

SECCIÓN AMBIENTE Y ENERGÍA

Ciclo de Conferencias

“La Problemática Energética: carbón, biocombustibles, matriz energética, generación nuclear”

10 de septiembre de 2008

I. Palabras de apertura a cargo del señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli.

II. Palabras de presentación a cargo del Presidente de la Sección Ambiente y Energía de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Eduardo A. Pedace.

III. Conferencia de la Lic. Carla Notari sobre el tema: “Tecnología nuclear y generación eléctrica”.

Palabras de apertura a cargo del señor Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería, Ing. Arturo J. Bignoli

Buenas tardes, señoras y señores.

Hoy la Lic. Carla Notari va a realizar una conferencia sobre tecnología nuclear y generación eléctrica que forma parte de un ciclo con el que esperamos enterarnos de todos los tipos de energía que se pueden utilizar. El problema de la energía presenta alcances mundiales; el Ing Pedace, presidente de la sección Ambiente y Energía, presentará brevemente a nuestra disertante. Yo no puedo más que agradecer la presencia de la Lic. Notari, de quien me ha impresionado su currículum, y del cual nos hablará el Ing. Pedace.

Palabras de presentación a cargo del señor académico, Ing. Eduardo A. Pedace, presidente de la Sección Ambiente y Energía de la Academia Nacional de Ingeniería

Debo agradecer a la Lic. Notari por su contribución. Hay algo muy importante que debemos destacar. La Academia se ha propuesto, en un término relativamente razonable, avanzar en distintas áreas de energía, nosotros hemos tenido hace más o menos un mes y medio una presentación del Ing. Antonio Cadenas sobre el tema del carbón, fuente que no está muy bien categorizada; hemos trabajado en algunos temas de energía nuclear que evidentemente necesitan una recuperación, lo cual está sucediendo en Europa y ver realmente cuál es la perspectiva, dónde está ubicada, que es dentro de las grandes fuentes de energía, pensamos seguir con biocombustibles, en una presentación general a cargo del Ing. Marcelo Martínez Mosquera, etc. Tenemos planeado hacer documentos que puedan servir de referencia para orientar un poco el tema de energía. Es indudablemente uno de los deberes que tenemos en nuestro país.

La Lic. Carla Notari es una distinguida profesional con una amplia trayectoria en la Comisión de Energía Atómica, que tiene a su cargo el Instituto Dan Beninson, de reciente creación, que, junto con el Balseiro y el Sábado, forman los Institutos de la Comisión de Energía Atómica que ha tenido una trayectoria mucho más estable en relación a otros organismos del Estado, lo cual le ha permitido tener una formación en este campo. La actividad de la Lic. Notari hoy hace énfasis en el campo de la formación de profesionales en este campo.

Esperamos con mucha ansiedad esta conferencia, cuyo título, muy importante, es: "Tecnología nuclear y generación eléctrica". Desde ya agradecemos mucho a la Lic. Notari por su presencia el día de hoy.

TECNOLOGÍA NUCLEAR Y GENERACIÓN ELÉCTRICA

Lic. CARLA NOTARI
Decana del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson
CNEA-UNSAM

Licenciada en Física de la Universidad de Buenos Aires, ha trabajado en el área nuclear desde 1970, desempeñando diversos cargos en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Participó activamente en los proyectos de centrales nucleares, particularmente en las de Atucha 1 y Embalse, en el área de diseño neutrónico y actuó como coordinadora del área Ciclo de Combustible para la utilización de uranio levemente enriquecido en las centrales nucleares argentinas. Es investigadora consulta y coordinadora de asuntos académicos de CNEA. En los últimos años se ha enfocado en la formación tecnológica de posgrado para atender las necesidades de recursos humanos del plan nuclear nacional, dirigiendo la Maestría en Reactores Nucleares y actualmente se desempeña como Decana del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson (IDB), creado por convenio entre la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Universidad Nacional de San Martín.

Resumen

Las fuentes de energía y el estudio de su utilización eficiente, segura y económica constituyen una cuestión de importancia fundamental para los países. La tecnología nuclear brinda la única opción apta para reemplazar parte de la generación fósil que se impone por argumentos ambientales y por el agotamiento previsto en las próximas décadas de combustible fósil.

Se describe el principio de funcionamiento de los reactores nucleares y se discuten los recursos uraníferos, los costos y las perspectivas de esta tecnología, abordando la situación de Argentina en este campo.

Palabras clave: Reactores, nucleoelectricidad, costos, prospectiva.

1. Introducción

El análisis de las fuentes de energía para la producción de electricidad es un tema vital para los países y la planificación de su producción. La tecnolo-

gía nuclear tiene un rol interesante para jugar en este terreno, a pesar de la percepción de buena parte del público que aún no es favorable a este tipo de generación. Esta percepción está asociada al origen de esta tecnología, ligada con las explosiones de las bombas atómicas al final de la segunda guerra mundial y más recientemente al accidente de Chernobyl que han influido muy negativamente a la imagen de la generación nuclear. No es ajena a esta percepción la tendencia generalizada a exagerar los inconvenientes asociados a lo nuclear y al mismo tiempo minimizar los problemas vinculados con las otras formas de generación. Sin embargo, el agotamiento de los recursos fósiles que tienen un horizonte de sólo algunas décadas y el conocimiento más difundido del detrimento en el ambiente y la salud humana producido por la combustión de los mismos está cambiando la situación.

2. La fisión nuclear

Para comenzar, vamos a recordar algunos aspectos de la física que hacen a la tecnología nuclear. Principalmente la fisión nuclear, fenómeno sobre el cual se basa el funcionamiento de los reactores nucleares.

Existen algunos materiales pesados, típicamente el uranio, que, bombardeado con neutrones (uno de los constituyentes de todos los núcleos atómicos), dan lugar a una reacción nuclear especial llamada fisión. El núcleo bombardeado se parte en dos fragmentos, dando lugar a la formación de dos átomos más livianos y liberando partículas, radiación y una gran cantidad de energía (Figura 1). ¿De dónde proviene esta gran cantidad de energía? Si hacemos un balance de masas contabilizando la suma de masas iniciales de la reacción (núcleo de uranio más neutrón) y las finales (fragmentos de fisión más partículas), veremos que se ha perdido masa. La relación de Einstein, que establece la equivalencia entre masa y energía, nos lleva a deducir que esa energía liberada proviene de la pérdida de masa.

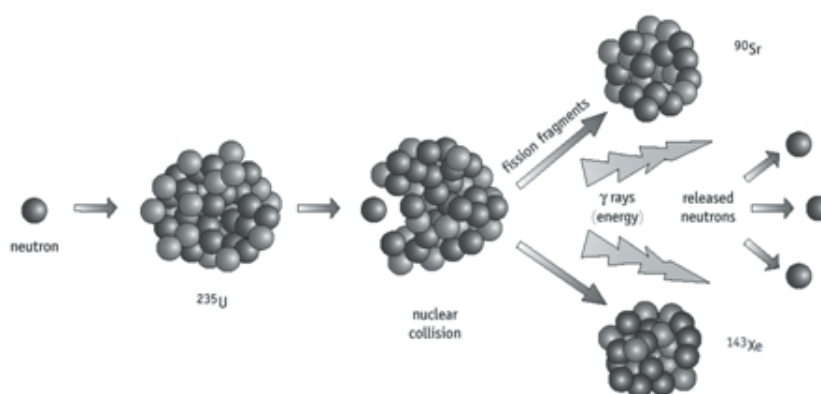


Figura 1. Representación esquemática de la fisión nuclear

Consideremos algunos aspectos importantes de esta reacción que condujeron a todo lo que vino después en materia de reactores nucleares:

- La energía liberada en este proceso es fenomenal comparada con la que se libera en una reacción química. La combustión de un átomo de carbón libera aproximadamente 10 electronvolt (1 ev). La fisión de un átomo de uranio libera 200 millones de electronvolt (200 Mev).
- La fisión es inducida por un neutrón pero entre los productos de la fisión aparecen entre 2 y 3 neutrones libres. Éstos pueden potencialmente impactar en otros núcleos de uranio y producir fisión. Si uno solo logra este objetivo, puede dar lugar a una reacción en cadena, donde las fisiones se replican en forma sostenida, dando lugar a una producción también sostenida de energía. Esto es un reactor nuclear.
- El uranio en la naturaleza existe bajo dos formas (isótopos), una más pesada: $\text{U}238$ y una más liviana $\text{U}235$. Ambas conforman el uranio natural en las proporciones 99,3% y 0,7% respectivamente. El más abundante requiere neutrones de alta energía para fisionar; el $\text{U}235$ fisiona con neutrones de cualquier energía y lo hace en mayor proporción si son de baja energía.

Merece mencionarse que los reactores nucleares no se utilizan únicamente para producir energía eléctrica, si bien esta es la aplicación más significativa económicamente. Hay múltiples usos industriales y médicos que hacen a nuestra vida cotidiana:

- Educación y entrenamiento.
- Prueba y calificación de combustibles.

- Soporte a reactores de potencia.
- Producción de radioisótopos para uso médico e industrial.
- “Scattering” de neutrones.
- Investigación de materiales.
- Análisis por activación.
- Neutrografía.

3. Reactores y centrales nucleares

La gran mayoría de los reactores que equipan a las centrales nucleares actuales utilizan la fisión del uranio liviano con neutrones de baja energía. Se llaman reactores térmicos para diferenciarlos de los reactores rápidos que utilizan las fisiones producidas con neutrones de más alta energía. La tecnología de estos últimos es más compleja. De hecho, el número de reactores rápidos que funcionan en el mundo es hoy pequeño, pero tienen una característica que los hace especialmente atractivos y que justifica toda la actividad de investigación y desarrollo que se realiza en el tema: tienen la capacidad de producir más combustible del que consumen y por ello se los llama reactores reproductores.

En un reactor nuclear se produce un elemento que no existe en la naturaleza y que es más pesado que el uranio: el plutonio. Este elemento se origina en el bombardeo de U238 con neutrones. Tiene la característica de que fisiona con neutrones de todas las energías, como el U235, y además produce en promedio más neutrones libres por fisión, de modo que es más efectivo para mantener la reacción en cadena. Este elemento se produce continuamente en el núcleo de un reactor nuclear y fisiona aportando a la producción de energía, pero en un reactor rápido se dispone alrededor del núcleo de una región rica en U238 con la finalidad de producir allí mayor cantidad de plutonio, que luego es recuperado, reprocessando el material y destinado a la fabricación de nuevo combustible.

La Figura 2 muestra un esquema de una central nuclear. A partir de la línea de vapor, es muy similar a una central convencional en la que se produce la combustión de un combustible fósil como el carbón o el gas. La diferencia básica reside en la fuente de calor, que en este caso es la fisión que ocurre en las **barras combustibles** del núcleo del reactor. El núcleo del reactor tiene muchos otros componentes, además de las barras combustibles. Entre otros, el sistema de regulación y control, que puede consistir en un conjunto de barras absorbentes de neutrones que permiten iniciar la reacción en cadena, llevar el sistema a la potencia deseada, regular la potencia y detener el reactor, según sea necesario. Otros componentes básicos son el **moderador**, que permite frenar a

los neutrones emergentes de la fisión, que son rápidos, para que alcancen una energía menor (térmica) y más apta para fisiónar el U235; **refrigerante**, que permite remover el calor y generar vapor a través de un generador de vapor (típicamente agua).

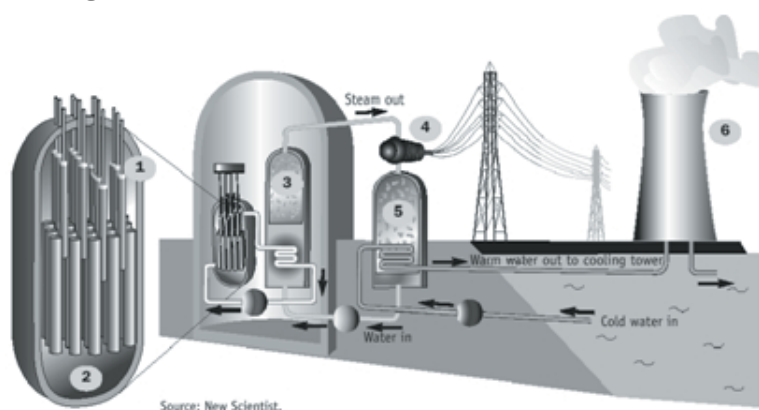


Figura 2. Representación esquemática de una central nuclear

Interesa recalcar la observación de que los neutrones que emergen de la fisión son rápidos, es decir, de alta energía, del orden de 1 Mev, mientras que los neutrones que inducen fisión en el U235 son, como se dijo antes, neutrones lentos, es decir, de baja energía, del orden de 1ev (un millón de veces menor). El propósito del material moderador en el núcleo de un reactor es, como se dijo, disminuir la energía de los neutrones de fisión a valores más aptos para inducir fisión en U235 y esto lo logra por medio de sucesivas colisiones del neutrón con átomos del moderador (generalmente agua), porque en este proceso el neutrón va cediendo paulatinamente su energía.

En los reactores que utilizan uranio natural como combustible, el moderador debe ser agua pesada (D2O), que es un material poco absorbente de neutrones. Si se utilizara agua liviana o común (H2O), que es un poco más absorbente de neutrones, no se conseguiría una reacción en cadena autosostenida. En cambio, los reactores que utilizan uranio enriquecido como combustible, en el cual, a través de un proceso industrial costoso llamado enriquecimiento, se lleva el contenido de U235 del valor 0,7% del uranio natural al 3-5%, se puede utilizar agua liviana como moderador, porque la densidad de fisiones que se produce en el material enriquecido admite una pérdida de neutrones por absorción en el agua y aun así se consigue la reacción en cadena autosostenida.

Los reactores hasta ahora mencionados se llaman reactores térmicos, porque los neutrones que producen la fisión son de baja energía (llamados térmicos) y, como se dijo, la gran mayoría de las 440 centrales nucleares que operan en el mundo hoy lo hacen con reactores de este tipo. Sin embargo, como se mencionó antes, existen reactores en los cuales la fisión se produce con neutrones de energías más altas (del orden de unos cientos de kiloelectronvolts): son los reactores rápidos. Estos reactores no tienen material moderador porque en su diseño se trata de evitar todo lo posible la presencia de materiales livianos que bajan la energía de los neutrones. Tal es así que el material refrigerante en este caso no puede ser agua y debe utilizarse un material más pesado, como los metales sodio o plomo, para remover el calor del núcleo. La propiedad sobresaliente de estos reactores es la capacidad de producir más combustible del que consumen, transformando U238 en Pu239.

4. Energía nucleoelectrónica

Si se observa la distribución de energía primaria en el mundo por tipo de fuente, se ve que la participación de la componente nuclear es aproximadamente de 7%, elevándose la misma a 17% si se analiza la energía eléctrica, dado que este es el uso principal que tiene la energía nuclear. Hay aproximadamente 30 países en el mundo que tienen energía nuclear y la mayoría de ellos utiliza un tipo de reactor que se alimenta con uranio enriquecido y utiliza como moderador agua liviana. Sólo un 8% del parque nucleoelectrónico mundial utiliza uranio natural y agua pesada. A pesar de ser minoritaria, esta línea de reactores es importante para nosotros, porque constituye el tipo de reactores de las centrales nucleares argentinas. Promediando los años 60, cuando se tomó la decisión de comprar la primera central nuclear, se optó por este tipo de reactores, dado que se preveía más simple el acceso local a una planta de enriquecimiento de agua como la que tenemos actualmente en Arroyito, que a una planta de enriquecimiento de uranio. Esto se relacionaba con la intención de asegurar, en la medida de lo posible, el suministro local. Lo cierto es que el desempeño de las centrales nucleares argentinas ha sido sumamente satisfactoria, validando la decisión tomada en su momento.

La Figura 3 muestra el rápido aumento en el mundo en la instalación de centrales nucleares desde mediados de los años 60 hasta mediados de los 80. A partir de entonces, este proceso se frenó. Sin embargo, se observa que la participación de la generación nucleoelectrónica ha aumentado y en los últimos años se ha mantenido alrededor de 17%, debido a un sostenido incremento en la disponibilidad de los equipos.

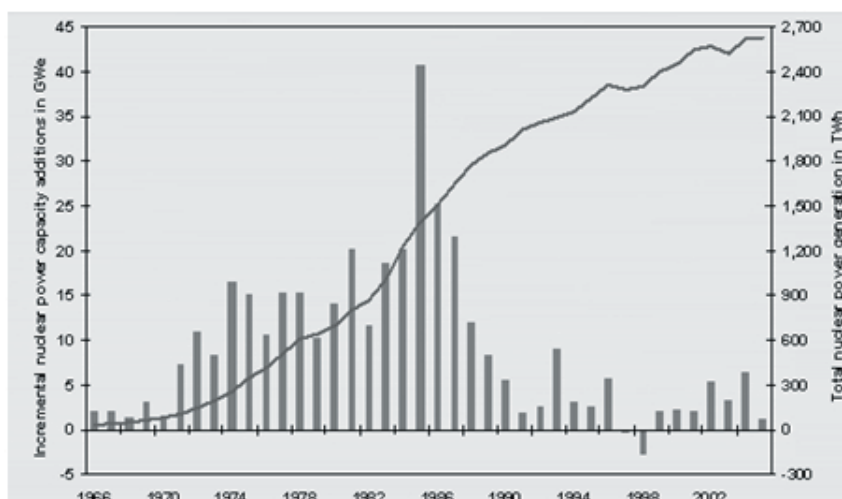


Figura 3. Incremento en la capacidad nuclear (barras) y generación nuclear

A principios de este año existían 439 centrales nucleares en operación y 35 en construcción. De estas últimas, 20 se construyen en Asia.

La situación mundial respecto de la instalación de nuevas centrales es dispar. Como se dijo, Asia es el motor de este proceso con India, China, Japón y Corea liderando el proceso. En Estados Unidos de América, si bien está en planes la construcción de nuevas centrales nucleares, el esfuerzo más importante está concentrado en la extensión de vida de las actualmente en funcionamiento. De hecho, el 48% del parque nucleoelectrico ha conseguido extender su licencia de operación a 60 años y buena parte de lo que resta seguirá el mismo camino. En Europa la situación es dispar: hay países que mantienen aún una moratoria nuclear y otros como Rusia, con 7 unidades en construcción y gran desarrollo del ciclo de combustible, o Francia, con 78% de su generación eléctrica de origen nuclear y un involucramiento importante en los diseños de avanzada de la generación IV.

En Latinoamérica, Argentina, Brasil y México tienen centrales nucleares. Argentina ha reiniciado su programa nuclear con la finalización de Atucha 2 y el nuevo impulso a las actividades mineras. Brasil ya ha anunciado un programa nuclear ambicioso para el futuro próximo con la finalización de Angra 3 y la construcción de 12 nuevas centrales nucleares.

5. Uranio

Veamos ahora algo sobre el recurso básico en el que descansa el desarrollo de esta tecnología: el uranio. La Tabla 1 muestra las reservas estimadas de uranio a valores inferiores a 130 U\$/kg en los principales países productores.

Tabla 1. Reservas estimadas de uranio de los principales productores

	< US \$ 40 / kgU	< US \$ 80 / kgU	< US \$ 130 / kgU
World	> 2746	3804	4743
Australia	701+343	714+360	747+396
Canada	287+85	345+99	345+99
Kazakhstan	279+130	378+228	514+302
Niger	173+0	180+45	180+45
Brazil	140+0	158+74	158+121
South Africa	89+55	177+72	256+85
Namibia	62+61	151+86	183+100
USA	NA	102+	342+
Uzbekistan	60+31	60+31	77+39
Russia	58+22	132+41	132+41

Los recursos uraníferos estimados totales son:

Total identificado (<130 U\$/kg): 4,7 millones toneladas.

Total sin descubrir (<130 U\$/kg): 10 millones toneladas.

Actualmente se consumen 68.000 toneladas/año para producir 360GWe, lo cual significa que con la actual tecnología de reactores tenemos uranio para 220 años y este horizonte se extiende notablemente con la introducción de reactores rápidos.

Las reservas probadas de Argentina son 10.000 toneladas; las probables suman 10.000 adicionales y con los planes de prospección se espera llegar a 50.000 toneladas.

6. Economía

La Figura 4 resume esquemáticamente la composición del costo de generación nuclear. Allí se muestra que la componente de capital es relevante y la de combustible mucho menor, a diferencia de lo que ocurre con las centrales fósiles.

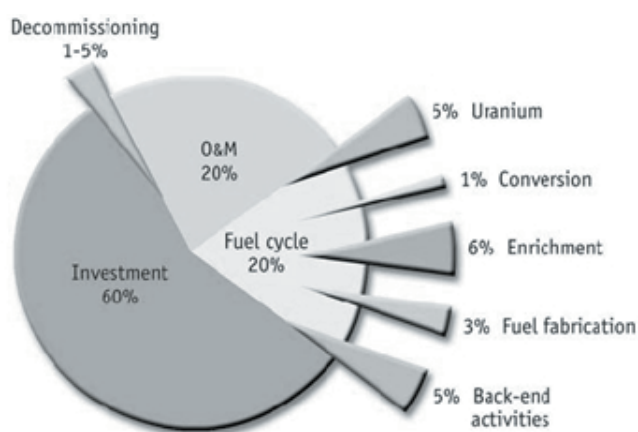


Figura 4. Composición del costo de generación nuclear

El gráfico se refiere a centrales de uranio enriquecido, pero es similar en el caso de uranio natural, aunque en este caso no hay etapa de enriquecimiento.

Veamos un análisis reciente, donde se comparan costos para generación eléctrica de base entre diferentes fuentes. El estudio refleja el análisis de la agencia nuclear de la OECD juntamente con la Agencia Internacional de la Energía realizado en 2005. Los valores corresponden a costos nivelados de carbón, gas y nuclear, calculados con 2 tasas de retorno: 5% y 10%.

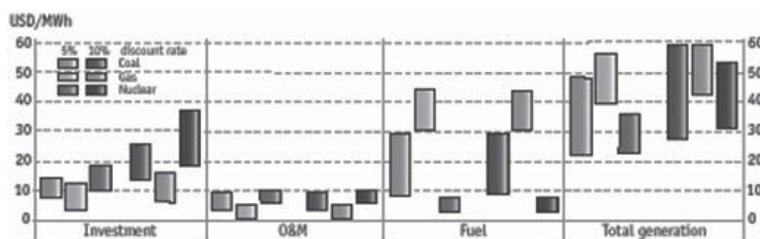


Figura 5. Costo de generación con diferentes fuentes

La Figura 5 muestra el costo total de generación dividido en sus componentes: capital, operación y mantenimiento y combustible. Los colores claro y oscuro se refieren, como se indica, a las dos tasas utilizadas en el análisis. La longitud de las barras corresponde a la dispersión de valores que se obtienen para diferentes centrales europeas.

Queda claro que en el caso europeo, la opción nuclear es perfectamente competitiva con las otras. Es de señalar que en este análisis, que es previo al incremento sufrido por el petróleo, no se incluye, además, ningún crédito para la generación nuclear por la ausencia de producción de gases de efecto invernadero.

En cuanto al impacto del incremento de costos de combustible, se muestra en la Figura 6 la sensibilidad de las distintas fuentes a este valor. En el caso nuclear es notablemente menor.

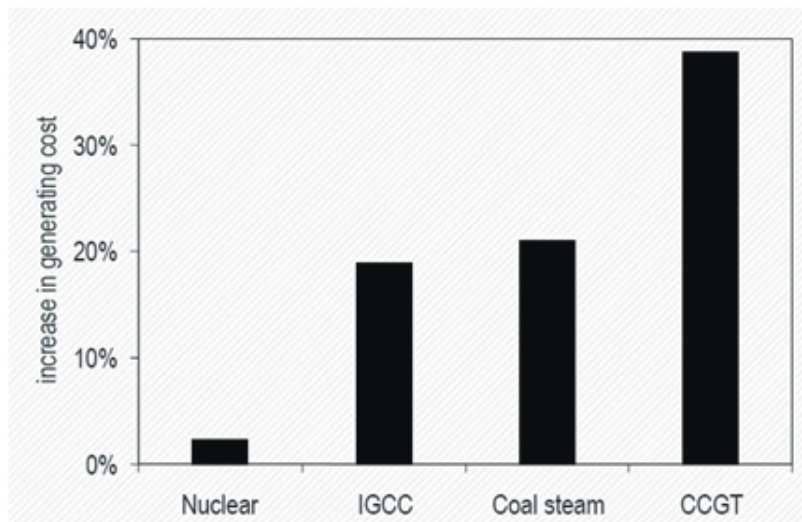


Figura 6. Impacto en el costo de generación por incremento de costo de combustible

7. Prospectiva

En cuanto al análisis prospectivo del incremento de generación nuclear por regiones, la Figura 7 resume algunos resultados.

Si bien se prevé que nuevos países ingresen a la comunidad nucleoelectrónica, el mayor incremento se producirá seguramente en los países que ya disponen de esta tecnología.

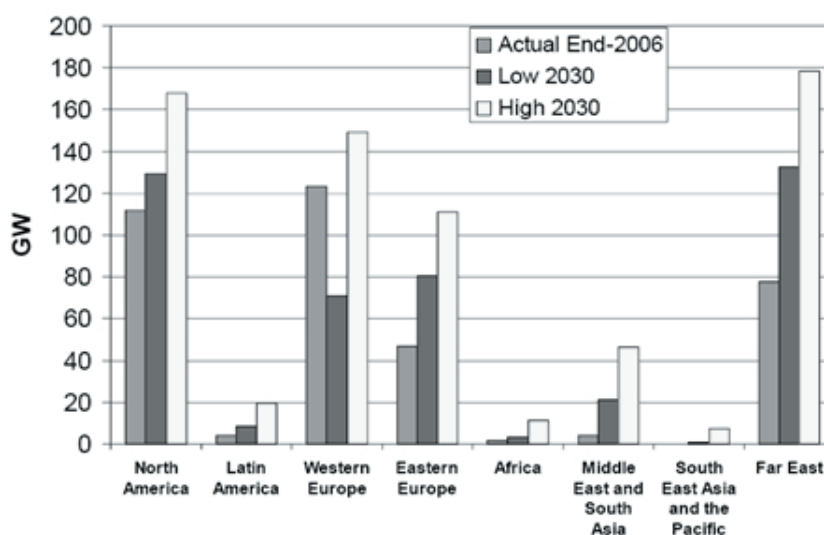


Figura 7. Incremento previsto en la generación nucleoelectrónica

¿Cuáles son las novedades que nos depara el desarrollo tecnológico en materia de centrales nucleares?

La Figura 8 muestra cómo han ido evolucionando las diferentes generaciones de reactores. La llamada Generación IV es un proyecto multinacional, del que participa nominalmente Argentina, que estudia los diseños avanzados que presuntamente entrarán al circuito comercial hacia mediados del siglo.

Los diseños en estudio dentro de este proyecto son:

- Reactor Rápido refrigerado a gas (GCR).
- Reactor Rápido refrigerado a sodio (SCR).
- Reactor Rápido refrigerado a plomo (LCR).
- Reactor de muy alta temperatura (VHTR).
- Reactor de agua supercrítica (SCWR).
- Reactor a sales fundidas (MSR).

Los objetivos que se persigue con los mismos son:

- Proveer generación de energía en forma sustentable.
- Minimizar los residuos nucleares en favor de la salud pública y el impacto al ambiente.
- Mejorar el costo del ciclo de vida de la planta en relación con otras opciones así como el riesgo financiero del proyecto.

- Sobresalir en seguridad y confiabilidad.
- Muy baja probabilidad y alcance de daño del núcleo.
- Eliminar la necesidad de respuesta de emergencia fuera del sitio.
- Aumentar la protección física contra actos de terrorismo y disminuir aún más la posibilidad de proliferación.

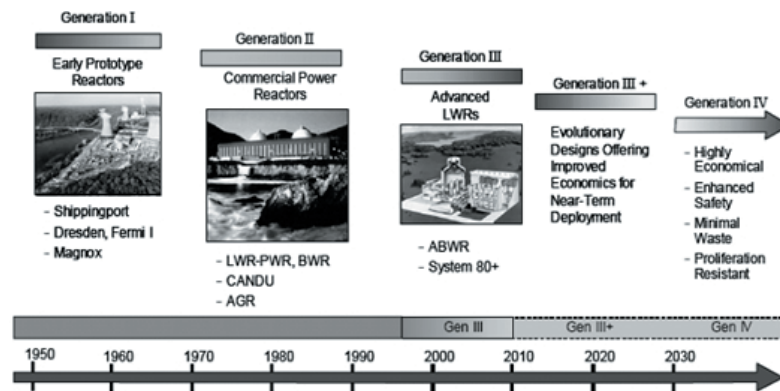


Figura 8. Evolución histórica de las generaciones de reactores

Es de destacar que 3 de los 6 diseños analizados son reactores rápidos.

8. Argentina y el futuro

La Argentina hoy tiene el equipamiento siguiente:

- Central Nuclear Atucha 1 (357MWe, PHWR).
- Central Nuclear Embalse (648MWe, PHWR).
- Central Nuclear Atucha 2 (745MWe, PHWR, en construcción).

El país ha alcanzado un grado de madurez importante en el área nuclear y particularmente con respecto a reactores nucleares, lo cual lo ha posicionado internacionalmente y en una situación de liderazgo regional. La Figura 9 resume los proyectos importantes en el área que arrancan en 1958, con el primer reactor nuclear latinoamericano, fabricado íntegramente en el país.

Sin embargo, el largo período de estancamiento nuclear que acompañó la tendencia mundial fue una experiencia devastadora desde el punto de vista de los recursos humanos. Hay una generación de científicos y tecnólogos nucleares que está ausente y los especialistas con amplia experiencia están retirados o a

punto de hacerlo. Esta situación es común a casi todos los países con tecnología nuclear. Sin embargo, en Argentina la recuperación del tiempo perdido se hace más difícil por la escasez de recursos económicos que se destinan a esta tarea.

Desde el Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson, que es un emprendimiento conjunto de la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Universidad Nacional de San Martín, intentamos contribuir a revertir esta situación. Ello sólo puede hacerse con la implementación de políticas activas de promoción de la actividad desde las más altas esferas de gobierno.

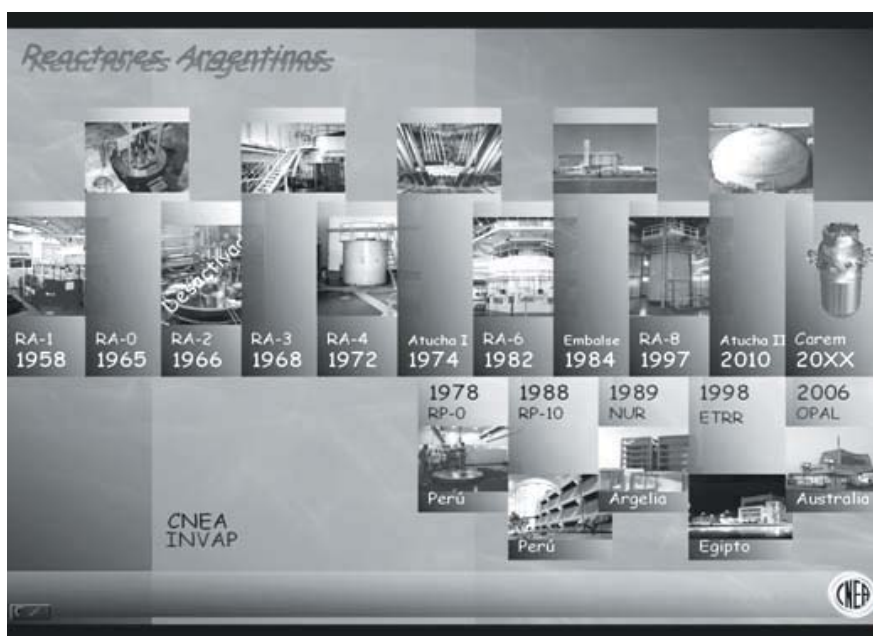


Figura 9. Secuencia histórica de los reactores en Argentina

Conclusiones

La generación de energía utilizando tecnología nuclear está siendo revalorizada como la única opción apta para reemplazar parte de la generación fósil, que se impone por argumentos ambientales y por el agotamiento previsto en

las próximas décadas de combustible fósil barato. Numerosos estudios revelan que la nuclear es una alternativa económica, eficiente y segura. Los recursos uraníferos mundiales son abundantes y suficientes para asegurar una provisión de energía sustentable, máxime si se prevé la introducción de los reactores rápidos. Los países centrales poseedores de esta tecnología llevan adelante ambiciosos proyectos sobre diseños avanzados de centrales nucleares.

Argentina está entre los 30 países que poseen tecnología nuclear en el mundo y su registro histórico en este campo la ha posicionado internacionalmente y en una situación de liderazgo regional. Tras el período de estancamiento en los proyectos nucleares en el país y el mundo, Argentina se encuentra en una situación crítica de escasez de recursos humanos calificados.

El Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson es una respuesta a esta situación. Sin embargo, se requiere un vigoroso impulso a la educación y entrenamiento en tecnología nuclear, que debe ser impartido desde las esferas gubernamentales, para dar una respuesta adecuada al enorme desafío que significa mantener e incrementar la competencia del país en el área.

Referencias

Nuclear Energy Today, OECD, 2006.

“Projected Costs of Generating Electricity”, Nuclear Energy Agency (OECD)-International Energy Agency, 2005.

Boletín OIEA, Vol. 49-2, 2008.

“El papel de la generación nuclear en la sustitución de los combustibles tradicionales”, Jornada del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson y la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, noviembre de 2007.

Curso ABC de la Energía Nuclear, CNEA, A. Pereyra, 2008.