

# Junta de Gobernadores Conferencia General

GOV/INF/2008/10-GC(52)/INF/6

Fecha: 27 de agosto de 2008

**Distribución general**

Español

Original: Inglés

---

## Sólo para uso oficial

Punto 13 del orden del día provisional de la Conferencia  
(GC(52)/1)

# Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrónica

*Informe del Director General*

---

## Resumen

- En sus resoluciones GC(50)/RES/13 y GC(51)/RES/14 la Conferencia General pidió a la Secretaría que a partir de 2008 presentara un informe exhaustivo bienal separado sobre la situación y las perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrónica. Este informe, con las actualizaciones que procedan, también se presentará por separado como anexo del *Examen de la tecnología nuclear 2009*.

## Índice

Resumen ejecutivo .....	1
Introducción .....	1
Situación de la energía nucleoelectrica en los Estados Miembros .....	1
Perspectivas de la utilización futura de la energía nucleoelectrica .....	2
Desafíos para la expansión nuclear .....	2
A.    Introducción .....	4
B.    Situación actual de la energía nucleoelectrica.....	4
B.1. Utilización de la energía nuclear .....	4
B.2. Tecnología de reactores disponible.....	7
B.3. Recursos humanos .....	9
B.4. Actividades del ciclo del combustible .....	10
B.5. Gestión de desechos radiactivos y clausura.....	12
B.6. Capacidad industrial .....	13
B.7. Aplicaciones no eléctricas .....	14
C.    Perspectivas de la utilización futura de la energía nuclear.....	15
C.1. Perspectivas en países que ya utilizan la energía nucleoelectrica.....	15
C.2. Perspectivas en países que estudian la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica .....	16
C.3. Colaboración regional.....	16
C.4. Factores que pueden impulsar la implantación de la energía nucleoelectrica .....	17
C.5. Proyecciones relativas a la expansión de la energía nucleoelectrica .....	18
C.6. Expectativas en cuanto a las aplicaciones no eléctricas y posibilidades de desarrollo .....	21
D.    Desafíos para la expansión nuclear .....	22
D.1. Principales cuestiones y tendencias relacionadas con la expansión nuclear a corto plazo.....	22
D.1.1. Seguridad y fiabilidad.....	22
D.1.2. Competitividad económica y financiación .....	22
D.1.3. Percepción del público .....	23
D.1.4. Recursos humanos .....	24
D.1.5. Gestión del combustible gastado y de los desechos .....	24
D.1.6. Transporte.....	25
D.1.7. Riesgos de proliferación y seguridad nuclear.....	25
D.1.8. Creación de infraestructuras en los países nuevos en el ámbito nuclear .....	26
D.1.9. Relación entre las redes de electricidad y la tecnología de los reactores .....	27
D.2. Cuestiones clave relacionadas con la utilización a largo plazo .....	27
D.2.1. Utilización eficaz de los recursos disponibles .....	27
D.2.2. Innovaciones en el diseño de los reactores .....	28
D.2.3. Innovaciones relacionadas con el ciclo del combustible .....	28
E.    Desarrollo de la tecnología de los reactores y del ciclo del combustible .....	29
E.1. Adelantos relacionados con los reactores nucleares y la tecnología conexas.....	29
E.1.1. Desarrollo evolutivo.....	29
E.1.2. Innovaciones futuras .....	32
E.2. Novedades relacionadas con el ciclo del combustible nuclear y la tecnología conexas.....	33
E.2.1. Novedades relacionadas con la tecnología del ciclo del combustible.....	33
E.2.2. Innovaciones futuras .....	33
E.3. Aplicaciones no eléctricas.....	34
F.    Cooperación en materia de expansión del uso de la energía nucleoelectrica y desarrollo de las tecnologías.....	34

# Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrica

*Informe del Director General*

## Resumen ejecutivo

### Introducción

1. Este informe se ha preparado en respuesta a la petición de los Estados Miembros, contenida en las resoluciones GC(50)/RES/13 y GC(51)/RES/14, de que la Secretaría presentara a partir de 2008 un informe exhaustivo bienal separado sobre la situación y las perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrica.

### Situación de la energía nucleoelectrica en los Estados Miembros

2. Las centrales nucleares (CN) se utilizan principalmente para producir electricidad. Actualmente, hay 439 reactores en 30 países, que producen alrededor del 14% de la electricidad generada a nivel mundial. En los últimos años la participación de la energía nucleoelectrica en la producción mundial de electricidad ha registrado una leve disminución. Sin embargo, la cantidad total de energía nucleoelectrica generada está aumentando debido a que la mayor disponibilidad de las centrales, el aumento de la potencia y la incorporación de nuevas centrales compensan las mermas causadas por la parada de centrales más antiguas. Teniendo en cuenta los beneficios económicos de mantener en funcionamiento las centrales una vez amortizados los costos de capital, y tras evaluar cuidadosamente la gestión de su vida útil, más las licencias de explotación de una serie de reactores se han prorrogado por 20 años.

3. Los reactores de agua ligera (LWR) son con creces los más utilizados en la actualidad, seguidos por los de agua pesada a presión y los refrigerados por gas. Si bien los reactores rápidos se vienen desarrollando desde los años cincuenta, actualmente sólo funcionan en centrales de demostración.

4. Se ha registrado una mejora constante en la seguridad y fiabilidad de las instalaciones nucleares. Los explotadores han podido aprender unos de otros y abordar problemas comunes mediante sólidas redes establecidas entre los países que cuentan con CN. Las actividades en curso han seguido consolidando la cultura de la seguridad y la supervisión reglamentaria.

5. La disponibilidad actual del suministro de uranio satisface la demanda. La capacidad existente de enriquecimiento y fabricación de combustible es suficiente para atender la demanda prevista para el próximo decenio. También existe considerable experiencia en materia de almacenamiento y reprocesamiento del combustible gastado, así como con respecto al tratamiento de desechos de actividad alta. La capacidad de reprocesamiento es suficiente para satisfacer la demanda actual. Sin embargo, la mayor parte del combustible gastado sigue almacenada a la espera de que se tome una decisión acerca de la política futura, es decir, reprocesarlo y reciclarlo o bien proceder a su disposición final como desechos. Actualmente no existen instalaciones de disposición final definitiva.

6. En la actualidad sólo unos pocos países destinan la energía nuclear para usos civiles a finalidades distintas de la producción de electricidad – principalmente para desalación de agua de mar y calefacción urbana – y aun así se trata de aplicaciones limitadas.

## **Perspectivas de la utilización futura de la energía nucleoelectrica**

7. Las necesidades energéticas mundiales y la participación de la electricidad en el consumo total de energía no cesan de aumentar y se prevé un incremento considerable de la contribución de la energía nucleoelectrica. De los 30 países que utilizan energía nuclear para producir electricidad, 24 prevén autorizar la construcción de nuevas centrales y la mayoría de éstos apoya activamente el uso creciente de la energía nucleoelectrica, en algunos casos mediante el establecimiento de incentivos. Se prevé que estos países construirán reactores con una potencia superior a los 1000 MW(e).

8. Además, cada vez son más los países que tienen el propósito de introducir la energía nucleoelectrica. De los más de 40 países que en los últimos años han expresado interés a ese respecto, más de 20 estudian activamente la posibilidad de establecer programas de energía nucleoelectrica para satisfacer sus necesidades energéticas y otros desean conocer la problemática relacionada con la introducción de ese tipo de energía.

9. Entre los motivos de la creciente expectativa que despierta la energía nucleoelectrica figuran los siguientes: el aumento de la demanda energética, las preocupaciones de los países por la seguridad del suministro de energía, la creciente volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y los problemas relacionados con el medio ambiente mundial. Son motivos que valen tanto para los países que están ampliando sus programas nucleares como para los que tienen el propósito de introducirlos.

10. Las proyecciones elaboradas por diferentes organizaciones internacionales apuntan a un crecimiento considerable del uso de la energía nucleoelectrica. Las proyecciones del Organismo indican que en 2020 la capacidad mundial total de producción de energía nucleoelectrica se situará entre 437 GW(e) y 542 GW(e) y en 2030 entre 473 GW(e) y 748 GW(e). Tanto en las proyecciones altas como en las bajas se prevé que en los próximos 20 años el mayor incremento se registrará en los países que ya tienen programas nucleoelectricos. Todas las proyecciones, incluidas las del Organismo, tienen un gran margen de incertidumbre.

11. El uso de la energía nuclear en aplicaciones distintas de la producción de electricidad puede aumentar en el futuro, por ejemplo, para desalación de agua de mar, calefacción urbana, producción de calor para aplicaciones industriales y licuefacción del carbón, y producción de hidrógeno. La contribución de la energía nucleoelectrica a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero puede incrementarse por su aportación indirecta en el sector del transporte, por ejemplo, mediante la utilización de trenes y otros vehículos con motores eléctricos.

## **Desafíos para la expansión nuclear**

12. Entre los desafíos que deben afrontarse para concretar las perspectivas de crecimiento y expansión de la energía nucleoelectrica figuran los siguientes:

- constante atención en garantizar la seguridad y fiabilidad de las centrales nucleares;
- mejora de la competitividad económica;
- logro y mantenimiento de la confianza del público en la energía nuclear;
- mantenimiento y perfeccionamiento de las competencias profesionales necesarias;
- mantenimiento de una gestión eficiente del combustible gastado y de los desechos radiactivos;

- demostración de resultados satisfactorios en la disposición final definitiva del combustible gastado y los desechos de actividad alta;
- gestión y aceptación del transporte de combustible nuclear;
- mantenimiento de la confianza en la no proliferación nuclear y en la seguridad nuclear;
- establecimiento de una infraestructura aceptable en los países que introduzcan la energía nucleoelectrónica;
- realización de diseños de reactores de eficacia demostrada que sean adecuados para determinados países;
- a largo plazo, uso eficaz y sostenible de los recursos.

13. En general la capacidad industrial de los suministradores nucleares se ha reducido durante los últimos 20 años. No sólo ha disminuido el número de diseñadores de reactores y la variedad de reactores disponibles, sino que también hay menos ingenieros constructores y menos entidades de gestión con experiencia en la ejecución de proyectos nucleoelectrónicos. Las dificultades registradas en la contratación, educación y capacitación de personal así como en la adquisición de la experiencia necesaria para apoyar el desarrollo y la expansión de la industria nuclear pueden limitar los planes de crecimiento incluso en algunos de los países que cuentan con programas nucleares.

14. Muchos países interesados en introducir la energía electronuclear carecen actualmente de la infraestructura necesaria. Es posible que necesiten bastante tiempo y recursos considerables para dotarse de las competencias que requiere el establecimiento de centrales nucleares. Entre los desafíos para el futuro pueden figurar la innovación institucional y la mejora de los procedimientos operativos de la industria - incluida la posibilidad de intercambiar información sobre aprobación de licencias de diseños - la utilización de infraestructuras nucleares regionales comunes - como instalaciones del ciclo del combustible - y la construcción de repositorios internacionales.

15. La introducción de reactores rápidos y del ciclo cerrado permitiría mejorar la utilización de los recursos y la eficiencia en el uso del combustible nuclear. Mediante este sistema es posible reciclar el uranio y el plutonio del combustible gastado y aprovechar mejor los recursos de uranio, así como reducir la presencia de nucleidos de período largo en los desechos. En algunos países sigue habiendo preocupación por los riesgos ambientales y de proliferación que podrían entrañar esas estrategias.

16. La mayoría de los países interesados en construir su primera central nuclear desean adoptar diseños de eficacia demostrada. En muchos países las redes nacionales son demasiado pequeñas para los grandes reactores (de potencia igual o superior a los 1000 MW(e)) que podrían instalarse actualmente.

17. Los objetivos fundamentales del diseño evolutivo de reactores consisten en mejorar la fiabilidad y seguridad, incorporar tecnologías modernas, abreviar los períodos de construcción, reducir los costos de capital y facilitar la concesión de licencias y la selección de los emplazamientos. A corto plazo la mayoría de las nuevas centrales nucleares tendrán diseños evolutivos. Se prevé que a largo plazo se dispondrá de diseños que conlleven períodos de construcción más breves, reduzcan los costos de capital e introduzcan nuevas estrategias del ciclo del combustible y de gestión de los desechos.

18. La cooperación internacional puede ayudar a compensar los costos del desarrollo tecnológico, en especial de sistemas innovadores o a más largo plazo. Dos actividades internacionales importantes, el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) y el Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del Organismo, ayudan a los Estados Miembros participantes a evaluar las novedades tecnológicas y la posible viabilidad de la opción nucleoelectrónica como componentes de su futura combinación de fuentes de energía.

19. Tanto la iniciativa de la Federación de Rusia de desarrollar una infraestructura nucleoelectrica mundial (GNPI), empezando por la creacion de un Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio en Angarsk, como la Alianza Mundial por la Energia Nuclear, lanzada por los Estados Unidos de America, tienen por objeto compartir una vision comun sobre la necesidad de fomentar a nivel mundial el uso de la energia nuclear con fines pacificos en condiciones de seguridad fisica y tecnologica.

## **A. Introduccion**

20. El presente informe contiene un examen sucinto de la situacion actual del uso de la energia nuclear a nivel mundial asi como de la tecnologia disponible para las centrales nucleares y del correspondiente ciclo del combustible.

21. Tambien se examinan las perspectivas de la aplicacion de la energia nuclear basandose en la informacion de que dispone el Organismo sobre las intenciones de los paises a ese respecto.

22. En primer lugar se describen los desafios que se plantean tanto para los paises que ya producen energia nucleoelectrica como para los que prevén hacerlo en el futuro, y luego se aborda la evolucion de la tecnologia de los reactores y del ciclo del combustible en funcion de esos desafios.

23. Este informe se ha preparado en respuesta a una peticion que los Estados Miembros formularon en la quincuagesima Conferencia General y reiteraron en la quincuagesima primera Conferencia General, en el sentido de que la Secretaria presentara a partir de 2008 "un informe exhaustivo bienal separado sobre la situacion internacional y las perspectivas de la energia nucleoelectrica" (resolucion GC(51)/RES/14).

## **B. Situacion actual de la energia nucleoelectrica**

### **B.1. Utilizacion de la energia nuclear**

24. Actualmente, la energia nuclear representa el 14% del suministro electrico mundial y alrededor del 6% del total de la energia utilizada en todo el mundo.

25. Tanto la produccion energetica total como su utilizacion per capita estan aumentando. Entre 1970 y 2006 el factor anual de incremento de las necesidades energeticas totales fue del 2,5, de 6 181 a 15 311 GW anuales (de 195 a 483 exajulios<sup>1</sup>). En los ultimos decenios tambien aumento la participacion de la electricidad como porcentaje de la produccion energetica total.

26. En la figura B-1 se indica la contribucion de las diferentes fuentes de energia al balance energetico mundial durante el periodo mencionado. La participacion de la energia nuclear se incremento de casi el 0,5% en 1970 a mas del 7% en los años noventa y descendio al 6% en 2006. Los combustibles fosiles siguen siendo la principal fuente de energia.

---

<sup>1</sup> Un exajulio equivale a  $2,78 \times 10^5$  GW·h o 31,7 GW·anuales.

27. La energía nuclear se utiliza desde 1954 para producir electricidad destinada al consumo público. A partir de ese año se explotaron centrales nucleares en 32 países<sup>2</sup>. En la actualidad hay 439 centrales en 30 países, con una capacidad total de 372 GW(e). Además, se están construyendo 34 unidades que producirán un total de 28 GW(e) (según información disponible al 26 de junio de 2008). En 2007 se produjeron 2 608 millones de kW·h. Actualmente, la industria cuenta con 13 000 años-reactor de experiencia.

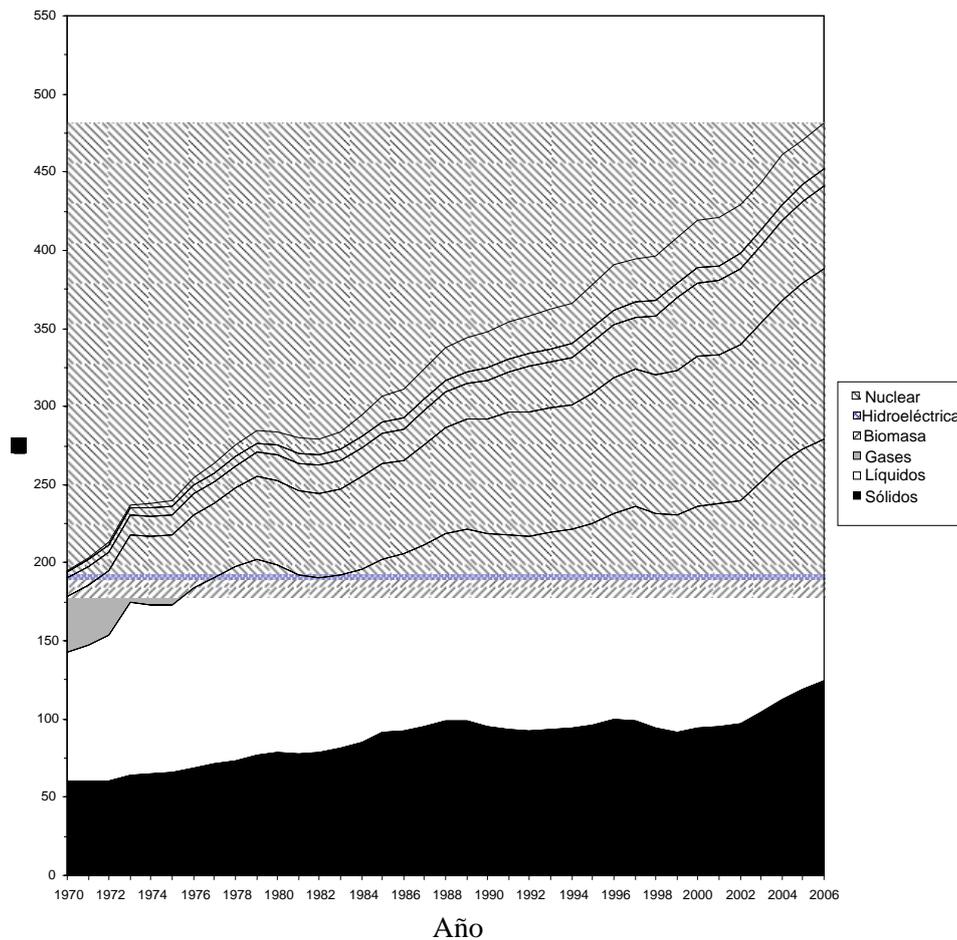


Figura B-1. Participación de las distintas fuentes de energía en la producción energética mundial, 1970-2006

<sup>2</sup> Alemania, Argentina, Armenia, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Canadá, China, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Finlandia, Francia, Hungría, India, Italia, Japón, Kazajstán, Lituania, México, Países Bajos, Pakistán, Reino Unido, República Checa, República de Corea, Rumania, Sudáfrica, Suecia, Suiza, Ucrania.

Cuadro B-1. Uso (EJ) y contribución porcentual (%) de los diferentes tipos de fuentes de energía a la producción de electricidad, 2006

Región	Térmica a)		Hidroeléctrica		Nuclear		Renovables b)		Total	
	Uso (EJ)	%	Uso (EJ)	%	Uso (EJ)	%	Uso (EJ)	%	Uso (EJ)	%
América del Norte	22,21	65,71	2,43	14,53	9,61	18,99	0,63	0,77	34,87	100,00
América Latina	4,42	38,28	2,46	58,31	0,33	2,61	0,32	0,81	7,54	100,00
Europa occidental	15,56	52,32	1,72	15,86	9,56	29,14	0,53	2,68	27,37	100,00
Europa oriental	17,36	64,95	1,12	17,21	3,51	17,80	0,02	0,05	22,01	100,00
África	4,89	80,01	0,35	17,74	0,11	1,84	0,04	0,41	5,4	100,00
Oriente Medio y Asia meridional	14,42	82,42	0,64	15,51	0,20	1,57	0,02	0,50	15,28	100,00
Asia sudoriental y el Pacífico	5,81	88,17	0,26	10,73			0,21	1,10	6,28	100,00
Lejano Oriente	32,61	75,65	2,04	12,50	5,70	11,52	0,47	0,33	40,83	100,00
<b>Total mundial</b>	<b>117,27</b>	<b>66,46</b>	<b>11,02</b>	<b>17,46</b>	<b>29,03</b>	<b>15,18</b>	<b>2,26</b>	<b>0,89</b>	<b>159,83</b>	<b>100,00</b>

Notas: a) En esta columna se agrupan los datos relativos a todos los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, así como a los derivados de la biomasa y los desechos.

b) Abarca la energía geotérmica, eólica, solar y mareal.

28. La contribución de la energía nuclear a la producción total de electricidad varía considerablemente según las regiones (cuadros B-1 y B-2). En Europa occidental la energía nucleoelectrica representa casi el 30% de toda la electricidad generada. En América del Norte y Europa oriental representa alrededor del 18%, mientras que en África y América Latina su participación es del 1,8% y el 2,6%, respectivamente. En el Lejano Oriente el porcentaje es del 11,5% y en Oriente Medio y Asia meridional se sitúa en el 1,6%<sup>3</sup>. El uso de la energía nuclear se concentra en los países con tecnologías avanzadas.

Cuadro B-2. Parque mundial de reactores de potencia (datos hasta finales de 2007)

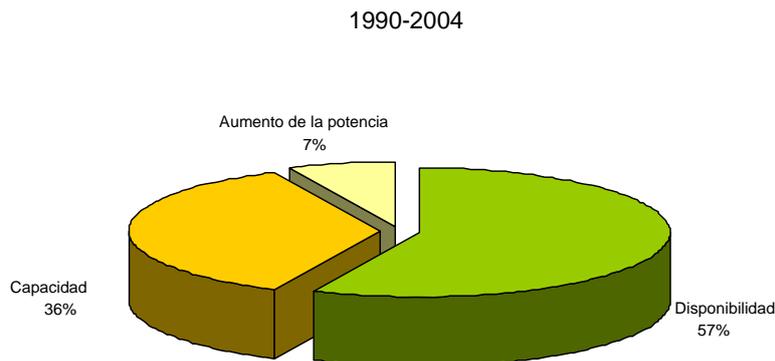
Región	En funcionamiento		En construcción		Electricidad suministrada por CN en 2007(TW·h)
	Número de reactores	Capacidad neta (MW(e))	Número de reactores	Capacidad neta (MW(e))	
América del Norte	122	113 171	1	1 165	895
América Latina	6	4 090	1	692	28
Europa occidental	130	122 638	2	3 200	827
Europa oriental	68	47 765	10	7 445	325
África	2	1 800			13
Oriente Medio y Asia meridional	19	4 207	8	4 125	18
Lejano Oriente	92	78 531	11	10 566	502
<b>Total mundial</b>	<b>439</b>	<b>372 202</b>	<b>33</b>	<b>27 193</b>	<b>2 608</b>

29. Durante el período comprendido entre 1990 y 2004 el incremento total de la producción nucleoelectrica fue de 714 TW·h, aproximadamente (alrededor del 40%); esto se debió a la combinación de tres factores: la mayor disponibilidad de las centrales nucleares existentes, la construcción de nuevas centrales y el aumento de la potencia en las centrales existentes. El factor más importante fue el aumento de la disponibilidad (del 72,3% al 83,2%), que representó el 57% del

<sup>3</sup> En la región de Asia sudoriental y el Pacífico no existen centrales nucleoelectricas.

incremento total. La construcción de nuevas centrales y el aumento de la potencia de las centrales determinaron el 36% y el 7% del incremento, respectivamente (figura B-2).

30. Desde el accidente de Chernóbil la seguridad ha mejorado considerablemente<sup>4</sup>. Las paradas de emergencia no previstas registraron un fuerte descenso, de 1,8 por 7 000 horas de criticidad en 1990 a 0,55 por 7 000 horas de criticidad en 2007<sup>5</sup>. El aumento tanto de la disponibilidad como de la seguridad se debe, en parte, al mayor intercambio de información sobre mejores prácticas y enseñanzas extraídas en la industria, así como a la aplicación de reglamentos basados en los riesgos y a la consolidación de la industria.



*Figura B-2. Factores que contribuyeron al incremento de la producción nucleoelectrónica*

## B.2. Tecnología de reactores disponible

31. Si bien se sigue utilizando una amplia gama de tecnologías, la mayoría de las unidades en funcionamiento son reactores de agua ligera. De todos los reactores comerciales en funcionamiento, alrededor del 82% son reactores moderados<sup>6</sup> y refrigerados por agua ligera, en 10% son reactores moderados por agua pesada y refrigerados por agua ligera, un 4% son reactores refrigerados por gas, y un 4% son reactores refrigerados por agua y refrigerados por grafito. Dos unidades son reactores moderados y refrigerados por metal líquido. En el cuadro B-3 se indica el número, los tipos y la potencia neta de las centrales nucleares en explotación. Además de los países que figuran en esta lista, otros países también han explotado reactores rápidos, que ahora están parados.

32. Alrededor de tres cuartas partes de los reactores en funcionamiento más de 20 años de antigüedad y el resto más de 30, como se indica en la figura B-3. En el marco de programas de gestión de la vida útil de las centrales se ha prorrogado el período de explotación inicial de muchas centrales para que puedan explotarse por otros 20 años. El envejecimiento de los reactores plantea problemas de degradación de los materiales y obsolescencia de la tecnología, por ejemplo, con respecto a los instrumentos y a los sistemas de control. La gestión de la vida útil de las centrales aborda estos problemas a fin de aumentar el rendimiento de las inversiones y, cuando la experiencia ha demostrado un comportamiento operacional satisfactorio, también para ampliar la vida útil autorizada de las centrales.

<sup>4</sup> *Examen de la seguridad nuclear, 2007*, documento GOV/2008/2, 31 de enero de 2008.

<sup>5</sup> Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN), *2007 Performance Indicators*, 2008.

<sup>6</sup> Algunos LWR son reactores moderados por grafito.

33. La mayoría de las centrales nucleares que se explotan en distintas partes del mundo tienen diseños que datan de finales de los años sesenta y del decenio de 1970, y que ya no se ofrecen en el mercado. La capacidad de los reactores diseñados ha ido aumentando para incrementar su competitividad aprovechando las economías de escala. Muchos de los primeros reactores, cuya explotación comercial se inició en los años cincuenta, tenían a lo sumo una potencia de 50 MW(e). La capacidad de las centrales en funcionamiento varía entre 100 MW(e) y 1500 MW(e). En 2006 la capacidad media de los reactores en funcionamiento era de 850 MW(e).

Cuadro B-3. Distribución actual de los tipos de reactor

Country	PWR		BWR		GCR		PHWR		LWGR		FBR		Total	
	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)	Nº	MW(e)
ALEMANIA	11	13973	6	6457									17	20430
ARGENTINA							2	935					2	935
ARMENIA	1	376											1	376
BÉLGICA	7	5824											7	5824
BRASIL	2	1795											2	1795
BULGARIA	2	1906											2	1906
CANADÁ							18	12610					18	12610
CHINA	9	7272					2	1300					11	8572
ESLOVAQUIA	5	2034											5	2034
ESLOVENIA	1	666											1	666
ESPAÑA	6	5940	2	1510									8	7450
ESTADOS UNIDOS	69	66697	35	33885									104	100582
FINLANDIA	2	976	2	1720									4	2696
FRANCIA	58	63130									1	130	59	63260
HUNGRÍA	4	1829											4	1829
INDIA			2	300			15	3482					17	3782
JAPÓN	23	18420	32	29167									55	47587
LITUANIA									1	1185			1	1185
MÉXICO			2	1360									2	1360
PAÍSES BAJOS	1	482											1	482
PAKISTÁN	1	300					1	125					2	425
REINO UNIDO	1	1188			18	9034							19	10222
REP. CHECA	6	3619											6	3619
REP. DE COREA	16	14824					4	2627					20	17451
RUMANIA							2	1305					2	1305
RUSIA	15	10964							15	10219	1	560	31	21743
SUDÁFRICA	2	1800											2	1800
SUECIA	3	2819	7	6215									10	9034
SUIZA	3	1700	2	1520									5	3220
UCRANIA	15	13107											15	13107
<b>TOTAL</b>	<b>265</b>	<b>243421</b>	<b>94</b>	<b>85275</b>	<b>18</b>	<b>9034</b>	<b>44</b>	<b>22384</b>	<b>16</b>	<b>11404</b>	<b>2</b>	<b>690</b>	<b>439</b>	<b>372208</b>

Los totales incluyen 6 unidades, 4921 MW(e) en Taiwán (China).

En 2007, 3 reactores, 1852 MW(e), fueron conectados a la red.

PWR: reactor de agua a presión; BWR: reactor de agua en ebullición; GCR: reactor refrigerado por gas; PHWR: reactor de agua pesada a presión; LWGR: reactor refrigerado por agua ligera y moderado por grafito; FBR: reactor reproductor rápido

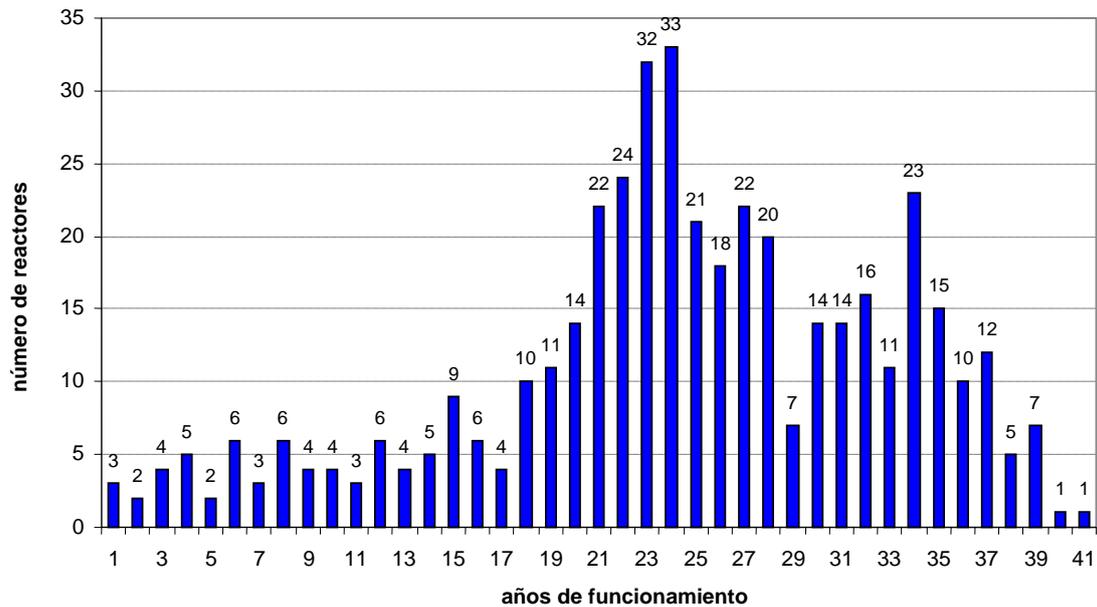


Figura B-3: Número de centrales nucleares en funcionamiento, por edad, en el mundo en enero de 2008 (la edad de un reactor se determina por la fecha en que fue conectado por primera vez a la red)

34. La tecnología de reactores actualmente disponible se basa fundamentalmente en diseños anteriores y tiene en cuenta las siguientes características de diseño:

- Vida útil de 60 años
- Mantenimiento simplificado – en línea o durante la interrupción del servicio
- Construcción más fácil y breve
- Inclusión de aspectos de seguridad y fiabilidad en las primeras fases del diseño
- Tecnologías modernas de control digital y de interfaz hombre-máquina
- Diseño del sistema de seguridad en función de la evaluación de riesgos
- Simplicidad mediante la reducción del número de componentes rotatorios
- Mayor dependencia de los sistemas pasivos (gravedad, circulación natural, presión acumulada, etc.)
- Adición de equipo de mitigación de accidentes graves
- Diseños completos y normalizados a los efectos de la concesión previa de licencias

35. Aunque históricamente la industria se ha esforzado por lograr mayores economías de escala, prosigue la utilización de reactores de pequeña y mediana potencia (menos de 300 MW(e), y entre 300 MW(e) y 700 MW(e), respectivamente). Los reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP) posibilitan la inversión incremental. Se están desarrollando RPMP para a) su uso en redes pequeñas con interconexiones limitadas, como las que existen en algunos países en desarrollo; b) como fuente de energía eléctrica o para fines múltiples en una zona aislada; y c) con fines de inversión incremental para evitar riesgos financieros.

### B.3. Recursos humanos

36. Aunque ni el Organismo ni otras organizaciones internacionales mantienen estadísticas exhaustivas, se estima que en 2007 el número total de centrales nucleares en funcionamiento en todo el mundo daban trabajo a más de 250 000 personas. Se estima que, en 2007, más de un millón de personas participó en el apoyo brindado a la industria nuclear en todo el mundo. Esas personas están

contratadas en los ámbitos de la construcción de nuevas plantas, la prestación de apoyo tecnológico y técnico, la capacitación y enseñanza, los órganos reguladores, los ministerios gubernamentales, las actividades de investigación y desarrollo, la gestión de desechos radiactivos, la protección radiológica, el diseño y la fabricación, el apoyo en la interrupción del servicio, el suministro de combustible y otros servicios, así como mediante contratistas en relación con el suministro. La fuerza actual de trabajo del ámbito nuclear está envejeciendo y muchos de esos sectores se enfrentan a la falta de personal experimentado y a una pérdida de conocimientos y experiencia debido a la jubilación, incluso en países con programas nucleares establecidos.

37. A la luz de lo anteriormente expuesto, la conservación de los conocimientos y la contratación para la industria y las autoridades reguladoras son cuestiones importantes. La complejidad de la tecnología nuclear requiere una fuerza de trabajo con alta formación académica y capacitación específica. En los últimos años se ha tendido a promover la enseñanza y la capacitación en la industria nuclear, aunque se dispone de recursos limitados en relación con esa enseñanza y capacitación especializadas y se necesitan hasta 10 años para obtener la capacitación apropiada que permita ocupar algunos cargos de la industria. En algunos países, el gobierno ha ofrecido incentivos con el fin de elaborar programas académicos y atraer a estudiantes a los ámbitos nucleares. También se han establecido redes regionales para el intercambio de información y se ha mejorado la creación de redes entre explotadores. Estos esfuerzos tienen por objeto, entre otras cosas, colmar la brecha de experiencia que conllevan la renovación y ampliación de la fuerza de trabajo.

#### B.4. Actividades del ciclo del combustible

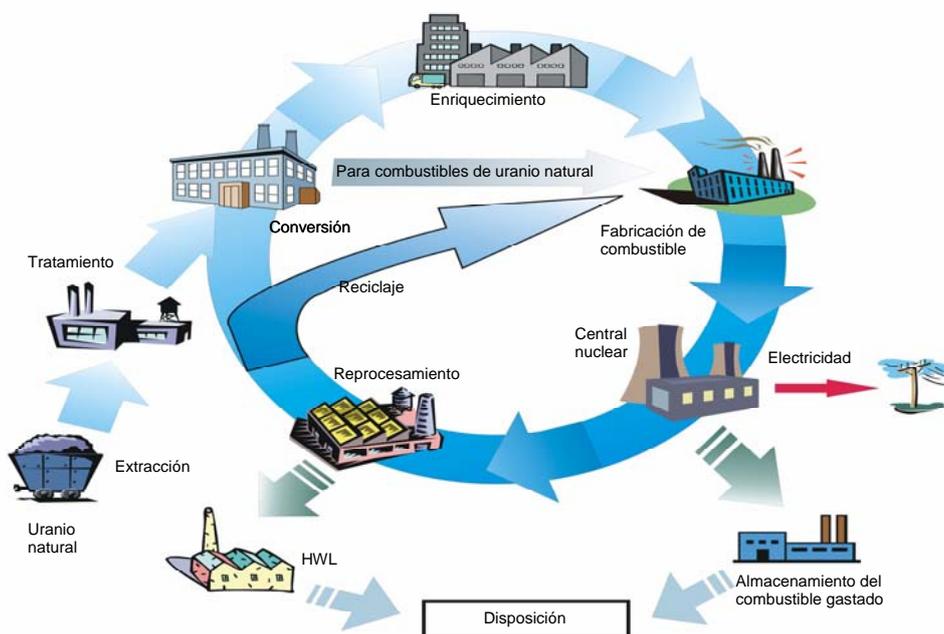


Figura B-4. El ciclo del combustible

38. La fabricación de combustible para reactores y la gestión del combustible tras su uso (el ciclo del combustible) requiere varios pasos, como se muestra en la figura B-4. Se suelen dividir en las

actividades de la parte inicial (extracción, conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible) para producir conjuntos combustibles<sup>7</sup> que se insertan en el reactor, y las actividades de la parte final, destinadas a gestionar el combustible nuclear gastado (incluido el almacenamiento, el reprocesamiento y la disposición final de desechos).

#### *Parte inicial*

39. Existe un mercado establecido y eficaz para los distintos servicios de la parte inicial. La mayoría de las actividades se realizan en virtud de contratos a largo plazo, aunque también existe un mercado al contado.

40. Se llevan a cabo actividades de extracción de uranio en 18 países, 7 de los cuales<sup>8</sup> representan el 90% de la capacidad mundial. Actualmente, el 40% de las necesidades de uranio se satisfacen con suministros secundarios – uranio almacenado o material antiguamente destinado a fines militares – y materiales reciclados. Gracias a esto, el precio del uranio se ha mantenido bajo, pero recientemente se ha registrado un aumento importante del precio (aproximadamente diez veces en cinco años) en previsión del aumento de la demanda y de la reducción de los suministros secundarios. El incremento del precio también estimula el aumento de la capacidad de las minas y la prospección del uranio, lo que puede traducirse en una reducción del precio del uranio. Los recursos de uranio identificados en el suelo son suficientes para cubrir la demanda actual durante casi 100 años.

41. El material extraído se convierte en la materia prima química para el resto de la industria, por lo general en forma de UF<sub>6</sub>, mediante un proceso denominado conversión. Más del 90 % de la capacidad mundial se concentra en seis países<sup>9</sup>, y la actual capacidad a escala mundial es aproximadamente el doble de lo que se necesita. En el mercado, el UF<sub>6</sub> poco enriquecido, que es adecuado para la fabricación de combustible, se considera un producto básico.

42. La capacidad de enriquecimiento actual es suficiente para atender la demanda del próximo decenio. Las plantas más antiguas basadas en tecnología de difusión gaseosa se están sustituyendo por plantas basadas en tecnología de centrifugación, que precisa menos insumo energético. En previsión del aumento de la demanda previsto se están construyendo plantas en los Estados Unidos de América y en Francia.

43. Los conjuntos combustibles, principales componentes generadores de energía del reactor, son un producto muy específico tecnológicamente que entraña un elemento importante de propiedad intelectual. Además, los conjuntos combustibles propiamente dichos son un componente de la seguridad general de la planta y requieren un amplio proceso de aprobación de licencias. Los conjuntos combustibles de distintos suministradores no se pueden intercambiar fácilmente, aunque muchas compañías eléctricas cambian de suministrador periódicamente con el fin de mantener la competencia. Los principales fabricantes de combustible son también los suministradores principales de las centrales nucleares o están estrechamente vinculados a ellas. La mayor capacidad de fabricación de combustible se encuentra en Alemania, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia y Francia, si bien se fabrica combustible en al menos siete países más, con frecuencia en virtud de la licencia de uno de los principales suministradores.

---

<sup>7</sup> La mayoría de reactores utilizan uranio poco enriquecido con un enriquecimiento de entre el 2% y el 5%. Algunos (PHWR) no utilizan uranio enriquecido.

<sup>8</sup> Australia, Canadá, Federación de Rusia, Kazajistán, Namibia, Níger y Uzbekistán.

<sup>9</sup> Canadá, China, Estados Unidos de América, Francia, Reino Unido y Rusia.

### *Parte final*

44. Algunos países consideran que el combustible gastado es un desecho de actividad alta (DAA) del que es preciso deshacerse. Otros consideran que es un recurso que debe someterse a reprocesamiento para su posible reutilización. Actualmente existe un mercado de reprocesamiento y fabricación de combustible de mezcla de óxidos de uranio y plutonio (MOX), pero no de almacenamiento o disposición final.

45. En el caso de ambas estrategias, el combustible gastado se almacena en primer lugar en la piscina del reactor y, más tarde, en distintos lugares de almacenamiento en el emplazamiento del reactor o en una instalación central. Aunque la mayor parte del combustible se almacena en piscinas de agua, la estrategia actual consiste cada vez más en utilizar instalaciones modulares de almacenamiento en seco, como cofres o cámaras. El tiempo de almacenamiento previsto depende de cuándo se pueda transportar el combustible a los lugares de reprocesamiento o disposición final. En la mayoría de países se prevén plazos de almacenamiento de varios decenios.

46. Actualmente, alrededor del 15% de todo el combustible gastado se reprocesa para recuperar y reciclar el uranio y el plutonio. El reprocesamiento se realiza en la Federación de Rusia, Francia, el Japón y el Reino Unido, y parte del combustible de PHWR se reprocesa en la India. La capacidad de reprocesamiento actual se aprovecha sólo en un 50% aproximadamente debido a las incertidumbres asociadas al uso futuro del material reprocesado. Hoy en día la reutilización del uranio y el plutonio (como MOX) se realiza principalmente en LWR, pero para aprovechar al máximo los recursos de uranio mediante un ciclo del combustible cerrado varios países están estudiando la posibilidad de utilizar reactores rápidos u otros sistemas avanzados. El ciclo del combustible cerrado también puede propiciar la reducción de la radiotoxicidad de los desechos. En la actualidad, buena parte del material reprocesado se mantiene almacenado.

47. Independientemente de que el combustible se reprocese o no, seguirá habiendo desechos de actividad alta y período largo que se deberán someter a disposición final segura. En muchos casos, tras su reprocesamiento, los desechos se devuelven al país en que se utilizó el combustible. Actualmente, al igual que el combustible gastado, estos materiales se almacenan.

## **B.5. Gestión de desechos radiactivos y clausura**

48. Los desechos radiactivos se generan en distintas fases del ciclo del combustible, y pueden darse en forma de líquidos, gases o sólidos radiactivos y con un amplio espectro de niveles de actividad. Según el nivel de actividad y su gestión y disposición final futuras, se clasifican en desechos de actividad baja, intermedia o alta. Las tecnologías de tratamiento, acondicionamiento y almacenamiento a largo plazo de todo tipo de desechos están comprobadas y se aplican normalmente en las instalaciones nucleares en las que se generan desechos. Son comunes los períodos de almacenamiento de 50 años o más, lo que permite tomar decisiones sobre la disposición final de forma flexible.

49. La disposición final de desechos de actividad baja e intermedia (DABI) se realiza a escala industrial en varios Estados Miembros y los expertos técnicos reconocen en general que las tecnologías empleadas cumplen los requisitos de seguridad. No obstante, varios países con centrales nucleares en funcionamiento no han podido aún determinar un emplazamiento ni construir una instalación de disposición final para DABI, principalmente debido a la falta de aceptación política y pública.

50. Entre, los expertos técnicos está muy extendida la opinión de que el método más adecuado para la disposición final de desechos de actividad alta (DAA) y de combustible nuclear gastado probablemente sean los repositorios geológicos profundos. Si bien no hay ninguno en funcionamiento, los Estados Unidos de América, Finlandia, Francia y Suecia están muy avanzados en su construcción. La experiencia indica que el tiempo necesario para seleccionar un emplazamiento y construir

repositorios geológicos es de varios decenios, y es poco probable que alguno de ellos entre en funcionamiento antes de 2020.

51. A medida que los reactores de potencia llegan al final de sus vidas útiles es preciso clausurarlos. Puesto que algunas partes de los reactores están contaminadas con radiactividad, su desmantelamiento deberá realizarse de forma controlada y será preciso encargarse de los desechos radiactivos. El momento en que se lleve a cabo el desmantelamiento depende de varios factores, por ejemplo, aspectos relativos a la protección radiológica, la disponibilidad de financiación y de instalaciones de disposición final. Según las estadísticas del Organismo, hasta la fecha se han sometido a régimen de parada 117 reactores de potencia. De ellos, diez han sido desmantelados completamente y sus emplazamientos se han declarado aptos para su uso público sin restricciones, y 32 se encuentran en proceso de desmantelamiento antes de declarar esos emplazamientos aptos para otros usos. Diecisiete han sido parcialmente desmantelados y cerrados en condiciones de seguridad para el almacenamiento a largo plazo, y otros 34 están siendo desmantelados antes de su cierre a largo plazo. Los demás reactores están siendo preparados para su clausura, incluida la retirada del combustible gastado y la descontaminación. Los desechos radiactivos derivados de la clausura son de actividad baja e intermedia, por lo que su manipulación y disposición final son factibles. En el caso de algunos componentes de gran tamaño, se han aplicado con éxito estrategias como la disposición final intacta.

## B.6. Capacidad industrial

52. El número de centrales nucleares en construcción alcanzó su nivel más alto en 1979, con 233, frente entre 30 y 40 en los últimos 15 años (véase la figura B-6 más adelante). La industria de suministro nuclear se ha ajustado a los 25 últimos años aproximadamente mediante la consolidación. Se han planteado cuestiones sobre si existe capacidad para satisfacer la demanda a corto plazo en el caso de que se cumplan las proyecciones de crecimiento altas relativas a la energía nucleoelectrónica.

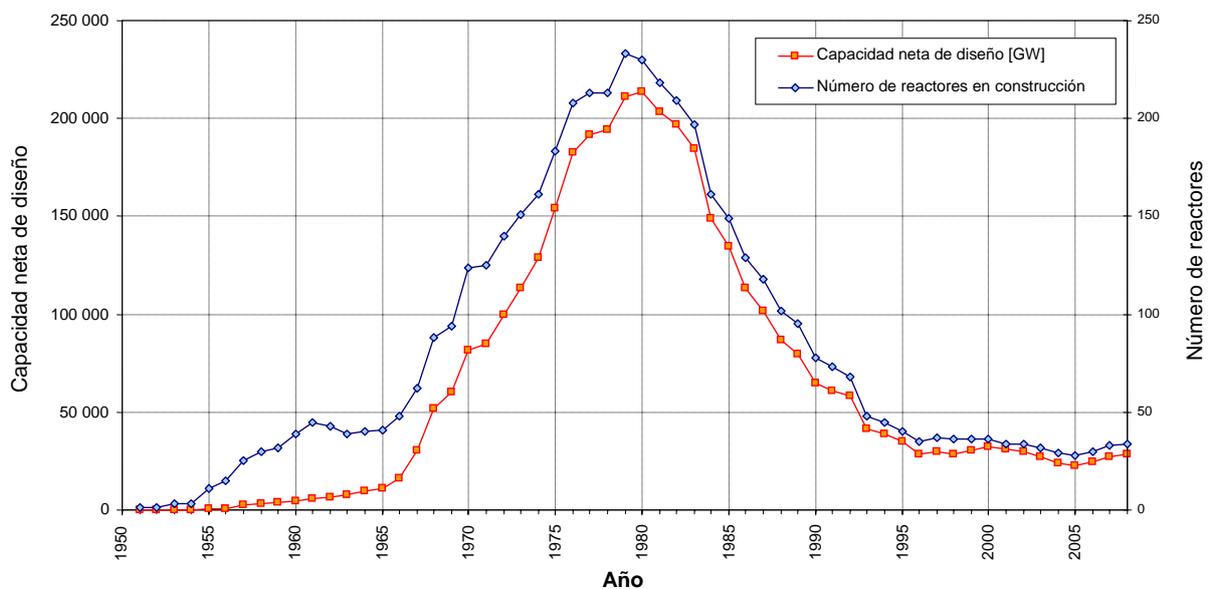


Figura B-5. Número de reactores, y capacidad total, en construcción de 1951 a 2008

53. Durante el período álgido de construcción hubo importantes empresas de suministro de sistemas nucleares en Alemania, Canadá, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia, Japón, el

Reino Unido, Suecia y Suiza. Actualmente, hay suministradores de sistemas nucleares en Canadá, China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia, India, Japón y República de Corea. Existen otros posibles suministradores que están trabajando en diseños como la Argentina y Sudáfrica, pero los diseñadores de sistemas nucleares de generación de vapor actualmente disponibles se han reducido a un pequeño grupo que trabaja muy unido, por ejemplo mediante la colaboración entre Areva y Mitsubishi, GE y Hitachi, y Toshiba y Westinghouse.

54. Entre los ingenieros constructores<sup>10</sup> se ha producido un cambio similar. El número de empresas con experiencia reciente en la gestión de la construcción de una central nuclear completa se ha reducido debido a la falta de pedidos, particularmente en América del Norte y Europa. Muchas de las empresas que eran organizaciones de primera fila dentro de la industria nuclear en 1980 se han alejado completamente del sector nuclear, se han fusionado con otras de ese mismo sector o han dado una nueva orientación a su enfoque comercial y se han centrado en actividades relacionadas con la clausura y la gestión de desechos, esfera en que se ha registrado un incremento de la actividad en los últimos años. Como consecuencia de ello, existe un número menor de empresas, en menos países, con capacidad para gestionar la construcción íntegra de una central nuclear. Por el contrario, en China, la India y la República de Corea, el crecimiento de la capacidad nuclear mediante la localización de muchas de las competencias y capacidades brinda la posibilidad a esos países de contribuir más a satisfacer las necesidades mundiales de conocimientos especializados relativos a la construcción en el ámbito nuclear.

55. Hay algunas muestras de preocupación acerca de la capacidad de la industria para atender la demanda de componentes clave (como vasijas de presión y piezas forjadas clave), que pueden suministrar instalaciones de China, Federación de Rusia, Francia, Japón, República Checa y República de Corea. Por ejemplo, las compañías eléctricas estadounidenses ya han hecho pedidos de componentes clave para centrales nucleoelectricas que no han sido aún aprobadas a fin de evitar que los atrasos en los plazos de entrega de esos componentes retrasen en el calendario de construcción. Será necesario un crecimiento de la capacidad de fabricación para cumplir las previsiones de crecimiento cada vez mayores de nuevas centrales nucleares. Esto puede estar sucediendo ya. China ha anunciado que tiene capacidad para producir equipo pesado para seis reactores de gran envergadura al año, aunque con ello apenas satisfará sus propias necesidades nacionales.

## **B.7. Aplicaciones no eléctricas**

56. La producción de calor y el transporte representan la mayor parte del consumo de energía en el mundo. Actualmente la energía nuclear se emplea sólo de forma muy limitada para aplicaciones no eléctricas. La tecnología de desalación de agua de mar mediante energía nuclear está demostrada y a escala mundial se han acumulado casi 200 años-reactor de experiencia operacional. La calefacción urbana consiste en el suministro de calor y agua caliente mediante un sistema de distribución normalmente en cogeneración en el que el calor residual de la producción de electricidad se utiliza como fuente de esa calefacción. Varios países (Bulgaria, Eslovaquia, Federación de Rusia, Hungría, Rumania, Suecia, Suiza y Ucrania) cuentan con calefacción urbana a partir del calor de centrales nucleares. En cuanto a la producción nuclear de hidrógeno, los Estados Unidos de América, el Japón y otros países cuentan con programas de investigación y desarrollo pero no se lleva a cabo ninguna explotación comercial.

---

<sup>10</sup> Por lo general, los ingenieros constructores son responsables de la gestión del proyecto, las compras, la ingeniería del proyecto, la instalación, la puesta en servicio, el control de calidad y el control de plazos y costos durante la construcción y puesta en marcha.

## C. Perspectivas de la utilización futura de la energía nuclear

57. En muchos países han aumentado recientemente las expectativas en cuanto a la utilización de la energía nuclear. Las perspectivas pueden examinarse desde el punto de vista de países que actualmente cuentan con centrales nucleares en funcionamiento, y de países que estudian la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica. Los elementos que pueden incidir en las posturas nacionales sobre la utilización de la energía nuclear, las predicciones internacionales sobre el uso futuro de la energía nuclear, y las posibilidades de utilización de la energía nuclear para usos no eléctricos también se examinan más adelante.

### C.1. Perspectivas en países que ya utilizan la energía nucleoelectrica

58. En 30 países que cuentan con centrales nucleares en funcionamiento, la parte de electricidad suministrada a escala nacional va del 78% en Francia al 3% en la India y el 2% en China. Se prevé que la expansión futura de la energía nucleoelectrica en todo el mundo dependa principalmente de países que ya cuentan con ella. Como se indica más adelante, la diferencia entre las proyecciones baja y alta del Organismo acerca de la energía nucleoelectrica se da en lo que respecta tanto a la capacidad total instalada en los 30 países que ya utilizan la energía nucleoelectrica, como al aumento del número de países con energía nucleoelectrica. Desde el punto de vista de la capacidad instalada, el aumento global de la proyección alta se deriva principalmente de los incrementos registrados en los 30 países que ya disponen de la energía nucleoelectrica, en particular la India, China, otros países del Lejano Oriente, más la Federación de Rusia y países de Europa y América del Norte.

59. Como medida de lo que se puede esperar de los 30 países que actualmente disponen de energía nucleoelectrica, en el cuadro C-1 se presenta un examen de la información disponible, que incluye presentaciones de los Estados Miembros ante la Conferencia General de 2007 y otras declaraciones públicas de sus posturas. Según esto, actualmente la ampliación de los programas nucleares existentes se centra en gran medida en Asia, donde también se prevé la mayor expansión de las necesidades energéticas. Muchos países de Europa y América del Norte también prevén ampliar sus programas nucleares, si bien el número de construcciones iniciadas ha sido reducido.

60. Se ha asignado a cada uno de los 30 países a uno de los grupos del cuadro C-1, lo que da una indicación de las intenciones futuras previstas de los 30 países que ya disponen de energía nucleoelectrica.

Cuadro C-1: Posturas de los países con centrales nucleares en funcionamiento

Descripción del grupo	Número de países
Países con la intención de eliminar gradualmente las centrales nucleares cuando las actuales lleguen al final de su vida útil o alcancen una potencia de salida acumulativa acordada	6
Países con la intención de permitir la propuesta de nuevas centrales, pero sin dar incentivos para fomentarlo	5
Países con la intención de apoyar la construcción de nuevas centrales	6
Países que apoyan la construcción de una nueva central	4
Países que apoyan la elaboración de un nuevo programa de centrales nucleares	9

## C.2. Perspectivas en países que estudian la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica

61. Tal como se muestra en el cuadro C-2, en los últimos dos años, aproximadamente 43 Estados Miembros han expresado al OIEA, mediante solicitudes de participación en proyectos de cooperación técnica, su interés en estudiar la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica<sup>11</sup>.

Cuadro C-2. Posturas de los países sin centrales nucleares en funcionamiento

Descripción del grupo	Número de países
Países que no tienen previsto construir centrales nucleares, pero que están interesados en estudiar los aspectos asociados a un programa nucleoelectrico	16
Países que estudian la posibilidad de implantar un programa nuclear para atender necesidades energéticas concretas con una clara indicación de su intención de seguir adelante	14
Países que se preparan activamente para un posible programa nucleoelectrico sin haber tomado una decisión definitiva	7
Países decididos a implantar la energía nucleoelectrica y que han comenzado a preparar la infraestructura apropiada	4
Países que han preparado una invitación a licitar para el suministro de una central nuclear	1
Países que han encargado una nueva central nuclear	
Países con una nueva central nuclear en construcción	1

62. Un país, la República Islámica del Irán, está construyendo su primera central nuclear. Doce países se están preparando para implantar la energía nucleoelectrica, y otros 38 han expresado interés en la posible construcción de una central nuclear.

63. De los 51 países que han expresado interés en la implantación de la energía nucleoelectrica, 17 son de la región de Asia y el Pacífico (desde el Oriente Medio hasta el Pacífico), 13 de la región de África, 11 de Europa y 9 de América Latina.

64. En general, los cuadros C-1 y C-2 son coherentes con las tendencias reflejadas en las proyecciones baja y alta del Organismo que se describen más adelante, es decir, que sigue habiendo una incertidumbre considerable en las proyecciones sobre energía nucleoelectrica, que el aumento previsto del uso de energía nucleoelectrica estaría impulsado más por la expansión en los países que ya utilizan la energía nucleoelectrica que por los países que inician programas nucleoelectricos, y que aproximadamente 20 nuevos países podrían tener en funcionamiento sus primeras centrales nucleares para 2030 en la proyección alta frente a unos 5 nuevos países en la proyección baja.

## C.3. Colaboración regional

65. En algunas regiones se han planificado medidas para cooperar en la construcción de nuevas centrales nucleares. Los Estados bálticos están planeando un proyecto regional en el emplazamiento de Ignalina, en Lituania. Los Estados miembros del Consejo de Cooperación del Golfo están estudiando la posibilidad de aplicar un enfoque regional a la implantación de un programa nuclear. La Argentina y el Brasil, que tienen programas nucleoelectricos, tienen previsto aumentar la cooperación en el campo nuclear, incluso preparando un modelo de concepto de central nuclear para ambos países que podrían utilizar otros países de la región.

---

<sup>11</sup> Además, unos 10 países expresaron previamente interés en tomar en consideración la energía nucleoelectrica pero no han presentado ninguna solicitud oficial de asistencia en materia de cooperación técnica.

## **C.4. Factores que pueden impulsar la implantación de la energía nucleoelectrica**

66. La expresión “crecientes expectativas” es la que mejor caracteriza las actuales perspectivas de la energía nucleoelectrica en un mundo que se enfrenta a una pujante demanda de energía, precios más elevados de la misma, preocupaciones acerca de la seguridad del suministro de energía y presiones ambientales cada vez mayores. Son varios los factores que impulsan estas crecientes expectativas de aumento de la energía nucleoelectrica, entre los que se cuentan los siguientes:

- Necesidades energéticas crecientes
- Seguridad del suministro de energía
- Preocupaciones y limitaciones ambientales
- Aumento y volatilidad de los precios de los combustibles fósiles
- Mejora de la competitividad económica relativa de la energía nucleoelectrica
- Experiencia, cada vez mayor, y buenos resultados en relación con la energía nucleoelectrica
- Interés en las aplicaciones avanzadas de la energía nuclear

67. En la presente sección se examinan estos posibles elementos impulsores del crecimiento de la energía nucleoelectrica en general, al mismo tiempo que se reconoce que el atractivo relativo de esa energía en comparación con otras alternativas será distinto en situaciones diferentes. En general, la energía nucleoelectrica resulta más atractiva en los lugares donde la demanda de energía aumenta rápidamente, donde las alternativas son escasas o caras, donde la seguridad del suministro energético es una prioridad, donde la reducción de la contaminación atmosférica o de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es una prioridad, o donde la financiación se puede realizar a más largo plazo.

### *Precios de los combustibles fósiles*

68. Según la publicación titulada *World Energy Outlook 2007* de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el 40% de la electricidad mundial en 2005 se generó a partir de carbón, el 20% de gas natural, el 16% de energía hidroeléctrica, el 15% de energía nuclear, el 7% de petróleo y el 2% de energías renovables distintas de la energía hidroeléctrica. Está previsto que la parte del petróleo en la generación de electricidad disminuya, y que las del carbón y el gas natural aumenten. Serán las principales alternativas a la energía nucleoelectrica a corto y medio plazo. Los precios del carbón son volátiles y en distintas regiones del mundo aumentaron entre el 50% y el 125% entre 2003 y 2006. Asimismo, los precios del gas aumentaron hasta un 130% durante el mismo período. Estos cambios contribuyen a las crecientes expectativas para la energía nucleoelectrica. Los precios del uranio también han aumentado y se han mostrado volátiles en los últimos años. Sin embargo, una diferencia es que los costos del uranio incluyen unos costos de generación globales menores que los del gas y el carbón. La duplicación de los precios de los combustibles se traduce en aumentos de los costos de generación del 35-45% aproximadamente de la electricidad a partir del carbón y del 70-80% de la electricidad a partir del gas natural. En cambio, la duplicación de los precios del uranio supone un aumento de los costos de generación a partir de la energía nuclear del 5-10% aproximadamente a precios actuales.

### *Seguridad energética*

69. La preocupación por la seguridad del suministro de energía fue un factor importante en los programas de expansión nuclear de Francia y el Japón durante las crisis del petróleo de los años setenta. Ése es uno de los argumentos que se esgrimen actualmente en los países que estudian la opción nucleoelectrica. En el Reino Unido, por ejemplo, la seguridad del suministro de energía ha sido una consideración importante para reevaluar la situación energética nacional y uno de los principales motivos para modificar la actitud ante la energía nucleoelectrica en los dos últimos años.

70. Además, hay dos aspectos de la energía nucleoelectrica que en general refuerzan la seguridad energética. El uranio, que es el combustible básico, se puede obtener de diversos países productores y se requieren volúmenes reducidos, lo cual facilita la creación de reservas estratégicas. En la práctica, durante años la tendencia no ha consistido en crear esas reservas sino en basar la seguridad en un mercado diversificado y eficiente de servicios de suministro de uranio y de combustible. Sin embargo, para los países que lo estimen importante, sigue abierta la opción de crear, a un costo relativamente bajo, reservas estratégicas que permitan disponer de suficiente combustible para asegurar el funcionamiento de las centrales nucleares durante varios años.

#### *Medio ambiente*

71. En la fase de producción de electricidad la energía nuclear no provoca emisiones que dañen la calidad del aire en la zona, tengan efectos de acidificación a nivel regional o contribuyan al cambio climático. En la cadena completa de la energía nucleoelectrica, desde la extracción de los recursos hasta la disposición final de los desechos, incluida la construcción del reactor y de la instalación, se emite la misma cantidad de carbono equivalente por kilovatio-hora que la producción de energía eólica e hidráulica. La producción de este tipo de energía se señala cada vez más como una alternativa tecnológica positiva a las fuentes de energía eléctrica cuya utilización entraña la emisión de GEI. La importancia económica del bajo nivel de emisiones de GEI en la producción de energía nucleoelectrica se determinó concretamente cuando en febrero de 2005 entró en vigor el Protocolo de Kyoto. De las nueve tecnologías de mitigación de las emisiones de GEI asociadas con la producción de electricidad que evaluó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la energía nucleoelectrica ofrece con creces el mayor potencial de mitigación y los costos de mitigación que supone sólo son superiores a los de la energía hidroeléctrica. Sin embargo, cabe señalar que, incluso con los programas más ambiciosos de expansión mundial de la utilización de la energía nuclear, la opción nucleoelectrica por sí sola no bastaría para estabilizar las emisiones mundiales de GEI.

#### *Historial de comportamiento y de seguridad*

72. En los últimos años ha habido mejoras considerables tanto en el comportamiento como en la seguridad de las centrales nucleares, cuyos niveles en ambos aspectos siguen siendo altos<sup>12</sup>, y las centrales que funcionan de manera eficiente han resultado bastante rentables. Esta evolución ha supuesto una mejora del factor de disponibilidad media de energía a nivel mundial y una reducción del número de disparos imprevistos de reactores<sup>13</sup>. Sin embargo, muchos explotadores aún pueden introducir avances en ambos aspectos, lo cual redundaría en ulteriores avances a nivel general. Tanto el buen historial de los dos últimos decenios en cuanto al comportamiento y la seguridad como el consiguiente incremento de la rentabilidad y las perspectivas de nuevas mejoras contribuyen a aumentar las expectativas en la esfera de la energía nucleoelectrica.

### **C.5. Proyecciones relativas a la expansión de la energía nucleoelectrica**

73. Por las razones arriba señaladas, en los últimos años ha habido un incremento general en las proyecciones sobre la energía nucleoelectrica que publican periódicamente diversas organizaciones.

74. El Organismo publica desde 1981 proyecciones de alcance mundial sobre el uso de la energía, la electricidad y la energía nucleoelectrica<sup>14</sup>. Las estimaciones se preparan en estrecha colaboración y consulta con varias organizaciones internacionales, regionales y nacionales, así como con expertos

---

<sup>12</sup> Examen de la seguridad nuclear correspondiente al año 2007, documento GOV/2008/2, 31 de enero de 2008.

<sup>13</sup> Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN), *2006 Performance Indicators*, 2007.

<sup>14</sup> Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, Colección de Datos de Referencia No. 1, 2008.

internacionales, que se ocupan de estadísticas y proyecciones relativas a la energía. En el cuadro C-3 se indican las proyecciones actualizadas más recientes sobre la capacidad de generación de energía nucleoelectrica, desglosadas por regiones. En la proyección baja, la capacidad aumenta de 372 GW(e) en 2007 a 473 GW(e) en 2030. En la proyección alta, la capacidad se eleva a 748 GW(e).

Cuadro C-3. Estimaciones de la capacidad de producción de energía nucleoelectrica (en GW(e))

Región	2007	2010		2020		2030	
		Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
América del Norte	113,2	113,5	114,5	121,4	127,8	131,3	174,6
América Latina	4,1	4,1	4,1	6,9	7,9	9,6	20,4
Europa occidental	122,6	119,7	121,3	92,1	129,5	73,9	150,1
Europa oriental	47,8	48,2	48,3	72,1	94,7	81,2	119,4
África	1,8	1,8	1,8	3,1	4,5	4,5	14,3
Oriente Medio y Asia meridional	4,2	7,6	10,1	12,5	24,3	15,9	41,5
Asia sudoriental y el Pacífico	0	0	0	0	1,2	1,2	7,4
Lejano Oriente	78,5	81,3	83,1	129,2	151,8	155,7	219,9
<b>Total mundial</b>	<b>372,2</b>	<b>376,3</b>	<b>383,1</b>	<b>437,4</b>	<b>541,6</b>	<b>473,2</b>	<b>747,5</b>

75. Como se observa en el cuadro C-3, las proyecciones indican que la mayor expansión se producirá en el Lejano Oriente. También se indica una expansión considerable en Medio Oriente y Asia meridional, región que abarca a la India. La región donde hay más incertidumbre - mayor diferencia entre las proyecciones baja y alta - es Europa occidental. Aun cuando las proyecciones para 2030 abarcan aproximadamente a 20 nuevos países, el aumento total en la proyección alta corresponde sobre todo a incrementos en los 30 países que ya producen energía nucleoelectrica. La proyección baja también abarca aproximadamente a cinco nuevos países cuya primera central nuclear podría estar en funcionamiento a más tardar en 2030.

76. Las proyecciones del Organismo han cambiado en los últimos años. En particular, la proyección alta relativa a la tasa de aumento de la capacidad nucleoelectrica instalada entre 2020 y 2030 se duplicó con respecto a las proyecciones realizadas en 2001, lo cual refleja el mayor optimismo en algunas regiones con respecto al uso de este tipo de energía. La proyección baja de 2001 indicaba una disminución de la capacidad instalada a raíz de la puesta fuera de servicio de centrales sin la correspondiente sustitución. En la actualidad, incluso en la proyección baja se prevé un aumento pequeño pero continuo de la capacidad instalada.

77. Las proyecciones de otros estudios también indican un crecimiento de la capacidad nucleoelectrica instalada.

78. En el *World Energy Outlook (WEO)*, publicado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) de la OCDE, también figuran proyecciones sobre este tipo de energía, que se actualizan periódicamente. El WEO siempre contiene un escenario de referencia, en lugar de presentar proyecciones bajas y altas como en el caso del Organismo. A menudo se publican también escenarios alternativos. En el escenario de referencia se proyecta la evolución de la demanda y la oferta de energía en el supuesto de que se mantengan las políticas actuales. Por consiguiente, en lo que respecta a la energía nucleoelectrica las estimaciones del WEO han sido en general cercanas a la proyección baja del Organismo. En los últimos años las han sobrepasado ligeramente y el 'escenario normativo alternativo' más reciente, que tiene en cuenta la adopción de medidas adicionales para abordar

problemas relacionados con la seguridad energética y el cambio climático, indica para 2030 un incremento del 25% con respecto al escenario de referencia<sup>15</sup>.

79. Según otras predicciones, en el futuro podría haber una gran diversificación en el uso de la energía nuclear. La Asociación Nuclear Mundial publica cada dos años escenarios altos, bajos y de referencia relativos a la capacidad nuclear. La variación indicada en su actualización de 2007 – con estimaciones de 285 GW(e) y 730 GW(e) para 2030 – es mayor que la diferencia entre las proyecciones baja y alta del Organismo, lo cual puede corresponder a un descenso o a una duplicación de la producción de energía nucleoelectrica.

80. En 2000 el IPCC publicó un conjunto de 40 escenarios relativos a las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero hasta 2100. En estos escenarios se estudia un conjunto muy diversificado de situaciones futuras con respecto a la energía nucleoelectrica. En la mayoría de ellos la participación de este tipo de energía en el suministro mundial de energía primaria se incrementa del 6% – 7% actual a porcentajes que varían entre el 10% y el 40%. En el informe del IPCC se llega a la conclusión de que la posible contribución de la energía nucleoelectrica a la combinación mundial de fuentes de electricidad podría situarse en el 18% en 2100. Este porcentaje está en consonancia con la proyección alta del Organismo para ese año.

#### *Incertidumbres en las proyecciones*

81. Como puede observarse, la variación de las predicciones sobre el uso futuro de la energía nucleoelectrica sigue siendo amplia. Hay diversas cuestiones que afectan a la futura ejecución de programas relativos a este tipo de energía y, por ende, a la exactitud de las predicciones sobre su utilización.

- La energía nucleoelectrica ha suscitado más inquietud política que otras alternativas. En el caso del gas natural, el carbón, la energía hidroelectrica, el petróleo y las energías renovables no existe nada comparable con las prohibiciones y políticas de eliminación gradual que varios países han aplicado con respecto a la energía nucleoelectrica.
- La estructura de los costos centrada en los desembolsos iniciales, los altos tipos de interés o la incertidumbre acerca de éstos debilitarán más la viabilidad comercial de las centrales nucleares que la de las otras opciones.
- La estructura de costos centrada en los desembolsos iniciales también abarca a los costos generados por retrasos durante la construcción debidos a consideraciones reglamentarias, que son más cuantiosos que en el caso de otras opciones. En los países donde en los últimos años la comprobación de los procedimientos de concesión de licencias ha sido relativamente escasa, los inversores pueden afrontar costos debidos a consideraciones reglamentarias también superiores a los de otras opciones.
- La firmeza, el alcance y la durabilidad de los compromisos en materia de reducción de las emisiones de GEI también influirán en las posibilidades de expansión de la energía nucleoelectrica.
- La industria nuclear opera a escala mundial, con un buen clima de cooperación internacional y, por lo tanto, dondequiera que se produzca un accidente sus consecuencias se harán sentir en todo el mundo.

---

<sup>15</sup> Agencia Internacional de la Energía (IEA), *World Energy Outlook 2007*, París, 2007.

- Del mismo modo, los actos de terrorismo nuclear pueden tener efectos mucho más amplios que acciones similares dirigidas contra instalaciones que utilizan otros combustibles.
- Si bien el desarrollo de centrales nucleares de por sí no figura entre los principales factores que contribuyen a agravar los riesgos de proliferación, las preocupaciones acerca de estos riesgos pueden incidir en la aceptación de la energía nucleoelectrónica por el público y las instancias políticas.
- La energía nuclear es el único medio de producción de electricidad que genera desechos radiactivos de actividad alta. La industria nucleoelectrónica podría verse afectada desproporcionadamente en caso de que surgieran problemas en alguno de los programas de repositorios de desechos más avanzados (es decir, los de los Estados Unidos de América, Finlandia, Francia y Suecia).

## C.6. Expectativas en cuanto a las aplicaciones no eléctricas y posibilidades de desarrollo

82. La energía nuclear también puede usarse para suministrar calor (o bien una combinación de calor y electricidad) en una variedad de procesos industriales (como en fábricas de papel, productos químicos y fertilizantes o en refinerías de petróleo) o bien para producir un portador de energía (hidrógeno) o para mejorar el acceso a combustibles fósiles (licuefacción del carbón o extracción de petróleo a partir de arenas alquitranadas). Sin embargo, como se muestra en la figura C-1, la mayoría de los reactores actuales (LWR) no suministran vapor o calor a temperaturas adecuadas para poder introducir algunas de estas aplicaciones adicionales. Concretamente, es preciso utilizar reactores de alta temperatura y de materiales apropiados, cuyo desarrollo actual se describe en la sección F *infra*.

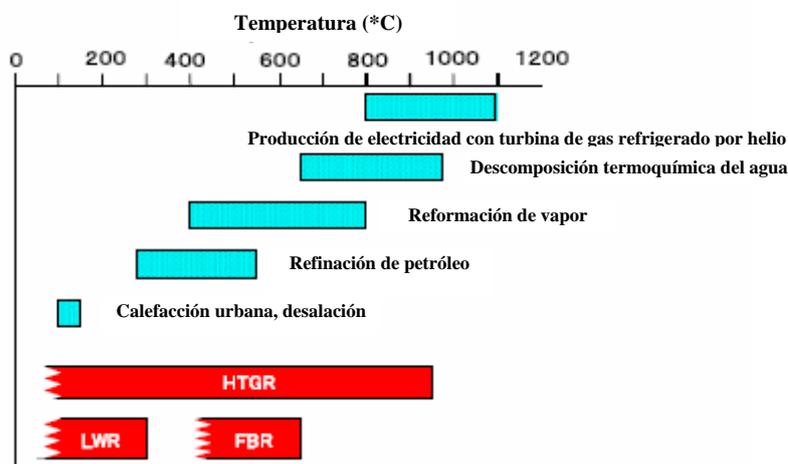


Figura C-1. Gama de temperaturas de funcionamiento y necesidades térmicas de los procesos

### Desalación

83. Actualmente, la desalación nuclear sólo se utiliza en muy pocos países. Las predicciones publicadas en el Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, preparado por las Naciones Unidas, indican que en 2025 la penuria grave o escasez de agua podría llegar a afectar a 3 500 millones de personas. En la actualidad el Japón tiene plantas de desalación de agua en 10 CN, la India está ejecutando varios proyectos de demostración, y la Federación de Rusia, el Pakistán y la República de Corea están elaborando proyectos de diseño y demostración. En otros países se están estudiando la viabilidad técnica y económica de diferentes procesos.

## *Transporte*

84. El transporte contribuye considerablemente a las emisiones de GEI. Una mayor utilización de la energía nuclear en el sector del transporte tendría repercusiones importantes con respecto a esas emisiones. Es posible aumentar su contribución en la producción de electricidad destinada a vehículos de tracción híbrida o eléctrica para transporte particular o colectivo, y también puede utilizarse para producir hidrógeno (véase la sección E.3 *infra*).

## **D. Desafíos para la expansión nuclear**

### **D.1. Principales cuestiones y tendencias relacionadas con la expansión nuclear a corto plazo**

#### **D.1.1. Seguridad y fiabilidad**

85. La seguridad y la fiabilidad son fundamentales para garantizar la eficacia de los programas nucleoelectricos. Es necesario mantener la atención y la vigilancia tanto en la preparación del establecimiento como en la explotación de las centrales nucleares. Cualquier daño en las instalaciones, retraso importante en la ejecución de los proyectos o menoscabo de las normas, ya sea en los países que tienen centrales en explotación o en los que introduzcan la producción de energía nucleoelectrica en el futuro, puede comportar efectos considerables en la expansión del uso de este tipo de energía a nivel mundial. Por consiguiente, los esfuerzos encaminados a reducir los costos y la duración de la construcción, que se describen en la sección E.1.1 *infra*, revisten suma importancia.

#### **D.1.2. Competitividad económica y financiación**

86. Las CN requieren inversiones de capital más cuantiosas que los otros tipos de instalaciones de producción de electricidad en gran escala. En el costo total de la generación de energía nucleoelectrica los costos menores y más estables del combustible en la fase de explotación compensan los costos de capital. Normalmente, la inversión representa alrededor del 60% del costo total de producción de este tipo de energía. Puesto que es preciso prestar atención al capital invertido durante la construcción, la competitividad de la energía nucleoelectrica se ve afectada por los retrasos que puedan registrarse en las fases previas a la explotación en relación con la concesión de licencias o con cuestiones jurídicas, así como con problemas técnicos o con la disponibilidad de personal especializado, equipo o componentes.

87. El costo de los materiales es otro factor que incide a corto plazo en la competitividad de la energía nucleoelectrica. Desde principios de 2007 los costos de materiales clave, como el acero y los metales no ferrosos, han aumentado entre un 50% y un 100%, según la ubicación, calidad y cantidad, etc. Las economías asiáticas en rápida expansión consumen materias primas y empujan a la alza a los precios del acero, el cemento y otros materiales. Si bien estos problemas también afectan a los otros tipos de centrales eléctricas, en el caso de las centrales nucleares sus efectos pueden ser desproporcionados debido a la concentración de los costos en los desembolsos iniciales. Otro problema a corto plazo que incide igualmente en la competitividad económica de la energía nucleoelectrica en algunos países es la vulnerabilidad a retrasos relacionados con la introducción de nuevos procedimientos reglamentarios integrados para la concesión de licencias y con la reactivación de la industria después de varios decenios de estancamiento. Otros riesgos económicos guardan

relación con la fase de explotación, como los costos del combustible, el grado de reglamentación del mercado eléctrico, la fiabilidad de las centrales y su comportamiento.

88. La economía de la energía nucleoelectrica depende de las condiciones de cada país. La competitividad económica está en función del costo de capital, el entorno reglamentario, la disponibilidad y el costo de las fuentes alternativas, los costos de la energía y la viabilidad comercial de los distintos proyectos nucleoelectricos. Los costos previstos de la producción de energía nucleoelectrica en centrales nuevas (con inclusión de su gestión y explotación, y del combustible) varían en un factor de dos según los países, entre unos \$30/MW·h y casi \$70/MW·h. En el caso de las centrales de gas, los costos varían entre \$40/MW·h, aproximadamente, y \$65/MW·h. En la mayoría de los países que utilizan la energía nucleoelectrica, las proyecciones indican que en el futuro los costos de producción de ese tipo de energía serán inferiores a los de las centrales de gas o de carbón. Según las proyecciones de la AEN/OCDE, en siete de los diez países examinados la energía nucleoelectrica llegaría a costar como mínimo un 10% menos que la producida en las centrales de carbón, mientras que en nueve de esos países se registraría la misma diferencia con respecto a las centrales de gas<sup>16</sup>.

89. Una característica de la energía nucleoelectrica es que cuando las centrales dejan de generar electricidad e ingresos se requieren gastos considerables para financiar la clausura de los reactores y la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos. Se estima que los costos de clausura representan entre el 10% y el 15% de los costos de capital de las centrales nucleares. Los costos totales de la gestión de desechos hasta la disposición final definitiva en un repositorio son del mismo orden de magnitud. La industria nuclear utiliza una amplia variedad de mecanismos y sistemas para garantizar la elaboración de estas estimaciones de costos y la disponibilidad oportuna de los fondos correspondientes. En general, se considera que se trata de costos de explotación y los explotadores ingresan los fondos correspondientes cuando las centrales producen electricidad. La seguridad de financiación para los programas de gestión de los desechos y el combustible gastado es un aspecto importante tanto de la economía de la producción nucleoelectrica como de la seguridad física y tecnológica de los programas nucleares.

90. Si bien la ventaja añadida de que el nivel de emisiones de GEI es muy bajo no presenta, por el momento, valor económico para los inversores, la situación podría cambiar si la energía nucleoelectrica se incluyera en los mecanismos que establecen limitaciones o gravámenes en relación con esas emisiones. La competitividad económica de la energía nucleoelectrica podría mejorar a corto plazo si se la incluyera en los planes de comercio de los derechos de emisión de carbono destinados a reducir las emisiones de GEI.

### **D.1.3. Percepción del público**

91. La percepción de la energía nucleoelectrica por el público se ha centrado en problemas relacionados con la seguridad, los riesgos de proliferación y la gestión de desechos. Después de los accidentes nucleares de Three Mile Island y de Chernóbil, el público se preocupó, no sólo por los peligros de radiación para las personas y el medio ambiente, sino también por la oportunidad y exactitud de la información disponible. Las preocupaciones acerca de los riesgos de proliferación y el terrorismo nuclear siguen presentes en la percepción de la energía nucleoelectrica por el público.

92. La percepción del público también depende de muchos factores específicos de determinadas sociedades, como la situación del suministro energético en el país, su experiencia en materia de energía nucleoelectrica y su percepción de las cuestiones ambientales. Los cambios registrados en la imagen pública de la energía nucleoelectrica se deben en parte al buen historial de explotación durante

---

<sup>16</sup> Agencia para la Energía Nuclear (AEN/OCDE), *Projected Costs of Generating Electricity: 2005 Update*, París, 2005.

los últimos 20 años, así como a la percepción de la importante contribución que este tipo de energía puede aportar para reducir el calentamiento atmosférico. La confianza del público también puede verse reforzada por la experiencia positiva en materia de clausura y gestión de desechos. En algunos países tanto la ausencia de alternativas prácticas y asequibles como la constatación de que la energía nucleoelectrica ha contribuido considerablemente a elevar los niveles de vida en otros países son factores que también pueden influir en la percepción del público.

93. En todo país que estudie la posibilidad de producir, o ya produzca, energía nucleoelectrica la comunicación con todas las partes interesadas (encargados de adoptar decisiones, público, medios de comunicación y países vecinos) sobre todas las cuestiones relacionadas con ese tipo de energía (beneficios, riesgos, compromisos y obligaciones) es fundamental para crear y mantener la confianza en los programas nucleoelectricos.

#### **D.1.4. Recursos humanos**

94. La disponibilidad de recursos humanos es un factor decisivo para la expansión y el desarrollo de la energía nucleoelectrica. La industria nuclear afronta el desafío de contratar y capacitar a un gran número de personas sólo para reemplazar al personal muy experimentado que se está jubilando. La expansión prevista o la ejecución de nuevos programas de energía nucleoelectrica requerirán la contratación de personal adicional. Esta doble necesidad de recursos humanos supone un desafío considerable.

95. En el caso de los países que inician sus programas nucleares un medio de eficacia comprobada para que los futuros encargados de la explotación y el mantenimiento de las primeras centrales asimilen las competencias necesarias consiste en adquirir experiencia en instalaciones ya existentes que utilicen tecnologías similares. Esta capacitación práctica y esta experiencia permiten transferir las competencias y la cultura de la seguridad que se necesitan en la industria nucleoelectrica. Debido a la coincidencia entre las fechas de jubilación de muchos profesionales y los planes de expansión de la industria, la necesidad de dotarse de recursos humanos suficientes y con la experiencia apropiada para desempeñar esas tareas puede suponer un serio desafío.

96. La mayoría de los directivos de la industria nuclear considera que la dotación de personal requiere una planificación cuidadosa. Sin embargo, no es imprescindible tener la plantilla completa antes de iniciar la construcción de la central, porque durante los años que dura la construcción se puede capacitar a la mayor parte del personal no especializado en la esfera nuclear.

#### **D.1.5. Gestión del combustible gastado y de los desechos**

97. Cuando se planifica la expansión o la introducción de la energía nucleoelectrica es preciso tener en cuenta la gestión del combustible nuclear gastado nuevo o adicional y de los desechos de actividad baja e intermedia (DABI), así como elaborar una política y estrategia para su ejecución y financiación.

98. La gestión del combustible gastado y la disposición final definitiva de los desechos radiactivos suelen señalarse como dificultades para la expansión de la energía nucleoelectrica. Si bien desde el punto de vista técnico el combustible gastado y los DABI pueden almacenarse durante mucho tiempo en condiciones de seguridad, en algunos países la decisión de expandir el uso de este tipo de energía puede requerir una decisión previa sobre la solución definitiva de los desechos. Existen tecnologías de eficacia comprobada tanto para el almacenamiento del combustible gastado como para el tratamiento, el almacenamiento y la disposición final de los DABI. Sin embargo, la experiencia indica que la construcción de instalaciones de disposición final de estos desechos puede plantear problemas relacionados con la aceptación del público.

99. Según las condiciones económicas, el combustible nuclear gastado se reprocesa o se considera como desecho. El reprocesamiento consiste en separar el plutonio y el uranio de los desechos para reciclarlos como combustible de mezcla de óxidos (MOX). Los desechos de actividad alta (DAA) remanentes deben someterse a disposición final segura. En la actualidad, sólo unos pocos países reprocesan y reciclan su combustible (ciclo cerrado del combustible). Otros países han decidido no reprocesarlo por razones económicas y por considerar que la separación del plutonio plantea cuestiones relacionadas con el riesgo de proliferación o con la protección del medio ambiente. En estos países el combustible se someterá a disposición final en una instalación geológica después de permanecer en almacenamiento provisional entre 30 y 40 años (ciclo del combustible abierto). Sin embargo, la mayoría de los países con centrales nucleares mantiene un compás de espera. Últimamente, el interés por el ciclo del combustible cerrado ha aumentado en todo el mundo por razones de sostenibilidad (mejor utilización de los recursos). Las técnicas avanzadas de reprocesamiento también pueden simplificar la disposición final definitiva de los DAA remanentes.

100. Con objeto de aumentar la eficacia y reducir la preocupación por los riesgos de proliferación también se están estudiando sistemas internacionales o multinacionales para la parte final del ciclo del combustible. Esto abarca la construcción de repositorios internacionales, el arriendo del combustible y aceptación de su devolución, y el suministro de servicios de reprocesamiento.

101. Es preciso tener en cuenta asimismo la futura clausura de reactores nucleares y la gestión de los desechos radiactivos resultantes. Existe tecnología de eficacia probada para las operaciones de clausura.

#### **D.1.6. Transporte**

102. Cuanto más sean los países con programas nucleoelectricos y más los reactores en funcionamiento a nivel mundial, mayor será el volumen total de uranio, combustible sin irradiar y gastado, y desechos que haya que transportar. En cuanto al combustible sin irradiar, las proyecciones baja y alta del Organismo para 2030 indican un incremento de alrededor del 20% y del 85%, respectivamente. En el caso del combustible gastado y de los desechos, el incremento del volumen por transportar es más difícil de predecir porque dependerá de las políticas nacionales relativas al reprocesamiento y de otros factores. A corto plazo, es probable que el número de envíos transfronterizos de combustible gastado siga siendo inferior al de los años noventa como consecuencia de la inauguración de la planta de reprocesamiento de Rokkasho en el Japón y el vencimiento de los contratos de reprocesamiento de combustible extranjero en el Reino Unido y en Francia. A largo plazo, es probable que al aumentar el reprocesamiento y el reciclado de combustible también se incremente su transporte.

103. En los últimos años el Organismo ha tomado nota del mayor número de rechazos del transporte de materiales radiactivos, fundamentalmente de fuentes radiactivas para fines médicos o industriales, pero también de uranio y combustible nuclear sin irradiar, con independencia del medio de transporte utilizado. El Organismo está recopilando información adicional acerca de esta tendencia y ha creado un comité directivo para investigar más a fondo sus repercusiones. El transporte de combustible gastado y de desechos, que normalmente se realiza en remesas especiales, no se ha visto afectado por rechazos, pero ha sido objeto de protestas del público asociadas con la oposición al uso de la energía nuclear.

#### **D.1.7. Riesgos de proliferación y seguridad nuclear**

104. Si bien las centrales nucleares no agravan de por sí los riesgos de proliferación, la mayor utilización de materiales nucleares puede incrementar los riesgos de desviación hacia usos no pacíficos o hacia actividades terroristas. La difusión de la tecnología nuclear y la existencia del terrorismo internacional también pueden fomentar la percepción de que los riesgos son mayores.

105. En consecuencia, convendría quizá que la comunidad internacional examinara los desafíos relacionados con la mejora del control de las partes estratégicas del ciclo del combustible nuclear (tales como la aplicación de enfoques multinacionales del ciclo del combustible nuclear), el aumento de los compromisos internacionales en apoyo del sistema de salvaguardias fortalecido del Organismo, y el fomento del intercambio de información sobre las medidas de seguridad física a escala internacional.

106. El crecimiento de la energía nucleoelectrica exigiría nuevas actividades de salvaguardias, pero es poco probable que las actividades de verificación del Organismo aumenten proporcionalmente si los Estados aceptan una mayor transparencia. Las actividades de verificación se basarán cada vez más en la información. El número cada vez mayor de instalaciones que se acercan al final de su ciclo de vida plantea un creciente desafío de verificación durante las fases de parada y clausura. El volumen de actividades de verificación de los reactores de nueva tecnología y de los nuevos tipos de instalaciones del ciclo del combustible podría reducirse mediante el desarrollo y la integración de tecnologías que faciliten la aplicación de salvaguardias y que permitan una verificación eficaz y eficiente.

107. La vulnerabilidad de los materiales en tránsito es un aspecto que podría requerir la adopción de nuevas medidas en caso de que el volumen de expediciones de combustible para reactores aumente. En este contexto, habría que revisar el documento INFCIRC/225, titulado *Protección física de los materiales y las instalaciones nucleares*, con el fin de incluir disposiciones complementarias sobre el transporte.

#### **D.1.8. Creación de infraestructuras en los países nuevos en el ámbito nuclear**

108. La aplicación de infraestructuras apropiadas para abordar todos los aspectos pertinentes en el momento de implantar la energía nucleoelectrica es una cuestión de interés central, especialmente para los países que planifican su primera central nuclear. La infraestructura comprende el apoyo gubernamental, jurídico, reglamentario, tecnológico, de recursos humanos y de otra índole que requiere el programa nuclear a lo largo de toda su duración. También abarca una amplia gama de cuestiones, que van desde el abastecimiento físico de la electricidad, el transporte de los materiales y los suministros al emplazamiento, el propio emplazamiento, y las instalaciones especiales para la manipulación de los desechos radiactivos, hasta el marco legislativo y reglamentario y los recursos humanos y financieros necesarios. En otras palabras, por infraestructuras se entienden, en este contexto, todas las actividades y disposiciones necesarias para establecer y ejecutar un programa nuclear<sup>17</sup>, independientemente de que el objetivo de ese programa sea la producción de electricidad, la desalación de agua de mar o cualquier otro uso pacífico.

109. Las organizaciones gubernamentales, compañías eléctricas, organizaciones industriales y órganos reguladores de los países que adoptan o amplían un programa nucleoelectrico participan en la creación de la infraestructura nuclear nacional. Puede que los suministradores y los gobiernos de los países exportadores también tengan que determinar, en su calidad de interesados directos, la idoneidad de la infraestructura nacional antes de suministrar el equipo y los materiales nucleares requeridos. La creación de las competencias de estas organizaciones es un elemento clave que debe establecerse al comienzo de la preparación de un programa nucleoelectrico.

110. El establecimiento de todos los elementos de una infraestructura nuclear nacional debe planificarse de manera minuciosa. Sin embargo, no es esencial crear toda la infraestructura antes de

---

<sup>17</sup> En la publicación del Organismo titulada *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power* (IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1) se enumeran 19 cuestiones que deben tenerse en cuenta para la creación de la infraestructura nacional.

comenzar la preparación del programa nucleoelectrico, ya que la infraestructura debería establecerse en etapas en función de la evolución del programa.

### **D.1.9. Relación entre las redes de electricidad y la tecnología de los reactores**

111. El tamaño, la calidad, la estabilidad y la interconexión de las redes son cuestiones que deben tener en cuenta los países que utilizan la energía nucleoelectrica, pero especialmente los nuevos países del ámbito nuclear. Se considera, en general, que para evitar problemas de interfaz con la red, la capacidad máxima de una unidad adicional de cualquier tipo debe ser del 10 por ciento de la capacidad de la red. La interconexión entre las redes aumenta la capacidad global. La existencia de sistemas de protección que aíslen las partes de la red en caso de que se produzcan estados transitorios puede reducir el riesgo de inestabilidad.

112. Muchos países interesados en recurrir a la energía nucleoelectrica tienen redes eléctricas pequeñas y aisladas. Veinte de esos países tienen redes de menos de 5 GW(e), es decir demasiado pequeñas, según el parámetro del 10 por ciento, para los diseños de reactores actualmente existentes. Las cuestiones relacionadas con la red pueden limitar las opciones tecnológicas para los 28 países cuyas redes tienen una capacidad inferior a 10 GW(e). La disponibilidad comercial de los diseños de menos de 600 MW(e) es limitada, aunque en estos momentos hay muchos en la etapa de desarrollo. La consecución de adelantos tecnológicos en la esfera de los reactores de pequeña potencia con miras a mejorar su viabilidad comercial y reducir su dependencia de la estabilidad y fiabilidad de la red ofrecería mayores opciones a los países con redes pequeñas. El desarrollo de reactores de potencia muy pequeña con características que les permitan ser plenamente independientes de la red eléctrica también podría ser de interés para las aplicaciones en lugares aislados.

## **D.2. Cuestiones clave relacionadas con la utilización a largo plazo**

113. Se requieren novedades en el diseño tanto de los reactores como de los ciclos del combustible para aumentar la contribución a largo plazo de la energía nuclear al desarrollo sostenible. La finalidad del desarrollo sostenible es lograr la equidad dentro de los países y entre ellos, así como entre generaciones, mediante la integración del crecimiento, la protección ambiental y el bienestar social. La sostenibilidad se puede considerar desde cuatro puntos de vista o dimensiones diferentes, pero relacionados entre sí, a saber: social, económico, ambiental e institucional. Para lograr estos objetivos en un sistema de energía nuclear, las mejoras de la sostenibilidad se consideran en el contexto de los adelantos en las esferas de la seguridad tecnológica, la economía, la resistencia a la proliferación, los desechos, el medio ambiente, la utilización de los recursos, la seguridad física y la infraestructura.

### **D.2.1. Utilización eficaz de los recursos disponibles**

114. La estimación más reciente de los recursos mundiales de uranio publicada por la AEN de la OCDE y el OIEA en 2008 muestra que los recursos convencionales de uranio conocidos ascienden a 5,5 millones de toneladas (MtU), lo que corresponde a casi 100 años de consumo al ritmo actual. Aunque esta cifra es elevada, en comparación con los otros recursos minerales, el desafío consiste principalmente en aprovechar mejor los recursos de uranio, es decir, aumentar la cantidad de energía producida por tonelada de uranio extraído. Paralelamente, cabe esperar que el aumento de las actividades de exploración redundará en un incremento de los recursos de uranio.

115. Ciertas mejoras (hasta la duplicación de la cantidad de energía producida) se pueden lograr para la actual generación de reactores, mediante la reducción de la cantidad de uranio 235 presente en las colas de las plantas de enriquecimiento, la reutilización del uranio y plutonio extraídos del combustible gastado y el aumento del grado de quemado del combustible.

116. Una de las medidas para utilizar más eficazmente los recursos disponibles sería la implantación de los reactores rápidos y los ciclos del combustible conexos. Mediante el reciclado múltiple, la cantidad de energía producida por tonelada de uranio podría aumentarse unas 60 veces con respecto a los reactores de agua ligera que se utilizan hoy en día. Asimismo, se podrían desarrollar a escala comercial reactores innovadores que utilicen combustible de torio, lo que permitiría aumentar las fuentes mundiales de combustible nuclear.

117. Además de los esfuerzos encaminados a la utilización eficiente de los recursos de uranio y de torio, también se debería procurar utilizar eficazmente los materiales estructurales, como el acero. Varios diseños de reactores evolutivos proporcionan soluciones técnicas que redundan de manera directa o indirecta en ahorros de materiales y un incremento de la competitividad económica. Cabe mencionar, entre ellas, las siguientes: vida útil de diseño más larga; mayor eficiencia térmica del ciclo de conversión de la potencia; menor consumo de acero; disposición compacta de la planta. A más largo plazo, el reciclado de materiales estructurales radiactivos provenientes de los reactores nucleares clausurados podría contribuir igualmente a la utilización eficaz de los recursos.

### **D.2.2. Innovaciones en el diseño de los reactores**

118. La segunda cuestión clave para una utilización a largo plazo guarda relación con las innovaciones en la esfera del diseño de los reactores. Las innovaciones respecto de los reactores de gran potencia se examinan en la sección E.1.2. Entre las destinadas a ampliar las posibles aplicaciones de las centrales nucleares figuran los aumentos de las temperaturas de funcionamiento y, por lo tanto, las de salida. A estos efectos, se realizan esfuerzos encaminados a desarrollar reactores de alta temperatura refrigerados por gas y a aumentar las temperaturas de salida de los reactores refrigerados por agua, así como a desarrollar reactores refrigerados por agua supercrítica. Las innovaciones destinadas a responder al creciente interés en las aplicaciones de la energía nucleoelectrónica en las que se requieren reactores de pequeña potencia se centran en el desarrollo de reactores que pueden funcionar en redes pequeñas o fuera de la red. A pesar de que hay un notable aumento del interés por este tipo de reactores, aún no está claro cómo evolucionará su mercado. Además, también se están desarrollando reactores que se pueden transportar o son móviles para aplicaciones a distancia o en lugares aislados.

### **D.2.3. Innovaciones relacionadas con el ciclo del combustible**

119. Paralelamente a los reactores innovadores, es necesario desarrollar a largo plazo las correspondientes instalaciones del ciclo del combustible, como por ejemplo, instalaciones avanzadas de reprocesamiento para la manipulación del combustible de los reactores innovadores y para la separación de plutonio y actínidos menores con miras a su reciclado, y tecnologías para la fabricación de estos combustibles.

120. Como resultado de la implantación de los reactores innovadores y el aumento del reciclado, se registrará un incremento en la manipulación de materiales nucleares de carácter estratégico, lo que podría acrecentar las necesidades de salvaguardias. Se han propuesto varios enfoques innovadores para abordar esta cuestión, entre ellos, la multilateralización de las instalaciones estratégicas del ciclo del combustible nuclear, tales como las de enriquecimiento y reprocesamiento. Entre otras soluciones posibles, algunos países podrían suministrar el combustible sin irradiar para los reactores y, a la vez, aceptar la devolución del combustible gastado como un servicio. El combustible devuelto constituiría un recurso para el reciclado en reactores rápidos y podría tener a más largo plazo un valor positivo. La utilización de materiales reciclados también podría incrementar los problemas de seguridad tecnológica y física durante el transporte.

121. El mayor uso de los ciclos del combustible cerrados también podría hacer que cambie la situación respecto de la disposición final de los desechos de actividad alta (DAA). Con la eliminación

del plutonio y los actínidos menores, la radiotoxicidad y la carga térmica de los DAA se reducirán, lo que permitirá incrementar la capacidad de los repositorios, facilitando así la disposición final de los bultos de desechos. Los posibles beneficios de los repositorios internacionales o regionales también son objeto de examen, aunque las disposiciones para la construcción de tales instalaciones continúan planteando problemas políticos y de aceptación del público.

## **E. Desarrollo de la tecnología de los reactores y del ciclo del combustible**

### **E.1. Adelantos relacionados con los reactores nucleares y la tecnología conexas**

122. La mayoría de los diseños avanzados de centrales nucleares existentes hoy en día son mejoras evolutivas de diseños anteriores. La ventaja de ello es que así se conservan las características de diseño demostradas, lo que, a su vez, minimiza los riesgos tecnológicos. Estos diseños evolutivos generalmente no requieren muchas más actividades de investigación y desarrollo o pruebas de confirmación.

123. En cambio, los diseños innovadores incorporan cambios conceptuales radicales de los enfoques de diseño o la configuración de los sistemas con respecto a los diseños anteriores. Los diseños innovadores requerirán probablemente más inversiones en términos de investigación y desarrollo y la construcción de un prototipo o una planta de demostración.

#### **E.1.1. Desarrollo evolutivo**

124. El crecimiento a corto plazo de la energía nucleoelectrica se basará principalmente en los diseños evolutivos. Estos diseños aprovechan las experiencias operacionales en lo que respecta a la interfaz persona-máquina, la fiabilidad de los componentes, la mejora de los aspectos económicos y de seguridad. Como una parte del sistema ya ha sido demostrada, los diseños evolutivos requieren, a lo sumo, ensayos técnicos y de confirmación. Como ejemplos de los elementos de los diseños evolutivos generalmente utilizados para mejorar los aspectos económicos cabe mencionar los siguientes:

- Diseños simplificados (véase la figura E-1: ejemplo de un BWR)
- Aumento de la potencia de los reactores
- Calendarios de construcción más cortos, lo que reduce los costos que se acumulan sin que se produzcan ingresos
- Normalización y construcción en serie, lo que permite distribuir los costos fijos entre varias unidades
- Aumentos de la productividad en la fabricación de equipo, la ingeniería de campo y la construcción
- Construcción de varias unidades en un solo emplazamiento
- Autosuficiencia y participación local

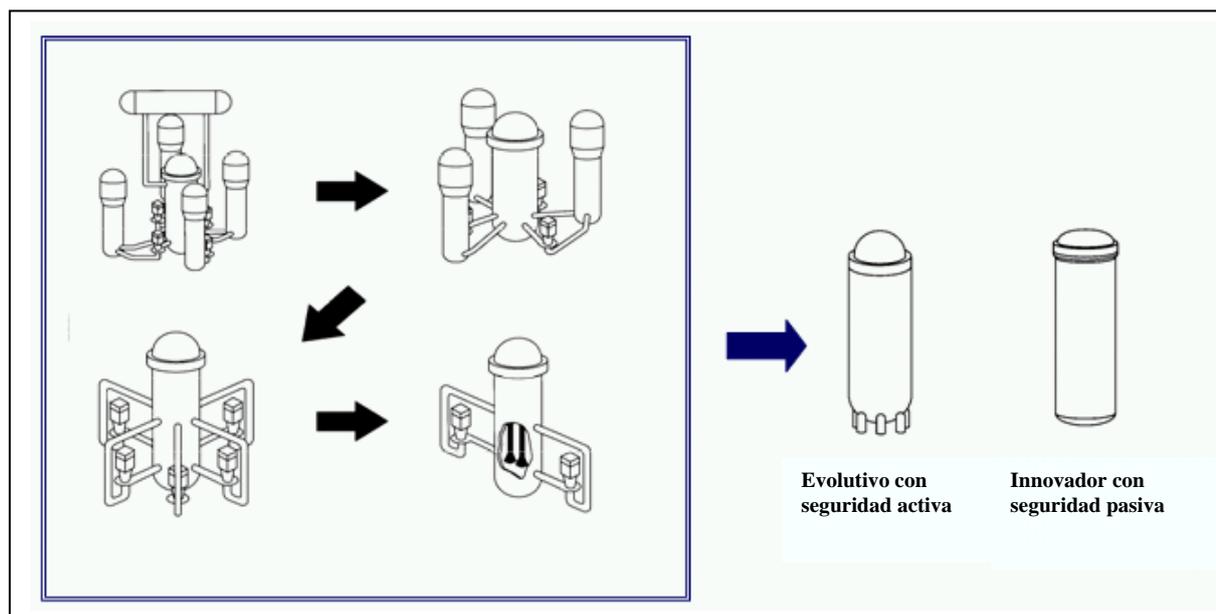


Figura E-1. Ejemplo de la evolución del diseño de un BWR

125. Además de las mejoras de los aspectos económicos, generalmente se utilizan varios medios para mejorar la seguridad y fiabilidad de los diseños evolutivos, prestando mayor atención a los peligros externos y los adelantos en materia de ensayos e inspección, y recurriendo al análisis probabilista de la seguridad (APS). Los diseños evolutivos también hacen mayor énfasis en la interfaz persona-máquina, particularmente la mejora del diseño de la sala de control y de la central, a fin de facilitar el mantenimiento. Los sistemas de instrumentación y control también se actualizan con el fin de aprovechar los sistemas digitales.

#### *Reactores de agua ligera (LWR)*

126. En varios países se desarrollan diseños avanzados de LWR.

127. En China, se ha preparado un diseño propio del PWR de 1000 MW(e). Se tiene previsto finalizar esta unidad de 1000 MW(e) en 2013.

128. En Alemania y Francia, AREVA ha diseñado el reactor europeo de agua a presión de 1600 MW(e), que satisface las necesidades de las centrales eléctricas europeas. El primer reactor europeo de agua a presión, Olkiluoto-3 en Finlandia, se encuentra en construcción y su explotación comercial está prevista para 2012. Asimismo, Électricité de France ha iniciado la construcción de un reactor europeo de agua a presión en Flamanville, que se espera finalizará hacia 2012. AREVA firmó un contrato de suministro de dos centrales de este tipo al emplazamiento de Atizán, en China, que se prevé entrarán en servicio en 2014. AREVA también está trabajando en una versión del reactor europeo de agua a presión para atender a las necesidades de los Estados Unidos.

129. El Japón desarrolla de manera continua reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR) de 1356–1385 MW(e), entre ellos la versión en Ohma, que sólo utiliza combustible de MOX. Actualmente se examina la solicitud de licencia para un nuevo diseño de reactor avanzado de agua a presión (APWR) de 1538 MW(e), destinado a Tsuruga-3 y 4.

130. En la República de Corea se está construyendo, en Shin-Kori 1 y 2, una versión mejorada de la central nuclear coreana estándar (KSNP), el reactor de potencia optimizado (OPR) de 1000 MW(e),

cuya explotación comercial está prevista para 2010 y 2011. Las primeras unidades del APR-1400 de 1450 MW(e) de la Compañía Hidroeléctrica y Nucleoeléctrica de Corea (KHNP), construido con una mayor potencia a raíz de la experiencia con la KSNP, se encuentran en construcción para Shin-Kori 3 y 4.

131. En la Federación de Rusia, Atomenergoproekt también está convirtiendo el WWER-1000 en reactores WWER-1200 y WWER-1500. En la India se están construyendo dos unidades WWER-1000, cuya explotación comercial está prevista para 2009. La Compañía nacional de electricidad (NEK) de Bulgaria firmó un contrato con ATOMSTROYEXPORT, de Rusia, en relación con dos unidades WWER-1000 en el emplazamiento de Belene. También se proyecta construir 17 unidades WWER-1200 en la Federación de Rusia.

132. La Oficina de Diseño Experimental para la Construcción de Maquinaria (OKBM) ha desarrollado una planta de cogeneración flotante o terrestre. En abril de 2007 se inició la construcción del primer prototipo de planta de cogeneración montada en una plataforma flotante con dos reactores KLT-40S (70 MW(e) y energía térmica), cuya finalización está prevista para 2010.

133. En los Estados Unidos de América, los diseños AP-1000 y ABWR fueron certificados por la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) y actualmente se encuentran en examen el reactor económico simplificado de agua en ebullición (ESBWR) (1520 MW(e)), el US-EPR (1600 MW(e)) y el US-APWR (1700 MW(e)). La NRC está examinando las solicitudes de licencia combinada (COL) para todos estos diseños avanzados, excepto el US-APWR. Westinghouse firmó un contrato con la Corporación nacional de la tecnología de la energía nucleoeléctrica (SNPTC) de China en relación con el suministro de cuatro centrales AP-1000 (dos unidades en el emplazamiento de Sanmen y dos en el de Haiyang), de las cuales la primera entrará en funcionamiento a fines de 2013.

134. Entre los otros LWR de pequeña y mediana potencia, típicamente evolutivos, cabe mencionar los siguientes: el AP-600 y el diseño integral IRIS de Westinghouse, en los Estados Unidos de América; el WWER-640 de Atomenergoproekt y Gidropress, el PAES-600 de la OKBM y el VK-300 del Instituto de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Eléctrica (NIKIET); los conceptos de diseño BWR simplificado (HSBWR) y ABWR (HABWR) de Hitachi, en el Japón; y el NP-300 de TECHNICATOME, en Francia. También se han propuesto muchos otros conceptos de diseño, en su mayoría evolutivos y algunos con características innovadoras. Ahora bien, hasta la fecha ninguno ha superado la fase de diseño.

#### *Reactores de agua pesada (HWR)*

135. En el Canadá, la Atomic Energy of Canada Limited (AECL) está desarrollando un reactor CANDU avanzado que funciona con uranio ligeramente enriquecido para compensar la utilización de agua ligera como refrigerante primario.

136. El HWR de 540 MW(e) de la India se basa en la experiencia adquirida con las unidades de 220 MW(e) de diseño propio, y ya se inició la explotación comercial de las dos unidades de 540 MW(e) en Tarapur. La India está diseñando igualmente un HWR evolutivo de 700 MW(e), así como un reactor avanzado de agua pesada que utiliza agua pesada como moderador y agua ligera en ebullición como refrigerante en tubos de presión verticales, optimizado para la utilización de torio y dotado de sistemas de seguridad pasiva.

#### *Reactores refrigerados por gas (GCR)*

137. En varios países se han construido y están en funcionamiento centrales con reactores refrigerados por helio que utilizan el ciclo de vapor de Rankine para producir energía nucleoeléctrica. En los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón y Sudáfrica se despliegan esfuerzos considerables para desarrollar el reactor de alta temperatura con turbina de gas de

ciclo directo, que presenta buenas perspectivas de alto nivel de eficiencia térmica y bajos costos de producción de electricidad. En Sudáfrica ha concluido el diseño del reactor modular de lecho de bolas (PBMR) de demostración de 165 MW(e), que se prevé empezar a construir en 2009. En China se está iniciando la fase de diseño básico del proyecto HTR-PM (reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura refrigerado por gas) de 200 MW(e) con un ciclo indirecto (turbina de vapor); el objetivo es concluir hacia 2013 la construcción de una central de demostración HTR-PM.

#### *Reactores refrigerados por metal líquido*

138. Desde que se empezaron a desarrollar reactores nucleares (el primer reactor rápido – Clementine - alcanzó su criticidad en 1946) se ha construido una serie de prototipos experimentales de esta clase de reactores. Gracias al diseño y el funcionamiento de los reactores rápidos refrigerados por sodio, como el prototipo de reactor rápido (PFR) de 270 MW(e) en el Reino Unido, el prototipo Phénix en Francia, el reactor BN-350 en Kazajstán, el reactor de demostración BN-600 en Rusia, el reactor Monju en el Japón y el reactor de tamaño comercial Superphénix en Francia (para mencionar sólo a los más grandes) se ha adquirido una base de experiencia de más de 300 años-reactor. La evolución de los reactores rápidos refrigerados por metal líquido prosigue en la India, que prevé concluir en 2010 la construcción de un reactor rápido refrigerado por sodio de 500 MW(e) en su emplazamiento de Kalpakkam y construir otros cuatro reactores rápidos del mismo tamaño. Por su parte, en la Federación de Rusia prosigue la construcción del reactor BN-800, que se prevé concluir en 2012.

139. En el suplemento pertinente del Examen de la tecnología nuclear 2008 figura información adicional acerca de la situación de los reactores rápidos.

#### **E.1.2. Innovaciones futuras**

140. Los principales factores que influirán en el desarrollo de los sistemas de producción de energía nucleoelectrica en el siglo XXI serán los siguientes: economía, seguridad, resistencia a la proliferación y protección del medio ambiente, con inclusión de la mejor utilización de los recursos y la menor generación de desechos. En el futuro muchas innovaciones se centrarán en los sistemas de neutrones rápidos, que producen más material fisible – plutonio 239 – del que consumen. La utilización de neutrones rápidos en los reactores permite utilizar o transmutar determinados radioisótopos de período largo, lo cual reduce la carga ambiental debida a la gestión de desechos de actividad alta. La complejidad de estas características explica de alguna manera por qué estos sistemas han estado en diversas fases de desarrollo durante más de 50 años y siguen evolucionando y aportando conceptos innovadores.

141. Además de los desarrollos que pueden lograrse a partir de las innovaciones para mejorar la eficiencia en el uso del combustible, hay otros aspectos que incitan a abordar conceptos innovadores. Entre ellos figuran las aplicaciones de alta temperatura y los diseños adecuados para lugares aislados o distantes.

142. Cabe mencionar los siguientes enfoques innovadores del desarrollo que, entre otras ventajas, podrían redundar en mejoras de la eficiencia, la seguridad y la resistencia a la proliferación:

- Combustible de larga vida con muy alto grado de quemado
- Mejoras en los materiales de las vainas y los componentes de combustible
- Refrigerantes alternativos para mejorar la seguridad y la eficiencia
- Sistemas sólidos y resistentes a los fallos

- Ciclo de Brayton de alta temperatura de conversión de la potencia
- Diseño de combustible de torio

143. Para este tipo de innovaciones se requiere una amplia labor tanto de investigación y desarrollo como de ensayo. Por tratarse de actividades que exigen recursos considerables, esta labor se lleva a cabo actualmente en el marco de acuerdos de cooperación internacionales o bilaterales.

## **E.2. Novedades relacionadas con el ciclo del combustible nuclear y la tecnología conexas**

### **E.2.1. Novedades relacionadas con la tecnología del ciclo del combustible**

144. La actual tecnología del ciclo del combustible nuclear es adecuada y sirve plenamente a los fines de la producción de energía nucleoelectrónica. Sin embargo, como en todas las esferas técnicas, en relación con todas las fases del ciclo del combustible se están registrando novedades que podrían mejorar aun más las ventajas económicas y reducir tanto los riesgos de seguridad física y tecnológica y de proliferación como los problemas ambientales, por ejemplo, una tecnología de enriquecimiento más eficiente y con menor consumo de energía.

145. El combustible que utilizan los reactores actuales se perfecciona continuamente para mejorar su rendimiento y conseguir un mayor nivel de quemado, es decir, un mejor aprovechamiento del uranio. En el reciclado del uranio reprocesado y, en particular, del plutonio como combustible de MOX, la fabricación de combustible supone la manipulación a distancia y la exposición del personal a mayores dosis de radiación, con la consiguiente necesidad de aumentar la protección radiológica.

146. En cuanto a la tecnología de reprocesamiento, desarrollada en los años sesenta, se está perfeccionando el equipo para incrementar la pureza de los productos, reducir la generación de desechos y lograr un mayor control de los riesgos de proliferación. Se están estudiando procesos que no separan el plutonio puro para el reciclado, sino que combinan siempre el plutonio con otro material - uranio o productos de fisión - que refuerza su resistencia a la proliferación.

147. Los principios relativos a la disposición final de los DAA y del combustible gastado, incluida su disposición final en profundidad en repositorios geológicos y rodeados de barreras múltiples, tienen buena aceptación a nivel internacional. Se están llevando a cabo actividades de desarrollo para investigar asentamientos adecuados, realizar evaluaciones de la seguridad y aplicar la tecnología de encapsulamiento y disposición final.

### **E.2.2. Innovaciones futuras**

148. En la sección E.1.2 se han expuesto las tendencias en el desarrollo de reactores innovadores. Para cada uno de estos sistemas será preciso aplicar un enfoque específico del ciclo del combustible. Cada tipo de reactor tendrá su propio combustible nuclear, para lo cual será necesario desarrollar la tecnología y los procesos de fabricación del combustible correspondientes, por ejemplo, utilizando mayores concentraciones de plutonio.

149. A fin de introducir sistemas de reactores rápidos es preciso realizar operaciones de reprocesamiento y reciclado. Se están desarrollando tecnologías de reprocesamiento mejoradas que permiten trabajar con los niveles de radiación más altos del combustible de los reactores rápidos y con períodos de refrigeración más breves. Esto abarca el desarrollo de procesos avanzados en húmedo a partir de la tecnología que se utiliza actualmente y de nuevos procesos en seco, como el procesamiento piroquímico.

150. A fin de reducir la radiotoxicidad a largo plazo y la carga térmica de los DAA remanentes del reprocesamiento, se están desarrollando nuevos procesos que separan algunos de los radionucleidos de

período largo, por ejemplo, los actínidos menores, como el americio y el curio. Los materiales separados se pueden destruir por quemado (transmutación) en el combustible de reactores rápidos. También se está estudiando la separación del cesio y el estroncio para reducir la carga térmica de los desechos. En el suplemento pertinente del Examen de la tecnología nuclear 2008 figura más información sobre el desarrollo de sistemas avanzados de reprocesamiento.

151. La introducción de sistemas avanzados de reciclado también tendrá repercusiones considerables en la disposición final definitiva de los DAA. Si bien es probable que aún sea necesaria la disposición final geológica en profundidad, se puede reducir la carga térmica, con el consiguiente aumento de la capacidad del repositorio, ya que en la mayoría de los casos la densidad del embalaje depende de dicha carga. También es posible reducir la radiotoxicidad a largo plazo, lo cual podría simplificar el diseño del repositorio y facilitar la aceptación del público.

### **E.3. Aplicaciones no eléctricas**

#### *Desalación de agua de mar y calefacción urbana*

152. La demanda de agua potable va en aumento. La electricidad o el vapor de las centrales nucleares ya se han utilizado en condiciones de seguridad para desalación y para difundir su aplicación no se requieren mayores desarrollos.

#### *Producción de hidrógeno y de calor*

153. Los Estados Unidos de América, el Japón y otros Estados están explorando medios de producir hidrógeno a partir del agua mediante procesos electrolíticos, termoquímicos e híbridos. La mayoría de las actividades se ha concentrado en los procesos de alta temperatura, que requieren temperaturas más elevadas (>750°C) que las que se alcanzan en los reactores refrigerados por agua. Los reactores avanzados, como el reactor de muy alta temperatura refrigerado por gas (VHTGR), pueden generar calor a estas temperaturas. No se prevé que la primera demostración de la producción de hidrógeno mediante reactores refrigerados por gas pueda efectuarse antes de 2015, aproximadamente, en el Japón y de 2020 en los Estados Unidos de América. El vapor de alta temperatura también podría aplicarse a procesos empleados en industrias con alto consumo térmico. La pertinencia de las aplicaciones destinadas a producir hidrógeno y calor dependerá tanto del desarrollo de reactores con capacidad de generar vapor de alta temperatura como de las características económicas de las tecnologías alternativas. Actualmente, no es posible determinar cuál será la tendencia a largo plazo.

## **F. Cooperación en materia de expansión del uso de la energía nucleoelectrica y desarrollo de las tecnologías**

154. El Foro Internacional de la Generación IV (GIF) es un grupo integrado por 11 miembros<sup>18</sup>, cuyo objetivo consiste en desarrollar una nueva generación de sistemas nucleoelectricos que presentan ventajas desde el punto de vista de la economía, la seguridad, la fiabilidad y la sostenibilidad, y que podrían estar disponibles en el mercado a más tardar en 2030. Se han seleccionado seis sistemas y se ha elaborado una hoja de ruta tecnológica para orientar las actividades de investigación y desarrollo. Se trata de los sistemas siguientes:

---

<sup>18</sup> Los miembros son la Argentina, el Brasil, el Canadá, los Estados Unidos de América, Francia, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea, Sudáfrica., Suiza y la Euratom.

- Reactor refrigerado por gas
- Reactor refrigerado por aleación de plomo líquido
- Reactor refrigerado por sodio líquido
- Reactor refrigerado por agua supercrítica
- Reactor de muy alta temperatura refrigerado por gas
- Reactor de sales fundidas

155. Los Estados Unidos de América han puesto en marcha la Alianza Mundial por la Energía Nuclear (GNEP), cuya finalidad es fomentar la seguridad y reducir los riesgos de proliferación. La GNEP tiene un componente tecnológico centrado en el ciclo del combustible cerrado que utiliza tecnología de reprocesamiento sin separación del plutonio, y un componente internacional en cuyo marco se han creado grupos de trabajo sobre desarrollo de infraestructuras y servicios de combustible fiables. En mayo de 2008 la GNEP contaba con 21 asociados y 3 organizaciones internacionales observadoras<sup>19</sup>. Otros nueve países participaban como observadores.

156. En 2006 la Federación de Rusia anunció una iniciativa encaminada a desarrollar una infraestructura nucleoelectrica mundial (GNPI), cuya primera fase es la creación de un centro internacional de enriquecimiento de uranio en Angarsk. Armenia y Kazajstán son asociados en esta iniciativa. Su finalidad es facilitar el acceso de los países interesados a los beneficios de la energía nuclear en cumplimiento de los requisitos del régimen de no proliferación.

157. En cuanto a la seguridad, la labor encaminada a mejorar la eficiencia en el proceso de certificación de diseños se ha iniciado mediante un proyecto piloto para compartir información relativa a dicho proceso en el marco del Programa multinacional de evaluación del diseño (MDEP). En futuras etapas el MDEP procurará armonizar los códigos, las normas de seguridad y los objetivos entre los reguladores de los principales países productores de energía nucleoelectrica. El establecimiento de un proceso internacional de certificación de diseños mediante el cual un órgano regulador que aplique las normas aceptadas pueda emitir un certificado que abone la confianza de un país comprador en el diseño y en su comportamiento, contribuiría a la expansión y el crecimiento de la producción nucleoelectrica.

---

<sup>19</sup> Los asociados en la GNEP son Australia, Bulgaria, el Canadá, China, Eslovenia, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, Ghana, Hungría, Italia, el Japón, Jordania, Kazajstán, Lituania, Polonia, el Reino Unido, la República de Corea, Rumania, el Senegal y Ucrania. La IAE, el GIF y el OIEA participan en calidad de observadores permanentes.