

Producción de electricidad y gestión de desechos: Comparando las opciones

En un estudio del OIEA se comparan las estimaciones de los costos de la gestión de desechos procedentes de la producción de electricidad a partir de combustibles nucleares y fósiles

Muchos años han transcurrido desde que el advenimiento de la energía nucleoelectrica fuera ensalzado como una fuente de "electricidad tan barata que no valía la pena medir". Con todo, el objetivo principal de los programas de desarrollo de la energía nucleoelectrica es proporcionar una fuente de electricidad asequible y segura a corto y largo plazos. Por eso lo que cuesta proporcionar la electricidad es una cuestión de suma importancia, como también lo es la selección del método para calcular estos costos. Por largo tiempo, numerosas organizaciones, entre ellas el OIEA, han venido calculando y comparando los costos relativos de los distintos métodos de generación de electricidad con miras a desarrollar una perspectiva adecuada.

Desde el desarrollo inicial de los reactores de fisión nuclear, la gestión de los desechos radiactivos se suele considerar como uno de los problemas principales de la energía nucleoelectrica. La preocupación se ha extendido a los costos que ello entraña, en particular los que están asociados a la evacuación de desechos de actividad alta o de combustible gastado no tratado. Muchas veces los detractores de la energía nucleoelectrica han esgrimido la cuestión de los costos en sus argumentos, aunque no siempre de manera objetiva. Más recientemente, las organizaciones ambientalistas han comenzado a percatarse de que todas las formas de producción de energía generan desechos y tienen repercusiones ambientales que pudieran ser inaceptables si no se controlan adecuadamente. En los últimos años temas tales como el "efecto de invernadero" y la "lluvia ácida" se han transformado en cuestiones políticas importantes que han suscitado un examen más detallado de los aspectos relacionados con la gestión de los desechos procedentes del quemado de combustibles fósiles. Hasta la fecha estos aspectos no estaban sujetos a regulaciones estrictas, especialmente en algunas partes del mundo. En estos momentos se ha llegado

a una etapa en la que la gestión de desechos procedentes de la energía nucleoelectrica se mantiene sujeta a estrictos reglamentos y en la que las regulaciones para el control de los desechos provenientes de las centrales alimentadas con combustibles fósiles son cada vez más rigurosas. Como es casi seguro que una parte sustancial de la electricidad que se continúa generando provenga de ambas fuentes, el momento es oportuno para examinar las prácticas de la gestión de desechos y sus costos.

El presente artículo se basa en un estudio realizado por el OIEA de las estimaciones que se han hecho sobre los costos de la gestión de desechos. Recientemente se han concluido una serie de estudios de costos sobre distintas etapas de la gestión de desechos. Se consideró útil compilar los resultados de estos estudios y compararlos de manera objetiva con los costos de la gestión de los desechos derivados de la producción de electricidad a partir de otras fuentes energéticas. Esta comparación podría servir después para tener un panorama preciso de los aspectos económicos y ambientales de los diferentes medios de producción de electricidad.

En el estudio se comparan los costos que se derivan de la gestión de desechos generados en la producción de electricidad a partir de ejemplos representativos del combustible nuclear y fósil. Los costos asociados con la tercera fuente de generación de electricidad más importante, la energía hidráulica, son a todas luces pequeños y por lo tanto no se consideraron en este trabajo. Los combustibles fósiles y nucleares pueden emplearse en algunos tipos de centrales. Como no resultaría práctico examinar todas las variantes posibles, para la evaluación se seleccionaron centrales representativas que poseen una capacidad de 1000 megavatios eléctricos (MWe), todas funcionando a un factor de capacidad del 70% durante 30 años.

por
V. Tsyplenkov

Ciclos del combustible nuclear y fósil

Ciclo del combustible fósil. En el mundo industrializado el carbón es el principal combustible fósil utilizado para la generación de electricidad, aunque

El Sr. Tsyplenkov es funcionario de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y Gestión de Desechos del OIEA.

la participación del gas aumenta rápidamente. En algunos países el petróleo también constituye un combustible importante para la producción de electricidad, pero muchos tratan de evitar su utilización por las posibles fluctuaciones súbitas del precio del petróleo. Desde el punto de vista de la generación de desechos, el petróleo se ubica entre el carbón y el gas. Por ello, a los fines de la comparación se seleccionaron el carbón y el gas como ejemplos representativos de combustibles fósiles.

Las centrales modernas alimentadas con carbón emplean el carbón pulverizado. Cuando se produce la combustión, el carbón reacciona con el oxígeno y

se produce el dióxido de carbono (CO_2). El proceso de combustión produce óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), cenizas volantes y algunos otros subproductos contaminantes, incluidos los radionucleidos contenidos en el carbón.

Para la producción de electricidad de carga básica existen dos tipos de centrales alimentadas con gas. La primera es una central de ciclo de vapor convencional (CVC). No obstante, las unidades más modernas emplean turbinas de gas antes del ciclo de vapor para mejorar la eficiencia de la unidad; esta combinación se denomina central de ciclo combinado (CC). El proceso de combustión del gas natural es mucho más limpio que el del carbón; los principales productos de su combustión son CO_2 , agua y NO_x .

Es probable que una central convencional alimentada con carbón y una central de ciclo combinado alimentada con gas se conviertan en las principales fuentes de la nueva generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Ambas representan los extremos de la gama de problemas que se asocian a la gestión de desechos provenientes de los combustibles fósiles. (Véase el diagrama de la página 30.)

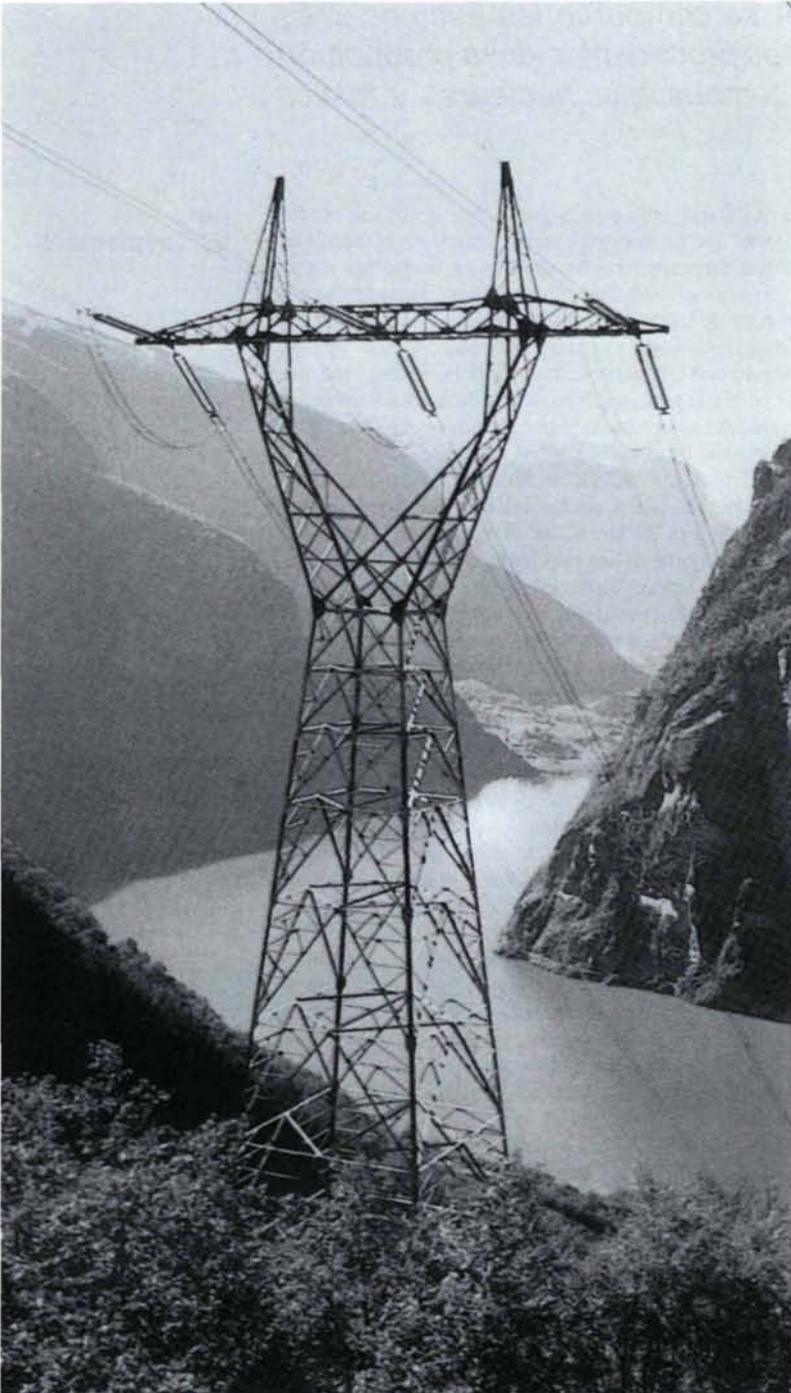
Ciclos del combustible nuclear. Las centrales nucleares generan electricidad a partir del calor que se produce cuando los núcleos de los átomos de los elementos pesados se fragmentan. El calor se emplea para producir el vapor que pone en funcionamiento las turbinas que generan electricidad.

En la actualidad el uranio es el principal combustible nuclear. Se encuentra en estado natural y se extrae mediante las técnicas tradicionales de extracción de minerales. Posteriormente se somete a tratamiento para que pueda ser utilizado como combustible en un reactor nuclear. El uranio natural contiene dos isótopos principales, el uranio 238 y el uranio 235. Sólo los núcleos de los átomos de uranio 235 son fácilmente fisibles. Sin embargo, el uranio 235 representa sólo el 0,7% del uranio natural. Algunos reactores emplean el uranio natural como combustible, pero hoy día la mayoría utiliza uranio ligeramente enriquecido en el cual se ha aumentado (enriquecido) en pequeño porcentaje la proporción de átomos de uranio 235. Por consiguiente, la mayor parte del uranio es enriquecido antes de convertirlo en elementos combustibles para cargar el reactor.

Cuando el combustible gastado se extrae del reactor, lo que ocurre generalmente todos los años, el combustible contiene uranio no consumido, productos de fisión, plutonio y otros elementos pesados. Es posible disolver el combustible gastado y elaborarlo químicamente (reelaborarlo) a fin de extraer el uranio y el plutonio no utilizados para la fabricación y el reciclado del combustible. También se pueden evacuar los elementos combustibles gastados directamente como desechos sin reelaboración.

Los dos principales ciclos del combustible nuclear son el ciclo abierto del reactor de neutrones térmicos y el ciclo del reactor de neutrones térmicos con reelaboración. (Véase el diagrama.) En el ciclo "abierto" del reactor térmico el combustible gastado no se reelabora, sino que se almacena hasta que a la larga se evacua como desecho. En el ciclo del reactor térmico con reelaboración, el combustible gastado se reelabora y el uranio y el plutonio se separan de los productos de fisión. El uranio, el plutonio, o ambos,

Líneas eléctricas
en Noruega.
(Cortesía: NorEnergi.)



pueden reciclarse en nuevos elementos combustibles.

En la actualidad para la generación de electricidad se usan distintos tipos de reactores térmicos. El más difundido en todo el mundo es el reactor de agua a presión (PWR), por eso a los fines de la presente comparación se seleccionó, con reelaboración y sin ella, como ejemplo de referencia nuclear. Aunque los demás tipos de reactores producen desechos distintos en algunos aspectos de los producidos por un PWR, se consideró que el PWR era suficientemente representativo y que podía usarse como ejemplo de referencia.

Generación de desechos

Todas las etapas de los ciclos del combustible —extracción, fabricación o elaboración del combustible, generación de potencia y clausura— generan desechos.

La generación de electricidad a partir de combustible nuclear produce desechos muy diferentes, desde el punto de vista de la cantidad y el tipo, de los provenientes de la generación de electricidad con combustibles fósiles. Los desechos que producen las centrales nucleares tienen volúmenes relativamente pequeños de material radiactivo. Por el contrario, las centrales alimentadas con combustibles fósiles queman grandes cantidades de combustible y los desechos procedentes de la explotación de la central incluyen grandes cantidades de productos de combustión. Ambos tipos de centrales eléctricas producen desechos en estado gaseoso, líquido y sólido.

No todo el mundo sabe que la combustión del carbón libera al medio ambiente cantidades de radiaciones que son similares (por sus posibles consecuencias biológicas) en magnitud a las emisiones cotidianas que la industria nuclear libera para producir cantidades comparables de electricidad. La producción y el uso del gas natural libera también radón radiactivo a la atmósfera.

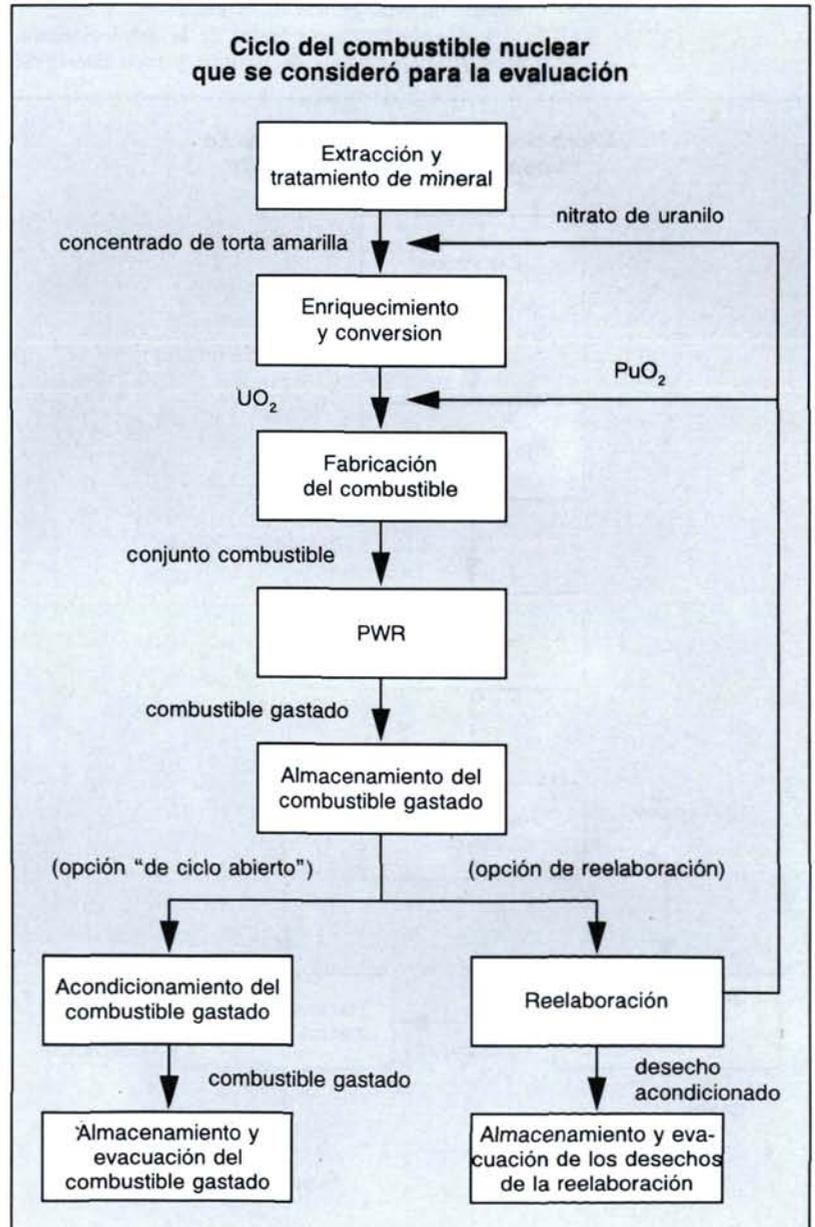
Desechos de los combustibles fósiles. La mayor parte de los desechos procedentes de los ciclos de los combustibles fósiles se genera durante la producción de energía, aunque en el caso del carbón también se producen grandes cantidades de desechos sólidos durante la extracción y la elaboración del combustible.

La combustión de los combustibles fósiles libera dióxido de carbono. Comparado con el carbón, el quemado de gas natural libera algo más de la mitad de CO₂ por unidad de energía. Asimismo, la combustión del carbón libera óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) mientras que los productos de la combustión del gas apenas contienen compuestos de azufre. Además, la combustión del carbón y el gas libera óxidos de nitrógeno (NO_x).

Con la combustión del carbón se producen también emisiones de materia en partículas (cenizas). Parte de las cenizas, aproximadamente el 10%, se queda en la caldera y es eliminada; se les denomina cenizas de fondo. No obstante, la mayor parte de las cenizas aparece en forma de materia en partículas muy finas en el gas de la combustión; esto se conoce como cenizas volantes.

Generación de desechos radiactivos acondicionados

Etapa	Clase de desecho	Unidad	Margen		
			bajo	de referencia	alto
Extracción y tratamiento	DAB	m ³ /a	20 000	40 000	60 000
Conversión y enriquecimiento	DAB	m ³ /a	20	20	20
Fabricación	DAB	m ³ /a	20	30	30
Funcionamiento de la central	DAB	m ³ /a	100	130	200
	DAI	m ³ /a	50	80	100
Reelaboración	A1	m ³ /a	3.5	4	4
	A2	m ³ /a	20	22	25
	DAI	m ³ /a	50	75	100
	DAI	m ³ /a	470	580	690
Combustible gastado (no acondicionado y de "ciclo abierto")		t/a	25	30	35



Corrientes de desechos del carbón después del tratamiento de los desechos

	Corrientes de desechos (g/kWh)
NO _x	0,25
SO ₂	0,32
Cenizas volantes liberadas a la atmósfera	0,07
Cenizas volantes recogidas	3,02
Yeso	2,10

En el caso de las instalaciones alimentadas con combustibles fósiles, es probable que la clausura ocurra poco después de que termine la vida útil de la central. Los desechos procedentes de la clausura estarán asociados en general con la demolición y no entrañarán peligros residuales especiales.

Desechos nucleares. Como en los ciclos de los combustibles fósiles, cada etapa del ciclo del combustible nuclear genera desechos.

Los desechos procedentes de la extracción son principalmente aguas de la mina y roca estéril. Si

bien las colas del tratamiento del uranio son por lo general similares a los desechos procedentes de la extracción, contienen casi todos los hijos radiactivos naturales resultantes de la desintegración del uranio.

Los procesos de conversión y enriquecimiento producen desechos sólidos y gaseosos que contienen algún uranio en suspensión en el aire. Por otra parte, las plantas de enriquecimiento producen grandes volúmenes de uranio empobrecido que se considera un desecho a los fines de esta evaluación.

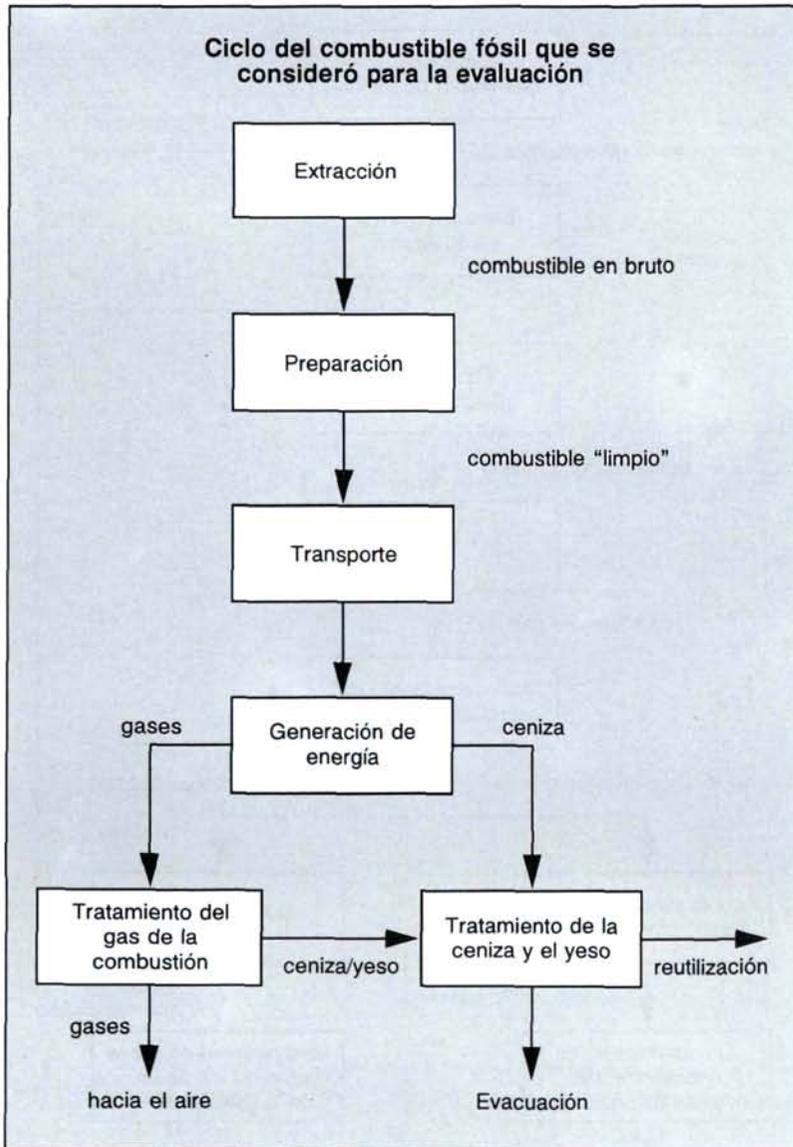
Según se emplee la reelaboración o no, los desechos de la fabricación del combustible aparecen en forma de diversas corrientes sólidas y líquidas contaminadas con uranio y/o plutonio.

La radiactividad se produce en diversas corrientes de desechos líquidos de la central. Además, durante la explotación de los reactores se generan pequeñas cantidades de desechos gaseosos. Asimismo, las operaciones con los reactores dan lugar a una gama de desechos sólidos que aparecen en forma de elementos contaminados o activados.

El contenido radiactivo de los desechos de la reelaboración está compuesto fundamentalmente por productos de fisión y activación, y actínidos secundarios que llegan a la planta de reelaboración como parte del combustible gastado y que aparecen en forma de corrientes de desechos líquidos y sólidos.

La radiactividad de algunos de los componentes de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear exige que durante la clausura se empleen técnicas costosas de manipulación por control remoto. El costo y la necesidad de aplicar este método pueden reducirse aplazando los trabajos y permitiendo que se produzca la desintegración radiactiva. En el caso de las centrales nucleares una estrategia muy utilizada en todo el mundo es el aplazamiento de la clausura, que es el método que se seleccionó como referencia a los fines de esta evaluación. La mayoría de los desechos radiactivos provenientes de la clausura de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear son desechos sólidos de actividad baja (DAB). Los pequeños componentes de los desechos de actividad intermedia (DAI), los desechos de actividad alta (DAA) o los desechos transuránicos están asociados a la reelaboración del combustible gastado y a la fabricación de combustibles de mezcla de óxidos.

Ciclo del combustible fósil que se consideró para la evaluación



Gestión de desechos

Desechos fósiles. La cuestión más grave de la gestión de desechos sólidos en el ciclo del carbón es el relativo a los estratos de mezcla de las minas, que plantean un gran problema de evacuación. Una opción posible es emplearlos como relleno en las minas de donde se extrajeron.

El tratamiento de los gases de la combustión en una central alimentada con carbón consta de tres etapas: eliminación de NO_x, reducción de SO₂ y reducción de las partículas de materia. En el caso del gas natural, el único problema importante de la gestión de los desechos de los gases de la combustión que se ha podido resolver hasta ahora es el relacionado con los óxidos de nitrógeno.

Modificando el proceso de combustión se ha logrado reducir un poco el NO_x. No obstante, el

proceso más efectivo para la eliminación de NO_x es el de la reducción catalítica selectiva (SCR) que utiliza amoníaco y un catalizador para reducir el NO_x a nitrógeno y agua. Las tasas clásicas de este tipo de reducción son de aproximadamente el 80%. El material catalítico utilizado es el único desecho que requiere evacuación como resultado de este proceso. Sin embargo, el componente principal puede ser devuelto al suministrador para su reutilización.

En los procesos de desulfuración del gas de la combustión (FGD) se emplean materias alcalinas para absorber y eliminar el dióxido de azufre de este gas. Los procesos de FGD tienden a ser prolongados y caros ya que es preciso tratar volúmenes muy grandes de gas que contienen concentraciones de SO₂ muy bajas. La reacción del dióxido de azufre con el reactivo produce grandes cantidades de producto (yeso), parte del cual puede ser tratado para producir yeso del que se emplea en el revestimiento de paredes y el resto utilizarlo como material de relleno. La eficacia que suele lograrse con el proceso FGD es de 95%.

La reducción de las partículas de materia en el gas de la combustión suele lograrse utilizando precipitadores electrostáticos (ESP) que tienen una eficiencia de eliminación típica de un 95%. Parte de las cenizas volantes y de fondo extraídas puede utilizarse en la industria del cemento y en la construcción de carreteras; el resto tiene que evacuarse como material de relleno.

En el presente, no existe ninguna tecnología eficaz en función del costo que reduzca las emisiones de CO₂ y no se ha intentado la remoción de los radionucleidos presentes en los efluentes gaseosos. Después del tratamiento de los desechos se liberan al medio ambiente diversas corrientes de desechos (Véase el cuadro.)

Desechos nucleares. Hoy día se aplican una serie de técnicas de gestión de desechos radiactivos, que comprenden desde la descarga directa al medio ambiente (dispersión) hasta las técnicas complejas de inmovilización de radionucleidos y su evacuación en instalaciones de evacuación cuidadosamente diseñadas y construidas.

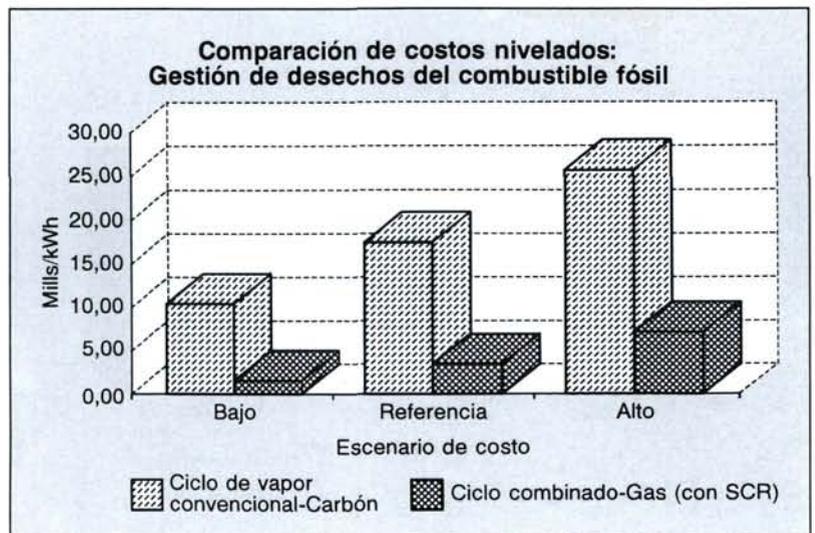
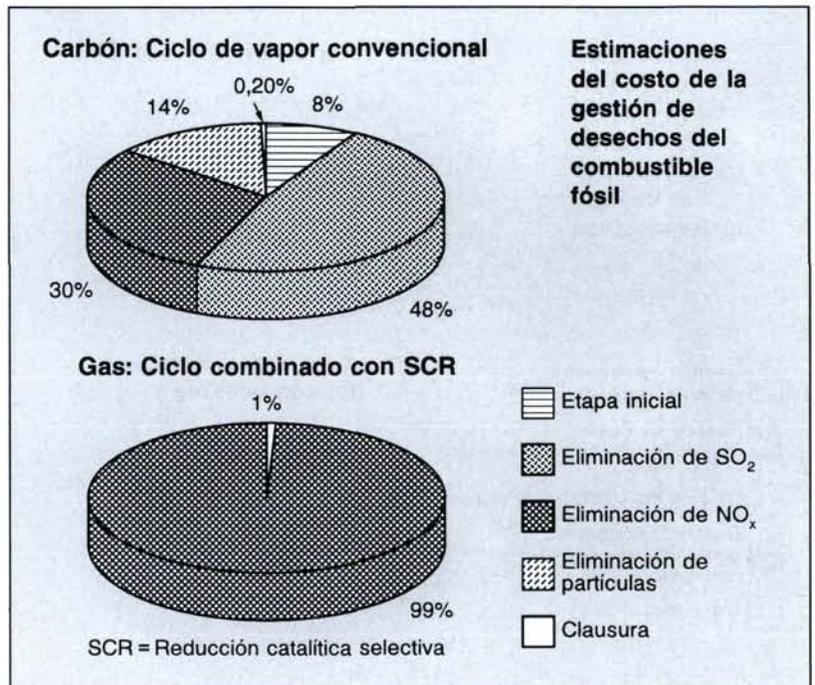
Desechos de la extracción y el tratamiento. Todos los desechos generados por la extracción del mineral de uranio se tratan antes de que tenga lugar cualquier clase de liberación. La evacuación de las colas de tratamiento suele realizarse en el emplazamiento por lo general cubriendo las colas para reducir la dispersión radiactiva.

Desechos líquidos. El tratamiento de desechos líquidos constituye una parte importante del programa de gestión de desechos en la mayoría de las instalaciones nucleares. La opción de la gestión de desechos que se escoja dependerá de las características y la cantidad de los desechos generados. Las pequeñas cantidades de desechos acuosos que contienen radionucleidos de período corto pueden liberarse en el medio ambiente. Es posible evaporar los desechos líquidos que contienen elevadas concentraciones salinas reteniendo el material radiactivo en el concentrado o precipitándolo químicamente para producir un lodo con las propiedades adecuadas para su tratamiento ulterior. Algunos desechos líquidos pueden absorberse en matrices sólidas como pasc

previo al tratamiento del sólido. En ocasiones se utiliza también la incineración para reducir el volumen de los aceites activos y los solventes combustibles. Los concentrados de DAB y DAI se capsulan en cemento o en matrices de betún y posteriormente se introducen en contenedores apropiados.

Los DAA líquidos generados en las instalaciones de reelaboración contienen casi todos los productos de fisión presentes en el combustible. Actualmente este tipo de DAA se convierte en vidrio mediante un proceso de vitrificación y el vidrio fundido se vierte en contenedores de acero inoxidable antes de evacuarlo en repositorios profundos preparados al efecto. (En este estudio se clasificaron estos desechos de actividad alta emisores de calor como A1.)

Desechos gaseosos. Por lo general los desechos gaseosos radiactivos se descargan en la atmósfera de conformidad con los requisitos de reglamentación



pertinentes. Si es necesario, los desechos gaseosos se tratan antes de la descarga para asegurar que no se excedan los límites reglamentarios establecidos para la descarga.

Desechos sólidos. Además de los desechos de reelaboración vitrificados, entre los desechos sólidos se incluyen además los cascos de vainas, y el equipo del conjunto combustible (clasificados como A2), filtros, equipo utilizado, resinas y lodos, sólidos del purificador y desechos en general. Todos los desechos, excepto aquellos que tengan muy baja actividad, requieren tratamiento y acondicionamiento.

Entre las operaciones de tratamiento y acondicionamiento se incluyen la reducción de volumen, la conversión de desechos en formas más estables y el embalado. Las diferentes etapas de la gestión de desechos del ciclo de PWR examinadas en este artículo generan volúmenes diferentes de desechos

sólidos acondicionados. (Véase el cuadro de la página 29.)

La evacuación en una instalación adecuada, que pudiera realizarse en formaciones geológicas profundas o cerca de la superficie, contribuye a limitar la emisión de radionucleidos al medio ambiente a niveles aceptables. En el caso del ciclo abierto, el combustible gastado se almacena durante años, probablemente varios decenios para lograr así que la radiactividad y la carga de calor asociada disminuyan antes de la evacuación.

Metodología para la evaluación de los costos

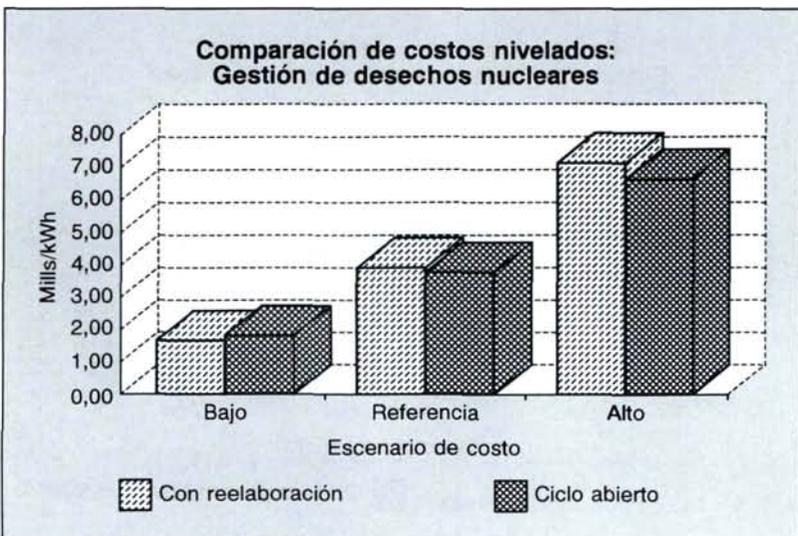
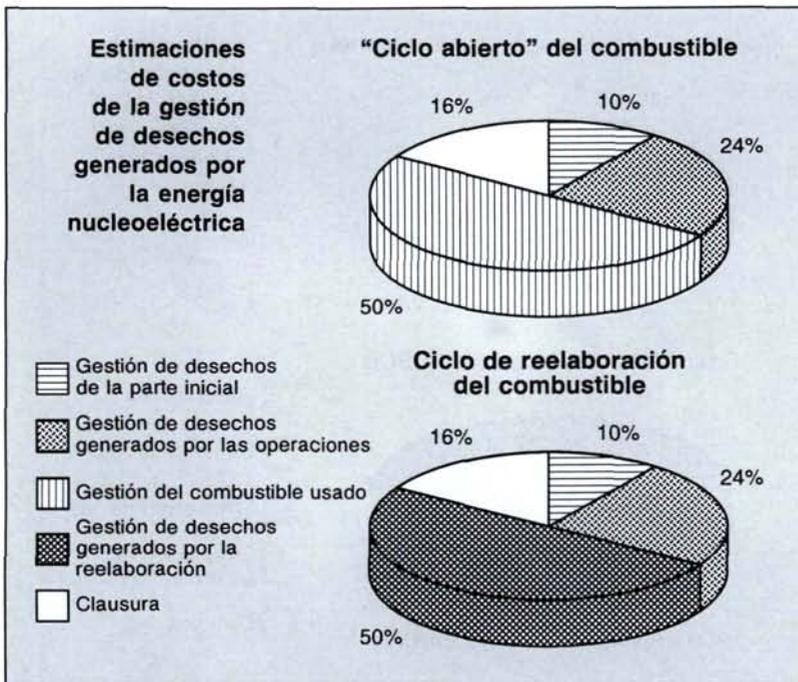
El estudio de las estimaciones existentes nos ha permitido obtener los datos relativos a cada uno de los componentes del costo de la gestión de desechos. En aras de propiciar una comparación bien fundada de los costos, en los casos necesarios se han ajustado los datos primarios y se han aplicado a los casos de referencia. Finalmente, todas las estimaciones de los costos se han convertido a un tipo común de costo unitario nivelado de la energía (CUN) expresado en dólares de los Estados Unidos de América hasta el 1 de julio de 1991, por kWh. El CUN se define de forma tal que el valor actual de la corriente de costos equivale al valor actual del costo nivelado simple multiplicado por el número de unidades (kWh) en cada lapso de tiempo. Para poder colocar en un mismo nivel los costos de la gestión de desechos con fines comparativos, es necesario convertir todas las corrientes de costos a un valor común mediante el procedimiento de descuento. Este método es ampliamente aceptado en las valoraciones económicas como procedimiento que facilita la comparación de las opciones de inversión que tienen diferentes corrientes de efectivo diseminadas en un lapso de tiempo.

La principal crítica que se hace a la aplicación de la técnica de descuento para la evaluación del costo de la energía nucleoelectrica es su aplicación a corrientes de costo significativas mucho después de concluida la producción de electricidad en la estación generadora nuclear. Esta crítica tiene que ver con la igualdad intergeneracional, es decir, hasta qué punto los clientes de las compañías eléctricas pagan el costo total del servicio que se les brinda y hasta qué punto las futuras generaciones asimilarán costos por los que no reciben beneficio alguno.

Para reconocer esta inquietud, los casos de referencia se basan en una tasa de descuento real de 5% hasta el final de la vida útil de la central nuclear seguido de una tasa de descuento cero a partir de ese momento. Muchos países miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) favorecen la tasa de descuento real de 5%. Además, se ha comprobado la susceptibilidad de los resultados ante diferentes factores: la tasa de descuento, el factor de capacidad y la vida útil de la central nuclear.

Datos de los costos

Ciclo del combustible fósil. En ambos ciclos del combustible los costos nivelados de la gestión de



desechos abarcan una gama de aproximadamente 0,5 a 2,0 veces los casos de referencia. (Véanse los gráficos.)

Al examinar las proporciones relativas de estos costos, se puede observar que sólo el control de SO₂ representa aproximadamente el 48% de los costos en una central alimentada con carbón de ciclo de vapor convencional. En cuanto al ciclo combinado, los costos derivados de la clausura constituyen el 99% de los costos de la gestión de desechos.

Los costos de la gestión de desechos del combustible fósil oscilan desde casi cero a aproximadamente 25 milésimas por kWh (una milésima representa una milésima parte de un dólar de los Estados Unidos). Se espera que los costos se mantengan dentro de esa escala con variaciones típicas dentro de la tasa de descuento del factor de capacidad o de la vida útil. El extremo inferior de la escala corresponde a la generación a partir del gas y el extremo superior a la generación a partir del carbón. A estos niveles, los costos de la gestión de desechos representan una fracción baja o moderada de los costos generales de la generación de electricidad de carga básica a partir de combustibles fósiles. El total de costos nivelados de la electricidad generada a partir de combustibles fósiles se incluye por lo general en la escala de 40 a 60 milésimas por kWh.

Ciclo del combustible nuclear. El costo nivelado de la gestión de desechos de los dos ciclos del combustible nuclear analizados es similar. (Véanse los gráficos.)

En ambos ciclos, la gestión de desechos en la etapa inicial resulta ser cerca del 10% del costo total de la gestión de desechos. De ello, aproximadamente una tercera parte se debe a la gestión del uranio empobrecido como desecho. La gestión de desechos derivados de la explotación de una central nuclear representa aproximadamente el 24% de los costos y el 15% se debe a la clausura de la central. El 50% del resto de los costos está asociado con la etapa final del ciclo del combustible.

Los costos de la gestión de desechos nucleares se incluyen en la escala de 1,6 mil/kWh a 7,1 mil/kWh. Tal como ocurre en la gestión de desechos fósiles, estos costos representan una fracción baja o moderada del costo de la electricidad generada. Los costos de la gestión de desechos pueden compararse con los costos de la electricidad de origen nuclear, que es de 30 a 50 mil/kWh.

Comparación. Los costos de la gestión de desechos nucleares se sitúan entre los costos de ambos casos de combustibles fósiles. Se asemejan más a los costos del ciclo combinado a partir del gas, el cual representa el extremo inferior de la escala del combustible fósil. La opción que emplea el carbón como combustible, que representa el extremo superior de la escala del combustible fósil, genera costos asociados a la gestión de desechos casi cuatro veces mayores que los costos de los casos nucleares.

Mientras que ambos ciclos del combustible nuclear muestran una escala de valores altos y bajos que abarcan un factor de cuatro, la fluctuación de las estimaciones de los costos del combustible fósil abarca sólo un factor de dos o menos. Esta diferencia en las variaciones puede atribuirse en parte al hecho de que los costos de los combustibles fósiles se basan en una tecnología establecida, mientras que los

costos derivados de los combustibles nucleares incluyen un aporte sustancial de las actividades de gestión de desechos que no están aún sólidamente establecidas. Aun cuando el tratamiento del gas del combustible es una actividad relativamente nueva, existen varias centrales en funcionamiento y las estimaciones de costo son más sólidas que las de algunas técnicas de gestión de desechos, como la clausura y los repositorios profundos. A la luz de lo expuesto anteriormente, la incertidumbre asociada con los costos de la gestión de desechos nucleares es mayor que en el caso de las actividades de gestión de desechos fósiles examinadas en esta evaluación. Parte de la diferencia en las variaciones existentes entre las estimaciones de los costos de la gestión de desechos fósiles y nucleares se debe también al efecto de las diferencias entre las condiciones locales, incluidos los requisitos de reglamentación.

Posibles cambios futuros

No se prevé que ocurra un cambio importante en las prácticas o expectativas de la gestión de desechos en relación con la generación nuclear. No obstante, se avisan algunas posibilidades futuras que pudieran influir en los costos de la gestión de desechos. Entre éstas se incluyen los esfuerzos dirigidos a elevar el quemado de combustible, mejorar la limpieza general y lograr técnicas de tratamiento de desechos más efectivas y avanzadas, como la supercompactación, la biodegradación, la incineración y el quemado del plasma mediante soplete. Al parecer todos estos adelantos podrían ayudar a reducir los costos de la gestión de desechos nucleares. En el futuro se avanzará también en los repositorios profundos y se contará con mayor experiencia sobre el proceso de clausura. Si bien puede correrse el riesgo de que los costos resulten más elevados de lo previsto, también se reducirá significativamente la incertidumbre reinante respecto de los costos de la gestión de desechos nucleares.

En el caso de los costos de la gestión de desechos fósiles, uno de los mayores adelantos previstos es el uso más generalizado de las tecnologías del carbón que no generan desechos. Como resultado se reducirán las consecuencias sobre el medio ambiente y los costos de la gestión de desechos con la aplicación de una tecnología que integra con mayor eficiencia el control de emisión dentro del proceso mismo de generación de electricidad. Otro adelanto posible en relación con la generación a partir de combustible fósil es la regulación relativa al CO₂. Ello podría entrañar el desarrollo de soluciones tecnológicas como la evacuación de CO₂ en zonas exentas de gas en el fondo del océano, o la aplicación de impuestos sobre la utilización del carbón, lo que podría aumentar significativamente los costos de la gestión de desechos fósiles.

Tanto en el caso de los combustibles fósiles como nucleares existe también la posibilidad de que los reglamentos vigentes relativos a la gestión de desechos se hagan más estrictos. Ello incluiría la posibilidad de que las compañías eléctricas asuman los costos asociados a los residuos liberados al medio ambiente. Tales cambios acarrearían un aumento de los costos.