en la atmósfera han aumentado considerablemente desde la era preindustrial, y, de hecho, en el caso del metano se han duplicado con creces.

En un esfuerzo por estabilizar estas concentraciones atmosféricas a un nivel que reduzca al mínimo el riesgo de importantes cambios climáticos globales, más de 130 países ratificaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en la Cumbre para la Tierra, celebrada en el Brasil, en 1992. A este esfuerzo inicial siguió la tercera reunión de la Conferencia de las Partes, celebrada en Kyoto (diciembre, 1997), en la que las autoridades acordaron objetivos de reducción de las emisiones de GHG específicos para cada país.

En la actualidad, los países industrializados, o países incluidos en el Anexo I, son responsables de gran parte de la liberación de gases de efecto invernadero en todo el mundo. Las actividades relacionadas con la producción de electricidad y el sector del transporte generan casi las dos terceras partes de las emisiones de GHG. Por tanto, el

cumplimiento del Protocolo de Kyoto exigirá de los países incluidos en el Anexo I un fuerte compromiso con el desarrollo y la explotación de las fuentes de energía, cuyas emisiones tienen bajo contenido de carbono. Las mejoras de la tecnología de conversión del combustible en energía para su uso también desempeñarán un papel importante, ya que estos países aspiran a satisfacer sus futuras demandas de energía. Como los países en desarrollo no están obligados por el Protocolo de Kyoto, y su consumo de energía va en aumento, la tasa de emisión de GHG crece bastante rápidamente y se espera que a finales del primer cuarto del siglo XXI su proporción de liberaciones sea la más alta a nivel mundial.

Dado que el sector de generación de electricidad es un importante emisor de gases de efecto invernadero (en la actualidad representa la tercera parte del total de las emisiones mundiales), el OIEA ha iniciado --en el marco de su programa de evaluación comparativa de las fuentes de energía-- un estudio de las emisiones de GHG generadas por todas las actividades (cadenas) relacionadas con la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles, energía nucleoelectrónica y fuentes de energía renovables. Desde octubre de 1994 hasta junio de 1998, el OIEA patrocinó la celebración de seis reuniones de grupos asesores que abarcaron las siguientes cadenas de combustible: lignito, carbón, petróleo, gas, energía nuclear, de biomasa, hidroeléctrica, eólica, solar y de biomasa. Estas reuniones tuvieron un doble

resultado: el primero, que los participantes formularon un conjunto coherente de factores de emisión de GHG para la cadena energética completa de la generación de electricidad; el segundo, que señalaron el camino hacia opciones tecnológicas y de combustible que podrían explotarse para facilitar el cumplimiento de los compromisos contenidos en la Convención Marco. En este artículo se exponen y examinan los resultados y las principales conclusiones de esas reuniones.

## FACTORES DE EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Todos los factores de emisión de GHG correspondientes a los distintos tipos de combustible se han analizado en diversos estudios. Los resultados se expresan en gramos de carbono equivalente (comprendidos CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.) por kilovatio-hora de electricidad (gC<sub>eq</sub>/kWh). En el gráfico de la página 21 se muestran datos de centrales nucleares en explotación (tecnología del decenio de 1990) y factores de emisión correspondientes a sistemas que se prevé estarán en funcionamiento a corto o medio plazo (tecnologías de 2005-2020).

Las estimaciones reflejan diferencias en la metodología de evaluación, el rendimiento de

---

*Los autores son funcionarios de la Sección de Estudios Económicos y Planificación del Departamento de Energía Nuclear del OIEA.*

*La lista completa de las referencias utilizadas para este artículo puede solicitarse a los autores.*

## GASES DE EFECTO INVERNADERO Y DESARROLLO ENERGETICO

Varias hojas informativas publicadas por la Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ponen de manifiesto cómo las actividades humanas producen gases de efecto invernadero. Entre los aspectos principales figuran los siguientes:

- La mayoría de las actividades humanas importantes emiten gases de efecto invernadero, y muchas de ellas son ya esenciales para la economía mundial.
- El dióxido de carbono proveniente de la quema de combustibles fósiles es la fuente que por sí sola genera más emisiones de estos gases como resultado de actividades humanas. Al suministro y uso de combustibles fósiles corresponden unas tres cuartas partes de las emisiones de dióxido de carbono generadas por actividades humanas.
- La mayoría de las emisiones vinculadas al uso de la energía ocurre cuando se queman combustibles fósiles. El petróleo, el gas natural y el carbón suministran la mayor parte de la energía empleada para producir electricidad, hacer funcionar los automóviles, calentar las casas y suministrar electricidad a las fábricas. Si el combustible se quemara completamente, el único subproducto que contendría carbono sería el dióxido de carbono. Pero, como la combustión suele ser incompleta, también se producen monóxido de carbono y otros hidrocarburos. La producción de óxido nítrico y otros óxidos de nitrógeno obedece a que, por efecto de la quema del combustible, el nitrógeno presente en este último o en el aire se combina con el oxígeno de la atmósfera.
- La extracción, el procesamiento, el transporte y la distribución de los combustibles fósiles también liberan gases de efecto invernadero.

Para más información, puede consultarse el juego de material informativo sobre cambio climático en el sitio de la Convención Marco en Internet, cuya dirección es [www.unfccc.de](http://www.unfccc.de).

conversión, las prácticas de preparación del combustible y el subsiguiente transporte hasta la central nuclear, y cuestiones locales como la mezcla combustible supuesta para las necesidades de electricidad relacionadas con la construcción de la central y la fabricación del equipo. Las tasas futuras incluyen mejoras del proceso de conversión del combustible en energía para servicio, reducciones durante la extracción y el transporte del combustible, y reducción de las emisiones durante la construcción de la central y el equipo.

En el caso de los combustibles fósiles, la tasa total de emisión es la suma de las emisiones de las chimeneas durante la quema del combustible y las liberaciones ocurridas en las actividades iniciales y finales, o cadenas. Por lo general, las emisiones de GHG generadas durante la construcción y la clausura de una central nuclear y los aportes de las líneas

eléctricas que conectan la central a la red eléctrica son insignificantes. Por ejemplo, la construcción de una central y su clausura sólo producirían el 1% del total de las emisiones de GHG.

En cuanto a las tecnologías de la energía hidráulica, la solar y la eólica, el tamaño y el tipo de la central son factores clave en el análisis. Aspectos como la ubicación geográfica y las disposiciones locales que regulan la construcción influyen mucho en la tasa de emisión. En el gráfico se muestra el impacto de estos factores en la tasa de emisión de gases de efecto invernadero.

Los resultados de las reuniones de los grupos asesores celebradas con el apoyo del OIEA muestran siempre que a las tecnologías de combustibles fósiles corresponden los factores de emisión más altos, al gas natural corresponde aproximadamente la mitad, igual que al carbón o el lignito, y las dos terceras partes de la estimación

corresponden al petróleo combustible. Por otra parte, la energía nuclear y la hidráulica producen las menores liberaciones de GHG, por ejemplo, de 50 a 100 veces menos que el carbón (en dependencia de la tecnología que se use). Las emisiones de GHG generadas por la energía solar están en un punto medio, y superan a las de la energía nuclear en aproximadamente un orden de magnitud.

## ENFOQUE ANALITICO

El objetivo de la evaluación del ciclo de vida (LCA) es determinar las cargas ambientales asociadas a la creación de un producto, teniendo en cuenta los flujos de masa y energía en cada etapa del procedimiento. En el caso de la generación de electricidad el producto final es 1 kWh de energía.

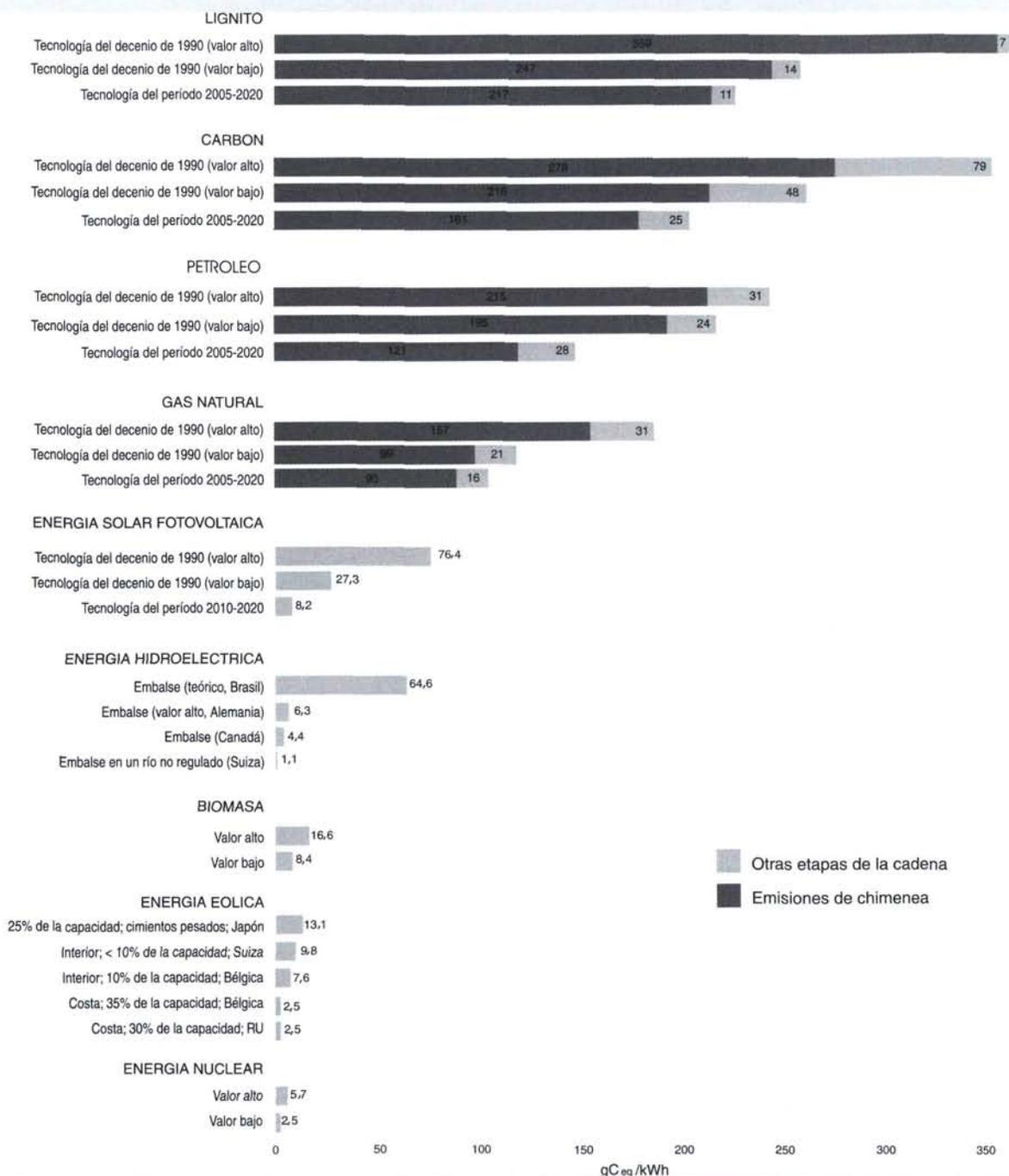
En ocasiones esta evaluación o análisis de la cadena de proceso (ACP) se complementa con un análisis insumo-producto (AIP). En este último se toman en cuenta las emisiones indirectas imputables a los diferentes sectores económicos que contribuyen a la creación del producto final, como la electricidad utilizada en el procesamiento, el diseño de las máquinas y la mano de obra.

No tener en cuenta estos insumos da lugar a una subestimación de las consecuencias para el medio ambiente, puesto que se reducen artificialmente las fronteras del sistema que ha de abarcar el análisis. Por ejemplo, cuando se comparan las tasas de emisión de GHG de los combustibles fósiles, el resultado que se obtiene aplicando el AIP es 30% mayor que el que se obtiene con el ACP. En el caso de la energía nucleoelectrónica, puede ocurrir una desviación aún más marcada, de hasta un factor de dos.

## FRONTERAS DEL SISTEMA EN EL ANALISIS

Al comparar distintos sistemas energéticos, es importante la selección de la frontera del

## ALCANCE DEL TOTAL DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERADAS POR LAS CADENAS DE PRODUCCION DE ELECTRICIDAD



sistema. Por ejemplo, si se pasan por alto las actividades iniciales y finales de los ciclos de los combustibles fósiles se subestimaría la tasa de emisión total de GHG entre el 5% y el 25%. En el caso de la energía

nucleoeléctrica y los combustibles de fuentes renovables, en el punto de generación no se emiten GHG, pero hay liberaciones atmosféricas durante la extracción, preparación y transporte del combustible, la

construcción y la clausura de la central, la fabricación del equipo y la descomposición de materia orgánica. El nivel de las emisiones depende mucho de la tecnología y la ubicación geográfica de la central nuclear.

El cálculo de la cadena energética completa, en el que se abarcan todas las etapas desde el principio hasta el final, tal vez sea la forma más justa de comparar las cargas climáticas y ambientales de los distintos combustibles y las distintas tecnologías de producción de electricidad. Las capacidades analíticas y el sentido común serán los que, en última instancia, determinarán la selección de las fronteras del sistema. Las intensidades de emisión deben incluir, por lo menos, la cadena de suministro de combustible, la etapa de producción de energía y, en el caso de la energía nuclear y las fuentes de energía renovables, los aportes de la construcción de la central y las necesidades de materiales. Un análisis más detallado podría extender la frontera del sistema hasta el uso final de la energía, es decir, hasta su aplicación.

En el caso de tecnologías intermitentes como las de la energía eólica, la solar y la hidroeléctrica en menor grado, surge la duda de si debe incluirse o no la energía auxiliar (secundaria) en el sistema que se analiza. El método que se prefiere es calcular por separado las emisiones correspondientes a los sistemas primario y auxiliar. Este método tiene tres ventajas. La primera es que las emisiones correspondientes al sistema primario se determinan estrictamente sobre la base de la utilización de una tecnología dada. La segunda es que la influencia del rendimiento o disponibilidad anual (horas de funcionamiento por año) puede determinarse claramente. Y la tercera es que permite comparar las distintas opciones en materia de sistemas auxiliares.

### POTENCIAL DE CALENTAMIENTO ATMOSFERICO

El potencial de calentamiento atmosférico (PCA) es la medida de la capacidad que tiene un gas en la atmósfera para atrapar el calor que irradia la superficie terrestre en

comparación con un gas de referencia, que en las hipótesis suele ser el dióxido de carbono. La permanencia de los gases en la atmósfera es muy variable, y, en consecuencia, los resultados se integran a diferentes intervalos. Por lo general se escoge un horizonte cronológico de 100 años.

A continuación figuran las estimaciones más recientes del PCA (con horizonte cronológico de 100 años). Fueron realizadas por el Grupo internacional de expertos sobre el cambio climático respecto de los gases de efecto invernadero que más comúnmente emite la cadena de generación de electricidad:

- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) = 1;
- metano (CH<sub>4</sub>) = 21;
- óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) = 310;
- hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) = 23 900;
- tetrafluoruro de metano (CF<sub>4</sub>) = 6500;
- carbonos hidrofluorados (HFC): HFC-134a = 1300;
- carbonos clorofluorados (CFC): CFC-114 = 9300;
- carbonos hidroclorofluorados (HCFC): HCFC-22 = 1700.

### RENDIMIENTO DE CONVERSION

El rendimiento de conversión del combustible en electricidad y el factor de carga de la central nuclear influyen en la tasa de emisión de GHG durante la quema del combustible. El factor de emisión de GHG disminuye cuando aumenta el rendimiento de conversión o el factor de carga. Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del contenido de carbono del combustible y del rendimiento de conversión; las tasas de N<sub>2</sub>O están determinadas fundamentalmente por características de los procesos, en tanto que las descargas de metano están vinculadas fundamentalmente a las prácticas de suministro de combustibles fósiles. En términos generales eso significa que la tasa de emisión varía en sentido inverso al rendimiento de conversión. Con

un rendimiento del 40% exactamente, un aumento adicional del 1% reduce la tasa de emisión de GHG en 2,5%. Con rendimientos menores, la reducción de la tasa de emisión es más marcada, en tanto que para tasas de conversión más altas sucede lo contrario. El rendimiento térmico siempre disminuye con la reducción del factor de carga, y el cambio depende mucho de la tecnología.

Los rendimientos de conversión característicos de los sistemas actuales están dentro de las escalas siguientes: entre 27% y 40% para las centrales alimentadas con lignito; entre 30% y 45% para las alimentadas con carbón; entre 34% y 43% para las alimentadas con petróleo; y entre 35% (en las aplicaciones de carga punta) y 55% para las alimentadas con gas natural. Las centrales nucleares de menores rendimientos suelen ser las ubicadas en países en desarrollo.

A medio plazo, se espera que los rendimientos de conversión de las mejores tecnologías disponibles sean del orden de 50% a 55% para el carbón y de 60% a 65% para las centrales eléctricas alimentadas con gas.

En el caso del combustible nuclear y los combustibles de fuentes renovables, las emisiones al medio ambiente que generen las mejoras de la conversión energética tendrán un impacto menor porque no hay emisiones de chimenea y las liberaciones provienen del suministro de combustible, la construcción de la central y la fabricación de los materiales. De hecho, las necesidades de combustible y el total de las emisiones disminuirán a medida que tecnologías más avanzadas permitan aumentar los rendimientos.

### FUTUROS SISTEMAS DE GENERACION

Las tecnologías más modernas y eficientes inevitablemente desplazarán a los sistemas actuales, aunque a corto y medio plazos

## FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LAS TASAS DE EMISION

Numerosos factores influyen en la tasa de emisión de gases de efecto invernadero. A continuación se resumen los parámetros predominantes por tipo de combustible.

### *Combustibles fósiles*

- Características del combustible como el contenido de carbono y el valor calórico;
- Tipo de mina y ubicación;
- Prácticas de extracción del combustible (que influyen en los requisitos de transporte y en las liberaciones de metano);
- Pérdidas de transmisión en el caso del gas natural;
- Rendimiento de la conversión;
- Mezcla combustible para necesidades de electricidad asociadas con el suministro de combustible y la construcción y clausura de la central.

### *Energía hidráulica*

- Tipo (ríos no regulados o embalses);
- Ubicación de la central (trópicos frente a clima de las regiones septentrionales);
- Uso de energía para construir la presa;
- Emisiones generadas durante la construcción de la central (hormigón y acero), que predominan en la generación total efectuada en ríos no regulados y embalses "tipo alpino" (montañosos). Respecto de embalses grandes, cuya relación volumen-superficie es elevada (ubicados por lo general en regiones septentrionales como el Canadá y Finlandia) y en regiones tropicales húmedas (Brasil), la descomposición de la biomasa que queda cubierta durante las inundaciones y la oxidación del sedimento superficial (causante de grandes emisiones de CH<sub>4</sub>) influyen en la tasa de emisión de GHG. Las emisiones de CO<sub>2</sub> exceden las tasas de CH<sub>4</sub> en no menos de un factor de diez para los embalses del "tipo septentrional".

### *Biomasa*

- Propiedades de la materia prima (contenido de humedad y valor calorífico);
- Uso de energía para necesidades relativas a la materia prima (cultivo, cosecha y transporte);
- Tecnología de la planta

El factor de emisión de dióxido de carbono de la quema de biomasa es neutro, es decir, que el carbono liberado durante la quema de la biomasa es igual a la absorción biogénica durante el crecimiento de las plantas.

### *Energía nucleoelectrónica (reactor de agua ligera)*

- Uso de energía para la extracción, conversión y enriquecimiento del combustible y para la construcción/clausura de la central (más los materiales);
- Enriquecimiento del combustible por difusión de gases, proceso que consume mucha energía y puede aumentar las liberaciones de GHG en un orden de magnitud cuando se compara con el enriquecimiento por centrifugación;
- Emisiones generadas en la etapa de enriquecimiento, que son muy específicas de cada país, pues dependen de la mezcla combustible local;
- Reprocesamiento del combustible (óxido de uranio u óxido mezclado), que puede representar entre el 10% y el 15% del total de la carga de GHG correspondiente a la energía nuclear.

### *Energía eólica*

- Uso de energía en la fabricación de las aspas y la construcción de la instalación (torre y cimientos);
- Mezcla de electricidad y reglamentos de construcción, que son muy específicos de cada país y de cada emplazamiento (por ejemplo, instalación en el interior o instalación costera);
- El rendimiento anual o factor de capacidad (depende de las condiciones naturales de los emplazamientos), que determinan la frecuencia de funcionamiento (disponibilidad) de la instalación. La velocidad media del viento es el parámetro clave cuando se calcula el grado de intermitencia de la generación (un aumento de 50% en la velocidad del viento, casi duplica el rendimiento anual).

### *Energía fotovoltaica solar*

- Cantidad y clase de silicón usada para fabricar las celdas;
- Tipo de tecnología (material amorfo o cristalino);
- Tipo de instalación (en el techo o en la fachada);
- Mezcla combustible para necesidades de electricidad;
- Rendimiento anual y vida útil supuesta de la instalación, que son consideraciones importantes para calcular la emisiones por kWh (válidas también para la energía eólica). La energía solar y la eólica generan emisiones relativamente bajas por kW, pero los valores por kWh son altos debido a factores de capacidad más bajos (es decir, tecnologías intermitentes).

(durante los próximos 10 a 20 años) en los países industrializados no se prevén cambios radicales en las tecnologías de generación de electricidad debido a las cuantiosas sumas ya invertidas en tecnología

e infraestructura energéticas. Para los países en desarrollo, actualmente abocados a decisiones difíciles que incluyen problemas económicos, sociales, políticos y ambientales, el establecimiento de

nuevos sistemas energéticos no está tan claro.

La mitigación de los problemas ambientales y los factores políticos y económicos promoverán el interés en fomentar y poner en

práctica el uso de tecnologías mejoradas y en ampliar el uso de fuentes renovables como la biomasa, la energía eólica y la energía solar.

En lo que respecta a los sistemas de combustibles fósiles, los mayores cambios obedecerán a mejoras en el rendimiento de conversión de las tecnologías actuales (por ejemplo, la explotación de ciclos combinados), reducciones de la tasa de fuga de metano en la transmisión de gas natural, mayor recuperación del metano durante la extracción de combustible, al control de las propiedades químicas de los combustibles (por ejemplo, el lavado del carbón para aumentar su valor calórico) y a la ubicación óptima de la central eléctrica para reducir al mínimo las emisiones durante el transporte del combustible y las pérdidas en la transmisión de energía. En Europa, los expertos han calculado que las emisiones de los futuros sistemas alimentados con combustibles fósiles podrían ser de 35% a 50% menores que las tasas actuales.

En cuanto a la energía nuclear, los cambios más importantes se deberán al enriquecimiento del combustible por centrifugación (o tecnología de láser) más que al proceso de difusión de los gases mediante el uso intensivo de energía, las mejoras en el rendimiento de la conversión, una mayor utilización del reprocesamiento del combustible y futuros adelantos de la tecnología nuclear para la generación de electricidad. *(Véanse los artículos conexos en las páginas 43 y 51.)*

Las mejoras de la tecnología de las turbinas repercutirán en las emisiones generadas por la energía hidroeléctrica, mientras que en el caso de los sistemas intermitentes, la reducción de las necesidades de material y componentes y los cambios en el rendimiento de la conversión incrementarán la eficacia, lo que, a su vez, reducirá los costos y las emisiones. La ubicación geográfica de las

centrales hidroeléctricas, así como el tipo de instalación, seguirán siendo cuestiones importantes.

## OBSERVACIONES FINALES

Los gases de efecto invernadero pueden influir en el cambio climático mundial, dado que obstaculizan el proceso natural de intercambio de calor entre la atmósfera terrestre y el espacio ultraterrestre. La reducción de las concentraciones de GHG en la atmósfera se ha convertido en una prioridad internacional como lo prueba la firma del Protocolo de Kyoto, en virtud del cual se reducirían las emisiones de los países industrializados (Anexo I) en 5% por debajo de los niveles de 1990 durante el período de compromiso comprendido entre los años 2008 y 2012.

Para conseguir el objetivo de reducción proyectado podrían ponerse en práctica varias opciones técnicas. En lo que concierne a las emisiones relacionadas con la generación de electricidad, tal vez el factor más importante a corto plazo sea lograr una utilización más eficiente de la energía en todas las etapas del ciclo del combustible, incluidos su preparación, transporte, y conversión en electricidad en la central eléctrica, y en el lugar del uso final (que no se ha examinado en este artículo).

Las estrategias para reducir las liberaciones de metano durante la extracción del combustible y durante la transmisión del gas son muy importantes. El cambio de combustible en favor de los que tengan un contenido de carbono menor o bajo, como el gas, la energía nuclear y las fuentes de energía renovables, desempeñará un papel muy importante en la reducción de las emisiones. Estos cambios son técnicamente viables, en virtud de los conocimientos y la experiencia que se tienen hoy día, exigen modificaciones mínimas en el estilo de vida de los consumidores y representan un rendimiento razonable de capital

(gas y energía nuclear para la generación de base y fuentes renovables de energías en mercados con finalidades concretas o para aplicaciones de carga punta).

En el presente artículo se ha proporcionado información sobre los factores de emisión de GHG de diferentes combustibles, determinados mediante el enfoque de la cadena energética completa, con el que se trata de cuantificar las emisiones liberadas a la atmósfera durante todas las etapas de la generación de electricidad, es decir, desde el principio hasta el final. Las tecnologías de combustibles fósiles registran los factores de emisión más elevados, y, entre ellos, los del carbón suelen duplicar los del gas natural.

Tomando en consideración la amplitud de las variaciones observadas en la tecnología de conversión del combustible en electricidad, cabe afirmarse que los factores de emisión de GHG pueden ser de un orden de magnitud mayores que los de los actuales sistemas fotovoltaicos solares y de hasta dos órdenes de magnitud mayores que de la energía nuclear y la energía hidráulica. Las estimaciones de GHG correspondientes a las cadenas de la energía eólica y la de biomasa se sitúan entre los resultados correspondientes a la energía solar y la nuclear.

Nunca se insistirá demasiado en esta importante conclusión: ninguna tecnología que se emplee en relación con el suministro y el uso de energía, ya sea en la producción de electricidad, en el transporte u otras actividades, entraña un nivel cero de emisiones de GHG. Sin embargo, las variaciones de los factores de emisión correspondientes a las diferentes opciones pueden ser muy significativas. No cabe duda de que ello influirá en el proceso de adopción de decisiones relacionado con la selección de las centrales eléctricas que se incluirán en los futuros sistemas nacionales de energía. □