

# Tendencias futuras de la energía nucleoelectrica

---

por Rurik Krymm, James A. Lane e Ivan S. Zheludev

Entre las incertidumbres, dudas y discusiones que han caracterizado al panorama de la energía en general y al de la energía nucleoelectrica en particular, es reconfortante encontrar algunas cuestiones sobre las que existe general acuerdo y que proporcionan una cierta orientación al tratar de evaluar las perspectivas futuras de la energía nucleoelectrica:

1. Continuará aumentando la demanda mundial de energía, si bien las tasas y modalidades de este crecimiento a escala regional son difíciles de predecir con exactitud. Incluso realizando los más denodados esfuerzos para conseguir conservar la energía, es probable que el consumo mundial aumente pasando de unos 6000 millones de toneladas de petróleo equivalente (TPE) en 1977 a entre 12 000 y 18 000 millones de TPE hacia finales de siglo.
2. La distribución sumamente irregular de las reservas de petróleo y de gas que constituyen la base para el suministro de aproximadamente los dos tercios de la energía actualmente producida y que seguirán representando la mayor parte de la producción de energía en el año 2000, coloca a muchos países en una posición de creciente dependencia de la energía importada.
3. Independientemente de los nuevos descubrimientos, posibles e incluso probables, de yacimientos de hidrocarburos estos combustibles continuarán ocupando el primer puesto en la lista de fuentes energéticas en vías de agotamiento de que dispone la humanidad.

A la luz de estas premisas, cabe imaginar en los siguientes términos el papel que desempeñará la energía nucleoelectrica:

1. A plazo medio la energía nucleoelectrica se ofrece como sustituto del petróleo y del gas, que de otro modo serían necesarios para la producción de electricidad, y representa para muchos países con insuficientes recursos no solo de petróleo y de gas sino también de carbón, un medio de evitar tener que depender en grado agobiante de las importaciones.
2. A largo plazo, la energía nucleoelectrica puede proporcionar una solución tecnológicamente bien fundada para satisfacer las necesidades energéticas globales, las cuales podrían llegar a representar casi 50 000 millones de TPE hacia mediados del próximo siglo.

Ambos aspectos están íntimamente ligados, ya que una integración en gran escala de la energía nucleoelectrica depende del desarrollo gradual de una amplia infraestructura de fabricación y del ciclo del combustible. Es necesario recordar el esfuerzo, tiempo y medios financieros que se necesitaron para pasar de los reactores de potencia experimentales a la producción a plena escala industrial, y que transcurrieron 35 años desde el momento de la experimentación inicial hasta que las centrales nucleares contribuyeron al suministro mundial de energía en proporción análoga a la de las centrales hidroelectricas. Esta cuestión se explica mejor haciendo un breve examen de la situación actual y futura de la energía nucleoelectrica en los países industrializados y en desarrollo.

---

El Dr. Krymm es Jefe de la Sección de Estudios Económicos de la División de Energía Nucleoelectrica y Reactores; el Sr. Lane es especialista en estudios de planificación de la energía nucleoelectrica, y el Prof. Zheludev es Director General Adjunto del Departamento de Actividades Técnicas.

## LA ENERGIA NUCLEOELECTRICA EN LOS PAISES INDUSTRIALIZADOS

A finales de marzo de 1977, la potencia de las centrales nucleares autorizadas en los países industrializados ascendía a 95 GW(e), de los cuales aproximadamente el 50% correspondía a los Estados Unidos de América. Aunque esta cifra no suponía más que el 7% de la potencia eléctrica de estos países, el ritmo de crecimiento de la energía nucleoelectrónica durante los últimos cinco años ha sido de un 28% anual [1].

En el Cuadro 1 figuran datos recientes tomados de la memoria presentada en la Conferencia de Salzburgo por la OCDE/AEN [2] y relativos al crecimiento de la energía nucleoelectrónica en los países de la OCDE. Las cifras se han ajustado conforme se indica en el mismo para excluir a Grecia y Turquía e incluir a Sudáfrica. También se ofrecen a título comparativo, las previsiones relativas a la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas y a la República Democrática Alemana basadas en datos obtenidos de trabajos publicados. Como puede observarse, la potencia nucleoelectrónica de los países industrializados de economía no centralmente planificada puede alcanzar para el año 2000 el intervalo de 830–1650 GW(e). Esta previsión puede compararse con la estimación hecha el año pasado por la OCDE/AEN y el OIEA, cifrada en 1350–1600 GW(e) [3]. El bajo límite inferior del intervalo es muestra de la incertidumbre que reina actualmente entre los planificadores de la energía nucleoelectrónica.

## LA ENERGIA NUCLEOELECTRICA EN LOS PAISES EN DESARROLLO\*

Aunque muchos países industrializados van a basarse en la conservación de la energía y en tasas reducidas de aumento de su consumo como medio para mitigar el problema de la oferta y la demanda energéticas, los países en desarrollo no pueden adoptar ese mismo planteamiento. Para ellos, aumentar la oferta de energía es una necesidad y allí donde faltan fuentes energéticas nacionales la única solución es recurrir a la energía nucleoelectrónica y al empleo de petróleo o carbón importados. Por ello, no es sorprendente que muchos países en desarrollo estén esperando con ansiedad el momento en que las centrales nucleares puedan incorporarse a su sistema de producción de energía eléctrica.

A pesar de este gran interés, hasta marzo de 1977 únicamente cinco países en desarrollo tenían centrales nucleares en explotación con una producción neta conjunta de 2000 MW(e) (2 GW(e)). Esto representa solo un 1% aproximadamente de la potencia eléctrica instalada en el conjunto de los países en desarrollo y un 2% aproximadamente de la potencia nucleoelectrónica mundial. No obstante, esos cinco países y otros once también en desarrollo, además de Taiwán, tienen centrales nucleares en construcción o que se prevé que comiencen a producir electricidad en 1985, con una potencia total de 28 GW(e). Si todas estas centrales se construyen en los plazos previstos, el aprovechamiento de la energía nuclear a corto plazo proporcionará a los países en desarrollo electricidad en cantidad que equivaldrá a un ahorro de 43 millones de toneladas de petróleo al año [4].

Las estimaciones actuales del OIEA del crecimiento a largo plazo de la energía nucleoelectrónica indican que para el año 2000 la potencia nucleoelectrónica instalada en los países en desarrollo de economía no centralizada estará comprendida en el intervalo de 200 a 300 GW(e). Los países en desarrollo del CAEM es posible que dispongan de 80 a 120 GW(e) de potencia nucleoelectrónica instalada para ese mismo año. Estas previsiones representan solo la mitad aproximadamente del mercado potencial de centrales nucleares estimado por el OIEA a principios de 1974 [5].

\* Se entiende por países en desarrollo aquellos que reúnen las condiciones necesarias para recibir asistencia técnica en el período de 1977 a 1981 al amparo del PNUD.

**Cuadro 1: Previsiones del crecimiento de la energía nucleoelectrica en los países industrializados**

Región o país	GW(e)			
	1985	1990	1995	2000
Europa (OCDE)	125-168	200-286	284-418	307-560
América (OCDE)	141-172	215-309	305-514	370-810
Pacífico (OCDE)	27-49	52-85	92-158	152-270
Total de la OCDE	293-389	467-680	681-1090	829-1640
Menos Grecia y Turquía	293-388	465-676	674-1084	821-1628
Rep. de Sudáfrica	1-2	2-5	5-11	7-17
URSS y Rep. Dem. Alemana	41-69	82-121	143-226	210-340
Total para los países industrializados	335-459	549-802	822-1321	1038-1985

## LA PARADOJA Y SUS CAUSAS

La disminución del ritmo de consecución de los objetivos previstos para el desarrollo de la energía nucleoelectrica a pesar de haberse quintuplicado el precio del petróleo constituye una paradoja que exige alguna explicación.

Si dejamos aparte causas accidentales limitadas en el espacio o en el tiempo, tales como por ejemplo la recesión de 1974 a 1975 que produjo un estancamiento en el consumo de energía eléctrica en la mayor parte del mundo y un aplazamiento de la construcción de nuevas centrales y el descubrimiento de campos petrolíferos y de gas que permitió a países como el Reino Unido y México frenar la expansión de la energía nucleoelectrica, las principales causas pueden clasificarse en dos grupos distintos:

1. Factores sociales y políticos suscitados por una inquietud en ocasiones incluso irracional en torno a los efectos ambientales de las centrales nucleares y de su combustible y por una creciente preocupación acerca de la posible relación entre la energía nucleoelectrica que se emplea con fines civiles y la proliferación de las armas nucleares.
2. Factores técnicos y económicos que conducen a considerables aumentos de los gastos de capital y de los costos del combustible para las centrales nucleares.

Por lo que respecta a los gastos de capitales los requisitos en materia de seguridad y protección del medio ambiente se intensificaron de forma que difícilmente hubiera cabido imaginar en los primeros años de utilización de la energía nucleoelectrica con fines industriales, con el correspondiente aumento de aquéllos.

Este fenómeno es particularmente evidente en los Estados Unidos de América, donde las cantidades de gran número de materiales importantes (por ejemplo, hormigón, acero, tuberías y cables) tuvieron prácticamente que duplicarse para satisfacer los requisitos reglamentarios. La cantidad de horas-hombre de trabajo de construcción por kW(e) ha aumentado proporcionalmente. Debido a la dilatación de los planes y a la creciente

complejidad de la construcción de las centrales nucleares, los gastos indirectos han aumentado en proporción mayor aún que los directos. En efecto, se necesita disponer de muchas estructuras provisionales para almacenar y proteger el equipo y los materiales de construcción, y se necesita aproximadamente doble número de ingenieros, etc. por períodos de tiempo más largos por cada proyecto para la prestación de servicios técnicos y de dirección de las obras.

La garantía y el control de la calidad constituyen otros ejemplos de requisitos notablemente más rigurosos. El número de normas aplicables al diseño y construcción de una central nuclear en los Estados Unidos pasó a ser de unas 100 en 1970 a aproximadamente 1600 en 1976. Los análisis de los efectos combinados de los requisitos reglamentarios llevaron a la conclusión de que habían contribuido a que se duplicase el volumen de las inversiones reales en el caso de las centrales nucleares desde los primeros años de la producción de energía nucleoelectrónica a escala industrial.

Además, con anterioridad a 1970 los fabricantes de reactores y las empresas de ingeniería y construcción de centrales estaban dispuestos a aceptar importantes riesgos comerciales a cambio de introducirse en un mercado nuevo y sumamente prometedor. Varios contratos a muy bajo precio parece que condujeron a notables pérdidas financieras para los vendedores. Tras cuadruplicarse los precios del petróleo en 1973, se encontraron en situación mucho más favorable. En consecuencia, han aumentado los precios hasta un nivel adecuado para poder cubrir los riesgos comerciales usuales.

Por lo que respecta a los costos del combustible nuclear los precios de los concentrados de uranio experimentaron una fuerte alza que en los casos de entrega inmediata hizo que llegasen a superar los del petróleo, mientras que los costos del enriquecimiento registraron un aumento de alrededor del triple.

## COMPETITIVIDAD Y POSIBILIDADES ACTUALES DE LOS REACTORES DE AGUA LIGERA

Un examen general de este tema no tendría cabida en un artículo breve como el presente, pero puede obtenerse una idea más clara de la situación considerando los resultados de una reunión de expertos de países adelantados y en desarrollo celebrada en junio de 1977 por el OIEA para examinar la experiencia adquirida recientemente en materia de gastos de capital respecto de las centrales nucleares y tradicionales [6]. Partiendo de datos comunicados en dicha reunión, parece que incluso sin añadir los gastos correspondientes a la construcción de la primera central de un determinado tipo, las centrales nucleares de 600 MW(e) van a tropezar con grandes dificultades para poder competir con las alimentadas con petróleo de mantenerse los costos del fuel oil a su nivel actual. El Cuadro 2 indica algunos gastos representativos de inversión y de producción correspondientes a las centrales de 600 MW(e) y de 900 MW(e) tanto nucleares como de petróleo. Se ve que los gastos de producción de un LWR de 600 MW(e) son aproximadamente 2 mills/kWh superiores a los costos de una central de petróleo de la misma capacidad. Sin embargo, para las centrales nucleares de 900 MW(e) los gastos de producción son inferiores en aproximadamente la misma cantidad y este margen se acentúa más aún al aumentar el tamaño de la central.

Debe señalarse que las comparaciones económicas generalizadas de este tipo pueden inducir a error ya que raramente reflejan las condiciones reales. Por ejemplo, los datos sobre los gastos de capital se basan en un emplazamiento hipotético ideal en los Estados Unidos de América y no incluyen factores tales como las subidas de impuestos y derechos, la construcción o mejora de instalaciones exteriores a la central (carreteras, puentes, puertos, vías férreas, etc.) y la capacitación y alojamiento de las personas que trabajan en las obras.

**Cuadro 2: Economía de los reactores de agua ligera y de las centrales de petróleo<sup>1</sup>**

	Reactores LWR		Centrales de petróleo	
	600 MW(e)	900 MW(e)	600 MW(e)	900 MW(e)
Inversión en la central, \$/kW	1150	910	540	510
Costos de producción, mills/kWh:				
Capital <sup>2</sup>	24,2	19,2	11,4	10,8
Combustible	7,0	6,8	18,3 <sup>3</sup>	18,3 <sup>3</sup>
Explotación y conservación	2,2	2,0	1,4	1,2
Total	33,4	28,0	31,1	30,3

<sup>1</sup> Todos los costos se indican en dólares constantes de los Estados Unidos de mediados de 1977.

<sup>2</sup> Factor de la central: 65%; cargas fijas anuales: 12%.

<sup>3</sup> Basados en fuel oil de alto contenido en azufre a 11 dólares/barril.

Cuando se examinan las futuras perspectivas, varios factores parecen abogar por un mejoramiento de la competencia de las centrales nucleares:

1. Con respecto a los gastos de capital, los requisitos de seguridad y de protección del medio ambiente parecen haberse elevado ya al máximo, por lo que al abreviarse el proceso de concesión de licencias que se utilizará respecto de las centrales normalizadas es posible que en éstas se consiga el correspondiente ahorro en la hasta ahora evasiva curva de los costos propia de un período de aprendizaje. Por el contrario, los gastos que se imponen por razones de protección del medio ambiente a las centrales alimentadas con carbón siguen aumentando aún.

2. Con respecto a los costos del combustible nuclear, es probable que los nuevos descubrimientos que se produzcan como resultado de los intensos trabajos de prospección de uranio en zonas no exploradas establezcan los precios, posibilidad ésta que dista mucho de estar asegurada en el caso del petróleo.

## POSIBILIDADES DE LOS REACTORES DE TIPO AVANZADO

Las estimaciones actuales de los recursos mundiales de uranio natural que pueden explotarse con un costo inferior a 30 dólares por libra de  $U_3O_8$  (aplicando el poder adquisitivo del dólar en 1976) son del orden de 4 millones de toneladas [7], que equivalen a unos 60 000 millones de toneladas de petróleo si se utilizan en reactores de agua ligera. En la actualidad el petróleo equivalente a los recursos de uranio es inferior a las reservas de petróleo.

Aunque muchos expertos consideran esta estimación como excesivamente baja debido a que existen vastas regiones del mundo sin explorar, una expansión nuclear a escala mundial basada exclusivamente en los reactores de agua ligera habría de quedar necesariamente limitada.

**Cuadro 3: Necesidades acumulativas de uranio de los países de economía no centralizada<sup>1</sup>**

Sistema o tipo de reactor	Millones de toneladas de uranio natural	
	Crecimiento nuclear bajo	Crecimiento nuclear alto
Agua ligera – Sin reciclado del Pu	38	60
Agua ligera – Con reciclado del Pu	25	43
Agua ligera – Reproductor de torio	23	44
CANDU con combustible del ciclo del Torio	17	30
Reproductor rápido	10	15
Reproductor de torio líquido	9	16
Combustible líquido + Reproductor rápido	5	10

<sup>1</sup> Hasta el año 2050

Por tanto, se abriga gran interés por los reactores de tipo avanzado que pueden utilizar uranio (y torio) con mayor rendimiento. Un "Grupo de consultores sobre reactores reproductores térmicos" reunido bajo el patrocinio del OIEA, ha realizado recientemente estudios estratégicos sobre estos sistemas para determinar los recursos que se requieren para distintos tipos de reactores avanzados [8]. El Cuadro 3 indica las cantidades acumulativas de uranio natural que necesitarán hasta el año 2050 los países de economía no centralizada en el supuesto de que los distintos tipos de reactores avanzados no se introduzcan a escala industrial hasta después de 1995. En este Cuadro se aprecia claramente que solo el reactor reproductor rápido y/o el reactor reproductor alimentado con torio líquido pueden reducir el consumo acumulativo de uranio al nivel de los recursos estimados de mineral explotables a bajo costo. Los estudios estratégicos anteriormente mencionados proporcionan una sólida base para el ulterior desarrollo de reactores de tipo avanzado. El Cuadro 4 indica cómo se afana el mundo, con la excepción de los Estados Unidos, por desarrollar los reactores rápidos reproductores de metal líquido.

Los reproductores de torio como combustible líquido llevan estudiándose en los Estados Unidos más de 25 años, aunque actualmente se dedique poco esfuerzo a este tipo de reactor. A pesar de ello, un grupo de empresas industriales de los Estados Unidos – el llamado "Molten Salt Group" – ha finalizado recientemente un análisis económico y técnico de los reactores de sales fundidas y ha llegado a la conclusión de que dichos sistemas tienen muchas probabilidades de constituir una excelente opción para producir energía nucleoelectrónica a escala industrial a principios de los años 90 [9]. Debido a que los reactores reproductores de sales fundidas se prestan, por sus características, a contribuir a la no proliferación, así como a sus características favorables en cuanto a la seguridad y a la protección del medio ambiente, existe la posibilidad de que se abrigue renovado interés por su desarrollo.

**Cuadro 4: Proyectos de reactores rápidos reproductores de metal líquido fuera de los Estados Unidos**

Nombre	País	MW(t)	MW(e)	Fecha de funcionamiento en potencia
DFR	Reino Unido	60	14	1965
Rapsodie	Francia	40		1967
BOR-60	Unión Soviética	60	12	1970
BR-10	Unión Soviética	10		1973
BN-360	Unión Soviética	1000	350	1973
Phénix	Francia	567	250	1974
PFR	Reino Unido	600	250	1976
JOYO	Japón	100		1977
KNK-2	Rep.Fed. de Alemania	58	20	1977
BN-600	Unión Soviética	1470	600	1979
PEC	Italia	118		1979
SNR-300	Rep.Fed.de Alemania	736	312	1981
Super Phénix	Francia	2900	1200	1982
MONJU	Japón	714	300	1984
CFR	Reino Unido	3125	1320	1988-90
SNR-2	Rep.Fed.de Alemania	5000	2000	1988-90

### CONCLUSIONES PROVISIONALES

Aunque las perspectivas que ofrece la energía nucleoelectrica se evalúan casi siempre tomando como base comparaciones de costos, no hay que olvidar que toda la esfera energética se ha caracterizado por una creciente discrepancia entre los precios y los costos de producción.

Este divorcio entre los precios de venta y los costos de producción prevaleció durante largo tiempo en la industria del petróleo, tanto en lo referente a los crudos como a los productos refinados, y ha comenzado recientemente a ampliarse a la del carbón y a la del uranio.

En vista de ello, es por lo tanto ilusorio, confiar en los análisis económicos como orientación segura sobre las perspectivas de la energía nucleoelectrica, especialmente si las comparaciones abarcan períodos de tiempo durante los cuales es dudoso que se mantenga la validez de los parámetros básicos iniciales.

Esta es la razón por la que las consideraciones cualitativas referidas tanto a corto como a largo plazo tienen con frecuencia más peso cuando se trata de elegir entre diversas opciones energéticas que las estimaciones monetarias de los futuros costos y beneficios.

Sie bien algunas de estas consideraciones cualitativas, por ejemplo, las relativas a las repercusiones sobre el medio ambiente, han podido retrasar el crecimiento de la energía nucleoelectrica en un pasado próximo, otras indican con claridad un futuro positivo. Entre ellas destacan las siguientes:

1. La energía nucleoelectrica depende mucho más de los recursos humanos que de los naturales. En realidad, si se basa en un ciclo reproductor eficaz, se independiza prácticamente de los suministros de materias primas.
2. La energía nucleoelectrica ofrece a muchos países industriales y en desarrollo un medio para disminuir su actual dependencia de las importaciones de energía. A este respecto debe recordarse que cada gigavatio de capacidad nuclear economiza aproximadamente 1 500 000 toneladas de petróleo al año, y que los objetivos mínimos previstos para el año 2000 supondrán un ahorro de más de la mitad del petróleo que actualmente se produce al año en el mundo entero.
3. La energía nucleoelectrica puede constituir una especie de póliza de seguro frente a la escasez de energía hasta pasado el final del siglo, siempre y cuando en este intervalo se hayan desarrollado una infraestructura industrial lo suficientemente amplia y un ciclo del combustible adecuado.

No cabe duda de que la naturaleza, alcance y funciones de esta infraestructura pueden variar de un país a otro según, por una parte, su grado de desarrollo en la esfera nuclear, y por otra según su riqueza nacional en recursos de combustibles fósiles y de combustibles fisionables.

No obstante, e independientemente de la amplia diversidad de situaciones nacionales que puedan plantearse en lo futuro, la plena contribución de la energía nucleoelectrica al abastecimiento mundial de energía se conseguirá únicamente si se establece a escala universal un clima de confianza internacional en cuestiones tan importantes como son el suministro de combustible nuclear y las salvaguardias.

#### Referencias

- [1] "Power Reactors in Member States", OIEA, marzo de 1977
- [2] J. Miida y col., "Nuclear Power Programmes and Medium Term Projections in the OECD Area", IAEA-CN-36/492, mayo de 1977.
- [3] R. Krymm and G. Woite, "Estimates of Future Demand for Uranium and Nuclear Fuel Cycle Services", Bolétin del OIEA, Vol. 18, N° 5/6, otoño de 1976.
- [4] A. Lane y col., "Nuclear Power in Developing Countries", IAEA-CN-36/500, mayo de 1977.
- [5] "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries", Edición de 1974, OIEA, octubre de 1974.
- [6] G. Woite, "Extrapolation of Capital Costs Experience from Industrialized to Developing Countries", se publicará dentro de 1977.
- [7] W. Häussermann y col., "Demand and Supply Estimates for the Nuclear Fuel Cycle", IAEA-CN-36/493, mayo de 1977.
- [8] J.J. Went, "Status and Prospects of Thermal Breeders", IAEA-CN-36/302, mayo de 1977.
- [9] L.F.C. Reichle, "MSR (Pu Converters) and MSBRs in Commercial Nuclear Power Stations", IAEA-CN-36/424, mayo de 1977.