

3. La energía nuclear.

La fisión nuclear se ha utilizado como fuente de energía para generar electricidad desde hace cerca de 50 años, un periodo relativamente breve en comparación con algunas otras tecnologías energéticas. Durante los años 70, debido a la crisis del petróleo, las políticas energéticas de muchos países se centraron en la energía nuclear, su utilización creció rápidamente y fue considerada como una tecnología capaz de garantizar la demanda a precios competitivos.

Sin embargo, esta situación comenzó a cambiar a mediados de los 80's cuando los precios del petróleo bajaron y nuevos yacimientos de gas fueron explotados, ofreciéndole a las compañías eléctricas nuevas opciones para la generación. Además los accidentes de Three Mile Island, ocurrido en 1979 en los Estados Unidos y el de Chernobyl en el año 1986 en Ucrania, causaron un empeoramiento de la opinión pública respecto de esta fuente de energía y una disminución de la confianza en la seguridad de esta industria y en sus beneficios económicos, lo que modificó las perspectivas de desarrollo en gran parte del mundo occidental.

El aumento de los costos y los retrasos en los plazos previstos para la puesta en marcha de las nuevas centrales, consecuencia de los nuevos requisitos de seguridad exigidos a los operadores tras el análisis de estos accidentes, detuvieron la construcción de nuevas plantas en Estados Unidos y, como consecuencia, en otros países, principalmente de Europa. La repercusión de estos accidentes hizo surgir una opinión pública contraria a la energía nuclear que influyó sobre las políticas energéticas nacionales, deteniendo su desarrollo y creando una división radical entre partidarios y detractores de la opción nuclear. Sin embargo, esto no ha sido así para el caso de países donde la demanda de energía ha crecido considerablemente, como en Asia, (Japón, Corea del Sur y China, principalmente), y en Rusia, donde han continuado los programas para la construcción de nuevas centrales nucleares.

Actualmente en distintos países se ha iniciado un debate sobre la energía en el que se contempla la evaluación de la capacidad de las fuentes disponibles para cubrir la demanda esperada, la necesidad de diversificar las fuentes de suministro para disminuir la dependencia a otras fuentes de energía y el análisis de los efectos sobre el medio ambiente de las distintas opciones tecnológicas. En este nuevo contexto la energía nuclear se considera capaz de contribuir a cubrir gran parte de la demanda futura en condiciones económicamente competitivas con otras fuentes. Por tanto, es necesario realizar un análisis detallado para evaluar las posibles ventajas e inconvenientes de esta tecnología. Un aspecto importante que debe de considerarse en esta discusión es el papel de la opción nuclear como una de las tecnologías energéticas capaces de reducir el riesgo de cambio climático, evitando las emisiones de gases causantes del efecto invernadero.

3.1 Situación Actual.

Al 31 de agosto de 2004 había en todo el mundo 439 centrales nucleares en 31 países, con una potencia neta total instalada de 364,569 GW_e que generaron 2,574 TWh en el año 2003, alrededor del 16% de la electricidad mundial. Este porcentaje varía según los países, destacando entre ellos, el 80.1 % de Lituania, Francia con el 78%, Bélgica con el 55%, Suecia con el 50%, Alemania y Finlandia con el 28%, Japón y España con, aproximadamente, el 25%, EE.UU. con el 20% y Rusia con el 16%.¹⁵⁴

Desde inicios del año 2003 hasta el 31 de agosto de 2004 se conectaron a la red cinco unidades, 2 en China, una en la Republica de Corea del Sur, una en Japón y otra en Ucrania, con una potencia neta total de 4.510 MW_e además se reconectaron tres unidades en Canadá que llevaban sin funcionar largo tiempo, con 2.095 MW_e. En este mismo periodo se cerraron definitivamente diez unidades, ocho en el Reino Unido, una en Japón y otra en Alemania, con una potencia neta total de 1,168 MW_e. Actualmente se construyen 28 reactores nucleares, con una capacidad neta de 22,517 MW_e, que comenzarán su operación entre el 2008 y el 2015. En distintas fases de solicitud o planificación se encuentran 35 reactores, y otros 71 están propuestos para su construcción.¹⁵⁵

En el año 2003 la Unión Europea disponía de 145 plantas nucleares produciendo 849 TWh que suponen el 35% de su electricidad.¹⁵⁶ Sin embargo, la situación es muy diferente entre los países miembros. Austria celebró una consulta en 1978 sobre la energía nuclear en la que más de la mitad de la población decidió no poner en marcha la central que se estaba construyendo. Paradójicamente como consecuencia de la liberación del mercado eléctrico, hoy importa electricidad de origen nuclear de los países vecinos, aunque no la produce. En 1980 Suecia decidió el cierre progresivo de sus instalaciones nucleares después de un referéndum nacional, pero el proceso ha sufrido considerables retrasos al no cumplirse las condiciones impuestas posteriormente por el Parlamento para autorizar el cierre. Italia renunció a la energía nuclear en 1987 cerrando las 4 plantas que tenía en funcionamiento. Alemania, Bélgica y Holanda han adoptado oficialmente la decisión de cerrar gradualmente sus programas nucleares, encontrando algunas dificultades para cumplir el calendario previsto. Por su parte Grecia, Irlanda, Luxemburgo y Portugal no la utilizan como fuente energética.

Alemania cuenta actualmente con 18 centrales nucleares que produjeron durante el año 2003 un total de 165.1 TWh de electricidad, el 27,6% de la generación eléctrica alemana.¹⁵⁷ A inicios del 2002 Alemania decidió el abandono de la energía nuclear mediante un cierre progresivo de los reactores después de 32 años de funcionamiento, a más tardar en el 2021, la suspensión de nuevas construcciones y del reprocesado de combustibles usados a partir del 2005.

154 IAEA, 2004. Cit. en Juan A. Cabrera. Energía nuclear. Fundación OPTI y CIEMAT. España, 2005. pág. 15.

155 World Nuclear Association, 2003. Cit. en ídem.

156 Juan A. Cabrera. Energía nuclear. Fundación OPTI y CIEMAT. España, 2005. Pág. 15.

157 World Nuclear Association, 2003. Cit. en ídem. Pág. 16.

Esta decisión obliga a decidir sobre nuevas instalaciones de producción de electricidad para su sustitución y a seleccionar entre las distintas opciones energéticas existentes, en función de su costo y su impacto ambiental.

Francia dispone de 58 reactores nucleares con una potencia instalada de 63 GW_e que producen el 75% de su electricidad. El último reactor, con 1,450 MW_e, fue acoplado a la red en 1999. Esta capacidad nuclear supone para Francia una independencia energética del 50% en el 2002, comparado con la necesidad de importar el 76% de los recursos energéticos en 1973. Su nivel de emisiones es de 1.7 toneladas de CO₂ por habitante, uno de los más bajos de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), frente a la media de 2.31 toneladas de la Unión Europea.¹⁵⁸

Finlandia dispone de 4 plantas en operación que produjeron 22 TWh en el 2003, el 26% de la producción eléctrica. Dentro de la estrategia nacional para cumplir los objetivos de los acuerdos de Kyoto, las emisiones de gases de efecto invernadero deben mantener los niveles de 1990 durante el periodo 2008-2012, lo que unido a la rentabilidad económica, planteó la construcción de una nueva planta nuclear que fue aprobada por el Gobierno y refrendada por el parlamento a primeros de 2001. Los estudios de seguridad iniciales fueron ampliados para incluir el impacto de aviones de gran tamaño sobre la planta a raíz de los ataques terroristas del 11 de septiembre. El informe favorable de seguridad y la solicitud de licencia para la planta de Olkiluoto fueron presentados al Gobierno a principios de 2004. Se trata de una planta basada en el “*European Pressurized water Reactor*”, EPR, con una potencia térmica de 4,300 MW que permitirá una producción de electricidad de 1,600 MW_e, y tendrá un periodo de funcionamiento de 60 años.¹⁵⁹

El Reino Unido dispone de 27 reactores nucleares que produjeron en el 2003 un total de 85,306 GWh, el 22% de su electricidad.¹⁶⁰ Una gran parte de las centrales actuales deberán ser cerradas a lo largo de los próximos 20 años, salvo que se extienda su vida operativa.

De los diez nuevos países miembros que forman parte de la UE desde el 1 de mayo, cinco cuentan con programas nucleares, sumando 19 nuevas centrales a las existentes. El país con mayor porcentaje de generación eléctrica de origen nuclear es Lituania con un 80% y el que menos la república Checa con el 20%.¹⁶¹

Todos estos países tienen una gran dependencia de la energía nuclear y cuentan con una opinión pública a favor. Sin embargo, sus instalaciones necesitan importantes modificaciones en seguridad para adecuarlas a la normativa europea y en algunos casos su cierre definitivo antes del final previsto para su vida operativa.

¹⁵⁸ Juan A. Cabrera, Energía nuclear. Fundación OPTI y CIEMAT. España, 2005, pág. 16.

¹⁵⁹ World Nuclear Association, 2003. Cit. en Ídem.

¹⁶⁰ World Nuclear Association, 2003. Cit. en Ibídem. Pág. 17.

¹⁶¹ Ídem.

3.2 El ciclo del combustible nuclear.

El ciclo de combustible nuclear es una cadena de procesos mediante los cuales, el combustible nuclear es producido y manipulado, antes y después de su uso en un reactor. Existen dos tipos de ciclos de combustible principalmente, el de un solo paso o abierto y el cerrado, la diferencia radica en el modo en que el combustible nuclear utilizado es manejado. Los procesos más importantes en el ciclo están resumidos en la figura 31.

Figura 31. El Ciclo del combustible nuclear.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003.

En el ciclo de combustible de un solo paso, el combustible removido de un reactor es dispuesto en áreas de almacenamiento dentro de la misma planta, esperando su futuro confinamiento. Un ciclo de combustible cerrado también conocido como ciclo de combustible “reciclado”, permite que el material fisible desaprovechado del combustible utilizado sea recuperado y reutilizado para que produzca energía como un nuevo combustible.

3.2.1 El inicio del ciclo.

Minería y Purificación del uranio

La extracción del uranio mineral de la tierra se lleva a cabo de una forma muy similar a la de la extracción de otros recursos minerales. Más de la mitad de la producción de uranio mineral es lograda mediante el uso de los métodos de pozos abiertos convencionales o el método de minería subterránea. El resto es obtenido por Lixiviación in situ (ISL) un método donde una solución solvente es inyectada bajo tierra, disuelve el uranio dentro de la solución y es recuperado en pozos de extracción del uranio disuelto.

La purificación es el proceso a través del cual el uranio mineral minado es físicamente reducido a un tamaño conveniente, luego es químicamente tratado para extraer y purificar el uranio. También reduce el volumen del material para ser transportado a su siguiente etapa en el ciclo del combustible. Reflejando su coloración y consistencia, el producto sólido de la purificación (U_3O_8) es conocido como “yellowcake” o “pastel amarillo” aunque este también puede tener un color grisáceo.

A inicios del 2001, había 21 países productores de uranio diez de los cuales, Australia, Canadá, Kazakhstan, Namibia, Níger, La Federación Rusa, Sudáfrica, Ucrania, los Estados Unidos y Uzbekistán, producían el 90% de la producción mundial. Los productores dominantes son Australia y Canadá, los cuales produjeron más del 50% de la producción mundial en el 2000.¹⁶²

La minería y la purificación del uranio mineral producen diferentes tipos de desperdicios, los cuales requieren un manejo apropiado. Los desperdicios de la minería de pozos abiertos y subterráneos son la tierra y/o rocas de desperdicio. La purificación produce el volumen más grande de desperdicios, que son una mezcla de rocas y líquido de proceso. Estos residuos plantean algunos problemas particulares debido a su gran volumen y a sus altos niveles de contaminantes radiológicos y químicos. La ISL no produce rocas de desperdicio o residuos de la purificación pero es apropiada solo para circunstancias geológicas específicas y debe ser manejada apropiadamente con el fin de proteger los mantos freáticos.

La cantidad de mineral necesario para producir una tonelada de producto, usando pozos abiertos o extracción del subsuelo depende primeramente del grado promedio del mineral que puede fluctuar de 10 a 1000 toneladas (con grados promedio de 10% a 0.1%). Por lo tanto el volumen de los residuos que resultan de purificar este mineral es grande. Por ejemplo, durante su vida, la mina Shirley Basin en los Estados Unidos produjo 9 460 toneladas de uranio mineral con un grado promedio de 0.145%. Esto resultó en 7.1 millones de toneladas de residuos.¹⁶³ La minería y la purificación son industrias maduras con mercados internacionales competitivos.

¹⁶² Uranium Information Centre. Cit. en. NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 24.

¹⁶³ Ídem.

Conversión

La conversión es el proceso químico que transforma el “yellowcake” en hexafluoruro de uranio (UF_6). Este proceso se lleva a cabo solo en algunos lugares alrededor del mundo, en su mayoría países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (ver tabla 14). El Hexafluoruro de uranio es sólido a temperatura normal, pero se convierte rápidamente en gas cuando llega a una temperatura menor a la del punto de ebullición del agua, en esta forma es bastante adecuado para el proceso de enriquecimiento. Usualmente es almacenado y transportado en grandes cilindros. En este punto el uranio sigue reteniendo la misma composición de isótopos como los que se encuentran en el uranio natural.

Tabla 14. Principales Instalaciones de conversión de uranio en el mundo.

País	Sitio(s)
Canadá	Blind River y Port Hope, Ontario
Francia	Malvési; Pierrelatte
Federación Rusa	Angarsk; Ekaterinburg
Reino Unido	Springfields, Lancashire
Estados Unidos	Metropolis, Illinois

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

Enriquecimiento

El enriquecimiento del uranio consiste en la separación parcial del uranio en sus dos principales isótopos (U^{235} y U^{238}), generando dos corrientes, la primera el enriquecimiento, para que contenga más U^{235} que en su concentración natural (0.711%), y la segunda correspondientemente, la reducción. La mayoría de los reactores comerciales requieren uranio enriquecido a menos de 5% de U^{235} . Algunos reactores de investigación requieren uranio altamente enriquecido como combustible, más del 20% de U^{235} , pero ya hay programas para que empiecen a utilizar uranio con menor grado de enriquecimiento.¹⁶⁴

Existen dos métodos de enriquecimiento comerciales en uso actualmente: difusión gaseosa y centrifugado, ambas basadas en el UF_6 . Las primeras plantas usaban tecnología de difusión gaseosa a pesar de su alto consumo de electricidad y el gran tamaño de la planta, factores que fueron clave para su menor proliferación alrededor del mundo. (ver tabla 15) Por ejemplo, la planta de difusión gaseosa en Tricastin, Francia se nutre de cuatro reactores nucleares. Más recientemente, los avances en las tecnologías de materiales y métodos de fabricación llevaron a un incremento en el uso del centrifugado, resultando en menores costos de enriquecimiento, debido principalmente a una reducción en el consumo de energía por un factor de 50.¹⁶⁵

¹⁶⁴ Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003. Francia. pág. 25.

¹⁶⁵ Ídem.

Figura 32. Cascada de centrifugadoras en Rokkashomura, Japón.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

Tabla 15. Principales Instalaciones de enriquecimiento de uranio en el mundo.

País	Sitio(s)	Tecnología
China	Lanzhou	Centrífuga
	Shaanxi	Centrífuga
Francia	Tricastin	Difusión gaseosa
Alemania	Gronau	Centrífuga
Japón	Rokkashomura	Centrífuga
Holanda	Almelo	Centrífuga
Rusia	Angarsk	Centrífuga
	Ekaterinburg	Centrífuga
	Krasnoyarsk	Centrífuga
	Seversk	Centrífuga
Reino Unido	Capenhurst	Centrífuga
Estados Unidos	Paducah	Difusión gaseosa

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

El proceso de enriquecimiento también produce uranio empobrecido, del cual existían, a finales de 1999, un estimado de más de 1.2 millones de toneladas principalmente producidas utilizando el proceso de la difusión gaseosa. El uranio empobrecido producido por el proceso de la difusión gaseosa contiene usualmente U^{235} recuperable, normalmente de alrededor de 0.3% de U^{235} (comparado con el 0.711% inicial).¹⁶⁶

Diferentes países han adoptado diferentes estrategias para el manejo de este material. Típicamente, el uranio empobrecido es almacenado en forma de UF_6 en grandes cilindros como en los Estados Unidos y Rusia. En esta forma puede representar un riesgo potencial químico si el cilindro se filtra. Otros países, como Francia, se encuentran transformando su material a un óxido estable para su almacenamiento a largo plazo y su posible reutilización eventual como combustible de reactores de cría rápida.

Dependiendo de su economía y de su capacidad de enriquecimiento por centrifugado, algunos países, Rusia por ejemplo, “re-enriquecen” para recuperar el U^{235} remanente utilizable.

El enriquecimiento es considerado una industria madura de servicios con mercados internacionales competitivos.

¹⁶⁶ NEA. *Nuclear Energy Today*. 2003. Francia. pág. 26.

Figura 33.
Ensamblaje típico
BWR.



Casi 4 m de altura y 15 cm de lado, puede llegar a pesar cerca de 300 kg.

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003.

Fabricación del combustible

La mayoría de los reactores usan dióxido de uranio como combustible. La producción en forma de combustible involucra la transformación del UF_6 a polvo de dióxido de uranio (UO_2), el cual es comprimido y calentado a altas temperaturas (casi 1400 °C) para producir pequeñas piezas cilíndricas en forma de pastillas. Estas son introducidas en tubos huecos de metal (barras de combustible) los cuales son ensamblados y montados. El metal utilizado es altamente resistente a la corrosión, el metal más comúnmente utilizado es el acero inoxidable o una aleación de zirconio. Más de 730 arreglos de barras de combustible, conteniendo cerca de 46000 barras de combustible servirán de combustible para un reactor típico BWR.¹⁶⁷

Una pequeña porción de los reactores alrededor del mundo han sido aprobados para usar el óxido-mixto (MOX) por sus siglas en inglés como combustible, es una mezcla de dióxido de uranio y dióxido de plutonio. El dióxido de plutonio se obtiene del reciclado comercial del combustible utilizado, aunque la Federación Rusa y los Estados Unidos están planeando usar plutonio de cabezas nucleares excedentes.

El proceso de producción del MOX es similar al del dióxido de uranio ya descrito, con precauciones adicionales para proteger a los trabajadores del incremento en la radiación de este material irradiado y de la inhalación de plutonio.

Aunque hay un gran número de fabricantes de combustible alrededor del mundo, la competitividad comercial se encuentra inhibida, debido principalmente a los requerimientos altamente específicos, a los sistemas reguladores nacionales y a la variedad de los tipos de reactores.

Figura 34. Pastilla de combustible típica.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003.

¹⁶⁷ NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. pág. 26.

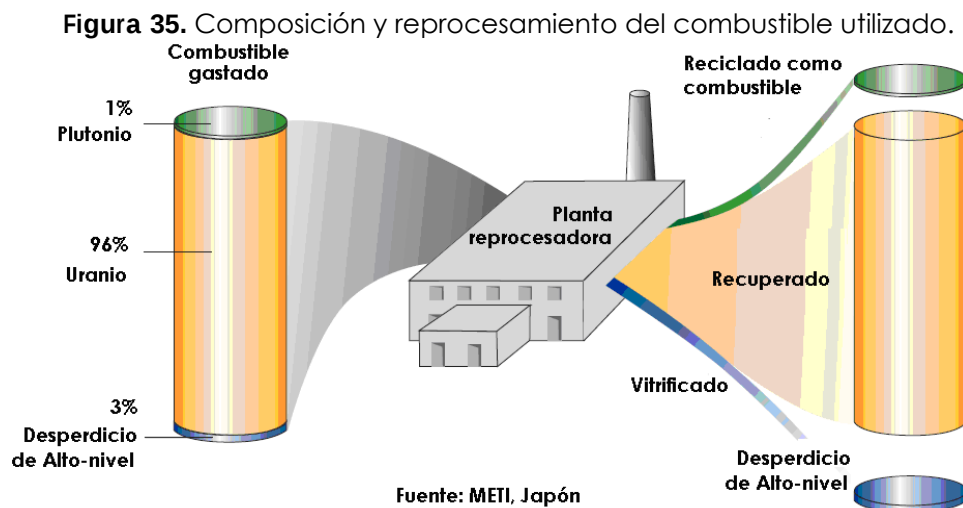
3.2.2 El final del ciclo.

El final del ciclo comienza cuando el combustible irradiado o “utilizado” es desmontado del reactor y almacenado en el sitio del reactor. Este proceso inicial implica el almacenamiento del combustible utilizado en grandes piscinas llenas de agua. El agua sirve como escudo para la alta radiación del material recientemente extraído del reactor y también ayuda a enfriarlo. Después de este primer periodo de enfriamiento, durante el cual ocurre la mayor disipación de calor, la temperatura del combustible es mucho más baja y está entonces listo para su almacenamiento a largo plazo o para su reprocesamiento si se persigue una estrategia de reciclaje.

El almacenamiento a largo plazo del combustible utilizado puede ser bajo condiciones húmedas o secas. Si se escogen condiciones húmedas el combustible utilizado es trasladado a otra piscina de agua similar a la del proceso de enfriamiento. Alternativamente, y recientemente, el combustible puede ser montado en grandes cascos blindados secos en los cuales la circulación natural del aire mantiene al combustible a la temperatura requerida, en lo que se conoce como almacenamiento en seco. El combustible utilizado puede mantenerse bajo condiciones secas o húmedas antes de que su empacamiento o re-empacamiento se vuelva necesario, o antes de su disposición.

Reprocesamiento

El reprocesamiento es la operación mediante la cual la energía no utilizada contenida en el combustible gastado es recuperada con la intención de utilizarla en el futuro o, en algunos casos, acondicionar al combustible para su desecho (ver figura 35). Este proceso también reduce el volumen y la radiotoxicidad a largo plazo del desperdicio que requiere desecharse. Este acercamiento al manejo del combustible gastado ha sido utilizado por algunos países Europeos (Bélgica, Francia, Alemania y Suiza), así como no europeos, como China, India, Japón y Rusia, aunque aún no es utilizado por la mayoría de los países que operan plantas nucleares.



FUENTE: METI, Japón. Nuclear Energy Today 2003.

El reprocesamiento puede reducir aproximadamente del 10 al 15% el requerimiento de uranio natural,¹⁶⁸ principalmente a través del uso del plutonio creado durante el proceso de fisión, el cual es extraído del combustible gastado y reciclado en combustible tipo MOX. La separación del uranio y del plutonio de otros isótopos se logra comercialmente usando un proceso químico llamado PUREX (*Plutonium Uranium Extraction*). Los remanentes de la fisión y los actínidos menores son desperdicios de alto-nivel. Otro remanente es la estructura metálica del arreglo del material llamada vaina y piezas de desecho. Las plantas reprocesadoras actuales son instalaciones grandes, caras y complejas que han sido, por estas razones, construidos sólo en algunos países (ver tabla 16)

Tabla 16. Plantas comerciales de reprocesamiento de combustible utilizado en el mundo.

País	Sitio/localización	Año de puesta en servicio	Tipo de combustible
China	Diwopu (Ganzu)	2002	LWR
Francia	La Hague	1976	LWR
India	Kalpakkam	1998	PHWR
	Tarapur	1974	PHWR
Japón	Rokkasho-mura	2005	LWR
	Takai-mura	1977	LWR, ATR
Federación Rusa	Tcheliabinsk-65 Mayak	1984	VVER
Reino Unido	B205/Sellafield	1964	Magnox GCR
	Thorp/Sellafield	1994	LWR, AGR

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

El número posible de reciclajes de plutonio con las tecnologías de reprocesamiento y de reactor actuales es limitado debido al escalamiento de los isótopos del plutonio que no son fisionables por los neutrones térmicos que se encuentran en los reactores de agua ligera y por el escalamiento de elementos indeseables, especialmente el curio. Después de dos o tres ciclos el combustible debe ser manejado como un desperdicio similar al del ciclo abierto.

Esta limitación en el número de reciclajes, no se aplica si el material reciclado es usado en reactores rápidos. El uranio recuperado durante el reprocesamiento ha sido reciclado como combustible en el pasado pero actualmente no es así, en su lugar el uranio se almacena para su futura reutilización. Esto es porque el uranio recuperado es más radioactivo que el uranio natural debido a su exposición a los neutrones en el reactor y su reciclaje, es por esto que contaminaría las instalaciones de enriquecimiento y fabricación del combustible, complicando su operación. Para usarlo se requerirá de instalaciones dedicadas, algo que no es económicamente viable actualmente.

168 NEA. *Nuclear Energy Today*. 2003. Francia. Pág. 29.

3.2.3 Desmantelamiento.

Cuando cualquier instalación nuclear cierra permanentemente, ya sea un reactor, una mina de uranio o una instalación del ciclo del combustible, ésta necesita ser puesta en un estado en el que no pueda dañar al público, a los trabajadores o al medio ambiente. Este proceso, conocido como desmantelamiento, usualmente consiste en varias etapas.

Clausura

El combustible utilizado es recuperado del reactor y es almacenado de la manera usual, los sistemas líquidos son drenados, los sistemas operacionales son desconectados, y las aperturas exteriores en la planta son bloqueadas o selladas. La atmósfera en el edificio de resguardo es controlada y el acceso es limitado, con sistemas de vigilancia instalados. Usualmente, la clausura ocurre poco después del cierre de la planta.

Descontaminación y desmantelamiento

Todas las superficies son lavadas con agua o tratadas por medios mecánicos, químicos o electromecánicos para remover la radioactividad (descontaminación). Todo el equipo y edificios conectados con el proceso son removidos, monitoreados para detectar cualquier radioactividad remanente y son reciclados o puestos en almacenamiento intermedio, dejando sólo las partes del núcleo del reactor, particularmente la vasija del reactor y su ensamblaje protector. Las partes no-nucleares del establecimiento – oficinas, turbinas, calentadores, etc. Son desechados o utilizados en otras aplicaciones. Un grado apropiado de vigilancia de las partes remanentes y del ambiente en sus alrededores es aplicado. Todas estas actividades ocurren en un rango de tiempo de 10, 20 o más años, después del cierre de la planta.¹⁶⁹

Demolición y limpieza del sitio

Eventualmente, y solo si las partes remanentes de las instalaciones no son adecuadas para algún otro propósito, todos los materiales son removidos y el sitio es clausurado, se hace disponible para nuevos usos. La temporalidad de esta fase final es determinada en cada país por factores económicos, técnicos y de regulación, en algunos casos, no se llevará acabo por mucho tiempo, talvez 100 años después de su cierre. Aunque, con la introducción de la robótica y las técnicas de telemanipulación, esta fase es alcanzada de manera más rápida.

Los retrasos relativamente largos entre las fases del proceso son para permitir que la radioactividad decaiga con el fin de proteger a los trabajadores involucrados en el proceso de desmantelamiento, así como el de facilitar el almacenamiento y, finalmente, el desecho de los materiales radioactivos.

¹⁶⁹ NEA, The Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities: Status, Approaches, Challenges. Paris: OECD, 2002.

Las plantas nucleoelectricas han alcanzado avanzados estados de desmantelamiento en los Estados Unidos y en varios países europeos (ver tabla 17). Las prácticas de desmantelamiento están madurando y se está ganando experiencia en este punto en el cual los procesos pueden ser considerados como predecibles y parte del ciclo de vida del reactor.

Desmantelamiento del desperdicio

El desmantelamiento de una planta nucleoelectrica o de alguna otra instalación nuclear genera una cantidad significativa de desperdicios radioactivos, la mayoría de ellos desperdicios de bajo-nivel. La comisión europea estima que el desmantelamiento de una planta nuclear “promedio” produce cerca de 10 000 m³ de desperdicios radioactivos,¹⁷⁰ en términos de volumen, son el concreto u otros materiales de construcción, que contienen las cantidades más pequeñas de radioactividad.

El combustible gastado en el reactor es la más grande fuente de radioactividad y con su extracción el inventario total de radioactividad en el sitio se reduce en cerca del 99%.¹⁷¹ Los grandes componentes del reactor como la vasija del reactor y los generadores de vapor son tratados como desperdicio radioactivo aunque su tamaño presenta grandes problemas. Estos pueden ser reducidos cortándolos en pedazos más manejables o pueden, como se hace regularmente, ser removidos y transportados a centros de depósito intactos.

Tabla 17. Reactores seleccionados que se encuentran en proceso de desmantelamiento o ya lo han completado.

Reactor	MW _e	País	Comentario
Niedera- ichbach	100	Alemania	Reactor enfriado por gas, cierre en 1974. La planta fue desmantelada y demolida con el sitio liberado para agricultura irrestricta en 1995.
Shipping- port	60	EUA	Reactor de cría de agua ligera cierre en 1982. En 1989 el sitio fue liberado para uso indistinto.
Trojan	1180	EUA	PWR cerrada en 1993. Los generadores de vapor fueron removidos y desechados en 1995, la vasija del reactor fue removida y desechada en 1999. El edificio está siendo descontaminado, pero su demolición no está planeada hasta el 2018.
Rancho Seco	913	EUA	PWR cerrada en 1989. La planta fue puesta en una condición de almacenamiento seguro y esta planeado que se mantenga de esta manera hasta el 2009 cuando habrá fondos para su desmantelamiento
Chinon	70 210 480	Francia	Tres plantas enfriadas por gas, de las cuales la última fue cerrada en 1990. Fueron parcialmente desmanteladas posponiendo su desmantelamiento final por 50 años.
Berkley	138 138	Reino Unido	Reactor enfriado por gas cerrado en 1989. La extracción del combustible fue finalizada en 1992. La planta está siendo preparada para un largo periodo de cuidado y mantenimiento.

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

170 NEA, The Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities: Status, Approaches, Challenges. Paris: OECD, 2002.

171 Ídem.

3.3 Aspectos económicos de la energía nuclear.

La energía nuclear se caracteriza por sus bajos costos de producción, altos costos de capital inicial, insensibilidad a la variación en los precios del combustible, larga vida operacional y gastos de regulación significativos.

Las plantas de energía nuclear existentes son competitivas generalmente aún en mercados sin regulación y particularmente cuando los costos de la inversión inicial han sido amortizados. Principalmente debido a sus altos costos de capital, la decisión para construir una nueva planta nuclear depende significativamente de factores y normas públicas.

Una diferencia entre la energía nuclear y otras formas de producción de electricidad es que algunos costos que son principalmente externos en otras fuentes de energía son internalizados en el caso de la energía nuclear.

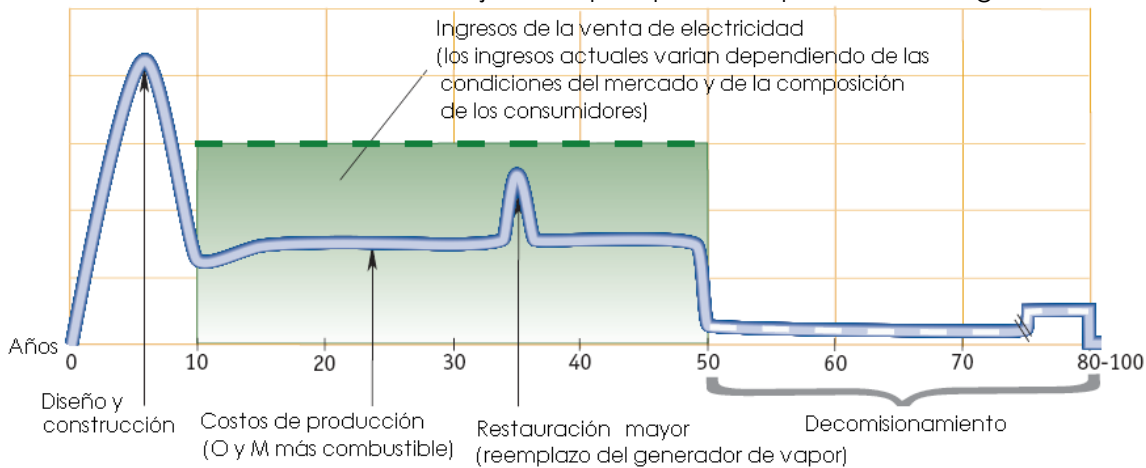
3.3.1 Costos, riesgos y desventajas.

Factores que influyen la economía de la energía nuclear

La gráfica 13 muestra el ciclo de vida de los ingresos y los costos de una planta nuclear típica. Ésta demuestra los factores que caracterizan la economía de la energía nuclear, los cuales son:

- Altos costos de inversión de capital;
- Largos horizontes de planeación y vida operacional;
- Bajos costos en el combustible, operación y mantenimiento;
- Costos significativos que incurren después de que la planta nuclear cesa de producir energía (principalmente en el manejo y almacenamiento de los desechos radioactivos y su desmantelamiento).

Gráfica 13. Ciclo ilustrativo del flujo de capital para una planta de energía nuclear.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

Elementos en los costos de generación de la energía nuclear

Los costos de generación de la electricidad son usualmente desglosados en tres categorías, los costos de inversión (capital), operación y mantenimiento, y combustible.

Los costos de inversión incluyen los costos de diseño y construcción, restauración mayor, y el desmantelamiento. Esta última incluye todos los costos incurridos desde el cierre de la planta hasta que el sitio es liberado, en concordancia con las políticas nacionales, e incluye los costos del manejo del material radioactivo y otros materiales de desecho generados durante el desmantelamiento, hasta que se dispone de ellos. A estos costos les son añadidos los asociados con el aseguramiento de la aprobación reguladora para proceder con la construcción y la operación.

Los costos de inversión deben ser financiados, y es por esto que en estos pueden incurrir cargos de interés. Estos son amortizados durante un periodo predeterminado, talvez en el orden de 20 a 25 años por lo que el servicio de deuda se vuelve parte de los costos de generación de electricidad.¹⁷² Se deben tomar medidas financieras para pagar el desmantelamiento y la disposición de los desperdicios asociados (procesos que pueden tomar varias décadas).

Los costos de operación y mantenimiento (O&M) incluyen todos los costos que no son considerados de inversión o costos del combustible, los mayores elementos serían los costos de operación y soporte técnico, entrenamiento, vigilancia, salud y seguridad, manejo y disposición del desperdicio operacional. Los costos del día a día y el mantenimiento periódico e inspección (durante el cual las plantas usualmente tienen que salir fuera de línea) también son incluidos. Debido a que los costos de inversión son esencialmente fijos después de la construcción, Los costos de O&M representan una gran oportunidad para la reducción de los costos existentes en una planta de energía.

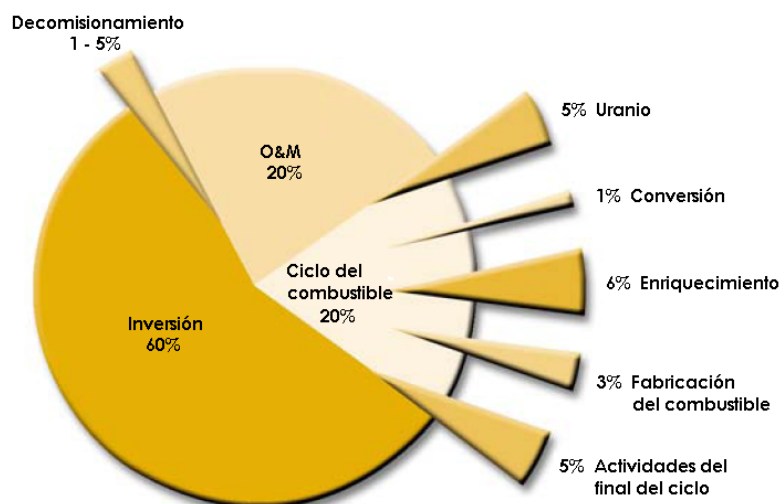
Los costos del combustible incluyen los costos relacionados con el ciclo del combustible, incluyendo los costos de compra, conversión y enriquecimiento del uranio, fabricación del combustible, acondicionamiento del combustible utilizado, reprocesamiento, disposición del combustible utilizado o del desperdicio de alto-nivel generado por el reprocesamiento y el transporte. Los costos del combustible solo forman parte del 20% de los costos de generación nuclear de electricidad,¹⁷³ por lo que es relativamente insensible a las fluctuaciones del precio del combustible, en contraste con la posición de los combustibles fósiles.

Aunque los costos de generación son bastante específicos, La gráfica 14 muestra la importancia relativa de los componentes en el costo de la generación nuclear de electricidad.

¹⁷² NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 60.

¹⁷³ Idem.

Gráfica 14. Diagrama típico de los costos de generación nuclear de electricidad.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

Riesgos financieros a largo plazo y obligaciones

La decisión de construir o de continuar con la operación de una planta de energía nuclear representa un mayor riesgo comercial que los que normalmente son asociados a fuentes de energía alternativas, por varias razones:

- El largo periodo de planeación y vida operacional conlleva a un mayor potencial para los cambios a largo plazo en el mercado que impactan en los ingresos negativamente o positivamente.
- El factor del alto costo fijo, debido principalmente a los altos costos de inversión, produce una gran vulnerabilidad a las fluctuaciones a corto plazo en las condiciones del mercado.
- El fuerte sistema regulador reduce la flexibilidad operacional e introduce la posibilidad de cambios en los requerimientos reguladores que pueden impactar adversamente en los costos (e históricamente ha sucedido de este modo).
- Incertidumbres asociadas con los costos del desmantelamiento y la disposición del desperdicio de larga vida, incluyendo los periodos de tiempo involucrados.

Mientras que las plantas no-nucleares pueden intercambiar o vender mucho de su costo base bajo condiciones económicas negativas, esta práctica está totalmente prohibida para las plantas nucleares (por ejemplo, una planta de energía de turbo gas puede vender su gas en el mercado abierto).

Aunque los costos del desmantelamiento y el manejo de los desperdicios asociados son altos, son relativamente un pequeño componente de los costos totales del ciclo del combustible, debido a que los largos periodos de tiempo involucrados producen un descuento considerable. La incertidumbre en la precisión de los costos esperados se da gracias a la larga vida en servicio de los reactores y al potencial cambio, así como al usual endurecimiento de las medidas reguladoras. Es por esto, que se toman medidas para que la incertidumbre forme parte de las provisiones para cubrir los costos del desmantelamiento.

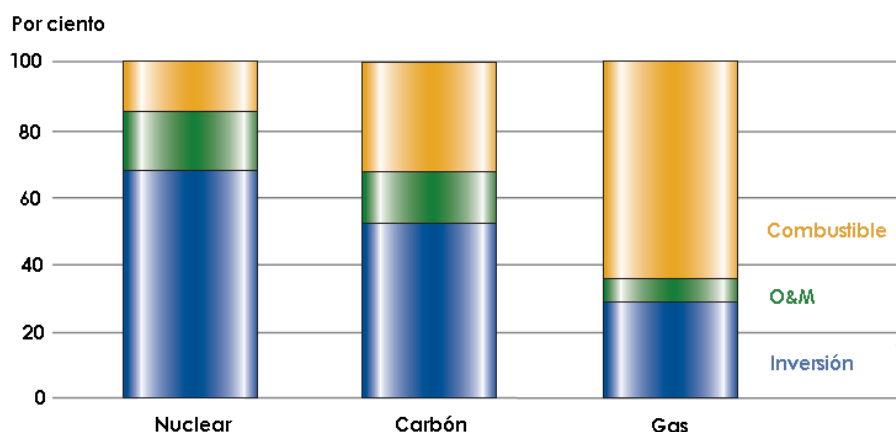
Si estos costos están basados en los ingresos proyectados sobre la expectativa de vida de una planta, existe un riesgo de déficit que podría forzar a la clausura temprana de la planta debido a estas condiciones económicas o podría producir ingresos por debajo de los niveles proyectados. En la práctica, no obstante, estos fondos se han reunido por encima de vidas proyectadas considerablemente más cortas que las actualmente alcanzadas. Existe también un potencial para avances en las tecnologías relevantes para reducir los costos por debajo de aquellos concebidos.¹⁷⁴

3.3.2 Aspectos competitivos.

Costos comparativos de la generación de electricidad

La gráfica 15 nos proporciona una comparación de los costos representativos de la generación de electricidad nuclear y de otras fuentes de combustible fósiles.

Gráfica 15. Diagrama de los costos representativos de generación.
(Tasa de descuento 10%)



FUENTE: NEA. *Projected Costs of Generating Electricity* (Paris: OECD, 1998). Valores promedio para Canadá, Francia, Japón, España y Estados Unidos.

174 NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*. Paris: OECD, 1994.

Comparada con la energía nuclear, las plantas de turbogas están caracterizadas por un bajo costo de inversión de capital y un significativo costo del combustible. Las plantas carboeléctricas se caracterizan por un rango medio de inversión y costo del combustible. En general, los costos del combustible representan relativamente una gran proporción de los costos de generación de las plantas basadas en combustibles fósiles que son, como resultado, sensibles a las variaciones del precio del combustible. Las fuentes de energía renovables, como las eólicas o las hidroeléctricas, son similares a las nucleoeeléctricas en tanto a su alta inversión y a su bajo costo de producción por unidad de potencia generada.

Plantas existentes

Debido al relativo bajo costo del combustible nuclear, los recientes avances en el mejoramiento de la eficiencia y el hecho de que en varios casos los costos de inversión iniciales ahora son amortizados, las plantas nucleares existentes han comprobado su competitividad a nivel mundial.

Información de la Comisión Europea en cuanto a los costos de producción de electricidad (incluyendo la inversión, la O&M y los costos del combustible) muestran que la energía nuclear es competitiva aún tomando en cuenta su alto costo de inversión (ver la tabla 18)

Tabla 18. Costos en la producción de electricidad por 7000 horas de producción.
(€ ¢/ kWh 1990)

	Carbón	Hidrocarburos	Gas	Nuclear	Biomasa	Fotovoltaicas	Viento
Mínimo	3.2	4.9	2.6	3.4	3.4	51.2	6.7
Máximo	5.0	5.2	3.5	5.9	34.5	85.3	7.2

FUENTE: Comisión europea, *Green Paper: Towards a European Strategy for Energy Supply*, European Commission. (Brusselas: EC, 2000), Anexo 2, Table 1 sin impuestos indirectos ni subsidios.

Datos de los Estados Unidos en costos de operación (solo O&M y costos del combustible) muestran un resultado similar. En 1999, los gastos de operación reportados fueron 1.92 US¢/kWh para la nuclear, 2.02 US¢/kWh para las fuentes de energía fósiles, 0.68 US¢/kWh para las hidro, y 3.87 US¢/kWh para las de turbogas, fotoeléctricas y eólicas.¹⁷⁵

Las posibilidades para las plantas ya existentes en campos económicos es por lo tanto el uso continuo de las instalaciones, debido a que los costos para una extensión en la vida útil de la planta o de una repotenciación son típicamente más bajos que la construcción de una nueva planta.

175 NEA, *Projected Costs of Generating Electricity: 1998 Actualización*. Paris: OECD, 1998.

La energía nuclear en mercados sin reglamentación

Un estudio de la OCDE/NEA (*Nuclear Energy Agency*) en Energía Nuclear en Mercados Eléctricos Competitivos, publicado en el 2000, encontró que plantas de energía nuclear ubicadas en Finlandia, Alemania, Holanda, España, Suecia, Estados Unidos y el Reino Unido han sido competitivas en sus respectivos mercados sin regulación.

Generalmente, la respuesta a la desregulación del mercado ha constado de una mejora en la eficiencia de operación y en las utilidades. La presión de administrar la propiedad de una planta para encarar el endurecimiento de las regulaciones de seguridad parece proveer una base firme para el desempeño competitivo.

Nuevas Plantas

Los relativamente grandes costos de inversión para nuevas plantas nucleares son los principales factores. Para hacer que la construcción de nuevas plantas sea más atractivo comercialmente bajo condiciones competitivas, los costos de inversión deben ser reducidos. Nuevos diseños más efectivos y económicos, mejores métodos de construcción, estandarización y construcción en serie y construcción de múltiples unidades son todos medios para reducir los costos de inversión de las plantas nucleares. El mejoramiento es posible. Por ejemplo, En Japón durante los 90's, el uso de un diseño avanzado estandarizado de la mano con la construcción por duplicado en un solo sitio, permitió la construcción de nuevas plantas que serían terminadas en un término de 6 años comparado con el rango usual de 7 a 10 años, La construcción de dos avanzados reactores de agua hirviente (ABWR) en Kashiwazaki-Kariwa fue completada (de inicio a comercialización) en 62 y 65 meses.¹⁷⁶

Aunque, los altos niveles de compromiso financiero y riesgo en un mercado competitivo puede hacer que solamente el sector privado financie nuevas plantas nucleares, aún con el gran ahorro potencial en tiempo y costos. Históricamente, la explotación de la energía nuclear en bases altamente innovadoras ha sido impulsada por coaliciones privadas y públicas. La pregunta ahora es si esta relación puede o podría existir en un país como el nuestro.

Costos externos

Una diferencia entre la energía nuclear y otras formas de producción de electricidad es que la energía nuclear conlleva algunos costos que no están incluidos en (son externos a) los costos de otras fuentes de electricidad. Algunos de los costos asociados con la generación de electricidad nuclear incluidos en el precio al cual la electricidad resultante es vendida en el mercado abierto incluyen el manejo de los desperdicios radioactivos y su disposición. Las fuentes de energía fósil conllevan ciertos costos para la reducción de emisiones a la atmósfera y al agua, como con la nuclear, pero una parte considerable del desperdicio es desechado a la atmósfera, imponiendo costos en la comunidad que no son reflejados en el precio de su electricidad.

176 NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 62.

A menos que haya una excesiva reducción en los costos de capital de la energía nuclear, un aumento sostenido y significativo en los costos de los combustibles fósiles o decisiones políticas de internalizar algunos de los costos asociados con los combustibles fósiles, las inversiones del sector privado en nuevas plantas nucleares serán pocas. Hasta entonces, las decisiones de construir nuevas plantas nucleares estarán en su mayor medida influenciadas por políticas públicas, como la seguridad en el suministro.

3.4 La energía nuclear y el desarrollo sostenible.

Este rubro se considera el futuro de la energía nuclear en un amplio contexto del suministro y la demanda de energía en el mundo.

3.4.1 Demanda de energía.

La demanda mundial de energía continuará incrementándose como resultado del desarrollo económico y del crecimiento de la población. La parte abrumadora de este crecimiento es probable que tenga lugar dentro de los países en vías de desarrollo, dado que estos países tratan de luchar para elevar los estándares de vida de sus crecientes poblaciones. En 1998, El Instituto Internacional para el Análisis de los Sistemas Aplicados (IIASA) por sus siglas en inglés y el Consejo de Energía concluyeron que para el 2050, la demanda global de energía crecería probablemente a un factor de entre 1.5 y 3.0 con la demanda de electricidad al menos del doble.¹⁷⁷ La Real Sociedad Británica y la Real Academia de Ingeniería concluyeron en 1999 que el consumo de energía sería:

“...al menos el doble en los próximos 50 años y crecería a un factor de cinco en los próximos 100 años mientras que la población aumenta y trata de buscar la mejora de sus estándares de vida”.

El reto será el de responder a estas demandas en una manera en la cual se pueda sostener el crecimiento de la sociedad mientras que se encararan las necesidades actuales sin impactar indebidamente en las generaciones futuras.

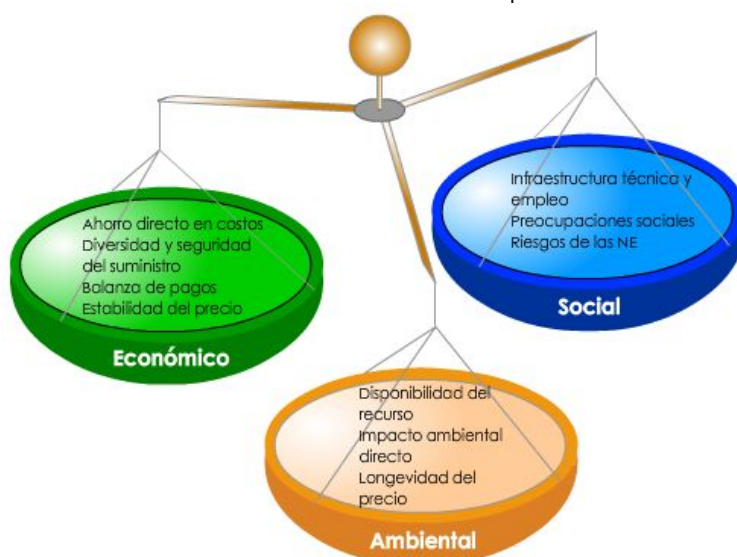
177 Royal Academy of Engineering, Nuclear Energy: The Future Climate. London: The Royal Society, 1999.

3.4.2 El desarrollo sostenible.

La energía es un componente importante de cualquier política para un desarrollo sostenible debido a que es de vital importancia para las actividades humanas y el crecimiento económico. El hecho de que las tecnologías actuales que proveen energía son ahora consideradas como insostenibles es proveedor de retos y oportunidades. Hasta que punto puede mostrarse la energía nuclear como una energía sostenible, será un factor determinante para colocarla en el espectro de fuentes de energía.

La sostenibilidad de cualquier desarrollo es discutida usualmente bajo tres dimensiones: *económico, ambiental y social* (ver figura 36)

Figura 36. Elementos de un desarrollo sostenible aplicable a la energía nuclear.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

Aspectos económicos

Los aspectos microeconómicos de la energía nuclear fueron discutidos anteriormente. Los siguientes párrafos se concentran en elementos macroeconómicos

Ahorro directo en costos

La habilidad de proveer electricidad a bajo costo y de manera confiable, es un aspecto importante del desarrollo sostenible. Como se mostró en el punto anterior, la energía nuclear puede ser competitiva en cuanto a costos se refiere con la adecuada acción política de internalizar los costos ambientales, engendrando la aceptación social e incrementando la seguridad en el suministro de los combustibles. A corto plazo, su competitividad es diferente en cada país, dependiendo principalmente del precio de los combustibles fósiles, que tienden a fluctuar.

Diversidad y seguridad del suministro de energía

El petróleo y el gas tienen una disponibilidad geográficamente limitada, con países del medio oriente y la Federación Rusa que controlan más del 70% de las reservas mundiales de crudo y cerca de dos terceras partes de las reservas de gas natural.¹⁷⁸ Dejando a un lado las inestabilidades políticas que han caracterizado a las regiones proveedoras, las largas rutas proveedoras a mercados importantes son también vulnerables a la disrupción por las acciones políticas.

Los países de la OCDE producen casi el 55% del uranio mundial, y tienen el 40% de las reservas conocidas, comparado con el 7% del petróleo, 12% del gas y 40% de las reservas de carbón.¹⁷⁹ Los países de la OCDE son en su mayoría autosuficientes en los servicios esenciales que convierten al uranio natural en combustibles nucleares terminados.

A diferencia de los combustibles fósiles, el combustible nuclear es fácil de almacenar; grandes inventarios pueden ser resguardados a precios comparativamente más bajos. Cerca de 25 toneladas de ensambles de combustible proveerán el combustible de un año para un reactor de agua presurizada que genera 1 GW_e. Una planta carboeléctrica de capacidad similar requeriría de 3 millones de toneladas de combustible, más de 100,000 veces más combustible.¹⁸⁰

Mientras que la dependencia de un país a fuentes extranjeras de energía aumenta, también aumentan los costos y las consecuencias económicas de cualquier disrupción. Cualquier fuente de energía que reduzca la dependencia a fuentes de combustibles extranjeros puede decirse que incrementa la seguridad del suministro de energía y principalmente la seguridad nacional.

Balanza de pagos

Puede observarse que la energía nuclear tiene dos potentes influencias en la balanza de intercambio, asumiendo que sus costos son competitivos. Primera, la importación de cantidades relativamente pequeñas de uranio a bajo costo será más atractiva que la importación o utilización local de grandes cantidades de carbón, petróleo o gas a altos precios. Segunda, La creación o la extensión de la infraestructura tecnológica necesaria para mantener a la energía nuclear puede ayudar a la exportación de tecnología.

Estabilidad en los precios

El costo del combustible es un gran componente del precio de la electricidad de combustibles fósiles. Por lo tanto la tendencia hacia la fluctuación de los precios de los combustibles fósiles se traduce en variaciones en el precio de la electricidad, especialmente en un mercado competitivo.

¹⁷⁸ NEA, Nuclear Energy Today, 2003. Francia, pág. 74.

¹⁷⁹ Ídem.

¹⁸⁰ Ídem.

La baja acumulación de costos del combustible y la alta acumulación de costos fijos en el caso de la generación de electricidad nuclear tienen, en contraste, un efecto potencialmente estabilizador en los precios y los costos de la electricidad.

Generalmente, la disponibilidad y el uso de fuentes alternativas de energía, tantas como sea posible, tiende a reducir las presiones en la demanda de cualquier fuente de combustible contribuyendo así potencialmente a la estabilidad macroeconómica de todas.

Aspectos ambientales

La sostenibilidad ambiental de un material particular es usualmente discutida en términos de su disposición, la adecuación de sus reservas, y su impacto directo en el medio ambiente.

Disponibilidad del recurso

El uranio está ampliamente disperso en la corteza terrestre y en los océanos, es aún más abundante que la plata. A inicios del 2001, los yacimientos estimados de uranio convencional, sumaron cerca de 16 millones de toneladas o casi 250 años de suministro al ritmo actual de uso. También hay, en adición, yacimientos no convencionales en los cuales el uranio existe en grados muy bajos, o es recuperado como un producto resultante. Existe un monto de cerca de 22 millones de toneladas en depósitos de fosfato y 4 000 millones de toneladas de uranio contenidos en el agua salada del mar.¹⁸¹ Aunque, hoy en día, solo se pueden obtener a nivel laboratorio.

En el largo plazo de cualquier manera, la adecuación de los yacimientos de uranio natural depende de las tecnologías de reactor y de las estrategias adoptadas en el ciclo del combustible. El reprocesamiento del combustible utilizado usando la tecnología del reactor de agua ligera podría, en principio, reducir la demanda de uranio de un 10 a un 15%.¹⁸² La introducción de reactores rápidos incrementarán la eficiencia del combustible, el reemplazo de todos los reactores térmicos con reactores rápidos y el reprocesamiento en el ciclo del combustible incrementarán las fuentes de uranio por un factor de 50.¹⁸³ Otras técnicas avanzadas actualmente concebidas es el empleo de Torio como combustible en lugar del uranio, expandiendo así las fuentes de combustible nuclear. La India, en particular, cuenta con grandes reservas de Torio, y se encuentra trabajando en la implementación de un ciclo del combustible para el Torio. En esencia, la energía nuclear no puede ser considerada limitada de recursos.

¹⁸¹ NEA, Uranium 2001: Resources, Production and Demand. París: OECD, 2002.

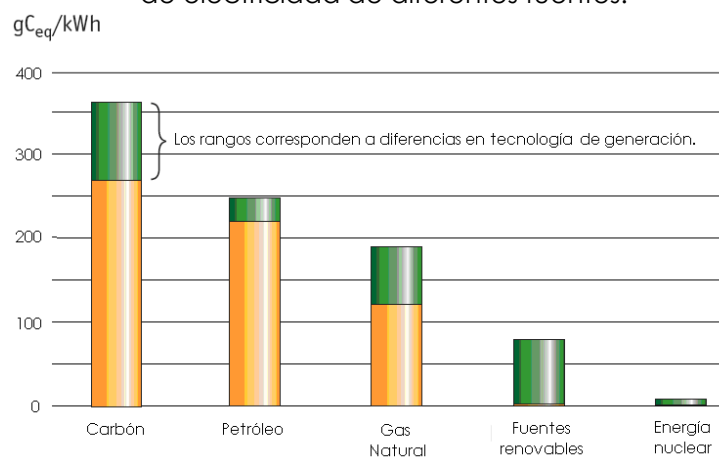
¹⁸² NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. pág. 76.

¹⁸³ Ídem.

Impacto ambiental directo

La energía nuclear es una de las pocas fuentes de energía que virtualmente no emiten gases contaminantes ni gases de efecto invernadero. Todo el ciclo del combustible incluyendo la extracción del mineral y la construcción de las plantas de energía se ha estimado una emisión de entre 2.5 y 6 gramos de carbono equivalente por kWh de energía producida. Esto es aproximadamente igual a las emisiones estimadas del uso de fuentes renovables (viento, hídrica, solar) y cerca de 20 a 75 veces menos que las emisiones de fuentes como el gas natural, el más limpio de los combustibles fósiles disponibles (ver gráfica 16).¹⁸⁴

Gráfica 16. Emisiones de gas de efecto invernadero por generación de electricidad de diferentes fuentes.



FUENTE: IAEA, 2003.

La energía nuclear es por lo tanto uno de los medios principales disponibles para limitar la emisión de carbono al medio ambiente. En países de la OCDE únicamente las plantas de energía nuclear evitan que 1 200 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) sean emitidas anualmente. Asumiendo que todas las plantas nucleares en el mundo fueran reemplazadas por plantas de energía alimentadas por combustibles fósiles, las emisiones de CO₂ del sector energético mundial aumentarían en un 8%.¹⁸⁵

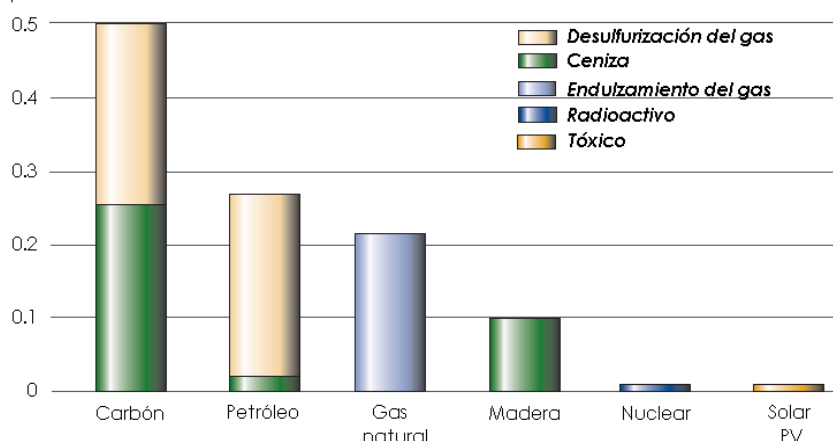
La energía nuclear evita la emisión local de gases contaminantes y partículas como el sulfuro, y los óxidos del nitrógeno que han sido vinculados con la lluvia ácida y enfermedades respiratorias. La cantidad de desperdicios sólidos generados por unidad de electricidad es mucho más bajo para la nuclear que para cualquier combustible fósil. Esta es esencialmente equivalente a los de las fuentes de energía renovables como la energía solar. (ver gráfica 17)

¹⁸⁴ NEA, Nuclear Power and Climate Change. Paris: OECD, 1998.

¹⁸⁵ Idem.

Gráfica 17. Generación total de desperdicios por fuente de energía.

Millones de toneladas
por GWe anual



FUENTE: IAEA, 2003.

De cualquier modo, para que la energía nuclear haga una mayor contribución para evitar el calentamiento global, la capacidad de generación nuclear debe tener una gran expansión que debiera incrementarse en un factor de 10 para 2100, la proporción del uso de su energía primaria se incrementaría de un 7% a no más del 25%, evitando así casi el 15% de las emisiones de carbono acumuladas durante el periodo.¹⁸⁶ Aunque, si esta expansión en capacidad nuclear se lleva a cabo sobre las bases de la tecnología actual, habrá una considerable adición al volumen acumulado (y también de actividad) del desecho radioactivo.

La energía nuclear es una de las opciones que pueden contribuir al enfrentamiento del incremento en la demanda de energía mundial, esencialmente sin adicionar emisiones de carbono. Pero para ser efectivos y aceptables a este nivel, deberán ser requeridas tecnologías avanzadas de reactores y estrategias de reciclaje del combustible. En esencia, a medida que el siglo avanza, la flota actual de reactores de agua ligera y térmicos, deberán ser reemplazados por tecnologías más avanzadas, como las reactores de cría rápida con reciclado del combustible. Un cambio como este requerirá inversiones considerables, sin exceder la demanda de inversión de otras estrategias para encarar la demanda creciente de energía mientras se limita el calentamiento global.

Longevidad del desperdicio

El desperdicio de alto nivel, aunque pequeño en volumen, permanece radioactivo por muchos años. Han sido investigados depósitos bastante profundos por varias décadas y el juicio experto es el de que no existen barreras técnicas para su construcción con estándares bastante altos de integridad. Aunque ha habido progresos recientes en Finlandia y Estados Unidos, ningún depósito se encuentra en operación actualmente.

¹⁸⁶ NEA, Nuclear Power and Climate Change. Paris: OECD, 1998.

Es por esto que la disposición de los desperdicios de alto nivel permanece, hasta ahora, como un reto para el desarrollo sustentable de la energía nuclear.

La investigación y el desarrollo de avanzados ciclos de combustible y del tratamiento del desperdicio prometen reducir el volumen de desperdicio que requiere de aislamiento y del tiempo que este debe permanecer aislado. Aunque, el resultado de estas investigaciones no estará disponible probablemente por varias décadas.

Aspectos sociales

Infraestructura técnica y empleo

La gente es la que crea y mantiene cualquier tecnología. A este respecto la energía nuclear tiene ciertas características especiales, basadas en grandes desarrollos científicos y tecnológicos del siglo XX. La mayoría de los altos costos de las instalaciones nucleares están personificados en la ciencia y la tecnología, las cuales son esenciales para la continuidad de su seguridad y su futuro desarrollo. La industria nuclear también emplea a una alta proporción del personal graduado y capacitado que está familiarizado con algunas otras industrias de energía y manufactura. El capital social así como una base para el desarrollo continuo son importantes dentro de la industria, aunque vulnerables.

La sustentabilidad de la energía nuclear depende de la compleja y cara infraestructura que yace en este capital social, el cual, si se perdiese, sería difícil de reemplazar ya sea barata o rápidamente.

Derivaciones

El mejoramiento y el mantenimiento de la infraestructura técnica e intelectual para el apoyo de la energía nuclear proveen de numerosos beneficios derivados a la sociedad. Así como con otras tecnologías altamente avanzadas, hay materiales, técnicas y aptitudes, que han sido aprovechadas en otros sectores, por ejemplo, en la medicina, manufactura, salud pública y en la agricultura, con los beneficios económicos consecuentes.

Preocupaciones sociales

Todas las tecnologías para generar energía tienen una tendencia a crear preocupaciones sociales, hasta conflictos. En el caso de la energía nuclear, las preocupaciones se han centrado en las cuestiones de seguridad, proliferación y disposición de los desperdicios. El carbón tiene su propia profunda historia de conflicto y división social, como a un nivel internacional lo ha sido el petróleo. Hasta la explotación de las energías renovables ha sido sujeta a escrutinio y oposición originada en su intromisión visual en el paisaje y por la gran área que cubren. Los grandes proyectos hidroeléctricos han levantado oposición a escala global debido a los impactos sociales y ambientales que involucra una inundación masiva.

El riesgo de las plantas nucleoelectricas

Así como con cualquier otra instalación industrial importante, y a pesar de todas las precauciones, las plantas de energía nuclear presentan riesgos para los trabajadores, para las personas que viven en los alrededores de la planta, y, en el caso de un accidente verdaderamente severo como el de Chernobyl, para las personas que viven a una distancia relativamente lejana de la planta. Usualmente estos riesgos son analizados en términos de consecuencias radiológicas por lo que resultan (1) operación normal y (2) de accidentes. La energía nuclear desde el punto de vista de seguridad industrial, es relativamente segura. Por ejemplo, datos de los Estados Unidos del 2000 revelaban un porcentaje de accidentes a una planta nuclear de 0.26 accidentes por 200 000 horas de trabajo comparado con el promedio de 3.0 de una planta de refinación de gasolinas.¹⁸⁷

Riesgos en la operación normal

Los riesgos radiológicos de la operación normal se derivan de las descargas diarias de material radioactivo ya sea en el aire o en el agua. Todas estas descargas están estrictamente controladas en todos los países por la autorización de las autoridades reguladoras más importantes. Éstas están también sujetas a tratados internacionales. En principio, las descargas de este tipo pueden afectar la cadena alimenticia humana (vía mariscos por ejemplo) y así representa un peligro para el público.

Riesgos en los accidentes

Los riesgos en los accidentes son mucho más difíciles de estimar, en parte porque los accidentes nucleares de toda clase han sido muy raros, y en parte también porque las consecuencias pueden variar en un rango muy amplio. Hay estudios que estiman la probabilidad de que las barreras protectoras construidas dentro de las plantas modernas fallen en el momento de un accidente, causando la liberación de vapores radioactivos de varios tamaños hipotéticos. Los cálculos muestran generalmente que las probabilidades de que cualquier accidente en un reactor moderno, uno que ha sido mejorado teniendo en cuenta la lecciones de Chernobyl y La isla de Tres Millas, es de 1 en 100 000.¹⁸⁸

Los diseños para futuros reactores poseen consideraciones en su diseño más explícitas para accidentes severos y los cálculos indican que la probabilidad de un accidente severo es aún menor, del orden de 1 en 1 000 000.¹⁸⁹

Tomando en cuenta estas cifras, debe de tenerse en mente que los efectos de un accidente nuclear pueden tener considerables impactos, incluyendo la muerte de individuos (que puede ocurrir décadas después del accidente), la pérdida del uso de algún terreno para vivienda o agricultura y de la pérdida de grandes cantidades de capacidad de generación de electricidad, los cuales tendrán serias consecuencias para la sociedad.

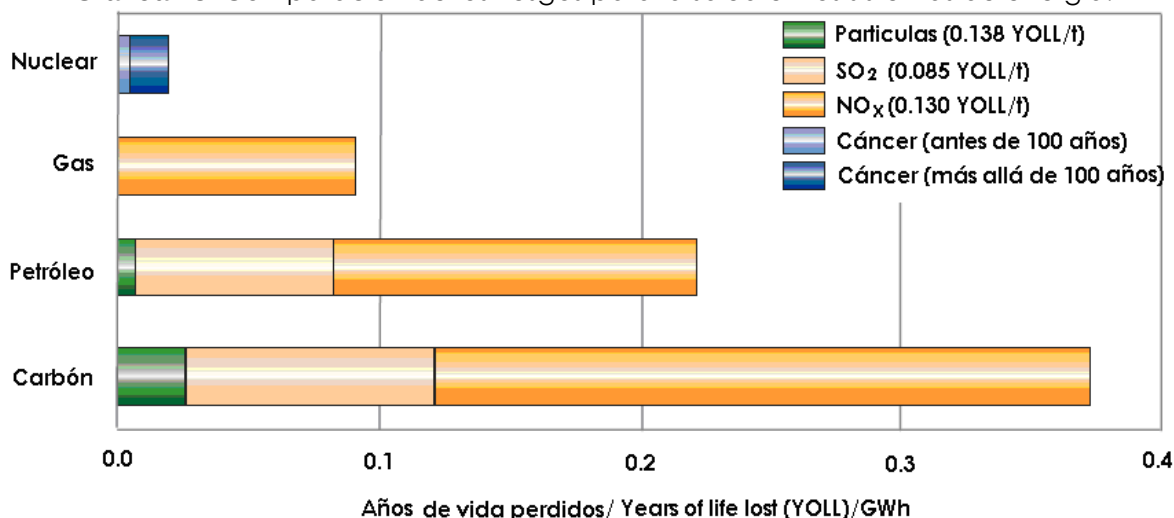
¹⁸⁷ NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. pág. 78.

¹⁸⁸ Ídem.

¹⁸⁹ Ídem.

En la consideración de riesgos potenciales de la energía nuclear es necesario referirlo en el contexto del enfrentamiento del incremento de las demandas de energía de la sociedad. Observando a los riesgos potenciales de las diferentes fuentes de energía muestra que las cargas potenciales al medio ambiente y a la salud pública de la energía nuclear son menores que aquellas asociadas con los combustibles fósiles. (ver la gráfica 18).

Gráfica 18. Comparación de los riesgos para la salud en los sistemas de energía.



FUENTE: "Comparative Assessment of Emissions from Energy Systems", Boletín IAEA, 1999.

Tomando una vista más amplia, se debería considerar también los riesgos más intangibles como colocar nuestra confianza en los combustibles fósiles locales e importados de otros países que pueden causar interrupciones económicas considerables si estas provisiones fueran interrumpidas. Adicionalmente, las fuentes de energía fósil, las cuales contribuyen enormemente al calentamiento global, podrían, en varios países, tener serias consecuencias como la inhabilitación de partes de ciudades costeras debido a los derrames de crudo.

Las instalaciones nucleares de todo tipo están dentro de los numerosos blancos potenciales de la actividad terrorista. Aunque, a diferencia de alguna otra actividad industrial, las plantas nucleares toman las medidas necesarias en respuesta a este peligro potencial, pero no se puede garantizar la absoluta seguridad. Es muy difícil de cuantificar o hasta describir los riesgos de esta clase, pero las centrales nucleares debido a su robustez inherente, a la protección de su construcción, fuerzas de seguridad y generalmente su localización tan remota, son blancos inatractivos y sin recompensas para los ataques terroristas.

Por ultimo, solo los individuos pueden juzgar la extensión de los riesgos particulares que les conciernen. Las cifras comparativas de riesgo tienen entonces solo un significado limitado, pero es sin lugar a dudas la manera de colocar los temas en proporción, y de recordarnos que el mundo es un lugar riesgoso, y que todos los medios disponibles para la producción de electricidad conllevan riesgos. El elemento social en el desarrollo sustentable puede ser afrontado sólo con la atención de las preocupaciones públicas y la obtención de la confianza pública. Será importante permitirle al público colocar las cuestiones sociales, éticas y políticas emanadas de la energía nuclear en una perspectiva con los diferentes, pero no disimilares, problemas emanados de las fuentes alternativas de generación de electricidad.

3.5 Perfil Nuclear de México.

A continuación se analizará someramente el perfil que posee México en lo que respecta a los aspectos más importantes que conciernen al desarrollo de la energía nuclear, desde la disponibilidad del combustible hasta los compromisos adquiridos internacionalmente para su desarrollo.

3.5.1 Reservas de uranio en México.

El desarrollo de los combustibles nucleares en México constituye un caso singular, desde que las primeras fases de exploración y explotación están bajo control del estado, de esta forma, las fluctuaciones que sufre el precio del uranio en el mercado internacional afectarán la economía nacional en la medida del volumen de reservas probadas, o en la carencia tecnológica para producir combustibles que conduzcan al establecimiento de los programas nucleares. Es de enfatizar, que para el desarrollo de la industria Nuclear en México, por fortuna se cuenta con reservas potenciales de uranio susceptibles de ser explotadas, descubiertas y desarrolladas parcialmente hasta la clausura de la empresa paraestatal Uranio Mexicano (URAMEX) en el año de 1984. En sus respectivas modalidades de potenciales, probables, posibles y probadas. Existen condiciones favorables para incrementar estos rubros a muy corto plazo; pero la escasez de capital y la carencia de tecnología doméstica ocasionó que estas perspectivas quedaran truncadas y olvidadas ante el “boom petrolero” que se desató durante la década de los ochenta.

En efecto, hacia finales de la administración del Presidente Luis Echeverría Álvarez (1970-1976) la solución programada por el gobierno del país, hacia el 2000, radicaba en emplear principalmente la energía nuclear y sólo un mínimo a los hidrocarburos para la generación de electricidad, no obstante que ya se habían descubierto los campos de Cactus y Cantarell.

Lo anterior se fundamentó en un estudio a largo plazo elaborado por la Comisión de Energéticos, al determinar que entre el 2003 y el 2005 se alcanzaría la máxima producción de hidrocarburos y el inicio de su descenso.¹⁹⁰

Desde 1957, se ha venido promoviendo la búsqueda de yacimientos de uranio en el territorio nacional por medio de exploraciones terrestres y reconocimientos aeroradiométricos, lográndose definir más de 200 anomalías radiométricas, entre prospectos y depósitos uraníferos de menor o mayor importancia. Desde entonces, varios distritos regionales investigados como Peña Blanca, Chihuahua, Coneto-El Rodeo, Durango; La Coma-Buena Vista, Tamaulipas y Los Amores, Sonora, formalizaron concentraciones económicas explotables de reservas minerales. Posteriormente hacia el cierre de URAMEX se descubrían los gigantescos yacimientos mesozoicos de la Cuenca de Tlaxiaco, Oaxaca. Los que básicamente vendrían a resolver la problemática de abastecimiento de combustible nuclear para el programa de instalación de plantas nucleoelectricas.¹⁹¹

Hacia los años 1978 y 1980, de acuerdo con estudios científicos desarrollados por Sergio Bazán Barrón de URAMEX, en un proyecto de tesis doctoral se programó explorar áreas favorables de Jurásico y Cretácico similares a las estudiadas en otros países, desarrollando la infraestructura geológica básica en regiones donde de hecho no existía referencia de manifestaciones uraníferas, pero condiciones favorables que a muy corto plazo resultarían positivas, localizándose las extensas concentraciones diseminadas en terrenos mesozoicos en la región de Tlaxiaco, evidenciando y acreditando así la teoría científica. Fue así como se promovió la exploración de la cuenca mesozoica de Tlaxiaco por medio de brigadas terrestres.

Los yacimientos de uranio sedimentario de la Cuenca de Tlaxiaco se encuentran diseminados hacia la base y la cima de secuencias litoestratográficas del Jurásico y Cretácico continental y litoral, en una faja potencial de 15-20 km. Las que comprenden secciones geológicas de 350-550m de espesor que afloran esporádicamente, cubriendo el frente continental mesozoico del cartón Precámbrico-Paleozoico denominado Complejo Basal Cristalino de Oaxaca y Guerrero. Estos depósitos se encuentran en condiciones semejantes a los extensos yacimientos sedimentarios del Colorado Plateau de EUA, una de las provincias con mayor riqueza y producción uranífera.¹⁹²

También como reservas no convencionales, es decir, económicamente no aprovechables pero de gran magnitud como subproducto, serían los depósitos de fosforita en sedimentos de ambientes marinos de la región de San Juan de la Costa y Santo Domingo, Baja California.¹⁹³

190 CE, 1976. Cit. En Sergio D. Bazán Perkins. La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México (2a parte), UNAM, México, 2005. Pág. 13.

191 Bazán, 1981. Cit. En Ídem.

192 Ídem.

193 Sergio D. Bazán Perkins. La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México (2a parte), UNAM, México, 2005. Pág. 13.

Con respecto al potencial y situación económica de las reservas probadas de uranio en México, su valoración es incierta hasta el año 1981, cuando se contaba con 14,522 t de U_3O_8 “in situ” como reservas probables y 35,000 t de posibles, lo que en la práctica se trata de verdaderas estimaciones de U_2O_8 difíciles de recuperar comercialmente por su escaso volumen y con gran parte de refractarios para su recuperación metalúrgica, lo que en conjunto elevaban su costo de concentración entre 4 a 8 veces, según el yacimiento; más de lo que se podría adquirir en el mercado internacional.¹⁹⁴

En resumen son pocas las reservas probadas de uranio en México, en 1999 las reportadas en la estadística mundial, fueron de 1,700 t.¹⁹⁵ Sin embargo, se cuenta con un gran potencial de reservas que en poco tiempo podrían ser cubiertas en detalle y convertirse en reservas probadas de grandes dimensiones, teniendo como principal región a las de la Cuenca Mesozoica de Tlaxiaco (Oaxaca-Guerrero). Su desarrollo puede colocar a México entre los países con mayores reservas probadas y un mayor interés económico para el desarrollo tecnológico, así como el mejor aprovechamiento energético con participación internacional.

Por lo expuesto, las regiones más favorables de México por sus condiciones potenciales son en primer término, la Cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca y Guerrero (Mesozoico); Cuenca de Burgos, Tamaulipas (Terciario); Secuencia Formación Trancas, Querétaro (Mesozoico); las tres en ambientes sedimentarios continentales de litoral. En segundo término, los yacimientos de uranio asociado a rocas volcánicas e hidrotermales como los de el Distrito Uranífero de Villa Aldama, Chihuahua, En tercer término, los no convencionales de San Juan de la Costa y Santo Domingo, Baja California, al obtenerse como subproducto de la roca fosfórica.

3.5.2 Ciclo del combustible.

Desde la desaparición de URAMEX, la Secretaría de Energía (SENER) ha tenido la responsabilidad de la prospección del uranio, la cual delega al Panel de Recursos Minerales. México ha identificado reservas de cerca de 2,000 t de uranio en el 2003 pero este no ha sido explotado a la fecha.¹⁹⁶

Una planta minera de uranio operó de forma experimental en Villa Aldama, en la región de Chihuahua a finales de 1960 pero fue desmantelada. Los restos fueron dispuestos en la región de Peña Blanca.

¹⁹⁴ Ídem.

¹⁹⁵ Uranium, 2000. Cit. En Ídem.

¹⁹⁶ Country Nuclear Power Profiles, IAEA 2003.

Bajo la legislación mexicana, el combustible nuclear es propiedad del estado y se encuentra bajo el control de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS). El combustible nuclear utilizado por los reactores de la planta de Laguna Verde es almacenado en el sitio en albercas de almacenamiento.

3.5.3 Manejo del desperdicio nuclear.

El gobierno de México, a través de la SENER es responsable por la disposición y el almacenamiento de los combustibles nucleares y los desperdicios radioactivos sin importar su origen.

La SENER está comenzando a tomar medidas administrativas y presupuestales para crear una compañía nacional que se encargue del manejo de los desperdicios nucleares. Y también se encuentra a punto de firmar el tratado de la Convención para la Seguridad en el Manejo del Combustible Gastado y el de la Seguridad en el Manejo de Material Radioactivo.

Un sitio de depósito cerca de la superficie para desperdicios de bajo nivel (LLW) operó en Piedrera entre 1985 y 1987. En ese entonces, 20,858 m³ de desperdicio fueron almacenados. También, un centro de tratamiento y almacenamiento para desperdicios de bajo nivel ha operado en Maquixco desde 1972.¹⁹⁷

3.5.4 Regulación y Seguridad.

El acta de 1984 de Actividades Nucleares declara que el gobierno, a través de la SENER, es responsable por el establecimiento de la infraestructura para el uso y desarrollo de la energía nuclear y la tecnología nuclear.

La CNSNS es un organismo regulatorio nuclear que se encuentra bajo la autoridad de la Secretaría de Energía que toma el rol de regulador. La CNSNS es responsable por asegurar la aplicación apropiada de regulaciones y salvaguardas para la seguridad nuclear y radioactiva y por la protección física de instalaciones nucleares y radiológicas para asegurar así la seguridad pública.

La CNSNS es también responsable por la revisión, evaluación y aprobación del criterio para diseñar, construir, operar y dismantelar instalaciones nucleares, proporcionando las regulaciones relevantes. Tiene el poder de conceder o suspender licencias para instalaciones nucleares, las cuales son avaladas por la CNSNS a través de la SENER.

¹⁹⁷ Ídem.

3.5.5 Investigación y Desarrollo.

La principal organización de investigación en México es el Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ). El ININ ha operado un reactor de investigación Triga Mk III de 1000 kW desde Noviembre de 1968.¹⁹⁸

La Universidad Nacional Autónoma de Zacatecas tiene un Modelo subcrítico Chicago 900 usado para entrenamiento, comisionado en 1969.¹⁹⁹

La Universidad Nacional Autónoma de México posee un programa de Maestría y Doctorado en Sistemas Energéticos con modulo en Sistemas Núcleo Eléctricos, así como de instalaciones para simulación de procesos y tecnologías nucleares.

Un Acuerdo Nuclear de Cooperación entre México y Canadá fue firmado en 1995 por el intercambio de información en investigación y desarrollo, salud, seguridad, planeación de emergencia y protección ambiental. Este también provee para la transferencia de material nuclear, equipo y tecnología y asistencia técnica.

3.5.6 No-Proliferación.

La Constitución mexicana proclama que la energía nuclear solo será utilizada con fines pacíficos y esto es reiterado en el Acta de Actividades Nucleares de 1984.

México ratificó el tratado de No-Proliferación Nuclear en 1969 y el Protocolo Adicional en 2004. También es parte de la Convención para la Protección Física del Material Nuclear, ratificado en 1988. México es depositario del Tratado para la Prohibición de Armas Nucleares en América Latina (El Tratado de Tlatelolco) y ha sido parte del Tratado desde 1967.²⁰⁰

¹⁹⁸ IAEA 2003, Country Nuclear Power Profiles

¹⁹⁹ Idem.

²⁰⁰ NEA. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 69.

3.6 Otras aplicaciones de la energía nuclear.

La ciencia y la ingeniería nuclear han contribuido al desarrollo de tecnologías, métodos y equipos que han tenido repercusiones muy importantes en otros campos proporcionando soluciones técnicas capaces de resolver necesidades concretas. Nuevos materiales, desarrollo de instrumentación, sistemas de detección, capacidades y conocimientos han podido ser utilizados por la industria y los laboratorios en numerosas aplicaciones. La física nuclear es hoy un campo de investigación básica y aplicada que ha permitido desarrollar técnicas para la utilización de los radisótopos en industria y medicina, el desarrollo de aceleradores para aplicaciones terapéuticas e industriales, la propulsión naval o de naves espaciales y podrá jugar un papel importante en el desarrollo de tecnologías energéticas emergentes como el desarrollo del vector hidrógeno.

El más atractivo a corto plazo está relacionado con el desarrollo de aceleradores para la producción de radioisótopos con aplicaciones de interés industrial o médico. Un tema pendiente, en un horizonte más lejano aborda el papel que puede jugar la energía nuclear para la producción de hidrógeno en grandes cantidades a precios competitivos, contribuyendo al desarrollo de una nueva economía energética. Así como la desalinización de agua de mar ante la inminente problemática del agua potable.