

LA REVISTA DE LA  
**COMISIÓN NACIONAL  
DE ENERGÍA ATÓMICA**



**AÑO X – NÚMERO 39/40 – JULIO / DICIEMBRE 2010**



**LA REVISTA CUMPLE 10 AÑOS**

ISSN 1666-1036

# 60 AÑOS DE LA CNEA



LA AATN  
FELICITA A LA  
COMISIÓN NACIONAL  
DE ENERGÍA ATÓMICA  
POR SU LARGA  
TRAYECTORIA DE  
LABOR ININTERRUMPIDA  
EN BENEFICIO DE  
LA COMUNIDAD  
ARGENTINA

**AATN**   
**ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE TECNOLOGÍA NUCLEAR**

Av. Callao 384 (1° 3)  
C. A. de Buenos Aires  
Tel: 011-4372-2013  
[www.aatn.org.ar](http://www.aatn.org.ar)  
[aatnmail@gmail.com](mailto:aatnmail@gmail.com)



# LA REVISTA DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA



**AÑO X – NÚMERO 39/40 – JULIO/DICIEMBRE 2010**

**editorial**

El Comité Editorial, si bien se complace en presentar el número 39/40 de la Revista de la CNEA con el que completa su décimo año de existencia, tiene a la vez el hondo pesar de informar el fallecimiento del Investigador Emérito de la Institución, Dr. Renato Radicella, científico e investigador de destacada actuación que desarrollara una extensa y fructífera carrera profesional en la CNEA iniciada en su etapa fundacional y se prolongara por más de cincuenta y cinco años, y quien además se desempeñara en varias ocasiones a cargo de la Presidencia de la Institución. El Dr. Radicella integraba asimismo el Comité Asesor de la Revista de la CNEA. Por todo ello comenzamos este número con un sentido y afectuoso obituario a su memoria.

En el marco de la reactivación de la actividad nuclear en el país dispuesta por el Gobierno Nacional en 2006 y de los 60 años de existencia de la CNEA, se han incluido en este número cuatro artículos que ponen de relieve las inquietudes y los esfuerzos que desarrolla el personal de la Institución para estar a la altura de las circunstancias.

El primero de ellos se refiere a un tema crucial para el desarrollo de la actividad nuclear en el mundo y en el país: la situación actual de los recursos uraníferos a nivel global y en la Argentina.

El segundo artículo nos brinda una breve pero muy completa reseña de la evolución de la tecnología nuclear caracterizada por las sucesivas generaciones de reactores nucleares de potencia, y un panorama general y actualizado sobre los diseños denominados de IVta Generación y su estado actual de desarrollo en el marco del Proyecto Internacional GIF (*Generation IV International Forum*).

En el Laboratorio de Materiales Nucleares del Centro Atómico Bariloche se ha venido desarrollando un método para la inmovilización de elementos combustibles irradiados tipo MTR provenientes de reactores de investigación, cuyo objetivo es reducir la posibilidad de migración o de dispersión de radionucleídos durante la manipulación, el almacenamiento y la disposición final de los mismos. El tercer artículo nos da cuenta de este interesante desarrollo tecnológico y de sus posibilidades futuras.

La elaboración del Plan Estratégico CNEA 2010-2019 por áreas temáticas permitió recolectar y analizar información muy valiosa sobre la forma en que la Institución organiza sus actividades. El cuarto artículo plantea una forma de entender a la organización bajo el concepto de complejidad, la define por sus características más relevantes y hace un intento de individualizar dónde se localiza la complejidad a nivel institucional y las trabas que ella supone para el logro de los objetivos estratégicos.

Como anunciáramos en nuestro número anterior, el 37/38, en la página web de la CNEA ([www.cnea.gov.ar](http://www.cnea.gov.ar)), en la opción del menú “Comunicación – Publicaciones – Revista de la CNEA” se ha incluido el índice general temático de los artículos publicados en la Revista hasta el Año 10 - N° 37/38, que será en el futuro mantenido actualizado a partir de la publicación de cada nuevo número, a fin de facilitar las consultas relacionadas con los temas cubiertos por la Revista de la CNEA a lo largo de su existencia.

Nuevamente volvemos a presentar la sección “Aclaraciones y comentarios”, en esta oportunidad para dar a conocer dos interesantes aclaraciones en relación con el artículo publicado en la Revista de la CNEA - Año X - Número 37/38 - período enero/ junio de 2010, titulado: “El desarrollo nuclear argentino” formulados por el Lic. José Boado que constituyen un aporte muy oportuno para clarificar dos aspectos significativos de ese desarrollo.

Como en los números anteriores se incluyen también las secciones “CNEA al Día” y “Reseñas bibliográficas”. Se reitera la invitación a todos los integrantes del sector nuclear, con prescindencia del organismo al que pertenezcan o hayan pertenecido, y a quienes estén o hayan estado vinculados a la actividad nuclear en cualquier circunstancia, que tengan trabajos que deseen difundir, a que los hagan llegar este Comité Editorial.

## autoridades nacionales

Presidente de la Nación  
Doctora Cristina E. Fernández de Kirchner

Ministro de Planificación Federal,  
Inversión Pública y Servicios  
Arquitecto Julio Miguel De Vido

Secretario de Energía  
Ingeniero Daniel Omar Cameron

## autoridades institucionales

Presidenta  
Licenciada Norma Luisa Boero

Vice-Presidente  
Ingeniero Mauricio Bisauta

Gerente General  
Doctor Carlos Rubén Calabrese

## comité asesor

Doctor Carlos Aráoz  
Doctor Jim Cronin  
Doctor Juan Martín Maldacena

## comité editorial

Ingeniero Pascual Francisco Aguirre  
Capitán de Navío (R) Roberto Mario Ornstein

Diseño de tapa Licenciada Stella Spurio  
Impresión VCR. Impresores S.A.  
SIN: 1666-1036



### Fotos de tapa

Foto composición de tapas  
de la Revista de la CNEA  
conmemorativa de su  
décimo aniversario

## sumario

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Editorial                                                                        | 3  |
| Obituario Dr. Renato Radicella                                                   | 5  |
| Reseñas bibliográficas                                                           | 7  |
| Aclaraciones y comentarios                                                       | 7  |
| Consideraciones sobre los recursos uraníferos<br>en el mundo y en la Argentina   | 8  |
| Reactores nucleares de IVta generación                                           | 17 |
| Proceso VITROCERUS para combustibles<br>irradiados de reactores de investigación | 29 |
| La complejidad en CNEA: Una visión de<br>Planificación Estratégica               | 35 |
| CNEA al día, noticias institucionales                                            | 39 |



## Doctor Renato Radicella (1934-2011)

Hondo pesar ha causado en el ámbito de la actividad nuclear en general y en esta Comisión Nacional de Energía Atómica en particular, el fallecimiento del Dr. Renato Radicella el 22 de abril del corriente año.

Figura señera en el campo de la radioquímica en el país y en la región, supo trascender los límites de la Institución, granjeándose inequívoco respeto y reconocimiento por sus dotes intelectuales y personales. Científico e investigador de destacada actuación, desarrolló una extensa, fructífera y brillante carrera profesional en esta Comisión Nacional iniciada en su etapa fundacional, que se prolongó por cuarenta y cinco años, abarcando los campos de la investigación, la producción, la docencia, incluida la universitaria, y el gerencial, alcanzando en este último los más altos niveles jerárquicos. Ya jubilado y en calidad de Investigador Emérito de la Institución, continuó aportando a la misma por otros diez años la valiosa contribución de su experiencia hasta su fallecimiento.



Arduo resulta reseñar su prolongada y siempre fructífera labor y sus múltiples actividades, en las que puso de relieve su sólida formación profesional y sus excepcionales dotes intelectuales.

Renato Radicella nació en Messina, Italia, el 6 de julio de 1934, adquiriendo por vocación la ciudadanía argentina el 4 de noviembre de 1964. Egresado de la Universidad Nacional de Tucumán como Químico en 1955, ingresó ese mismo año en la Comisión Nacional de Energía Atómica en calidad de investigador en radioquímica, obteniendo con posterioridad en la nombrada Universidad la Licenciatura en Ciencias Químicas en 1957 y el Doctorado en Química en 1959.

En 1958 fue comisionado por la CNEA para realizar estudios e investigaciones de post-grado en la División de Química Nuclear de la Universidad de Oslo, Noruega; y en 1966 para desempeñarse en calidad de Colaborador Científico Extranjero en el Centro de Estudios Nucleares de Saclay, Francia, donde realizó investigaciones en su especialidad.

A partir de su ingreso en la CNEA participó activamente en numerosas investigaciones en el campo de la radioquímica, en particular en la búsqueda de nuevos radio nucleídos y en la determinación de sus propiedades, integrando el que fuera conocido internacionalmente como el "Grupo de Buenos Aires" que lograra en esos años pioneros el descubrimiento de 20 nuevos radioisótopos.

Resulta importante destacar el relevante papel del Dr. Radicella en la actividad productiva de la casa, en la que además de haber desarrollado nuevos métodos de producción de radioisótopos, organizó y dirigió a partir de 1961 el Programa de Producción de Radioisótopos (luego Departamento de Producción de Radioisótopos), siendo designado con posterioridad Gerente de Radioisótopos y Radiaciones en 1973 y Director del Área de Radioisótopos y Radiaciones en 1974.

En 1977 se hace cargo de la Jefatura del Proyecto Centro Atómico Perú (conocido a partir de 1978 como Proyecto Perú), y en 1980 es designado Director de Proyectos Internacionales, en el marco de cuyas funciones concretó con pleno éxito la primera exportación significativa de tecnología de punta realizada por el sector nuclear argentino, que se convirtiera en la vidriera que posibilitó a otros organismos del sector el logro de varias exportaciones tecnológicas de singular importancia.

Entre 1980 y 1987 estuvo en repetidas oportunidades a cargo de la Presidencia de la CNEA, y entre diciembre de 1983 y enero de 1984 ejerció la Presidencia Interina de la Institución. En 1989 fue designado miembro del para ese entonces recientemente recreado Directorio de la misma.

Pero su actuación en el campo nuclear no estuvo restringida al ámbito de la CNEA. Entre 1980 y 1984 se desempeñó como miembro del Directorio de la empresa INVAP S.E. y entre ese año y 1989 como Presidente del mismo, y en 1987 fue designado Presidente del Directorio y Gerente General de la empresa ENACE, funciones que cumplió hasta 1989, al igual que las anteriores en forma relevante.

También fue socio fundador y miembro de la Comisión Directiva y Vicepresidente de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, socio fundador y miembro de la Comisión Directiva de la Sociedad Argentina de Biología y Medicina Nuclear, miembro del Colegio Directivo de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias y Presidente de la Mutual del Personal de la CNEA.

Su figura trascendió al campo internacional, en el que tuvo destacada actuación en la promoción y el desarrollo de la actividad nuclear en Latinoamérica, sea a través de la gestión de la cooperación técnica de la CNEA con sus instituciones hermanas de la región, cuanto en sus funciones como integrante del Consejo Consultivo de la Comisión Interamericana de Energía Nuclear y como Jefe de la División América Latina del Departamento Cooperación Técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica. Además, representó dignamente al país en calidad de integrante de las Delegaciones Argentinas en un sinnúmero de importantes eventos internacionales, destacándose por sus dotes

diplomáticas y su capacidad intelectual y profesional.

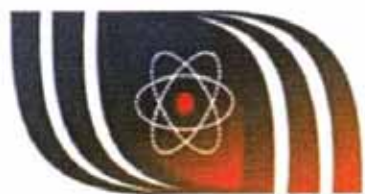
En el campo de la docencia se desempeñó en la Cátedra de Fisicoquímica y Radioquímica y en el Instituto de Radiología y Oncología de Universidad Nacional de Tucumán y en las Facultades de Ciencias Exactas y Naturales y de Farmacia y Bioquímica de la Universidad de Buenos Aires en las que cumplió diversas funciones.

Al jubilarse luego de cuarenta y cinco años de servicios, sus méritos le valieron ser designado Investigador Emérito de la CNEA, función desde la cual continuó aportando a la misma la valiosa contribución de su experiencia hasta su reciente desaparición.

El Dr. Radicella participó en la autoría de más de una cincuentena de invalorable artículos y libros científicos, varios de ellos considerados señeros en el campo de la radioquímica en general y en el de la producción y aplicación de radioisótopos en particular, disciplinas en la que se convirtió en obligado referente a niveles nacional y regional.

Sus merecimientos profesionales le valieron el Premio de KONEX de Ciencia y Tecnología 1983 y el Premio Desarrollo de la Energía Nuclear en América Latina Año 2001 de la Sección Latinoamericana de la *American Nuclear Society*, y ser condecorado como Oficial de la Orden al Mérito por Servicios Distinguidos de la República del Perú en 1978 y declarado Huésped Distinguido de la Ciudad de La Paz, Bolivia, en 1981.

Pero además de por sus méritos profesionales, el Dr. Radicella se destacó por su entrega a la Institución y por su personalidad que despertó siempre sincero aprecio y un profundo respeto. Quienes tuvieron el privilegio de conocerlo, trabajar con él y aprender de él, guardarán de él un recuerdo imborrable.



## **NA-SA NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA S.A.**

**NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA** fue fundada el 7 de septiembre de 1994 con el propósito de constituirse en uno de los actores claves del Mercado de generación eléctrica en la Argentina. Cuenta para ello con las Centrales Nucleares Atucha I y Embalse, las cuales se encuentran en operación desde 1974 y 1984 respectivamente. Además, tiene en construcción la Central Nuclear Atucha II.

**NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA** es una empresa comprometida con la generación de energía nucleoelectrica en forma segura, eficiente, competitiva y limpia. Estos valores son los que guían su actuación en el Mercado Eléctrico Mayorista Argentino, uno de los más desregulados y competitivos del mundo.

### **NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA S.A.**

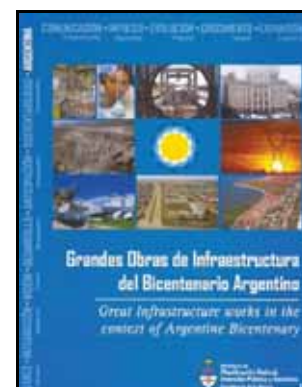
Arribeños 3619 Buenos Aires . Argentina - (C1429 BKQ)  
Tel. (54 11) 4701-1643/8514/4651 - Fax (54 11) 4701-0401  
Info@na-sa.com.ar - www.na-sa.com.ar



## Reseñas bibliográficas

Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios – Presidencia de la Nación.  
Grandes Obras de Infraestructura del Bicentenario Argentino. 2010

Rústica 21,5 x 29 cm  
175 páginas



En el marco del Congreso Mundial de Ingeniería que se llevó a cabo en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires del 17 al 20 de octubre de 2010, el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios elaboró esta publicación editada en idiomas castellano e inglés y la distribuyó a todos los participantes en el mencionado Congreso y a los Colegios Profesionales de Ingeniería.

Destaca los grandes objetivos realizados y en curso basados en dos conceptos: el desarrollo económico de acumulación con matriz diversificada e inclusión social y el plan de intervención territorial que tiende a definir la infraestructura económica, social y de trabajo para que el ciudadano pueda desarrollarse en su lugar de origen, pueblo o provincia.

Comprende tres capítulos:

- Desarrollo económico productivo. Describe 17 grandes obras que impactan en la cadena productiva, comercial e industrial como así también en la inserción de la Argentina en el mundo. Allí está incluida la terminación de la Central Nuclear Atucha II con el lema “más energía a partir del segundo semestre de 2011” y la extensión de vida de la Central Nuclear Embalse.
- Desarrollo económico social. Describe 12 obras que generan un gran impacto social.
- Inversiones complementarias para el desarrollo del modelo productivo. Describe 7 grandes proyectos futuros, entre ellos el CAREM como prioridad en la política nuclear.

Las tres grandes obras nucleares han sido detalladas con sus características históricas, su presente y el aporte que darán al mejoramiento de la calidad de vida de los argentinos.

## Aclaraciones y comentarios

En relación con el artículo publicado en la Revista de la CNEA - Año X - Número 37/38 - período enero/ junio de 2010, titulado: “El desarrollo nuclear argentino”, del cual es autor Roberto Ornstein, consignamos dos aclaraciones del Lic. José Boado que constituyen un aporte muy oportuno para clarificar sendos aspectos significativos de ese desarrollo.

En el citado artículo, en la página 13, columna izquierda, línea 40 se señala que el reactor RA-6 fue diseñado y construido por la empresa asociada INVAP S. E. En realidad, la ingeniería en todas sus fases fue desarrollada en el entonces Departamento de Reactores Nucleares de la CNEA, gracias a lo cual primó la decisión de que el reactor fuese argentino y no un modelo TRIGA importado como algunos prohijaban. La empresa INVAP proveyó la construcción, habiendo sido los directores del proyecto designados por la CNEA.

Respecto de la Planta de Enriquecimiento de Uranio, a cuyo desarrollo se hace mención en la página 13, columna derecha, primera línea, el mismo debe ser considerado como realizado en forma conjunta por la CNEA e INVAP. Los desarrollos iniciales fueron llevados a cabo por personal de la CNEA y luego INVAP llevó adelante la construcción y la operación de las instalaciones en Pilcaniyeu, en muchos casos con ingeniería y desarrollos propios, aunque siempre con una activa participación de la CNEA.

## Consideraciones sobre los recursos uraníferos en el mundo y en la Argentina

LUIS LÓPEZ – Jefe Departamento Innovación Tecnológica- Gerencia de Exploración de Materias Primas – Comisión Nacional de Energía Atómica.

**Los recursos mundiales identificados de uranio (U) provenientes de fuentes convencionales ascienden a 5.469.000 t U, considerando la categoría de costos de producción por debajo de los USD 130/kg U. La información existente sobre la estimación de recursos uraníferos asociados a fuentes no convencionales dista de ser completa, pero de todas maneras éstos están evaluados en 8.124.989 t U.**

**La actual producción de uranio en el mundo proviene principalmente de recursos convencionales y en 2009 ascendió a 50.572 t U, correspondiendo el 57% a las mineras convencionales a cielo abierto y subterránea, el 36% a lixiviación in situ (ISL) y el 7% a uranio obtenido como subproducto. Las fuentes no convencionales pueden ganar importancia en el futuro en la medida en que los recursos de alta ley se vayan agotando progresivamente.**

**Los recursos uraníferos identificados provenientes de fuentes convencionales serían suficientes para los próximos 90 años considerando la tasa de consumo de 2009. Si se tiene en cuenta el escenario más optimista de crecimiento de la energía nuclear planteado en 2010, con la mitad de los recursos identificados existentes se cubriría la demanda de uranio por los próximos 25 años.**

**En la Argentina los recursos razonablemente asegurados e inferidos son del orden de las 16.000 t U (< USD 130/ kg U) y provienen casi exclusivamente de los yacimientos Sierra Pintada y Cerro Solo.**

*The uranium identified resources from conventional sources amount to 5,469,000 t U at the production costs < USD 130 / kg U. The existing information on the estimates of uranium resources associated with unconventional sources is still incomplete but they are evaluated in 8,124,989 t U.*

*Current production of uranium is mainly generated from conventional resources. In 2009, world uranium production was 50,572 t where open pit and underground conventional mining methods accounted 57%, on site leaching accounted 36% and the remaining share of 7% corresponded to uranium obtained as byproduct. Uranium unconventional sources will most likely gain importance in the future, as the high grade conventional resources get progressively depleted.*

*The identified resources from conventional sources would suffice until the end of the century if consumption rates follow 2009 consumption pattern. It is estimated that even with the highest anticipated demand set up in 2010, less than 50% of the uranium resources would be consumed in the next 25 years.*

*In Argentina, the current uranium identified resources are approximately 16,000 t U (< USD 130 / kg U) and belong to Sierra Pintada and Cerro Solo deposits.*

### Generalidades del uranio

El uranio es un metal de la serie de los actínidos de número atómico 92 y masa atómica 238,05079. Posee tres isótopos naturales de los cuales el  $^{238}\text{U}$  es el más abundante con el 99,284% de ocurrencia, seguido por el  $^{235}\text{U}$  con el 0,711% y cantidades muy subordinadas de  $^{234}\text{U}$ . De estos isótopos sólo el  $^{235}\text{U}$  es fisionable y es la base del combustible nuclear utilizado en los reactores de potencia actuales.

Este elemento está presente en todos los materiales naturales. Sus concentraciones son normalmente bajas, con un promedio de 2,7 ppm en la corteza continental superior (1,7 para la corteza total) y 0,0032 ppm en el agua de mar. En la Tabla 1 se presentan los contenidos medios de uranio en diferentes materiales naturales.

El uranio se encuentra formando minerales propios, como elementos sustitutos en minerales principales y accesorios, ocupando posiciones de intercambio en zeolitas y minerales arcillosos, adsorbido en superficies cristalinas, disuelto en fluidos

intergranulares y en inclusiones fluidas. Los estados de oxidación en que puede presentarse son  $\text{U}^{4+}$ ,  $\text{U}^{5+}$  y  $\text{U}^{6+}$ , en la forma de ion uranilo ( $\text{UO}_2^{2+}$ ). Se puede destacar que aproximadamente el 5% de todos los minerales conocidos contienen uranio como un constituyente estructural esencial (Cuney y Kyser, 2008).

### Depósitos de uranio

Un depósito mineral es una zona o cuerpo de concentración de recursos minerales (Townley, 2010). En el caso del uranio y más allá de su ubicuidad y sus niveles de concentración en la naturaleza, la generación de un depósito de interés requiere de condiciones especiales y de la concurrencia de factores favorables en términos de roca fuente, procesos de disolución, movilización y preconcentración, una trampa que permita la depositación en tonelajes y tenores de importancia económica, y finalmente, buenas condiciones de preservación de la mineralización formada.

Tabla 1. Contenidos de uranio en materiales naturales (Cuney y Kyser, 2008)

| MATERIAL                     | ppm          |
|------------------------------|--------------|
| Corteza promedio             | 1,7          |
| Corteza oceánica             | 0,5          |
| Corteza continental Superior | 2,7          |
| Peridotita                   | 0,003 – 0,05 |
| Eclogita                     | 0,013 – 0,8  |
| Basalto promedio             | 0,07 – 0,1   |
| Andesita continental         | 0,5 – 1,0    |
| Andesita de arco de isla     | 0,2 – 0,4    |
| Granodiorita promedio        | 2,0          |
| Granito promedio             | 3,8          |
| Sienita nefelínica           | 200 – 600    |
| Lutita común                 | 3,7          |
| Lutita negra carbonosa       | 3 – 1.250    |
| Arenisca                     | 0,45 – 3,2   |
| Roca carbonática media       | 2,2          |
| Rocas fosfáticas marinas     | 50 – 300     |
| Rocas evaporíticas           | 0,01 – 0,43  |
| Agua de mar                  | 0,003        |

En el mundo existen unos 1.024 depósitos de uranio informados e incluidos en la base de datos UDEPO (OIEA, 2009), 838 de los cuales se encuentran clasificados de acuerdo a sus tonelajes y tenores en la Tabla 2 (Tulsidas, 2009). La clase de mayor frecuencia de depósitos de uranio corresponde al rango de 1.000 - 10.000 t U y de contenidos de 0,10 al 1 % de U, donde a modo de ejemplo, se encuentran los depósitos argentinos de mayor importancia (Cerro Solo y Sierra Pintada). Existen muy pocos yacimientos con altísimos tonelajes y concentraciones, como es el caso del depósito canadiense McArthur River con 260.000 t U de reservas con una ley mineral del 13% U (Cameco, 2011). Por otra parte, puede puntualizarse que se cuenta con depósitos que si bien poseen leyes muy bajas pueden contener grandes tonelajes de uranio. A esta última categoría corresponde Olympic Dam en Australia que posee recursos de más de 950.000 t U con tenores del orden de 0,024 % U (BHP Billiton, 2011).

Tabla 2. Distribución de depósitos uraníferos mundiales por tonelajes y leyes (Tulsidas, 2009)

| Recursos Uraníferos t U             |             |             |              |                  |           |       |     |
|-------------------------------------|-------------|-------------|--------------|------------------|-----------|-------|-----|
|                                     | < 500       | 500 – 1.000 | 1.000-10.000 | 10.000 – 100.000 | > 100.000 | Total |     |
| L<br>e<br>y<br>e<br>s<br><br>%<br>U | < 0,03      | 3           | 9            | 65               | 32        | 6     | 115 |
|                                     | 0,03 – 0,10 | 13          | 26           | 96               | 31        | 6     | 172 |
|                                     | 0,10 – 1,00 | 33          | 106          | 282              | 89        | 7     | 517 |
|                                     | 1,00 – 5,00 | 5           | 3            | 13               | 10        | 0     | 31  |
|                                     | > 5,00      | 0           | 0            | 1                | 0         | 2     | 3   |
| Total                               | 54          | 144         | 457          | 162              | 21        | 838   |     |

### Minería del uranio

Más allá del encuadre que pueda darse al uranio desde el punto de vista estrictamente minero, la gran importancia de su ciclo productivo reside en el hecho de constituir la primera etapa de generación nucleoelectrónica y consecuentemente, del ciclo del combustible nuclear asociado, el que se encuentra esquematizado en la Figura 1 (Waggitt, 2010).

La minería del uranio comprende todas las actividades involucradas en la producción de concentrados de uranio natural para su utilización como combustible en la generación de energía nuclear y aplicaciones similares. De una manera simplificada comprende: exploración uranífera, estudios de factibilidad, minería propiamente dicha y desarrollo de instalaciones de producción y procesamiento, desmantelamiento y remediación. El manejo de todo lo concerniente al ambiente, asuntos regulatorios, comunicación social e involucramiento de todos los actores de un determinado proyecto ("stakeholders"), es una parte integral de todas estas actividades. En síntesis, el ciclo minero comienza por la exploración uranífera cuyo objetivo consiste en identificar y evaluar recursos que sean factibles de ser explotados para producir concentrados de uranio ("yellowcake").

### Recursos uraníferos convencionales

Los recursos uraníferos convencionales son aquellos a partir de los cuales el uranio es recuperado como producto principal o bien como co-producto o sub-producto de importancia. Los recursos identificados en 2009 ascienden a 5.469.000 t U en la categoría de costos de producción inferior a USD 130/ kg U, los que se incrementan a 6.306.300 t U si se considera como límite superior al costo de producción de USD 260/ kg U. En la Tabla 3 se muestra la clasificación de recursos uraníferos de acuerdo al grado de conocimiento geológico y a los costos de producción, la que es tomada como referencia en la publicación bianual de la OECD – NEA e IAEA conocida como "Red Book" (OECD-NEA e IAEA, 2010).



Figura 1. Esquema del ciclo del combustible nuclear.  
(Waggitt, 2010)

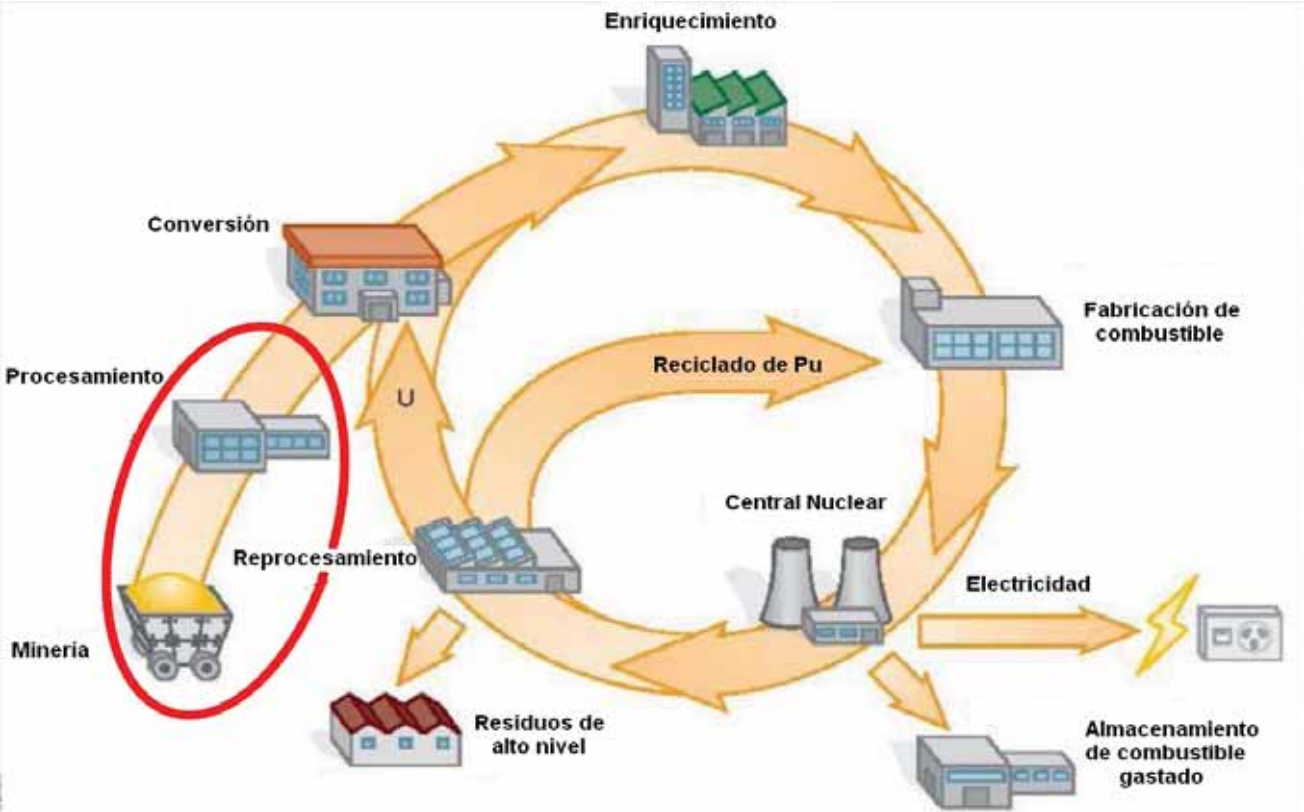


Tabla 3. Clasificación de recursos uraníferos.  
(OECD-NEA e IAEA, 2010)

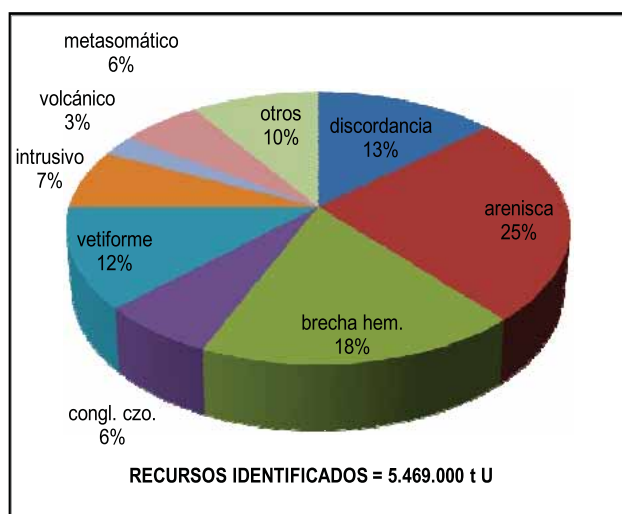
| RECURSOS IDENTIFICADOS                                                                         |                       |                                          |                       | RECURSOS NO DESCUBIERTOS  |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| C<br>O<br>S<br>T<br>O<br>S<br><br>D<br>E<br><br>P<br>R<br>O<br>D<br>U<br>C<br>C<br>I<br>O<br>N | < U\$S 40 / kg U      | RECURSOS<br>RAZONABLEMENTE<br>ASEGURADOS | RECURSOS<br>INFERIDOS | RECURSOS<br>PRONOSTICADOS | RECURSOS<br>ESPECULATIVOS |
|                                                                                                | U\$S 40 - 80 / kg U   | RECURSOS<br>RAZONABLEMENTE<br>ASEGURADOS | RECURSOS<br>INFERIDOS |                           |                           |
|                                                                                                | U\$S 80 - 130 / kg U  | RECURSOS<br>RAZONABLEMENTE<br>ASEGURADOS | RECURSOS<br>INFERIDOS | RECURSOS<br>PRONOSTICADOS |                           |
|                                                                                                | U\$S 130 - 260 / kg U | RECURSOS<br>RAZONABLEMENTE<br>ASEGURADOS | RECURSOS<br>INFERIDOS | RECURSOS<br>PRONOSTICADOS |                           |
|                                                                                                |                       | GRADO DE CONOCIMIENTO GEOLÓGICO          |                       |                           |                           |

Figura 2. Distribución global de los recursos uraníferos identificados (< USD 130/ kg U).  
(AEN – NEA e IAEA, 2010)



Considerando los tipos geológicos definidos por Dahlkamp (1993) y la categoría de costos de producción menor a < USD 130/ kg U, los mayores recursos se encuentran ligados a areniscas (25%), brechas hematíticas (18%), discordancias (13%) y vetiformes (12%), según se exhibe en la Figura 3 (Slezák, 2009).

Figura 3. Distribución de recursos identificados de uranio por tipos geológicos (Slezák, 2010)



En la Argentina los recursos razonablemente asegurados e inferidos son del orden de 16.000 t U en la categoría de costos de producción menor a USD 130/ kg U (Sardin, 2009). Los mismos provienen casi exclusivamente de los yacimientos Sierra Pintada (Mendoza) y Cerro Solo (Chubut), los que corresponden a los tipos geológicos de depósitos de uranio “volcánico y en caldera” (subtipo vulcanoclástico) y “arenisca” (subtipo paleocanal), respectivamente (Salvarredi, 1999; Fuente y Gallone, 1999; Bianchi y Páez, 2005).

### Recursos uraníferos no convencionales

Los recursos no convencionales son aquéllos a partir de los cuales el uranio puede ser recuperado como sub-producto minoritario, ocurre en muy bajas leyes o bien requiere de tecnologías innovativas para su extracción minera y procesamiento (OECD – NEA e IAEA, 2010; Schnell, 2009). Éstos incluyen al uranio asociado a rocas fosfáticas, menas no ferrosas, carbonatitas, arenas costeras monacíticas, lutitas negras, lignitos, cenizas de carbón, colas de minería y el agua de mar.

La información existente sobre la estimación de recursos uraníferos asociados a fuentes no convencionales dista de ser completa. De todas formas, a partir de los datos conocidos, los recursos uraníferos no convencionales mundiales están evaluados en 8.124.989 t U, con aporte de 7.546.960 t U de las fosforitas, 464.669 t U de las lutitas negras, 83.320 t U de los lignitos y las 30.040 t U remanentes provenientes de otras fuentes (Tulsidas, 2009) (ver Figura 4).

Figura 4. Distribución de los recursos de uranio no convencionales (Tulsidas, 2009)



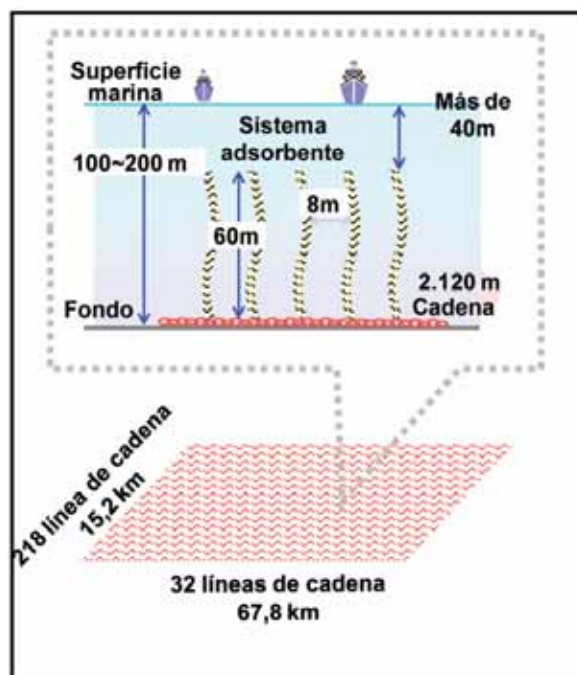
De los tipos mencionadas, los fosfatos también son la principal fuente de recursos no convencionales a partir de la cual el uranio ha sido recuperado en el pasado. Si bien hasta ahora la producción de uranio a partir de rocas fosfáticas ha sido considerada marginal desde el punto de vista económico, podría convertirse en una opción competitiva debido a la demanda creciente y a las condiciones de mercado que rigen para el uranio. Las fosforitas contienen entre 90 y 130 ppm de U, pudiendo extraerse este metal como sub-producto durante el proceso de producción del ácido fosfórico en la fabricación de fertilizantes. Los principales depósitos de fosforitas se encuentran en Marruecos, USA (Idaho y Florida), Jordania y otros países de Medio Oriente.

Otras fuentes tales como las cenizas de carbón y el agua de mar pueden ganar importancia en el futuro en la medida en que los recursos de alta ley se vayan agotando progresivamente.

El contenido de uranio de un carbón es de 1 – 10 ppm que luego del proceso de combustión se concentra en las cenizas entre uno y dos órdenes de magnitud. Para dar un ejemplo, en China recientemente Sparton Energy ha diseñado un proyecto que contempla el tratamiento de 20.000.000 toneladas de residuos generados en la usina térmica de Datang / Heshan. Estas cenizas poseen entre 130 y 150 ppm de U de donde se estima recuperar más de 2.000 t U (Baker, 2009).

Quizás el caso extremo de recursos uraníferos no convencionales está dado por el agua de mar que contiene en promedio 0,003 ppm de U. En los últimos años Japón se ha mantenido bastante activo a nivel de investigación y desarrollo en la materia y ha diseñado sistemas de bloques adsorbentes y sistemas de adsorbentes entrelazados que luego de una residencia en el mar atrapan una considerable cantidad de uranio que sirve como base para la producción de concentrados. En la Figura 5 se presenta el sistema de adsorbentes entrelazados, el que cubriendo una superficie de 67,8 x 15,2 km podría producir unas 1.200 t U en un año (Tamada, 2009).

Figura 5. Sistema de adsorbentes entrelazados (Tamada, 2009)



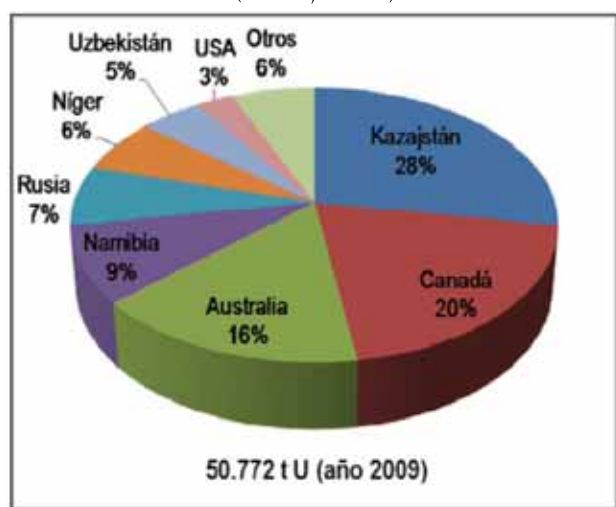
En lo que hace al uranio de fuentes no convencionales en nuestro país, podrían incluirse en esta categoría los recursos pronosticados y potenciales de granitos ricos en uranio (75 – 260 ppm U) y depósitos superficiales tipo caliche (150-200 ppm U), que si bien presentan bajos contenidos, los tonelajes pueden ser considerables (López y Cuney, 2008). También pueden incluirse en este tipo los recursos remanentes de antiguas explotaciones como es el caso del depósito de uranio Don Otto (Salta) donde a nivel de investigación y desarrollo se está analizando la factibilidad de utilizar la lixiviación en bloques a partir del laboreo subterráneo existente (López et al, 2009). Finalmente, pueden citarse las colas de minería, donde además de extraerse contenidos interesantes de uranio, desde el punto de vista ambiental significaría un impacto muy positivo, por el hecho de minimizar el contenido de uranio del material que se encuentra expuesto superficialmente.

### Producción y demanda

La actual producción mundial de uranio proviene principalmente de recursos convencionales y en 2009 fue de 50.772 t U, siendo los principales productores Kazajstán (28%), Canadá (20%), Australia (16%) y Namibia (9%) (Figura 6). Es de destacar el caso de Kazajstán, primer productor mundial, que en 2010 alcanzó las 17.803 t U, lo que significó un 27 % de incremento respecto a 2009. Este país espera un incremento del 10% en 2011 en su producción uranífera, pronosticándose una caída de este valor de crecimiento a un 2% en 2012, en función de la situación nuclear existente en Japón ocasionada por la catástrofe natural de dominio público (Tunganov, 2011).



Figura 6. Producción de uranio por países  
(WNA, 2010)



En relación a los métodos mineros, el 36% de la producción corresponde a lixiviación in situ (ISL), seguido por explotación subterránea (32%) y minería a cielo abierto (25%). El 7% restante proviene de depósitos donde el uranio es obtenido como sub-producto (Ver Fotos 1 a 3). En la Tabla 4 se encuentran listados los principales yacimientos uraníferos del mundo (WNA, 2011).

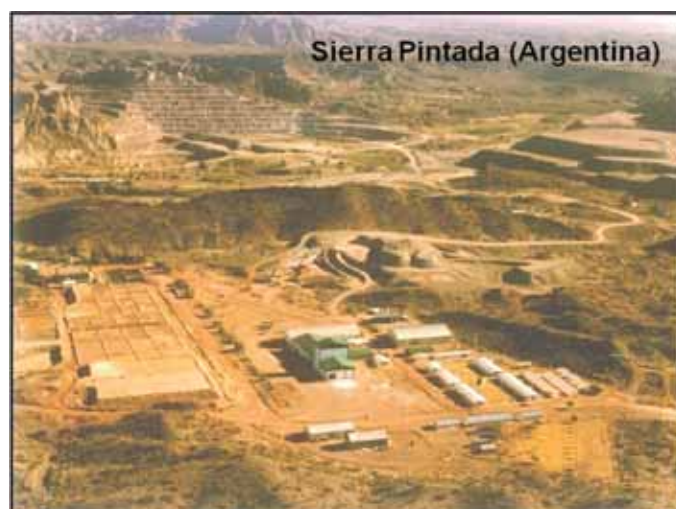
Foto 1. Minería por ISL  
Depósito de Uranio Smith Ranch (USA)



Foto 2. Minería subterránea  
Depósito de Uranio McArthur River (Canadá)



Foto 3. Minería a Cielo Abierto  
Depósito de Uranio Sierra Pintada (Argentina)



La Argentina, por su parte, cesó la producción de concentrados de uranio a fines de los 90s, cuando se había alcanzado un total histórico de 2.500 t U. De este total, el 70% correspondió al depósito Sierra Pintada (Mendoza), último complejo en producir uranio y que en la actualidad se encuentra en "stand by". También se pueden mencionar al depósito Don Otto (Salta) con el 8% del uranio producido, Schlagintweit (Córdoba) con el 6,5%, Huemul (Mendoza) con 4,9% y Los Adobes (Chubut) con el 4% del total (Lardone y Solís, 2001).

En nuestro país ha prevalecido el método de explotación a cielo abierto, habiéndose utilizado en menor medida la minería subterránea. En lo que hace a la ISL, se estudian algunas alternativas para el futuro, contándose con el apoyo de un proyecto de cooperación técnica con el OIEA abocado a la transferencia de tecnología en la materia (López, 2010).

En lo que hace a la demanda de uranio, en el mundo se encuentran en operación 438 centrales nucleares distribuidas en 30 países, las que en 2009 tuvieron un requerimiento de 68.650 t U. Es decir que para ese año el 74% del consumo fue cubierto por la producción de uranio en ese mismo período.

La relación entre producción y demanda se encuentra reflejada en la Figura 7 donde puede verse que la última se ha mantenido creciente a través de los años, mientras que la producción presentó fluctuaciones importantes manteniéndose por encima de la demanda hasta principios de los 90s. A partir de este punto se produjo un desfase negativo entre la demanda y la producción que está siendo cubierto por los "stocks" e inventarios de uranio natural y enriquecido (civil y militar), el combustible producido a partir de reprocesamiento de combustible gastado y del plutonio de programas militares y el uranio producido del re-enriquecimiento de las colas de uranio empobrecido (WNA, 2010; OECD-NEA e IAEA, 2010).

En la Tabla 5 se encuentran detallados los principales países productores y consumidores de uranio. Algunas particularidades que muestra el mercado del uranio son que grandes productores como Kazajistán,

Australia, Namibia y Uzbekistán no son usuarios de energía nuclear. Por otra parte, USA, principal consumidor de uranio con el 28 % aporta el 3 % de la producción, Japón consume el 12 % sin ser país productor y Francia consume el 15 % del uranio y si bien hoy no extrae uranio

en su territorio, lo hace en países de África, Asia y Canadá a través de su empresa estatal. Finalmente, naciones como Rusia y Ucrania guardan un equilibrio entre la producción y demanda, que es la misma situación en que se encuentra Brasil; pero en un rango de menores toneladas.

Tabla 4. Principales centros productivos de uranio (año 2009)  
(WNA, 2011)

| Mina              | País       | Tipo          | Producción (t U) |
|-------------------|------------|---------------|------------------|
| McArthur River    | Canadá     | subterránea   | 7.339            |
| Ranger            | Australia  | cielo abierto | 4.444            |
| Rossing           | Namibia    | cielo abierto | 3.520            |
| Kraznokamensk     | Rusia      | subterránea   | 3.004            |
| Olympic Dam       | Australia  | subproducto   | 2.955            |
| Tortkuduk         | Kazajstán  | ISL           | 2.272            |
| Arlit             | Níger      | cielo abierto | 1.808            |
| Rabbit Lake       | Canadá     | subterránea   | 1.447            |
| Akouta            | Níger      | subterránea   | 1.435            |
| Budenovskoye 2    | Kazajstán  | ISL           | 1.415            |
| McClellan Lake    | Canadá     | cielo abierto | 1.388            |
| Langer Heinrich   | Namibia    | cielo abierto | 1.108            |
| Central Mynkuduk  | Kazajstán  | ISL           | 1.104            |
| Akdala            | Kazajstán  | ISL           | 1.039            |
| Karamuran         | Kazajstán  | ISL           | 1.011            |
| East Mynkuduk     | Kazajstán  | ISL           | 1.001            |
| Zafarabad         | Uzbekistán | ISL           | 900              |
| South Inkai       | Kazajstán  | ISL           | 831              |
| Inkai             | Kazajstán  | ISL           | 715              |
| Smith Ranch et al | USA        | ISL           | 705              |
| Uchkuduk          | Uzbekistán | ISL           | 700              |
| Nurabad           | Uzbekistán | ISL           | 700              |
| Beverley          | Australia  | ISL           | 583              |
| Vaal River        | Sudáfrica  | subproducto   | 554              |
| Kanzhugan         | Kazajstán  | ISL           | 545              |
| Irkol             | Kazajstán  | ISL           | 502              |
| Resto             |            |               | 7.747            |
| <b>TOTAL</b>      |            |               | <b>50.772</b>    |

Figura 7. Demanda Vs. Producción a Nivel Mundial  
(WNA, 2010; OECD-NEA e IAEA, 2010)

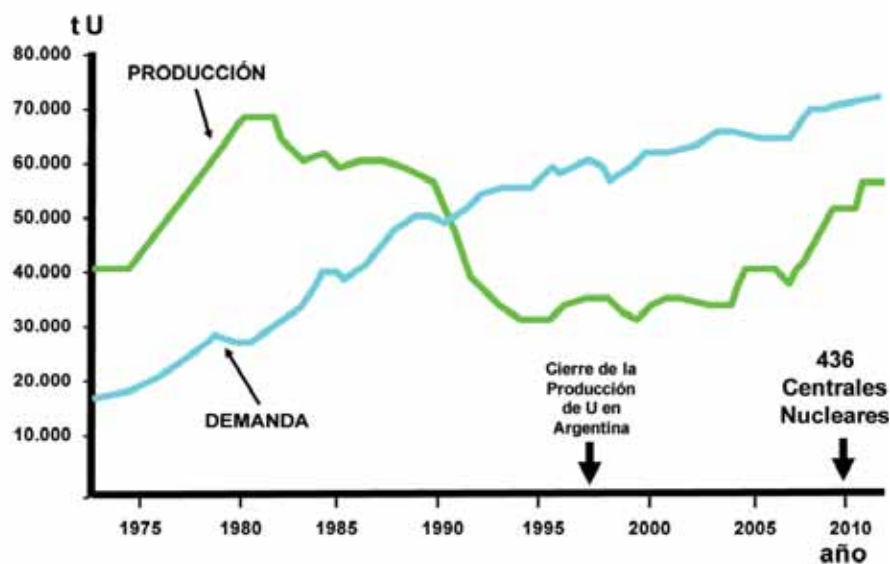


Tabla 5. Producción y demanda de uranio por países  
(OECD-NEA e IAEA, 2010; Slezák, 2010)

| PAIS         | PROD. (t U)   | %          | PAIS         | DEM. (t U)    | %          |
|--------------|---------------|------------|--------------|---------------|------------|
| Kazajstán    | 14.216        | 28         | USA          | 19.540        | 28         |
| Canadá       | 10.154        | 20         | Francia      | 10.150        | 15         |
| Australia    | 8.124         | 16         | Japón        | 8.000         | 12         |
| Namibia      | 4.569         | 9          | Rusia        | 4.140         | 6          |
| Rusia        | 3.554         | 7          | Corea Sur    | 3.450         | 5          |
| Níger        | 3.046         | 6          | Alemania     | 3.800         | 6          |
| Uzbekistán   | 2.539         | 5          | UK           | 2.030         | 3          |
| USA          | 1.523         | 3          | Ucrania      | 1.680         | 2          |
| Ucrania      | 1.015         | 2          | Canadá       | 2.240         | 3          |
| Otros        | 2.031         | 4          | Otros        | 13.620        | 20         |
| <b>Total</b> | <b>50.772</b> | <b>100</b> | <b>Total</b> | <b>68.650</b> | <b>100</b> |

Al grupo de naciones que guardan un equilibrio entre la producción y demanda perteneció históricamente nuestro país, hasta que operó el cierre de la producción nacional de concentrados, ya apuntada.

Argentina consume actualmente unas 120 toneladas de uranio por año que son importadas bajo la forma de concentrados, los cuales son procesados en la planta de conversión a UO<sub>2</sub> de Dioxitek S.A. (Córdoba). Ésta a su vez suministra el material para la fabricación de los elementos combustibles a CONUAR S.A. (Buenos Aires). Con la entrada en operación de Atucha II, la demanda local se incrementará sustantivamente y superará las 200 t U por año. Si se considera la operación restante para Atucha I y Embalse y 40 años de actividad de Atucha II, las previsiones de materia prima son de 6.400 t U.

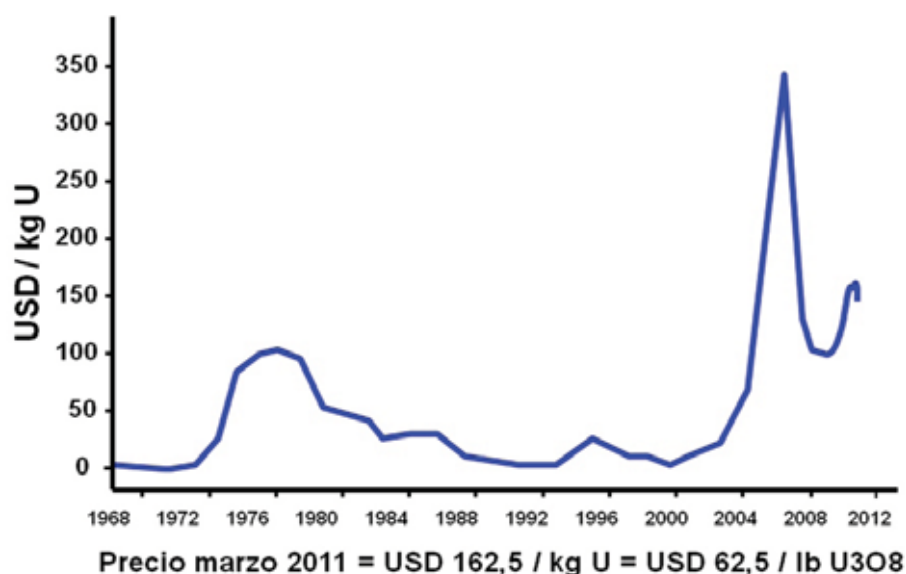
La Figura 8 muestra la evolución del precio del uranio en el mercado internacional (UxC, 2011), donde puede verse que en épocas recientes, principalmente a

partir de 2004, se registró un alza sostenida con un punto culminante en el 2007, una caída hasta 2009 y una tendencia a la suba a partir de 2010. En 2011 las fluctuaciones han sido considerables y en marzo el precio se sitúa en los U\$S 162,5/kg U.

El alza de los precios ha impactado positivamente en las inversiones en exploración, que en la actualidad rondan los USD 1.300 M, valor comparativamente muy superior al de USD 200 M registrado en 2004. Estas mayores inversiones llevaron a aumentar los recursos uranífero (< USD 260 / kg U) en un 15 % en el período 2007 – 2009.

Es oportuno también puntualizar que si bien el precio del uranio es un factor económico importante, su influencia en el costo final de la energía nuclear no es un elemento definitorio. Es menester considerar la importancia que adquiere el aspecto estratégico de disponer del recurso uranio que es la base de la fabricación del combustible nuclear.

Figura 8. Evolución del precio del uranio  
(UxC, 2011)





## CONSIDERACIONES FINALES

Del análisis realizado y tomando en consideración lo que se viene tratando en distintos foros internacionales y publicaciones de organizaciones especializadas, puede concluirse que:

- Los recursos uraníferos identificados provenientes de fuentes convencionales serían suficientes para los próximos 90 años considerando la tasa de consumo de 2009. Si se considera el escenario más optimista de crecimiento de la energía nuclear planteado en 2010, con la mitad de los recursos existentes se cubriría la demanda de uranio por los próximos 25 años.
- Debe tenerse en cuenta que los tonelajes de recursos presentados oficialmente por el OECD – NEA y la IAEA no corresponden a un inventario completo del uranio recuperable existente en el mundo. Por el contrario, existen recursos ya conocidos (USA, Rusia, Australia), pero no informados al no contarse con la

completa evaluación económica que permita incluirlos en la categoría de recursos identificados.

- De mantenerse el ritmo actual de inversiones en exploración y desarrollo minero se continuarán realizando descubrimientos y evaluando nuevos recursos uraníferos.
- También debe contemplarse que las fuentes no convencionales de uranio pueden ganar importancia en el futuro en la medida en que los recursos de alta ley se vayan agotando.
- Habida cuenta de la disponibilidad de recursos, el principal problema quizás reside en poner en operación proyectos productivos de manera sustentable para atender en el tiempo adecuado la demanda futura de uranio.
- En términos de prospectiva energética, no puede dejar de apuntarse que el desarrollo de reactores con tecnologías de avanzada afectaría positivamente la disponibilidad de uranio a largo plazo, pudiendo extenderla a cientos o miles de años.

## Referencias

Baker L., 2009. *Making Clean Energy Fuel from Unconventional Sources – Sparton Energy*. IAEA Technical Cooperation Project on ISL in Argentina. Perspectives for the evaluation of uranium resources recoverable by the block leaching technology. *Proceedings IAEA Technical Meeting on “Uranium from Unconventional Resources”*. Viena (Austria), 4 al 6 de noviembre de 2009, CD-ROM.

BHP Billiton, 2011. <http://www.bhpbilliton.com>

Bianchi R., Páez, M., 2005. Tipificación y distribución de depósitos de uranio en la cuenca del Golfo de San Jorge.

16° Congreso Geológico Argentino, La Plata (Argentina), 20-23 September, *Proceedings* (CD-ROM).

Cameco Resources Inc., 2011. <http://www.cameco.com>

Cuney M., Kyser, K., 2008. *Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration*. Mineralogical Association of Canada. *Short Course Series*. Volume 39.

Dalhkamp F., 1993. *Uranium ore deposits*, Springer-Verlag, Berlin.

Fuente A., Gayone M., 1999. Distrito uranífero Pichifán, yacimientos Los Adobes, Cerro Cóndor y Cerro Solo, Chubut. En: E. Zapettini (Ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina*, Anales N° 35 SEGEMAR, p.p. 1255-1259.

International Atomic Energy Agency, 2009. *World distribution of uranium deposits (UDEPO) with uranium deposit classification*. IAEA-TECDOC-1629.

Lardone L., Solís R., 2001. Breve historia del uranio. Informe interno CNEA.

López L., 2005. *Uranium favorability and exploration in Argentina*. IAEA International Symposium on the “Uranium production and the raw materials for the nuclear fuel cycle – supply and demand, economics, the environment, and the nuclear security”. Vienna (Austria), 20-24 June 2005 (CD-ROM).

López L., 2010. *Overview of the IAEA technical cooperation projects on ISL in Argentina*. Technical Meeting “Uranium ISL Mining”. Viena (Austria), 7 al 9 de junio de 2010.

López L., Cuney M., 2008. “Les principaux types de minéralisations uranifères en Argentine”. 22ème Réunion des Sciences de la Terre, Fédération Française de Géologie et de la Société Géologique de France, 21 – 24 avril 2008, Nancy, France. *Recueil des Résumés*: 577.

López L., Gorustovich S., Slezák J., Guidi F., 2009. IAEA Technical Cooperation Project on ISL in Argentina. Perspectives for the evaluation of uranium resources recoverable by the block leaching technology. *Proceedings IAEA Technical Meeting on “Uranium from Unconventional Resources”*. Viena (Austria), 4 al 6 de noviembre de 2009, CD-ROM.

López L., Slezák J., 2010. Recursos Uraníferos Convencionales y No Convencionales. Argentina Mining 2010. San Juan (Argentina), 31 de agosto al 2 de septiembre de 2010, CD-ROM.

Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) e International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010. *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*. OECD Publications. France.

Salvarredi J., 1999. Yacimiento Doctor Baulfés y otros depósitos del distrito uranífero Sierra Pintada, Mendoza. En: E. Zapettini (Ed.), *Recursos Minerales de la República Argentina*. Anales N° 35 SEGEMAR, p.p. 895-906.

Sardín P., 2009. Tabulación de Recursos Uraníferos en Argentina. Informe interno CNEA. Inédito.

Schnell H., 2009. *An Overview of Uranium Production from Unconventional Resources*. IAEA Technical Meeting on “Uranium from Unconventional Resources”. Vienna (Austria), 4 - 6 November 2009, CD-ROM.

Slezák J., 2009. Uranium Production Cycle Sub-programme Activities. IAEA International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM 2009), Vienna, Austria 22–26 June 2009, CD-ROM.

Tamada M. 2009. *Collection of uranium from seawater*. IAEA Technical Meeting on “Uranium from Unconventional Resources”. Vienna (Austria), 4 - 6 November 2009, CD-ROM.

Townley B., 2011. Yacimientos Minerales y Procesos Geológicos. Departamento de Geología. Universidad de Chile. <http://www.educarchile.cl>

Tulsidas H., 2009. *Unconventional Uranium Resources in UDEPO*. IAEA Technical Meeting on “Uranium from Unconventional Resources”. Vienna (Austria), 4 - 6 November 2009, CD-ROM.

Turganov D., 2011. <http://www.bloomberg.com/news/2011-03-29/kazakhstan-says-growth-in-uranium-production-will-slow-next-year.html>

Ux Consulting Company (UxC), 2011. [http://www.uxc.com/review/uxc\\_Prices.aspx](http://www.uxc.com/review/uxc_Prices.aspx).

Waggitt P., 2010. *The Uranium Production Cycle*. November 2010 edition. <http://iaea.org>

World Nuclear Association (WNA), 2010 - 2011. *World Nuclear Fuel Cycle*. [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)

Trabajo presentado en la XXXVII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Buenos Aires, 22 al 26 de noviembre de 2010.

## Reactores nucleares de IVta generación

O. E AZPITARTE. - Grupo de Reactores Avanzados – Sector Estudios de Reactores y Centrales – Gerencia Ingeniería de Reactores y Centrales Nucleares – Gerencia de Área Energía Nuclear – Comisión Nacional de Energía Atómica

**El presente trabajo tiene por objeto presentar, en primer lugar, una breve reseña de la evolución de la tecnología nuclear caracterizada por las sucesivas generaciones de reactores nucleares, para luego brindar un panorama general y actualizado sobre los diseños denominados de IVta Generación y su estado actual de desarrollo en el marco del Proyecto Internacional GIF (*Generation IV International Forum*).**

*A brief summary of the nuclear technology evolution is presented by describing the different and consecutive generations of nuclear reactors. The background of the Generation IV International Forum (GIF) is explained, and the most important features of the Generation IV nuclear reactors are presented.*

### 1. Introducción

Las principales características de las generaciones que precedieron a los denominados reactores de Generación IV eran (Ver Figura 1):

- Generación I: primeros prototipos (1950-1970) – Shippingport, Dresden, Magnox, etc.
- Generación II: líneas comerciales (1970-1990) – PWR, BWR, PHWR y GCR.
- Generación III: reactores evolutivos (a partir de 1990) – AP1000, ACR, etc.

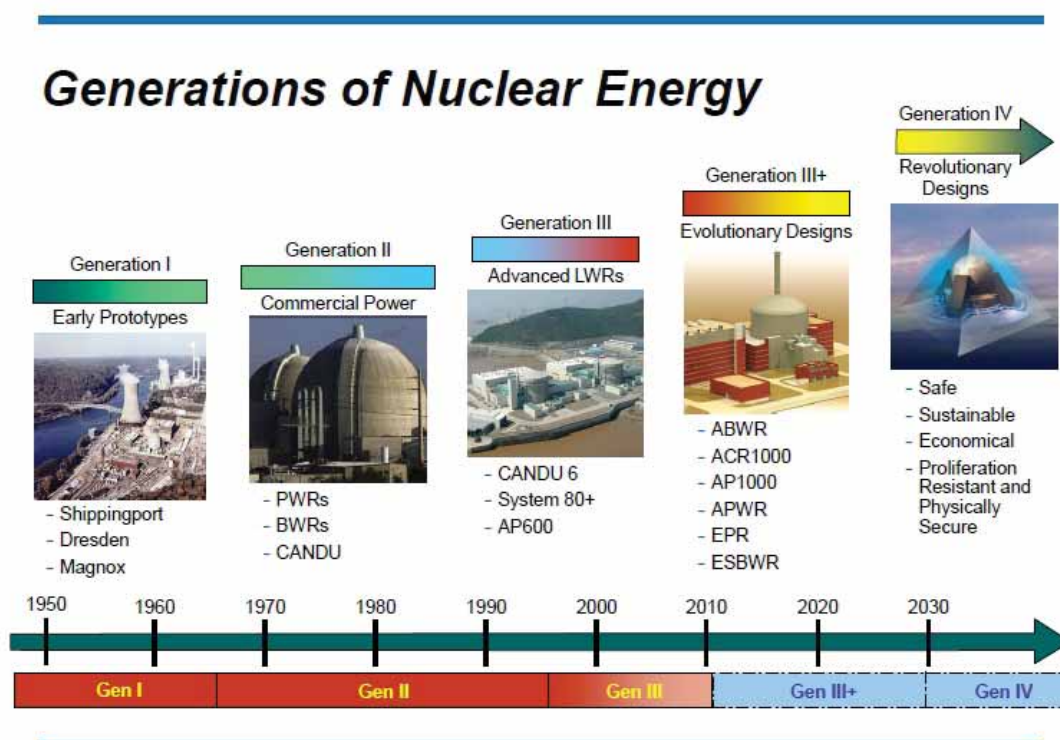


Figura 1 - Clasificación de reactores nucleares según generación [GIFRoadmap, 2001]

Como consecuencia del creciente interés global en lo referido a la conservación del medio ambiente y al uso racional de los recursos naturales, en el año 2000 se lanzó el proyecto internacional GIF, del que participan más de 10 naciones. Su objetivo es el de coordinar el desarrollo de reactores nucleares innovativos que satisfagan requerimientos de excelencia vinculados a sustentabilidad, seguridad nuclear, economía y resistencia a la proliferación.

Luego de un riguroso proceso, GIF seleccionó 6 diseños para volcar en ellos los esfuerzos de investigación y desarrollo: el *Sodium Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por sodio líquido), el *Gas Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por helio), el *Lead Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por plomo líquido), el *Super Critical Water Reactor* (reactor refrigerado por agua supercrítica), el *Very High Temperature Reactor* (reactor térmico refrigerado por helio a muy alta temperatura) y el *Molten Salt Reactor* (reactor cuyo combustible de sales fundidas de uranio está disuelto en sales fundidas refrigerantes).

Se prevé que el diseño conceptual de estos reactores esté terminado alrededor del 2020 y que podrían entrar en operación a partir del 2030.

Entre sus características principales se pueden citar:

- Espectro neutrónico rápido que facilita la transmutación de actínidos, lo que redundará en disminución del volumen y radiotoxicidad de los residuos.
- Factor de conversión cercano a uno, lo que los hace autosustentables en lo referente a consumo de material fósil.
- Ciclo de combustible cerrado, lo que permite hacer un uso más racional de los recursos naturales de material fósil y fértil.
- Sistemas de seguridad inherentemente pasivos.
- Temperaturas de operación mayores que las de los reactores actuales, lo que permite obtener mayor eficiencia en el ciclo térmico y hace posible otras aplicaciones como la producción de hidrógeno o de calor para procesos.

Si bien sus ventajas son considerables, su desarrollo presenta serios desafíos. Grandes esfuerzos de investigación se están llevando a cabo, sobre todo en las áreas de materiales y combustibles.

## 2. Antecedentes : Reactores nucleares de Generaciones I, II, III y III\*

### 2.1 Reactores nucleares de Generación I – Primeros prototipos

Una vez comprobada la posibilidad de producir energía eléctrica a partir de energía nuclear y confirmada la factibilidad de conectar los reactores nucleares a una red eléctrica, comenzó la construcción de los primeros prototipos, denominados reactores de Generación I. Estos prototipos siguieron tres líneas generales de diseño: PWR (Shippingport, USA), BWR (Dresden, USA) y GCR (Magnox, UK).

- PWR (Shippingport, USA) [Shippingport, 1980]

Estuvo en servicio en Pittsburgh, USA, entre 1957 y 1982. Era un reactor reproductor refrigerado con agua presurizada (PLWBR - *Pressurized Light Water Breeder Reactor*) que entregaba una potencia de 60 MWe. Su núcleo tenía una región central (*seed*) compuesta por placas de dióxido de uranio altamente enriquecido (HEU) cubiertas con zircaloy, y una región periférica (*blanket*) compuesta de barras cilíndricas con pellets de dióxido de uranio natural y vainas de zircaloy. El reactor operaba con ciclo indirecto utilizando 4 generadores de vapor.

- BWR (Dresden, USA) [Dresden, 1959]

Operó en Chicago, USA, entre 1960 y 1978. Era un *boiling water reactor* (BWR), con un ciclo directo similar al de los BWRs comerciales construidos posteriormente por la compañía *General Electric*. Entregaba una potencia de 912 MWe a la red. El refrigerante y moderador era agua liviana. Su núcleo estaba compuesto de barras cilíndricas con pellets de dióxido de uranio levemente enriquecido (SEU) y vainas de zircaloy.

- GCR (Magnox, UK) [Magnox, 2004]

El reactor Magnox es un GCR refrigerado con dióxido de carbono y moderado con grafito. El combustible está compuesto por barras de uranio natural metálico con vainas de una aleación de magnesio con pequeñas cantidades de aluminio denominada Magnox (de allí el nombre del reactor). La barra combustible tiene aletas (*fins*) para mejorar la transferencia térmica. El reactor opera con un ciclo indirecto, con un circuito primario que utiliza dióxido de carbono como refrigerante, generadores de vapor y un circuito secundario de agua liviana.

El Reino Unido construyó 26 reactores de la línea Magnox. Varios de ellos se encuentran aún en operación. El prototipo, conocido como Calder Hall, fue construido en Sellafield (UK) y operó entre 1956 y 2003. Constaba de cuatro unidades que entregaban 50 MWe cada una.

### 2.2 Reactores nucleares de Generación II – Reactores comerciales [Knief, 1992]

Se conoce como reactores de Generación II a las líneas de reactores comerciales que surgieron luego de la etapa de demostración de los primeros prototipos. Estos reactores fueron construidos entre las décadas de 1960 y 1990 y la gran mayoría continúa operando en el presente. Esta generación incluye a los siguientes diseños, ampliamente conocidos: PWR (*Pressurized Water Reactor*), BWR (*Boiling Water Reactor*), PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor* – CANDU), GCR (*Gas Cooled Reactor*) y LWGR (*Light Water Graphite Moderated Reactor* – RBMK).

La Tabla 1 resume las características principales de cada uno de ellos.



|                                  | <b>PWR</b>                                        | <b>BWR</b>                                           | <b>PHWR</b>                              | <b>GCR</b>                                      | <b>LWGR</b>                                      |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Combustible</b>               | UO <sub>2</sub><br>~3.5 % U <sup>235</sup><br>MOX | UO <sub>2</sub><br>~3 % U <sup>235</sup><br>MOX      | UO <sub>2</sub> nat                      | UO <sub>2</sub><br>~3 % U <sup>235</sup><br>MOX | UO <sub>2</sub><br>~2 % U <sup>235</sup>         |
| <b>Configuración combustible</b> | Pellet-vaina<br>cilíndrico<br>vertical            | Pellet-vaina<br>cilíndrico<br>vertical               | Pellet-vaina<br>cilíndrico<br>horizontal | Pellet-vaina<br>cilíndrico<br>vertical          | Pellet-vaina<br>cilíndrico<br>vertical           |
| <b>Refrigerante</b>              | H <sub>2</sub> O líq.                             | H <sub>2</sub> O en<br>ebullición<br>~15 % vapor     | D <sub>2</sub> O líq.                    | CO <sub>2</sub> gas                             | H <sub>2</sub> O en<br>ebullición<br>~15 % vapor |
| <b>Moderador</b>                 | H <sub>2</sub> O líq.                             | H <sub>2</sub> O en<br>ebullición<br>~ 15 %<br>vapor | D <sub>2</sub> O líq.                    | Grafito                                         | Grafito                                          |
| <b>Presión (MPa)</b>             | 15                                                | 7.6                                                  | 10                                       | 4                                               | 6.9                                              |
| <b>Temperatura (°C)</b>          | 301–332                                           | 278–288                                              | 267–310                                  | 640                                             | 265-284                                          |
| <b>Eficiencia térmica (%)</b>    | 33.7                                              | 32.9                                                 | 29.3                                     | 41                                              | 26                                               |
| <b>Ciclo</b>                     | Indirecto                                         | Directo                                              | Indirecto                                | Indirecto                                       | Directo                                          |
| <b>Potencia (MWe)</b>            | ~ 1.000                                           | ~ 1.000                                              | ~ 600                                    | ~ 600                                           | ~ 1.000                                          |
| <b>Quemado (MWd/t)</b>           | 33.000                                            | 27.500                                               | 7.500                                    | 18.000                                          | 20.000                                           |

Tabla 1 - Características principales de los reactores de Generación II [Knief, 1992]

Existen en la actualidad más de 400 reactores de IIda Generación en operación y la mayoría de ellos lleva más de 30 años en servicio. Esto equivale a una experiencia acumulada de más de 10.000 años-reactor.

Las dos principales limitaciones que presentan estos reactores son:

- La temperatura de operación menor de 300 °C limita la eficiencia del ciclo térmico.
- El espectro neutrónico térmico limita el coeficiente de reproducción de material fisible.

### 2.3 Reactores Nucleares de Generación III y III\* [WNA, 2010]

Debido al temor infundido en el público general por los únicos 2 accidentes mayores en la historia nuclear, Three Mile Island (USA, 1979) y Chernobyl (URSS, 1986), y también a la creciente influencia de grupos- ambientalistas antinucleares en la opinión pública, la instalación de nuevas centrales de energía nuclear de Generación II sufrió una virtual parálisis a partir del lustro 1985-1990. (Ver Figura 2).

Demandó un gran esfuerzo conjunto de la comunidad nuclear, pero finalmente se pudo demostrar a la opinión pública global que todos los reactores nucleares que operan en la actualidad, en su gran mayoría de Generación II, lo hacen con un alto grado de seguridad y confiabilidad. De hecho, satisfacen todos los requerimientos impuestos por las autoridades regulatorias de los distintos países y todos los estándares de seguridad sugeridos por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

En los últimos años la comunidad internacional y el público en general comenzó a tomar conciencia del proceso conocido como “calentamiento global”, fenómeno producido por el aumento de la concentración en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero, cuyo componente principal es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera son generadas, en gran parte, por el proceso de combustión de hidrocarburos que tiene lugar en la producción de energía eléctrica utilizando combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). Fue entonces que se reconoció la ventaja que presenta la energía nuclear. Ésta puede aportar, en forma intensiva, grandes cantidades de energía eléctrica sin emitir CO<sub>2</sub>.

A partir de entonces tuvo lugar el fenómeno global conocido como “renacimiento nuclear” (*nuclear renaissance*). En el marco de este renacimiento es que tuvo lugar la aparición de los reactores conocidos como de Generación III y III\*. Gracias a la experiencia acumulada en la operación de reactores y al avance permanente de la tecnología, la nueva generación de reactores completó la etapa de diseño y se encuentra actualmente en etapa de licenciamiento o de construcción. Estos reactores tienen una performance mejor que la de sus antecesores de Generación II.

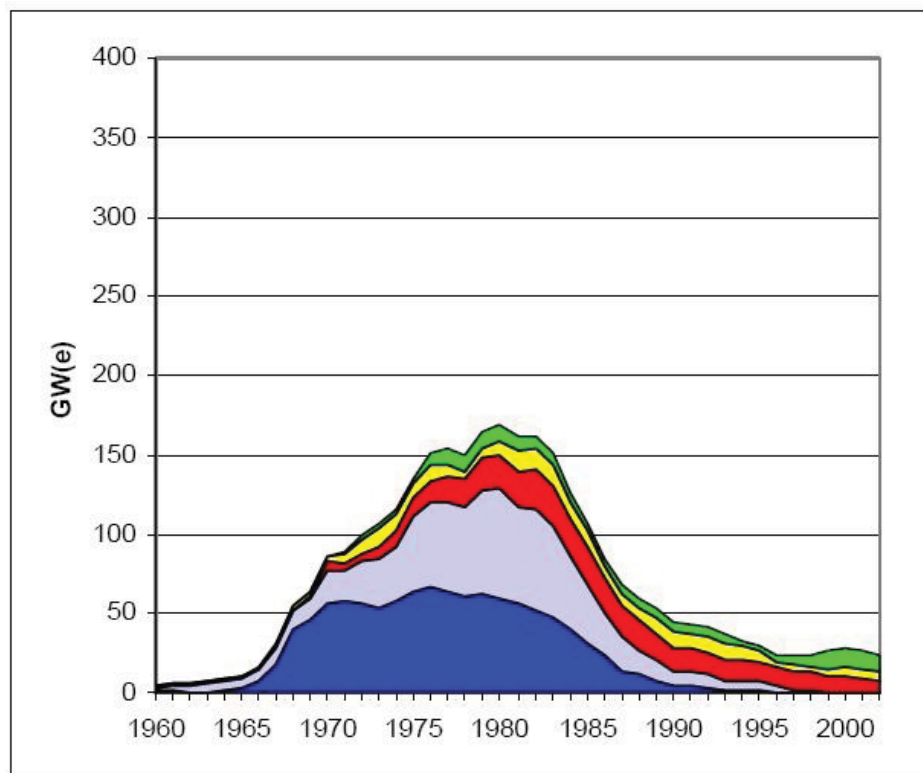


Figura 2 - Evolución de la potencia nuclear en construcción [IAEA, 2004]  
Azul: América del Norte; Celeste: Europa Occidental; Rojo: Rusia – Europa Oriental;  
Amarillo: Japón – Corea del Sur; Verde: Países en vías de desarrollo

Las principales mejoras que presentan los reactores de Generación III y III<sup>+</sup> son las siguientes:

- Sistemas de seguridad inherentemente pasivos.
- Diseño más simple y robusto que los hace más fáciles de operar y menos vulnerables a alteraciones en la operación.
- Diseño estandarizado y modular para facilitar el licenciamiento, reducir el costo de capital y reducir el tiempo de construcción. Algunos diseños mencionan un *overnight cost* de 1.200 U\$/D/KWe y un tiempo de construcción de 36 meses.
- Mayor factor de disponibilidad y una vida útil típica de 60 años.
- Reducida probabilidad de accidentes con fusión de núcleo (un orden de magnitud menor que los diseños existentes).
- Mitigación de las consecuencias en caso de fusión de núcleo (*core catcher*).
- Mayor resistencia a daños severos que provocarían liberación radioactiva por impacto de aeronave (doble contención).
- Mayor quemado que disminuye el consumo de uranio y el volumen de residuos.
- Capacidad para operar con 100% de combustible de óxidos mixtos (MOX).
- Utilización de venenos quemables para extender la vida del combustible.
- Algunos diseños pueden operar haciendo seguimiento de carga (pasar del 25% al 100% de potencia nominal en 30 minutos).

Los principales exponentes de esta generación son los siguientes reactores:

- Tipo PWR: AP1000 (Westinghouse), EPR (Areva), APWR (Mitsubishi).
- Tipo BWR: ABWR (Toshiba), ESBWR (General Electric - Hitachi).
- Tipo PHWR: ACR (AECL).

### 3. Reactores nucleares de IVta Generación

Las perspectivas sobre la demanda energética para el siglo XXI muestran un crecimiento exponencial, impulsado por el crecimiento demográfico y la mejora de la calidad de vida. En ese marco, se espera que la participación de la energía nuclear también aumente de su 16 % actual (Ver Figura 3). Ante estas hipótesis, la sustentabilidad se transforma en un requerimiento fundamental, lo que significa que el uso racional de los recursos naturales, la minimización de los residuos nucleares y la resistencia a la proliferación son consideradas ahora tan importantes como la seguridad nuclear y la economía. Además, nuevas aplicaciones de la energía nuclear han comenzado a ser tenidas en cuenta, como por ejemplo la producción de hidrógeno, la producción de calor para procesos industriales y la desalinización de agua [Braun, 2008].

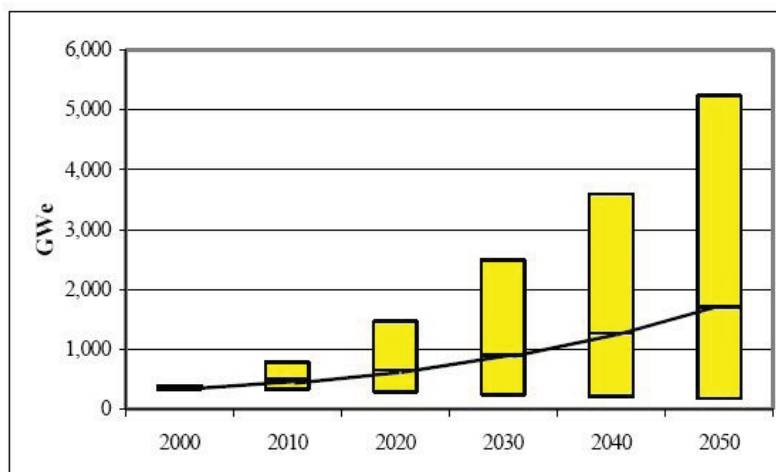


Figura 3 – Estimación de la evolución de la potencia nuclear instalada [TECDOC1434, 2004]

La consideración de las perspectivas energéticas a futuro y de los desafíos tecnológicos a afrontar hace que adquieran importancia los esfuerzos que se puedan hacer por superar las limitaciones propias de los LWRs (PWR y BWR) y PHWRs, a saber: la temperatura de operación menor de 300 °C que limita la eficiencia del ciclo térmico y el espectro neutrónico térmico que limita el coeficiente de reproducción de material fisible.

### 3.1 El Proyecto GIF (*Generation IV International Forum*)

El Proyecto GIF (*Generation IV International Forum*) fue lanzado a principios del año 2000 con la participación de nueve estados (Argentina, Brasil, Canadá, Corea del Sur, Estados Unidos, Francia, Japón, Reino Unido y Sudáfrica), a los que posteriormente se unieron cuatro más (China, Rusia, Suiza y Euratom). En la actualidad, tres de ellos son participantes no activos (Argentina, Brasil y Reino Unido) [GIFIntro, 2008].

El objetivo del Proyecto, definido en su Carta [GIFChart, 2001], es el desarrollo de conceptos para uno o más sistemas de energía nuclear de Generación IV, que puedan ser licenciados, construidos y operados de manera en que puedan proveer una fuente de energía confiable y económicamente competitiva, cumpliendo satisfactoriamente requerimientos vinculados con seguridad, gestión de residuos, no proliferación y percepción pública. A partir de ese objetivo, se definió que los reactores nucleares de IVta Generación deberían cumplir ocho metas en cuatro áreas principales [GIFRoadmap, 2001] :

#### Sustentabilidad :

- Generar energía en forma sustentable, facilitando la disponibilidad de combustible nuclear a largo plazo.
- Minimizar los residuos nucleares y disminuir la carga de su almacenamiento.

#### Seguridad y confiabilidad:

- Destacarse en seguridad y confiabilidad.
- Presentar una probabilidad muy baja de daño al núcleo.
- Eliminar la necesidad de evacuación externa fuera del sitio de la planta.

#### Economía:

- Tener un costo de ciclo menor que el de otras fuentes de energía.
- Tener un riesgo financiero asociado comparable al de otras fuentes de energía.

#### Resistencia a la Proliferación y Seguridad Física:

- Ser una ruta muy poco atractiva para el robo o la desviación de material utilizable para armas nucleares.

Luego de un minucioso proceso de selección que incluyó la evaluación de la capacidad potencial para satisfacer las ocho metas definidas, el proyecto GIF eligió 6 diseños de reactor para volcar en ellos los esfuerzos coordinados de investigación y desarrollo. Los reactores seleccionados, conocidos desde entonces como Reactores Nucleares de IVta Generación, son: **SFR** - *Sodium Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por sodio líquido); **GFR** - *Gas Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por helio); **LFR** - *Lead Fast Reactor* (reactor rápido refrigerado por plomo líquido); **SCWR** - *Super Critical Water Reactor* (reactor refrigerado por agua supercrítica); **VHTR** - *Very High Temperature Reactor* (reactor térmico refrigerado por helio a muy alta temperatura); **MSR** - *Molten Salt Reactor* (reactor cuyo combustible de sales fundidas de uranio está disuelto en sales fundidas refrigerantes).

Los países miembros de GIF adhirieron, entonces, en forma individual, al proyecto de desarrollo de cada reactor particular (Ver Figura 4): VHTR: 9 países; SFR: 6 países; GFR: 4 países; SCWR: 3 países; LFR: 2 países y MSR: 2 países.



# System Partners

Apr 2008

|      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| VHTR | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                  | ◆                                                                                   | ◆                                                                                   | ◆                                                                                   |
| GFR  |                                                                                   | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 |                                                                                   | ◆                                                                                  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| SFR  |                                                                                   | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 |                                                                                    | ◆                                                                                   | ◆                                                                                   |                                                                                     |
| SCWR | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 |                                                                                   | ◆                                                                                 |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| LFR  |                                                                                   | ◆                                                                                 |                                                                                   | ◆                                                                                 |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| MSR  |                                                                                   | ◆                                                                                 | ◆                                                                                 |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |

Partners: NRCan JRC CEA JAEA, ANRE MEST, KOSEF PSI DOE CAEA, MOST DME

- ANRE – Agency for Natural Resources and Energy (JP)

CAEA – China Atomic Energy Authority (CN)

CEA – Commissariat à l’Énergie Atomique (FR)

DME – Department of Minerals and Energy (ZA)

DOE – Department of Energy (US)

JAEA – Japan Atomic Energy Agency (JP)

JRC – Joint Research Centre (EU)

KOSEF – Korean Science and Engineering Foundation (KR)

MEST – Ministry of Education, Science and Technology (KR)

MOST – Ministry of Science and Technology (CN)

NRCan – Natural Resources Canada (CA)

PSI – Paul Scherrer Institute (CH)
- VHTR – Very-High-Temperature Reactor

GFR – Gas-Cooled Fast Reactor

SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor

SCWR – Supercritical Water-Cooled Reactor

LFR – Lead-Cooled Fast Reactor

MSR – Molten Salt Reactor

<http://www.gen-4.org/GIFGovernance/system.htm> <http://www.gen-4.org/GIFGovernance/framework.htm> 21

Figura 4 - Países e instituciones participantes de cada proyecto [GIFRoadmap, 2001]

El cronograma acordado para el desarrollo y la implementación de estos reactores incluye tres etapas: viabilidad (demostración de la viabilidad), performance (desarrollo de la tecnología que asegure la performance deseada) y demostración (construcción de prototipo). Según se muestra en la Figura 5, cada reactor tiene su cronograma particular, pero todos estarían en condiciones de ser construidos a partir del 2025. [GIFRoadmap, 2001].

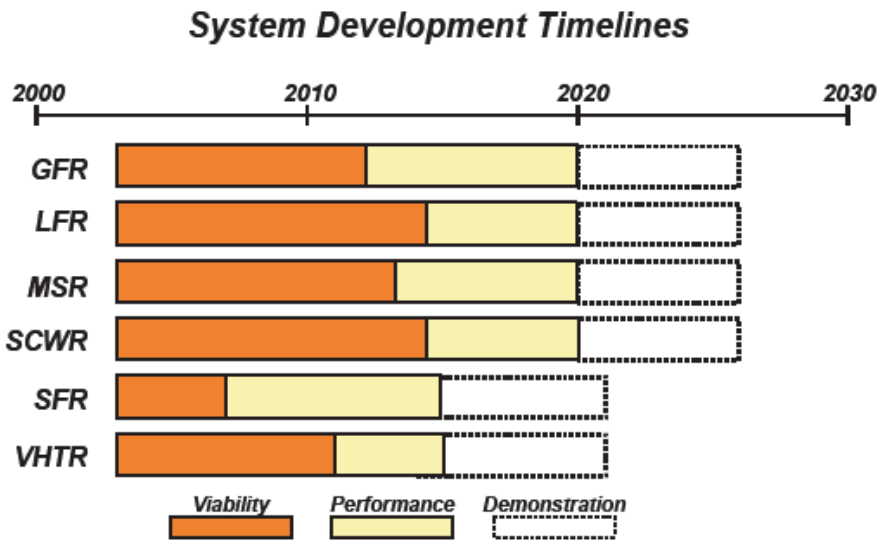


Figura 5 – Cronograma de implementación de cada proyecto [GIFRoadmap, 2001]

La Figura 6 muestra los montos previstos para afrontar las dos primeras etapas (viabilidad y performance) del desarrollo de cada reactor. Esos montos varían entre 610 y 1.000 millones de dólares, lo que da una idea de la magnitud del esfuerzo requerido.

| Reactor     | Inversión estimada (M U\$D) |
|-------------|-----------------------------|
| <b>GFR</b>  | <b>940</b>                  |
| <b>LFR</b>  | <b>990</b>                  |
| <b>MSR</b>  | <b>1000</b>                 |
| <b>SCWR</b> | <b>870</b>                  |
| <b>SFR</b>  | <b>610</b>                  |
| <b>VHTR</b> | <b>670</b>                  |

Figura 6 – Inversión estimada para las primeras 2 fases de cada proyecto [GIFRoadmap, 2001]

### 3.2 VHTR (*Very High Temperature Reactor*) (Ver Figura 7).

- Participan: Canadá, China, Corea del Sur, Estados Unidos, Euratom, Francia, Japón, Sudáfrica y Suiza.
- Aplicación: electricidad y producción de hidrógeno (método termo-químico sulfuro/iodo o electrólisis de alta temperatura).
- Potencia: 600 MWt.
- Espectro neutrónico: térmico.
- Refrigerante: Helio.
- Temperaturas de operación: Tin: 640 °C, Tout: 900 a 1000 °C.
- Moderador: grafito.
- Combustible: partículas TRISO en *pebbles* o *blocks* (Ver Figura 8). Núcleo de UO<sub>2</sub> con recubrimiento de SiC y PyC (carbono pirolítico) o núcleo de UCO (*uranium oxycarbide*) con recubrimiento de ZrC.
- Quemado postulado: 150000 / 200000 MWd/t.
- Ciclo de combustible asociado: abierto.
- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Combustible y reprocesamiento.
  - Materiales: grafito para núcleo e internos, metales para internos, tuberías, válvulas, intercambiadores de calor y turbina, y cerámicos para vainas, intercambiadores de calor y componentes de turbina.
  - Construcción: nuevos métodos de soldadura y tratamiento térmico.
- Principales ventajas: alta eficiencia térmica; el helio es químicamente compatible con el agua y los materiales estructurales; la activación del helio es despreciable.
- Principales desventajas: las altas temperaturas imponen mayor exigencia sobre la performance térmica del combustible y materiales estructurales; exige una mayor potencia de bombeo por la menor capacidad de extracción de calor del helio en relación a los metales.

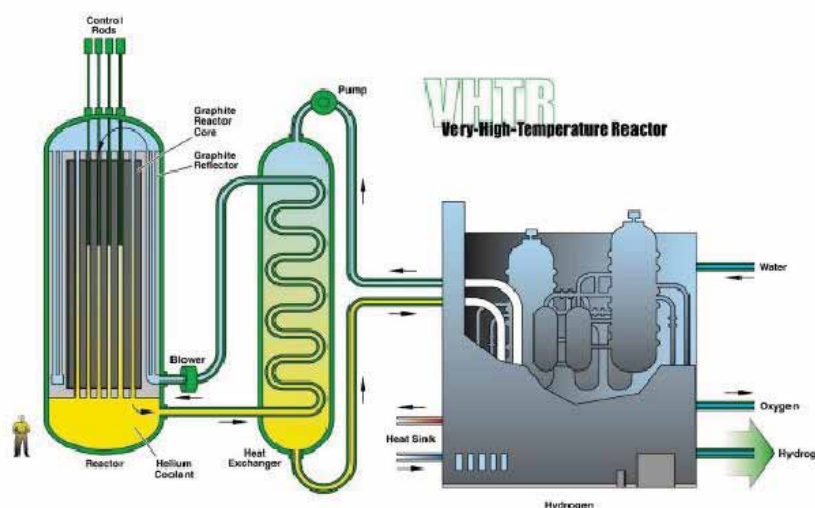


Figura 7 - VHTR - *Very High Temperature Reactor* [GIFRoadmap, 2001]

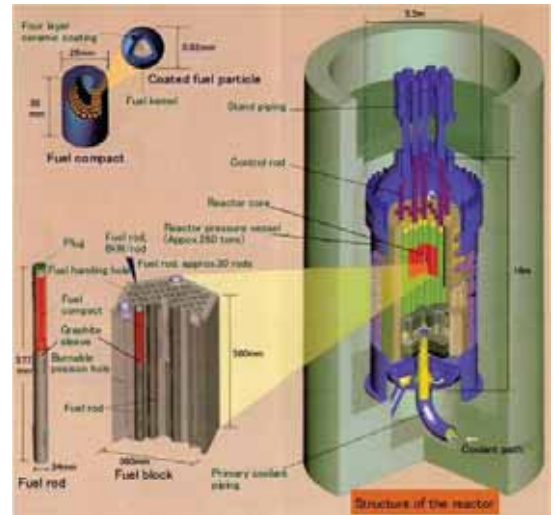
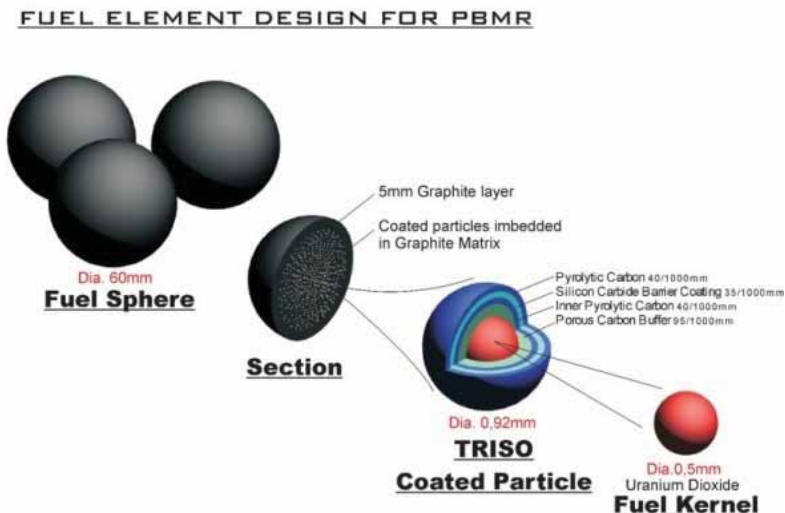


Figura 8 - Combustible del VHTR [GIFRoadmap, 2001]

### 3.3 GFR (*Gas Fast Reactor*) (Ver Figura 9).

- Participan: Euratom, Francia, Japón y Suiza.
- Aplicación: electricidad.
- Potencia: 2.400 MWt.
- Espectro neutrónico rápido.
- Refrigerante: Helio.
- Temperaturas de operación: Tout 850 a 900 °C.
- Combustible: 2 opciones: avanzado tipo placa o tradicional tipo pastilla-vaina.
- Quemado postulado: 140.000 MWd/t.
- Ciclo térmico indirecto con eficiencia del 50 %.
- Ciclo de combustible asociado: cerrado con transmutación de actínidos.
- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Combustible y reprocesamiento.
  - Materiales: grafito para núcleo e internos, metales para internos, tuberías, válvulas, intercambiadores de calor y turbina, y cerámicos para vainas, intercambiadores de calor y componentes de turbina.
- Principales ventajas: alta eficiencia térmica; el helio es químicamente compatible con el agua y los materiales estructurales; la activación del helio es despreciable.
- Principales desventajas: las altas temperaturas imponen mayor exigencia sobre la performance térmica del combustible y materiales estructurales; exige una mayor potencia de bombeo por la menor capacidad de extracción de calor del helio en relación a los metales.

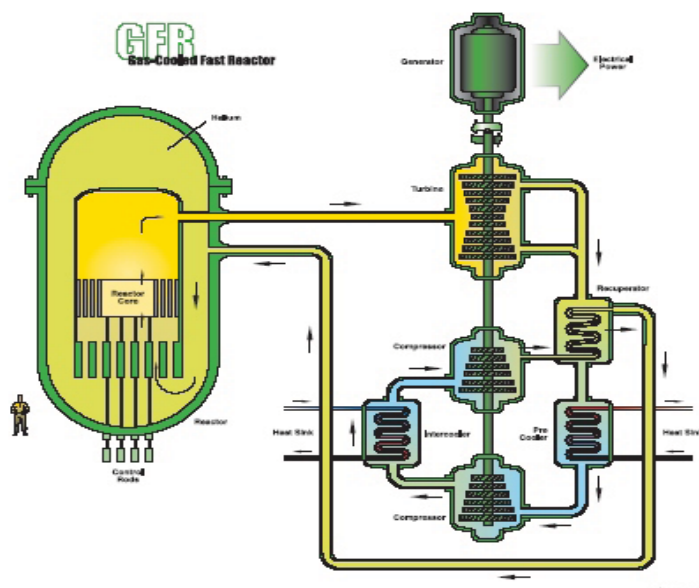


Figura 9 - GFR - *Gas Fast Reactor* [GIFRoadmap, 2001]



### 3.4 SFR (*Sodium Fast Reactor*) (Ver Figura 10).

- Participan: Corea del Sur, China, Estados Unidos, Euratom, Francia y Japón.
- Aplicación: electricidad.
- Potencia: entre 300 y 1.500 MWe.
- Espectro neutrónico rápido.
- Refrigerante: sodio líquido ( $T_{\text{fus}}: 98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Temperatura de operación:  $T_{\text{out}}$ : 500 a 550  $^{\circ}\text{C}$ .
- Presión de operación: aproximadamente 1 atmósfera.
- Combustible: tipo pastilla-vaina, MOX, enriquecimiento de 15-20 %.
- Quemado postulado: 150.000 MWd/t.
- Circuito primario tipo *loop* o tipo *pool*.
- Circuito intermedio de sodio líquido.
- Ciclo térmico indirecto con eficiencia del 42%, Rankine de vapor o Brayton de  $\text{CO}_2$ .
- Ciclo de combustible asociado: cerrado con transmutación de actínidos.
- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Seguridad: manejo de accidentes con Na y extracción de calor de decaimiento.
  - Combustible: tipo y forma del compuesto físil+vaina (*Stainless Steel*) para alta temperatura y alto quemado.
- Principales ventajas: experiencia en operación (reactores Phenix, Super Phenix y Monju); buena capacidad de extracción de calor del sodio; baja presión de operación.
- Principales desventajas: reacción exotérmica del sodio con el agua y con el aire; necesidad de mantener el refrigerante por encima de su temperatura de fusión en toda condición de operación.

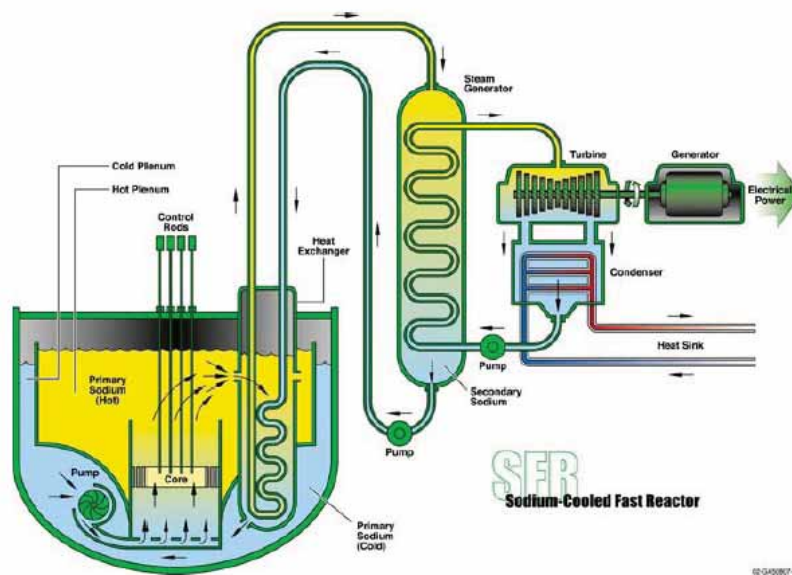


Figura 10 - SFR - *Sodium Fast Reactor* [GIFRoadmap, 2001]

### 3.5 SCWR (*Super Critical Water Reactor*) (Ver Figura 11).

- Participan: Canadá, Euratom y Japón.
- Aplicación: electricidad.
- Potencia: entre 300 y 1.500 MWe.
- Espectro neutrónico rápido (SCWR, Japón) o térmico (CANDU-SCWR, Canadá).
- Tipo de núcleo: recipiente de presión (SCWR) o tubo de presión (CANDU-SCWR).
- Refrigerante: agua supercrítica (Presión crítica: 22.1 MPa; Temperatura crítica: 374  $^{\circ}\text{C}$ ).
- Moderador (CANDU-SCWR): agua líquida.
- Presión de operación: 25 MPa.
- Temperatura de operación:  $T_{\text{in}}$ : 280  $^{\circ}\text{C}$  (agua líquida);  $T_{\text{out}}$ : 510  $^{\circ}\text{C}$  (agua supercrítica).
- Combustible: tipo pastilla-vaina.
- Quemado postulado: 45.000 MWd/t (CANDU-SCWR).
- Ciclo térmico directo con eficiencia del 44 %.

- *Balance of Plant*: similar al de usinas térmicas refrigeradas con agua supercrítica.
- Ciclo de combustible asociado: cerrado con transmutación de actínidos/abierto.
- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Correlaciones de transferencia de calor.
  - Validación de códigos computacionales para LOCA.
  - Estabilidad potencia – caudal.
  - Radiolisis del  $H_2O$  supercrítica.
  - Materiales: corrosión, SCC (*stress corrosión cracking*), resistencia, fragilización.
- Principales ventajas: refrigerante en una sola fase por lo que, comparados con los BWR, se eliminan separadores, secadores y bombas de recirculación; BOP no necesita investigación y desarrollo ya que hay experiencia sobre las usinas térmicas de agua supercrítica.
- Principal desventaja: altas tensiones mecánicas debido a alta presión y temperatura y a cambio de densidad del agua:  $800\text{kg/m}^3$  a  $280^\circ\text{C}$  –  $80\text{kg/m}^3$  a  $500^\circ\text{C}$ .

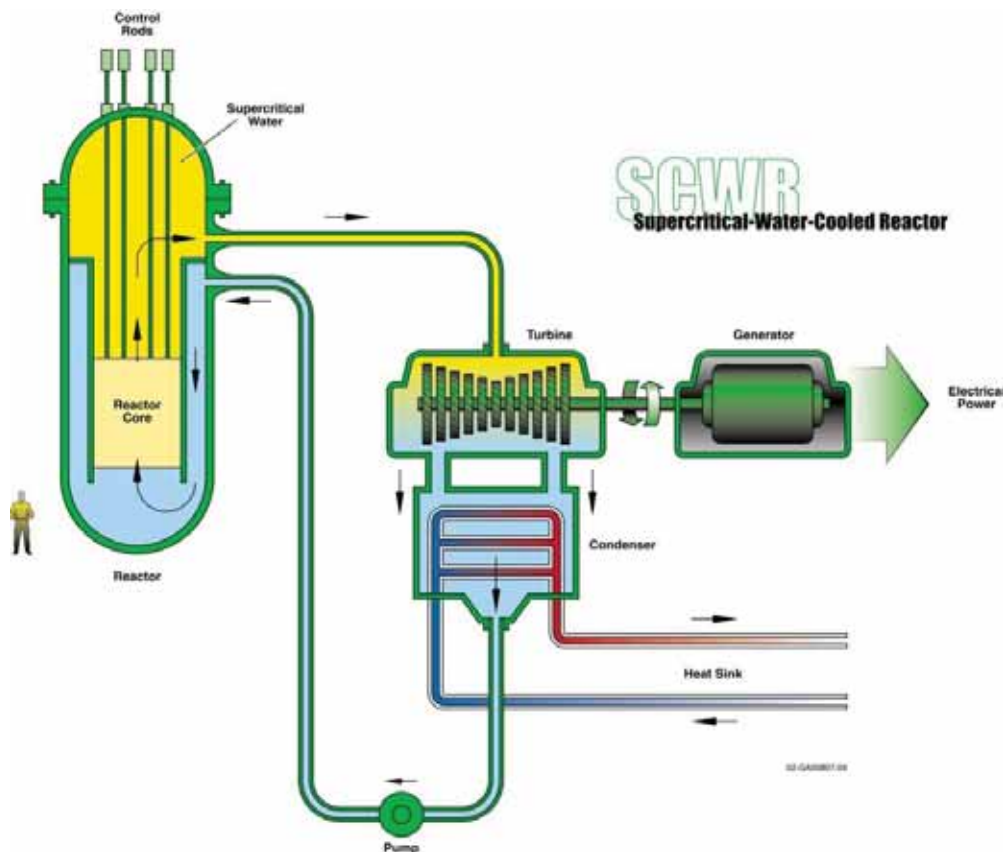


Figura 11 – SCWR - *Super Critical Water Reactor* [GIFRoadmap, 2001]

### 3.6 LFR (*Lead Fast Reactor*) (Ver Figura 12).

- Participan: Estados Unidos, Euratom y Japón.
- Aplicación: electricidad.
- 2 diseños: SSTAR (*Small Secure Transportable Autonomous Reactor*) y ELSY (*European Lead-cooled System*).
- Potencia: SSTAR: 20 MWe, ELSY: 600 MWe.
- Espectro neutrónico rápido.
- Refrigerante: Plomo líquido ( $T_{fus}$ :  $318^\circ\text{C}$ ) en convección natural (SSTAR) o convección forzada (ELSY).
- Temperatura de operación: Tout:  $750\text{-}800^\circ\text{C}$  (SSTAR) y  $550^\circ\text{C}$  (ELSY).
- Presión de operación: 1 atmósfera.
- Combustible: tipo pastilla-vaina, combustible de nitrato de uranio.
- Quemado postulado: 100.000 a 150.000 MWd/t (SSTAR) y 100.000 MWd/t (ELSY).
- Ciclo térmico indirecto, Brayton de dióxido de carbono con eficiencia del 44 % (SSTAR), o Rankine de agua supercrítica con eficiencia del 42 % (ELSY).
- Ciclo de combustible asociado: cerrado con transmutación de actínidos.

- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Aleación Pb-Bi como opción de respaldo, con temperatura de fusión más baja ( $T_{fus}$ : 125 °C), pero fácilmente activable.
  - Combustible, materiales en general y control de corrosión.
- Principales ventajas: buena capacidad de extracción de calor del plomo; baja presión de operación; el plomo es relativamente inerte en comparación con el sodio.
- Principales desventajas: necesidad de mantener el refrigerante por encima de su temperatura de fusión (318 °C) en toda condición de operación.

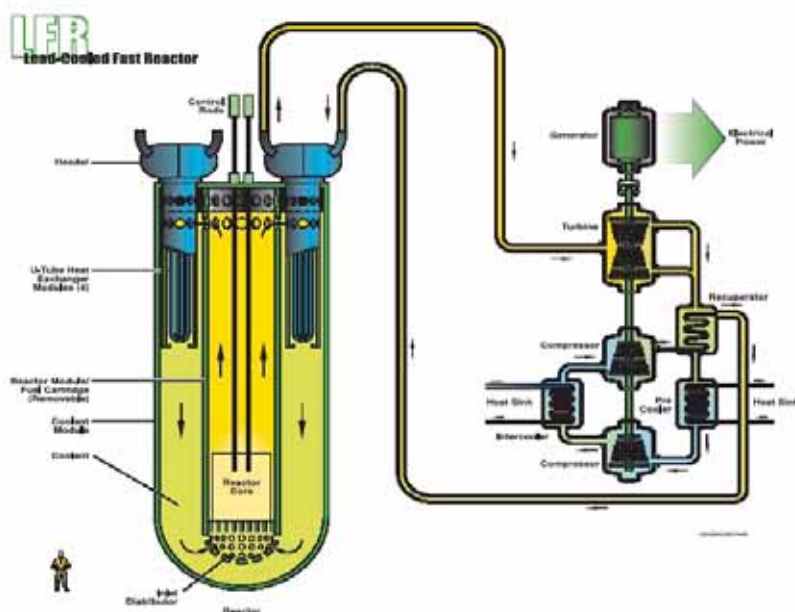


Figura 12 - LFR – Lead Fast Reactor [GIFRoadmap, 2001]

### 3.6 MSR (Molten Salt Reactor) (Ver Figura 13).

- Participan: Euratom y Francia.
- Aplicación: electricidad y producción de hidrógeno.
- Potencia: hasta 4.000 MWt.
- Espectro neutrónico rápido.
- Refrigerante: sales fundidas ( $\text{LiF} + \text{NaF} + \dots$ ),  $T_{fus}$ : 450 °C.
- Combustible: sales fundidas ( $\text{LiF} + \text{ThF}_4 + \text{UF}_4 + \text{PuF}_3 + \dots$ ) disueltas en la sal refrigerante.
- Baja presión de operación: 5 atmósferas.
- Temperatura de operación: entre 450 °C ( $T_{fus}$  de sales) y 800 °C (compatibilidad con materiales).
- Circuito intermedio de sales fundidas.
- Ciclo térmico indirecto Brayton de helio con eficiencia del 50 %.
- Ciclo de combustible asociado: cerrado con transmutación de actínidos.
- Reposición de combustible “on-line”.
- Reprocesamiento de combustible “on line”.
- Principales áreas de investigación y desarrollo:
  - Materiales.
  - Propiedades físicas y químicas de la sal fundida.
  - Combustible.
  - Reprocesamiento del combustible.
- Principales ventajas: buena capacidad de extracción de calor de la sal; baja presión de operación; no existe el “elemento combustible quemado”; coeficientes de reactividad por vacío y temperatura negativos.
- Principales desventajas: necesidad de mantener la sal combustible-refrigerante por encima de su temperatura de fusión (450 °C) en toda condición de operación; complejidad del sistema de reprocesamiento “on-line” del combustible.



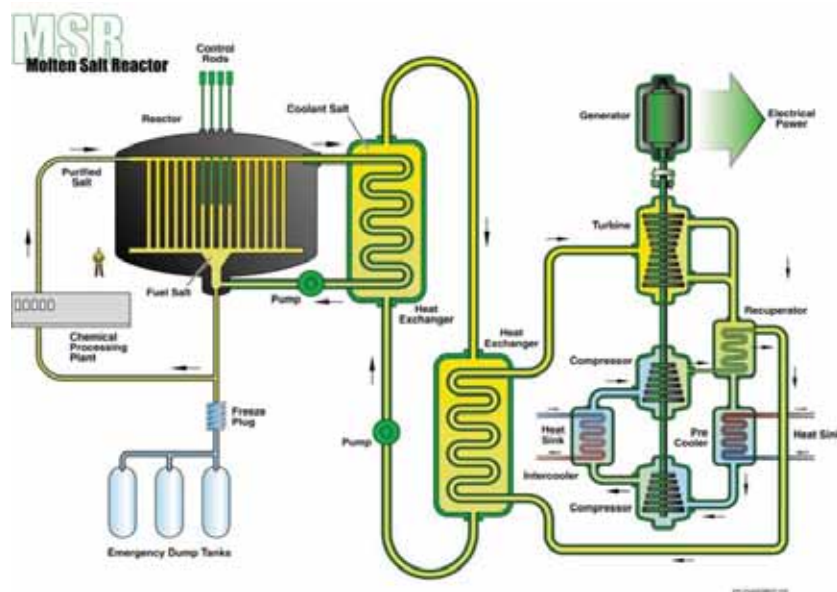


Figura 13 - MSR - Molten Salt Reactor [GIFRoadmap, 2001]

#### 4. Referencias

- [Braun, 2008] Chaim Braun, *New Nuclear Technologies*, WNU Orientation Course, Bariloche, Argentina, 2008
- [Dresden, 1959]: Wayne L. Townsend, *Dresden Nuclear Power Station*, University of Michigan, 1959
- [GIFChart, 2001]: *Charter of the Generation IV International Forum*, <http://www.gen4.org/GIF>, 2001
- [GIFIntro, 2008]: *Introduction to Generation IV Nuclear Energy Systems and the International Forum*, <http://www.gen-4.org/GIF>, 2008
- [GIFRoadmap, 2001]: *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, <http://www.gen4.org/GIF>, 2001
- [IAEA, 2004]: *50 Years of Nuclear Energy*, IAEA 48 General Conference, 2004
- [Knief, 1992]: Ronald A. Knief, *Nuclear Engineering, Theory and Technology of Commercial Nuclear Power*, Taylor & Francis, 1992
- [Magnox, 2004]: *Report by HM Nuclear Installations – Inspectorate on the results of Magnox Long Term Safety Reviews (LTSRs) and Periodic Safety Reviews (PSRs)*, 2004
- [Shippingport, 1980]: *Shippingport Atomic Power Station, A National Historic Mechanical Engineering Landmark*, 1980
- [WNA, 2010]: *Advanced Nuclear Power Reactors*, World Nuclear Association, 2010 <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>
- [M U\$D][TECDOC1434]: IAEA-TECDOC-1434, *Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*, 2004
- [WNA, 2010]: *Advanced Nuclear Power Reactors*, World Nuclear Association, 2010 <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>

## Proceso VITROCERUS para combustibles irradiados de reactores de investigación

PAULA ARBOLEDA <sup>(1,2)</sup>, DIEGO RODRÍGUEZ <sup>(1)</sup>, MIGUEL PRADO <sup>(1)</sup>

(1) Laboratorio de Materiales Nucleares - Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica

(2) Instituto Balseiro - Comisión Nacional de Energía Atómica/Universidad Nacional de Cuyo

En el Laboratorio de Materiales Nucleares del Centro Atómico Bariloche se ha venido desarrollando un método para la inmovilización de elementos combustibles irradiados tipo MTR provenientes de reactores de investigación, cuyo objetivo es reducir la posibilidad de migración o de dispersión de radionucleidos durante la manipulación, el almacenamiento y la disposición final de los mismos. Partiendo de elementos combustibles simulados de reactores de investigación se postula la creación de una matriz cerámica con estos combustibles irradiados de siliciuro de uranio ( $U_3Si_2$ ) – enriquecido al 10 % luego de ser retirados del reactor – y una adición de  $U_3O_8$  utilizado para la disolución isotópica 11:1, con agregados de vidrio borosilicato VG98 en baja proporción que favorece la sinterización, sometida a tratamientos térmicos y, de esta manera, obtener bloques vitrocerámicos. Este proceso ha sido denominado VITROCERUS (acrónimo de “Ceramización de elementos radioactivos en uranio sinterizado con adición de vidrios). El proyecto se encuentra enmarcado en el Programa Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos.

El método propuesto involucra procesos físicos sencillos llevados a cabo en una celda caliente, no considera el reprocesamiento del combustible y permite trabajar con volúmenes considerablemente menores que los que se utilizarían en una vitrificación convencional. La dilución isotópica con uranio natural tiene el fin de evitar la proliferación del material físil, problemas de salvaguardias y reducir la criticidad. Esto daría la idoneidad al producto resultante para ser almacenado interinamente en seco o de algún otro modo.

La adición de pequeñas cantidades de vg98, en porcentajes en peso máximo del 10%, favorece visiblemente la solidez del material resultante, evaluado mediante ensayos de lixiviación en agua destilada con resultados satisfactorios en relación a los compuestos sin adición de vidrio. Para determinar la resistencia mecánica se realizó el “Brazilian test” utilizado para la determinación de esfuerzos tensiles y ensayos de microdureza Vickers, con los cuales se pudo registrar una pobre resistencia a tensiones de tracción y compresión y penetración para las muestras sin adición de vidrio con respecto a aquellas que sí lo contenían.

El análisis de la microestructura y la cinética de sinterización también corroboran que el vidrio contribuye a la sinterización parcial del compuesto a temperaturas reducidas, gracias a su composición en parte equivalente a la del combustible y a su baja viscosidad a la temperatura de trabajo, lo cual permite que una cantidad suficiente de fase líquida llene los espacios ocupados por los poros entre los granos sólidos de residuo.

*A processing immobilization method has been developed for the spent fuels MTR type from research reactors in the Nuclear Materials Laboratory at Bariloche Atomic Centre; its objective is reduce a possible radionuclides migration, dispersion and criticism. This process involves the creation of sintered ceramic matrix containing fuel and natural uranium in an isotopic dissolution, plus a small glass addition, which is a project known as VITROCERUM (by its Spanish acronym for Ceramización de Elementos Radioactivos en Uranio Sinterizado y Vidrio). This works with less volumes than a conventional vitrification; the addition of small amounts of glass improves the sintering process and enhances the lixiviation and mechanical properties of final material. In this process, the reprocessing possibility of the spent fuel is not taken into account.*

### Introducción

Los combustibles agotados del tipo MTR de reactores de investigación presentan características relevantes que los diferencian de otros combustibles irradiados como los de los reactores de potencia, debido a su alto enriquecimiento al ser extraídos del reactor, su estructura de baja manipulabilidad y la presencia de grandes cantidades de aluminio, que suponen un inconveniente al considerar su disposición final [1]. El Laboratorio Materiales Nucleares del Centro Atómico Bariloche se ha desarrollado una propuesta para el procesamiento de estos elementos denominada proceso VITROCERUS, que consiste básicamente en una serie de procedimientos físicos sencillos (cizallado, calcinación, molienda y sinterizado) con el objetivo de obtener bloques cerámicos de bajo enriquecimiento, con una resistencia considerable a los posibles agentes externos a los cuales se verán sometidos en un repositorio geológico profundo o en otro posible tipo de almacenamiento. Para este fin deben evaluarse fundamentalmente la resistencia a la lixiviación y la resistencia mecánica a la tensión, así como la dureza del material a emplazar, sin contemplar el reprocesamiento de los elementos.

El material resultante es entonces una mezcla del combustible irradiado diluido con uranio natural que contiene una pequeña proporción de vidrio que mejora de manera sustancial el sinterizado y, por ende, la conformabilidad y manipulación. Es importante destacar que el proceso difiere radicalmente de una vitrificación convencional ya que en esta última los volúmenes de vidrio utilizados son considerablemente superiores. Por otro lado, en VITROCERUS, el material continúa siendo un cerámico básicamente de uranio sinterizado; la dilución isotópica con uranio natural tiene el fin de evitar la

proliferación del material físil y reducir su criticidad. Esto daría versatilidad al producto resultante para ser almacenado interinamente en seco o de algún otro modo propuesto.

### Preparación de las muestras. Sinterizado y caracterización morfológica

El material empleado para imitar el combustible irradiado proveniente del reactor fue una miniplaca no irradiada, la cual simula las dimensiones y estructura de las placas reales utilizadas. La morfología y composición de la miniplaca son proporcionales a la placa estándar que opera en el reactor. El procedimiento seguido para la obtención de las muestras se detalla en el esquema de la figura 1. [1]

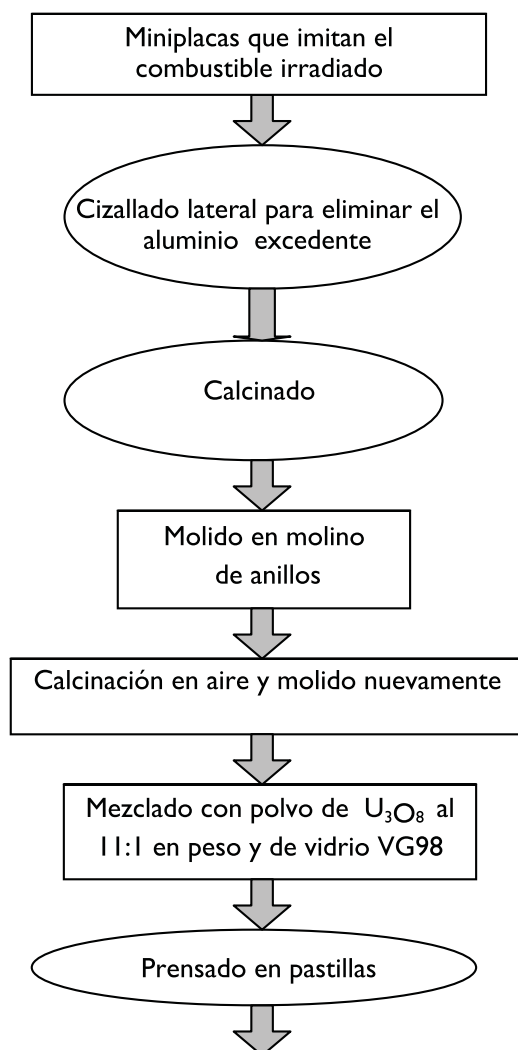


Figura 1. Esquema procedimiento de obtención de las muestras

Las placas constan de dos láminas de aluminio puro (AL 6061) que contienen entre sí un combustible de siliciuro de uranio ( $U_3Si_2$ ) – enriquecido al 19,75% - más un 20% de aluminio en polvo. Éstas se esquematizan en la figura 2. Durante el proceso en el reactor se quema en promedio un 50% del uranio 235, luego de lo cual continúa con un enriquecimiento del 10% aproximadamente. Un elemento combustible MTR contiene 18 placas combustibles con 2.270g de uranio y todo el conjunto ocupa un volumen de 6,5L.

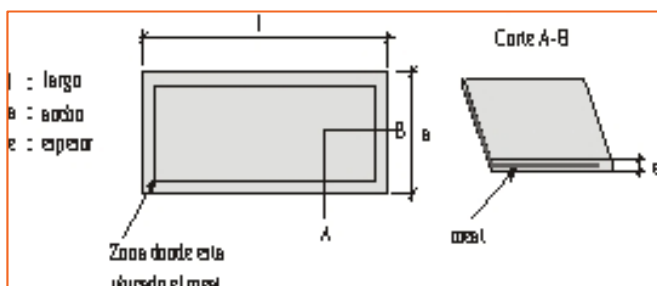


Figura 2. Placas de Al 6061 que contienen entre sí el combustible ( $U_3Si_2$ ) + 20% de aluminio en polvo

Con el fin de alcanzar un enriquecimiento de alrededor del 1% para evitar criticidad, se requiere diluir con uranio natural, en un volumen suficiente como para lograr bajar el enriquecimiento. Para una dilución aproximada al 1,5% y un quemado del 50%, la masa de uranio natural por unidad de masa de siliciuro de uranio en la placa es de 11:1. El material resultante es una mezcla de polvos del residuo de siliciuro de uranio y aluminio provenientes del calcinado y molido de las miniplacas con un tamaño de partícula de 65m, más uranio natural de 45m en una proporción 11 veces mayor (Figura 3), para obtener polvos de 48m de tamaño de partícula en promedio, determinado mediante análisis por ultrasonido a 2.050 rpm en el equipo *mastersizer* del Laboratorio.



Figura 3. Polvos en una relación 11:1 para la disolución isotópica

El polvo resultante se rota mecánicamente, obteniéndose una mezcla homogénea y, a partir de allí, se procede a dividir el polvo con el objetivo de adicionar vidrio VG98 en diferentes proporciones. El vidrio VG98 es un vidrio base borosilicato formulado especialmente para la vitrificación de residuos, el cual fue desarrollado originalmente para la vitrificación de residuos de reactores de potencia en Alemania [2], y es la base de numerosas formulaciones de matrices de composites [3]. En la tabla 1 se muestra la composición del mismo. Se observa que posee algunos elementos comunes al residuo en la forma de Si y Al. Este vidrio de 15m de tamaño de partícula posee la característica de la adición de sodio, lo que hace que tenga una baja viscosidad:  $1.7 \text{ Log dPaS}^{-1}$  a la temperatura de  $1.200^{\circ}\text{C}$ .

| Elemento                           | % en peso    |
|------------------------------------|--------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | <b>56.7%</b> |
| <b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | <b>12.4%</b> |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>2.6%</b>  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | <b>17.5%</b> |
| <b>CaO</b>                         | <b>4.1%</b>  |
| <b>MgO</b>                         | <b>2.1%</b>  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | <b>4.6%</b>  |

Tabla 1. Composición en % en peso del vidrio VG98

Como procedimiento previo al sinterizado, la mezcla de polvos fue compactada mediante la utilización de una matriz metálica flotante, de lo cual resultaron pellets cilíndricos que fueron sinterizados en atmósfera de aire. [4]

## Caracterización

### Morfología y sinterización

Los polvos precursores, es decir: el combustible contenido en las miniplacas de aluminio, las miniplacas calcinadas molidas y el uranio natural, fueron estudiados mediante SEM, EDS y análisis XRD en equipos disponibles en el Grupo de Caracterización de Materiales del Centro Atómico Bariloche, con el objetivo de caracterizar los materiales de partida. En la figura 4 se muestra un ensayo de microscopía de calefacción efectuado en el microscopio de alta temperatura del Laboratorio de Materiales Nucleares, que permite visualizar la variación del área con la temperatura de un pellet compuesto por residuo ( $\text{Si}_2\text{U}_3 + \text{Al}$ ) disuelto con uranio natural ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) sin adición de vidrio; así como para un pellet con este mismo compuesto y una adición de 5% de VG98. En este experimento se genera una imagen de la muestra que se sinteriza y se observa que existe en un principio un aumento en el área debido posiblemente a la oxidación del uranio y, posteriormente, se produce la densificación del mismo hasta un 94% del área.



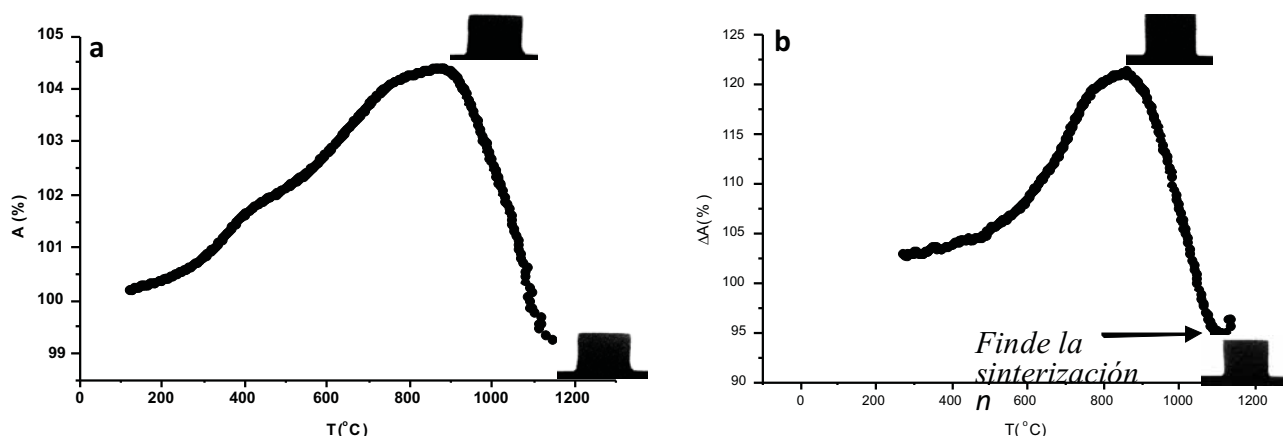


Figura 4. Gráficas de variación del área con la temperatura: a) sin adición de vidrio y b) con 5% de VG98

El momento de inicio de la sinterización se da cuando se genera el primer encogimiento de la muestra y la etapa final corresponde al máximo encogimiento registrado dando paso a una nueva expansión. La figura 4 a) muestra que hubo una sinterización incompleta del compuesto sin adición de vidrio, mientras que para aquel pellet con 5% de VG98 se completa el proceso de sinterización a 1.150°C aproximadamente (Figura 4 b).

Si bien se trabaja con temperaturas bajas buscando reducir la generación de vapores, se consigue una buena sinterización parcial considerando que estos materiales sinterizan a temperaturas considerablemente mayores. En la micrografía obtenida mediante microscopio electrónico de barrido SEM (figura 5) se aprecia el sinterizado parcial de los granos para una muestra que contiene 5% de vidrio, comparado con una que no tiene adición de VG98.



Figura 5. Micrografías para: a) muestra sin adición de vidrio y b) muestra con 10% de VG98

## Resistencia química

Posteriormente se realizaron ensayos de lixiviación utilizando el protocolo MCC1P [5] empleando muestras monolíticas. La lixiviación se refiere a la acción de remover constituyentes solubles desde un sólido hacia una solución. La velocidad de lixiviación se define como la rapidez con la cual estos constituyentes solubles provenientes del sólido entran a la solución durante la lixiviación. [4,5]. La velocidad de lixiviación - que es la masa de la muestra o de un elemento que pasa a la solución por unidad de área de la muestra y por unidad de tiempo de lixiviación - se expresa en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

El periodo de lixiviación fue de 7, 14 y 28 días a 90° C en agua desionizada para las muestras sin vidrio y con adición de 2%, 5% y 10% siguiendo la norma MCC1P. En cuanto a los compuestos elaborados en las mismas condiciones pero sin el aditivo de vidrio fue un inconveniente conseguir cilindros adecuados para cumplir las condiciones del ensayo ya que resultaban poco manipulables, por lo que fueron molidos y sinterizados por segunda vez, obteniéndose un comprimido más rígido.

El valor de la velocidad de disolución gravimétrica (VRG) de las muestras monolíticas se calculó a partir de la pérdida de peso medida ( $\Delta p$ ), el área de la muestra ( $A$ ) y el tiempo de inmersión en agua ( $t$ ), empleando la siguiente fórmula:

$$VRG = \frac{\Delta p(\text{g})}{A(\text{cm}^2) \times t(\text{días})}$$

## Comportamiento mecánico

La caracterización del comportamiento mecánico se realizó mediante la prueba denominada “*Brazilian test*” o ensayos de compresión diametral [6,9]. Es uno de los métodos actualmente disponibles para la determinación de la resistencia a la tracción de materiales frágiles que consiste en aplicar sobre la probeta cilíndrica dos cargas iguales puestas en compresión, distribuidas uniformemente a lo largo de una línea de carga que coincide con una de las generatrices de la probeta. En la práctica, la línea de carga se materializa mediante un apoyo de ancho uniforme. Una característica interesante del “*Brazilian test*” frente al ensayo de tracción directa es que la rotura por tracción de la probeta se induce mediante la aplicación de cargas externas de compresión que se materializan de manera rápida y sencilla sin necesidad de dispositivos de ensayo especiales. [2]. Para ensayar las probetas se empleó una prensa de compresión hidráulica que proporciona durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga [4].

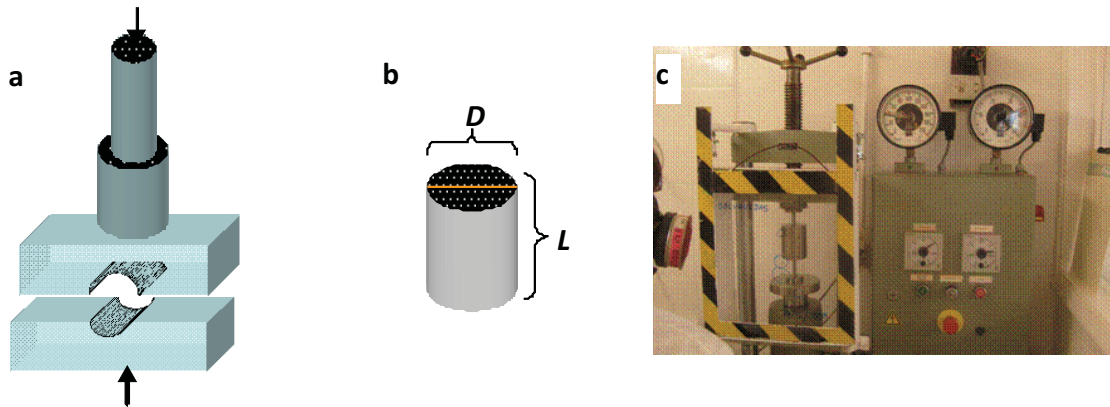


Figura 6. a) esquema del dispositivo de soporte, b) modelo de un pellet y c) prensa para compresión

Para garantizar que la distribución de tensiones no se altere significativamente se dispuso de un dispositivo de placas de hierro pavonado que ofrece un apoyo curvo a las probetas, con radio de curvatura igual al radio nominal del cilindro a testar, como se esquematiza en la figura 6 a). Se realizaron alrededor de 10 pruebas por probeta a temperatura y presión ambiente; además se probaron muestras del  $\text{UO}_2$  sinterizado que se utiliza como combustible en reactores de potencia y el vidrio VG98 sinterizado con el propósito de obtener valores de referencia. Como la fractura es producida por las tensiones a tracción, esta puede calcularse mediante la expresión:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

donde P es la carga aplicada máxima soportada, L la longitud de la probeta y D su diámetro. Las tensiones de tracción son constantes y máximas en el plano de aplicación de la carga. [6-9]

También se realizaron ensayos de microdureza Vickers. Se efectuaron del orden de 6 indentaciones por probeta en un microdurómetro de la División Metalografía del Grupo de Materiales Nucleares, a fin de determinar valores de resistencia a la penetración en la fase mixta vitrocerámica para las probetas con contenido de vidrio y en la única fase cerámica para las probetas sin adiciones. La carga del indentador de diamante fue de 50g y se promediaron los valores obtenidos.

## Resultados y discusión

Se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia a la lixiviación, con velocidad de disolución gravimétrica del orden de g.cm por día para las muestras con adición de 10% de VG98. En la tabla 2 se reportan los resultados de los ensayos de lixiviación para las muestras que exhibieron mejor resistencia aparente. Esta mejora en las propiedades potencializa el proceso a fin de ser aplicado como parte del procesamiento de combustibles gastados y da versatilidad para su almacenados interino en seco. [10]

| Muestra        | T(°C)     | Atm  | VRG<br>(g.cm-2.d-1) |
|----------------|-----------|------|---------------------|
| <b>VG98</b>    | 650       | Aire | ~10-6               |
| <b>10%VG98</b> | 1200(3h)  | Aire | 2,31*10-5           |
| <b>10%VG98</b> | 1200(5h)  | Aire | <b>8,33*10-6</b>    |
| <b>5%VG98</b>  | 1200(3h)  | Aire | 1.27*10-5           |
| <b>5%VG98</b>  | 1200(5h)  | Aire | 2.32*10-5           |
| <b>0%VG98</b>  | 1200 (5h) | Aire | 9,35*10-5           |

Tabla 2. Resultados de velocidad de disolución gravimétrica (*test de leaching*).

Respecto a las propiedades de resistencia mecánica, los materiales preparados con el supuesto combustible irradiado de siliciuro de uranio diluido en uranio natural más adiciones de vidrio VG98 presentaron una calidad superior respecto a los que no lo contenían. El vidrio agregado contiene en su composición elementos comunes al residuo de siliciuros de uranio con aluminio, lo cual permite una interacción del material vítreo con el residuo y contribuye a la sinterización parcial del compuesto. Su baja viscosidad (1.7dPas a 1200°C) permite incluso obtener un compacto a bajas temperaturas.

Los valores para la presión a la cual se producen las fisuras en el material con un 2% de vidrio VG98 superan 14 veces aquellos con solo residuo y uranio.

Es importante destacar que los valores con mayor contenido de vidrio presentaron problemas de conformación, dado que el exceso de vidrio fluía hacia abajo deformando la pastilla incluso a temperaturas más reducidas, por lo que se descartó la posibilidad de implementar materiales con porcentajes de vidrio mayores al 10%; esto en grandes proporciones no favorece la interacción entre las partículas sólidas del residuo diluido, separándolas y dispersándolas en el compuesto, asemejando el procedimiento a una vitrificación convencional - lo cual no es el objetivo del proyecto - además de incrementar indeseablemente el volumen de material. Con el proceso VITROCERUS se incrementa aproximadamente en un 25% (1,8L) el volumen de un elemento combustible; al considerar las ventajas del proceso, este aumento de volumen no significa un inconveniente relevante.

Los errores estándar se encuentran en el orden de 10% de los valores promedio para cada tipo de ensayo

## Conclusiones

- El proceso VITROCERUS constituye una alternativa factible para aplicarse en el procesamiento en el marco de la gestión de combustibles irradiados provenientes de reactores de investigación.
- Se logra un material manipulable y de calidad satisfactoria, consiguiendo mejoras sustanciales al adicionar vidrio en pequeñas proporciones, lo que permitiría un eficiente manejo y un posible emplazamiento seguro de los combustibles irradiados. La resistencia es comparable con la del vidrio, similar al que se usa en los procesos de disposición segura de combustibles agotados.
- Mediante la prueba de tracción indirecta se registró una pobre resistencia mecánica para las muestras sin adición de vidrio.
- El vidrio en fase líquida contribuye a la sinterización parcial del compuesto debido a la interacción del material vítreo con partículas del residuo gracias a su baja viscosidad, siempre y cuando se adicione en pequeñas proporciones, hasta un máximo de 10% en peso.
- La implementación del “*Brazilian test*” resulta una herramienta práctica y confiable en cuanto a la determinación cuantitativa de las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión de materiales cerámicos como los combustibles irradiados de siliciuro de uranio y dióxido de uranio sinterizado. Esta aplicación resulta novedosa en el campo de la tecnología nuclear.
- Utilizando el proceso VITROCERUS es posible realizar un almacenamiento temporal en seco de estos materiales combustibles irradiados evitando problemas de criticidad y proliferación; se estima que el volumen de un elemento combustible luego de ser procesado es aproximadamente 8,5L.

## REFERENCIAS

1. D.O. Russo, D.S. Rodríguez, P. Mateos, M. Sterba, A. Heredia, M. Sanfilippo. “Acondicionamiento de combustibles gastados de reactores nucleares de investigación en matrices cerámicas”
2. S. Gahlert and G. Ondracek. In: W. Lutze and R.C. Ewing, Editors, “*Radioactive Waste Forms for the Future*”, North-Holland, New York (1988), p. 162
3. Dlouhy and A.R. Boccaccini. “*Borosilicate and lead silicate glass matrix composites containing pyrochlore phases for nuclear waste encapsulation*” *Comp. Sci. Tech.* 56 (1996), p. 1415
4. A.M Bevilaqua, M.A Audero. “Inmovilización de residuos líquidos de alta actividad simulados en vidrios sinterizados”. Tesis doctoral. Instituto Balseiro. CNEA. Argentina 1992.
5. *Nuclear waste materials handbook. Waste form test methods DOE/TIC 11400*. Material Characterization Center, 1981
6. F. Gálvez, D. Cendón y V. Sánchez, “Modelización numérica de la fractura en ensayos brasileños de materiales cerámicos a alta velocidad de deformación”; *Anales de mecánica de la fractura*, vol. 20 (2003), p. 59-64 (paper)
7. C. Rocco<sup>1</sup>, W. Morales<sup>1</sup> y G. V. Guinea “Factor de intensidad de tensiones y cmod para probetas cilíndrica y prismáticas en compresión diametral”; *Anales de mecánica de la fractura*, vol. 18, (2001), p.204-210 (paper)
8. NLT 346/90. “Resistencia a Compresión Diametral (ensayo Brasileño) de Mezclas bituminosas”
9. E. Garrote. “Nuevo procedimiento de ensayo para evaluar la tenacidad de las mezclas bituminosas”; (2007) (Tesina)
10. H.E.P Nassini, C.N.F Troyano, A.M Bevilaqua, J.E Bergallo. “Diseño conceptual de un sistema para el almacenamiento interino en seco del combustible gastado de la Central Nuclear Atucha”. *Revista de la CNEA*. Año 5-No 19-20. Diciembre 2005. Argentina.

## La complejidad en CNEA: Una visión de Planificación Estratégica

GUSTAVO BARBARÁN - Grupo de Planeamiento Estratégico - Subgerencia de Planificación Estratégica - Gerencia de Planificación, Coordinación y Control – Comisión Nacional de Energía Atómica.

**El Plan Estratégico CNEA 2010-2019, a diferencia de planes anteriores, se organizó por áreas temáticas en contraposición a hacerlo por la estructura vigente. Esta forma de trabajo permitió recolectar y analizar información muy valiosa sobre la forma en que la Institución organiza sus actividades, con el propósito de poder establecer las estrategias que puedan tener mayor impacto en el logro de los objetivos institucionales. Inicialmente este trabajo plantea una forma de entender a la organización bajo el concepto de complejidad. Luego, la define por sus características más relevantes y hace un intento de individualizar dónde se localiza la complejidad a nivel institucional y las trabas que ella supone para el logro de los objetivos estratégicos. Por último, se realizan propuestas sobre cómo mejorar los procesos institucionales para mejorar los sistemas y así ayudar al logro de los objetivos de la CNEA.**

*Strategic Plan CNEA 2010-2019 is organized in thematic areas corresponding to different fields. This organization differs from the current structure of the Institution, which applied to the previous strategic plans. This way of work made it possible to gather and analyze highly valuable information about the way in which CNEA organizes its activities, with the aim of defining strategies which may have a higher impact on achieving institutional objectives. Initially, this work outlined a way of understanding the organization under the concept of complexity. Then, it defined organization by its major characteristics and intended to individualize where this complexity is placed at an institutional level along with the difficulties that must be dealt with in order to achieve strategic objectives. Finally, suggestions were made of the way to improve institutional processes to get better systems and thus contribute to succeed in achieving CNEA goals.*

### Entendiendo y desmenuzando la complejidad

En el marco de las reuniones de planificación estratégica, un argumento recurrente entre los participantes era la duplicación de procesos: los procedimientos con múltiples interpretaciones que llevan a diferencias entre dos equipos de trabajo, la complejidad que implicaba el trabajo de la Institución provocando retrasos e inclusive el incumplimiento de los objetivos planteados. Aún así, en el marco de esas reuniones, cuando se pedía una mayor precisión sobre la complejidad, la mayoría de los actores establecían miradas parciales sobre los procesos y estructuras de la organización.

Una de las características sobresalientes de la elaboración de este plan fue su conformación en reuniones de trabajo, donde se invitaba a los expertos de cada área a que plantearan la situación actual de la misma, llegando luego a un resumen de ella en una matriz FODA (Fortalezas - Oportunidades - Debilidades y Amenazas) que trataba de condensar el complejo panorama para, desde ese punto de partida, plantear los objetivos y metas a cumplir en el plan.

En casi todas (si no todas) las reuniones del plan los participantes se explayaban con lujo de detalles sobre su forma de trabajar y sobre lo que ellos, desde la perspectiva de su trabajo, intuían como las causas que llevaban a la complejización en su trabajo diario. Así se pueden mencionar a modo de ejemplos la duplicación de procesos, los procedimientos con múltiples interpretaciones que llevan a diferencias entre dos equipos de trabajo, la convivencia de variados sistemas de gestión y control y la resistencia a los cambios.

### ¿Qué es la complejidad?

Según el diccionario de la Real Academia Española es la cualidad de lo complejo, y la definición de complejo es algo que reviste al menos dos acepciones que resultan interesantes:

- 1- Que se compone de diversos elementos.
- 2- Complicado, de difícil comprensión.

Ambas definiciones aportan una guía para entender la complejidad, pero nada más.

La primera no da ningún indicio de cómo se interrelacionan estos elementos entre sí, de su dinámica y evolución. La segunda se queda en una mera afirmación sobre la complejidad, sin ningún análisis sobre la misma.

De acuerdo con Rolando García **“un sistema complejo es una representación de un recorte de la realidad, conceptualizado como una totalidad organizada (de ahí la denominación de sistema), en la cual los elementos no son “separables” y, por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente”** (resaltado en el original). En este caso, la definición es clara respecto a la interrelación de estos elementos que hace que se deba estudiar como un todo, asociado a la imposibilidad de considerar aspectos particulares del fenómeno, proceso o situación. Rolando García también establece los componentes esenciales de un sistema: límites, elementos y estructura, estableciendo su dinámica. La imposibilidad de separación en el análisis de los sistemas está directamente asociada con la necesidad de involucrar a diversas especialidades o puntos de vista para el planteo y la solución del problema, siendo prácticamente inabarcable por una sola disciplina; de ahí



que la definición del diccionario de la Real Academia destaque que es de difícil comprensión algo que necesariamente tiene que ser encarado por un grupo interdisciplinario.

### Definición de complejidad en el contexto organizacional

Aunque el concepto de complejidad es universal, para una mejor comprensión de nuestra tarea debemos definirla en el contexto organizacional. Las organizaciones son instituciones creadas por hombres para el logro de objetivos que superan el accionar de cada uno de ellos por separado. Se establecen jerarquías, componentes, procedimientos y estructuras para alcanzar dichos objetivos. A medida que las organizaciones crecen, aumentan los elementos que la componen y las relaciones entre sí, esto lleva a un aumento en la complejidad de las mismas. Se incrementa la frecuencia de situaciones en donde la gran cantidad de variables, el alto grado de relación entre ellas y su dinámica hacen imposible pensar en un proceso sencillo de toma de decisiones, vulnerando a la organización entera.

La complejidad tiene múltiples dimensiones y puede ser evaluada bajo todas ellas, algunas son excluyentes entre sí y otras pueden complementar el entendimiento de los sistemas que buscamos comprender. Así podemos definir la complejidad según sus orígenes y tendremos los tipos de complejidad inherente, impuesta y diseñada.

La **complejidad inherente** es la intrínseca a la actividad. Está relacionada directamente con el cuerpo de teorías y leyes (naturales) sobre las cuales se basa la actividad y el espacio que abarca. Se dice que una organización es compleja cuando demanda conocimiento específico, mucho esfuerzo y coordinación por parte de múltiples actores. Claramente, la única forma de evitar este tipo de complejidad es dejar de hacer la actividad.

El segundo tipo, la **impuesta**, es la que se deriva del entorno exterior de la organización y se expresa mediante la forma de leyes, regulaciones, estándares y otras formas de intervención social. La organización no tiene control sobre este tipo de complejidad, debiendo adaptarse a la misma cuando aparece.

El prestigio que la CNEA tiene en la sociedad depende en gran parte de las dos primeras formas de complejidad. Los logros conseguidos en 60 años de participación en los usos pacíficos de la energía nuclear logrando la inserción del país como un actor relevante a escala mundial son dos muestras de que esta complejidad puede ser manejada de manera exitosa y que cierta parte del país siente orgullo por ello.

La última forma de complejidad es la **diseñada**. Esta se refiere a cómo se organizan los procesos internos dentro de la organización para llevar adelante las actividades teniendo en cuenta las restricciones previamente mencionadas, las inherentes a las actividades y las impuestas por el entorno. Es la resultante de las elecciones que realiza la organización, sus modelos

organizativos, sus necesidades, etc. Claramente, este tipo de complejidad es la que puede resultar un impulso o una traba para alcanzar los objetivos que se plantea la organización.

Bajo esos conceptos, la complejidad que necesariamente debe ser tratada, manejada y simplificada es la diseñada; es en ella que se concentran las trabas internas para el desarrollo pleno de la organización. Si ésta puede ser manejada y potencialmente utilizada en favor de la organización, no será vista como problema a ser eliminado sino como un impulso para el desarrollo y crecimiento de la organización. Es en el diseño de sus procesos donde la organización puede generar fuentes adicionales de valor. Un correcto manejo de la complejidad puede crear la flexibilidad que necesita la institución al enfrentarse a un entorno en permanente cambio.

Otra forma de definir la complejidad es de acuerdo al nivel donde ocurre dentro de la organización, es decir, a nivel institucional o a nivel individual. La **complejidad institucional** es la consecuencia del número de elementos e interacciones que se realizan dentro de la organización. Se relaciona con la cantidad y diversidad de actividades que realiza, la diversidad geográfica, su regulación. Relacionando estas definiciones de complejidad con las anteriores, se puede decir que la complejidad institucional está definida por la inherente y la impuesta en gran medida y en menor parte por la diseñada (sobre todo en los grandes conceptos organizativos).

La segunda es la que podemos llamar **complejidad individual**, es decir la manera en la que empleados y directivos trabajan en el entorno complejo. Es decir, en el día a día, cuánto cuesta hacer las cosas, cómo están definidos los roles, como se toman las decisiones, entre varios tipos de ejemplos. Claramente depende fuertemente del diseño de la organización, teniendo lazos débiles con las otras dos.

En el caso de la Comisión Nacional de Energía Atómica podemos hablar sin problemas del alto grado de complejidad institucional. La cantidad y calidad de conocimientos que se necesitan, el esquema regulatorio y normativo sobre el cual se asientan las múltiples actividades que realiza, los esquemas mundiales de generación, preservación y transmisión del conocimiento en temas nucleares con sus implicancias políticas, hacen que el manejo de la organización sea complejo.

Aún cuando estos dos niveles están relacionados fuertemente, la distinción entre ellos es muy importante. La primera, mediante un manejo adecuado, crea valor, mientras que la segunda no lo hace. Por lo tanto, debe encontrarse la manera de reducir la complejidad individual de la organización.

Una manera de lograrlo podría ser la eliminación de un área entera de investigación. Evidentemente el nuevo entorno sería el de una organización más simple, menos compleja. Pero se estaría destruyendo a la organización. Una mejor respuesta a la complejidad es la de identificar y reducir el grado de complejidad individual, realizando elecciones claras a nivel organizacional y operacional, incluyendo la clarificación de roles, la redefinición de

procesos claves y el desarrollo de capacidades entre los empleados para maniobrar en el entorno complejo. Concentrándose en esta perspectiva no solo se habrá mantenido el área previamente mencionada, sino que además se habrá creado un valor adicional en la organización: el manejo de la complejidad institucional.

### Reduciendo la complejidad: características relevantes

Entre los factores que se correlacionan fuertemente con la complejidad individual podemos mencionar tres: el diseño organizacional, los procesos y las capacidades organizacionales.

El diseño organizacional es el conjunto de medios que maneja la organización con el objeto de dividir el trabajo en diferentes tareas y lograr la coordinación efectiva de las mismas. De esta manera, puede realizarse el esfuerzo coordinado que lleve a la obtención de objetivos, definiendo las relaciones y aspectos más o menos estables de la organización. En términos de la teoría de sistemas, es la estructura del mismo. El diseño de la estructura es un elemento fundamental para proporcionar un ambiente interno adecuado en la organización, en el que las actividades que desarrollan sus miembros contribuyan al logro de los objetivos organizacionales. En este sentido, una estructura es eficaz si facilita el logro de los objetivos.

Un diseño organizacional efectivo puede minimizar la complejidad individual. Las organizaciones con un bajo nivel de complejidad individual se caracterizan por tener **estructuras matriciales** y **múltiples canales de información**, pero también por tomarse acciones para **eliminar las actividades redundantes** y fijar **objetivos claros con una rendición de cuentas efectiva**. La decisión de centralizar o descentralizar parece entonces secundaria, en tanto y cuanto se elimine la duplicación de actividades y se establezcan procedimientos claros de rendición de cuentas y fijación de objetivos.

Si bien es cierto decir que las organizaciones que están descentralizadas son más independientes y más dinámicas, mencionar lo opuesto también puede llegar a ser correcto. La centralización crea dependencia y también incrementa la complejidad, al crecer el número de variables a controlar y al centralizar la toma de decisiones; sin embargo, lo que resulta un reto identificar es el momento en el cual la organización debe cambiar su enfoque de centralizado a descentralizado. Lo anterior cabe decirlo puesto que centralismo en un medio altamente cambiante no funciona, pero unidades descentralizadas sin los recursos o la información necesarios para operar tampoco funcionan.

Los procesos son las interrelaciones bajo el concepto de sistemas complejos analizado. Establecen las relaciones entre los diferentes componentes del sistema y están en directa relación con las estructuras establecidas en el mismo. Es claro que bajo esta dinámica compleja, los procesos y las estructuras son realimentados el uno por el otro, constante e indefinidamente, aunque el cambio de los procesos se presenta en menores escalas de tiempo. Desde el objetivo final de la organización misión y visión)

hasta las actividades más rutinarias, éstas están traducidas como procesos; podemos mencionar así a los procesos de toma de decisiones, los procesos operativos, los procesos de desarrollo de recursos humanos y los procesos de desarrollo tecnológico, entre otros.

La desalineación entre los procesos y los objetivos de la organización es una de las principales causas de la complejidad individual. Los procesos son el mecanismo de coordinación entre los diferentes componentes de la organización y dada la característica de recurso escaso que tienen los componentes, para un mejor uso de éstos está claro que la organización deberá alinearlos con sus objetivos. La efectividad de los procesos de gerenciamiento, de los procesos operativos y de los sistemas informáticos de soporte claramente lleva a la disminución del grado de complejidad individual.

Como tercera característica relevante mencionada está la capacidad organizacional. Ésta se define como el grado de destrezas, conocimientos y habilidades existentes en una organización que permiten coordinar, ordenar e integrar los sistemas, procesos y recursos (materiales, financieros, técnicos) con eficacia y eficiencia para alcanzar las metas y objetivos deseados. Están en relación con la historia de la organización y su ámbito de trabajo. Dentro de las capacidades organizacionales que pueden reducir la complejidad individual están las capacidades gerenciales generales (liderazgo, autoridad, etc.) y, por otro lado, las capacidades para tomar la iniciativa y trabajar en un marco complejo y estrecho y aun así crear valor para la organización.

La identificación de dónde reside la complejidad individual dentro de la organización es el primer paso para accionar. En organizaciones nuevas y en crecimiento, por ejemplo, se centra a nivel de la dirección, mientras que todo el resto realiza sus operaciones de manera muy simple como si fueran compartimentos estancos. En otras organizaciones, la complejidad puede estar definida por una actividad principal, o por una función especial o un lugar geográfico particular (un lugar alejado, con altos costos y tiempos en logística, hace que una operación rutinaria en otro entorno sea compleja).

Por las características de la CNEA, la complejidad se presenta a través de toda la organización. Esto tiene la ventaja de que existen condiciones de flexibilidad y adaptabilidad en toda la organización. La desventaja principal se presenta cuando se trata de conseguir claridad en la responsabilidad de las tareas, por lo tanto también es difícil gestionar la performance de los individuos. Un adecuado manejo de estas características puede transformarse en una ventaja competitiva para la institución.

### Propuesta de mejora organizacional

Una vez que se conoce donde se encuentra la complejidad, la organización debe entonces enfocarse en reducir la complejidad individual. Para hacer esto, la organización debe definir claramente las responsabilidades (definiendo roles y los procesos de decisión) y eliminando la

duplicación (algunas veces mejorando los procesos).

**Definición clara de responsabilidades:** En este sentido “clara” significa definir cómo, cuándo y quiénes están involucrados; cómo y por quiénes se toman las decisiones; y quiénes arbitran si no se puede llegar al consenso para una decisión. Una definición clara de responsabilidades en los procesos puede compensar la complejidad que genera la distribución geográfica y la cantidad de tareas que existen en la Institución.

**Control en áreas claves:** Los pocos procesos que se deben estandarizar son aquellos que apuntalan a la fuente de valor de la institución. No se trata de mantener una estructura centralizada que controle a toda la institución sino de saber elegir aquello que tiene un real impacto sobre la creación de valor. El principio de centralización normativa y descentralización operativa es clave para entender cómo se puede hacer para establecer una unicidad en el control organizacional.

**Sistemas descentralizados:** Los sistemas descentralizados son aquellos donde el núcleo de comando y decisión está formado por varios subsistemas. En dicho caso el sistema no es tan dependiente, sino que puede llegar a contar con subsistemas que actúan de reserva y que sólo se ponen en funcionamiento cuando falla el sistema que debería actuar en ese caso. Aunque los sistemas centralizados se controlan más fácilmente que los descentralizados, son más sumisos y requieren menos recursos y son más lentos en su adaptación al contexto. Los sistemas descentralizados tienen una mayor velocidad de respuesta al medio ambiente, pero requieren mayor cantidad de recursos y métodos de coordinación y de control más elaborados y complejos.

**Procesos unificados y automatizados:** La unificación de procesos y automatización de los mismos desarrollados bajo las tecnologías de la información actuales son herramientas que deben explorarse al máximo para el mejoramiento de los recursos institucionales. Así, las distancias se achican, las interfaces se diluyen y la organización gana en simplificación de sus procesos internos. Es claro que para pensar en este tipo de herramientas se debe poseer la infraestructura necesaria para que la implementación tenga efectividad y un impacto altamente positivo.

**Coherencia:** Por coherencia se entiende al uso integral de la información generada por un proceso que sirva de base a otros de manera de trabajar en una forma integrada. En este sentido, la dinámica social de estos tiempos marca la pauta del trabajo interrelacionado y los mecanismos que existen para ello. Ya no se puede pensar más a la institución como áreas estancas ni a los recursos humanos como exclusivos de una sola área.

## Conclusiones

El presente trabajo sólo pretende ser una guía en las discusiones para la elaboración de las estrategias de la institución. La estrategia de una organización no es sólo fijar objetivos, sino que también sobresalen otras dimensiones, entre las que se pueden mencionar a la estructura organizacional, la forma en la que se toman las decisiones, los órganos de gobierno, los recursos humanos e, inclusive, las expectativas que genera la estrategia en la organización.

En este sentido, la fijación de objetivos es un aspecto más (y quizás el más sencillo) de la elaboración de la estrategia organizacional. Las otras dimensiones de la estrategia contemplan el concepto de complejidad que se trató de elaborar en el presente trabajo. Eliminar la complejidad que no agrega valor no es una tarea sencilla y requiere un consenso entre los diferentes actores de la organización y una dirección clara sobre lo que se quiere conseguir. Pero es con ese tipo de acciones que el éxito del Plan Estratégico 2010-2019 se alcanzará.

## Bibliografía

- Diccionario Real Academia Española, vigésimo segunda edición. [www.rae.es](http://www.rae.es).
- Sistemas complejos: Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Rolando García. Ed. Gedisa, Barcelona, 2006.
- Complejidad y caos: Guía para la administración del siglo XXI. Alfonso Cornejo Alvarez, 2004.
- Better strategy though organizational design*. Lowel L. Bryan, Claudia I. Joyce. McKinsey Quarterly, 2007.
- Cracking the Complexity Code*. Suzanne Heywood, Jessica Spungin, David Turnbull. McKinsey Quarterly, 2007
- Making the most of uncertainty*. Hugh Courtney. McKinsey Quarterly, 2001.
- Putting Organizational Complexity in its place*. Julian Birkingshaw, Suzanne Heywood. McKinsey Quarterly, 2010.
- The new dynamics of strategy: Sense-making in a complex and complicated world*. Kurtz, C. F.; Snowden, D. J.; IBM Systems Journal Volume: 42, Issue: 3. 2003.
- Understanding Complexity*, Olivier Serrat. Kwonledge Solutions, Asian Development Bank, November 2009.
- Desarrollo Organizacional – Principios y Aplicaciones. Rafael Guízar Montúfar. Ed. McGrawHill, México, 2008.
- Transparencia en la gestión pública: Ideas y experiencias para su viabilidad. Francisco Mezones (editor). Banco Interamericano de Desarrollo. MagnaTerra Editores. Guatemala, 2006.
- Evaluación organizacional: marco para mejorar el desempeño. Charles Lusthaus ... [et al.]. Banco Interamericano de Desarrollo, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. Washington, 2002.

Trabajo presentado en la XXXVII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, Buenos Aires, 22 al 26 de noviembre de 2010.



# CNEA AL DÍA

## NOTICIAS DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

(1º de julio a 31 de diciembre de 2010)

### Acuerdo con Francia

El 23 de julio, la Presidenta de CNEA, Lic. Norma Boero, y el Administrador General Adjunto del Commissariat à l'Energie Atomique de Francia, Hervé Bernard, firmaron en Buenos Aires un Acuerdo de Cooperación en los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear, en presencia del Ministro de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Arq. Julio De Vido, y de la Secretaria de Estado de Comercio Exterior de Francia, Mme. Anne Marie Idrac.

Ambas instituciones han desarrollado en el pasado una extensa trayectoria de cooperación en los usos pacíficos de la energía nuclear. Este acuerdo constituye una renovación de anteriores que otorga un nuevo marco para la cooperación bilateral en dominios estratégicos tales como la formación de recursos humanos y la generación nucleoelectrónica.

### Taller "Óptica para lunáticos" en el Balseiro

En julio se realizó nuevamente el Curso de Formación Continua que docentes del Instituto Balseiro brindan desde 1985 a profesores de nivel secundario. Cada año, unos 30 educadores de todo el país asisten a estos talleres que se llevan a cabo en el Centro Atómico Bariloche. Se trata de un curso intensivo de una semana que hace fuerte hincapié en actividades prácticas sencillas, eligiéndose cada año una temática distinta.

En esta ocasión se trataron temas de óptica, con énfasis en las aplicaciones a la astronomía y los descubrimientos astronómicos a lo largo de la historia. Además de charlas, se realizaron numerosas experiencias en laboratorio. Cada docente construyó un telescopio y un espectroscopio con elementos sencillos de la vida diaria. Todos los docentes se llevaron los elementos necesarios para construir en el aula los dos artefactos más importantes para el desarrollo de la astronomía: el telescopio para observar los astros y el espectroscopio para conocer su composición química.

### Entre Ríos tendrá el tercer centro de medicina nuclear del país

El 10 de agosto, el Gobernador de Entre Ríos, Sergio Urribarri, y la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero, firmaron en Buenos Aires un acuerdo marco para la instalación de un centro de medicina nuclear en esa provincia, que se ubicará en la ciudad de Paraná. Esta trascendente iniciativa, la tercera en su tipo en el país (sólo existen centros similares en Mendoza y la Capital Federal), que tendrá un alto impacto en materia de salud e investigación, permitirá contar con una instancia de investigación y desarrollo dedicada a los tratamientos oncológicos con la aplicación de tecnologías nucleares.

### Seminario para periodistas en Formosa

Conjuntamente con el Gobierno de la provincia de Formosa, la Universidad Nacional de Formosa y la Municipalidad de Formosa, la CNEA realizó el 18 de agosto el "Seminario de información para periodista sobre la Energía Nuclear", que contó con la participación del Subsecretario de Desarrollo Económico de Formosa, estando las exposiciones a cargo de autoridades y funcionarios de la CNEA.

El objetivo del encuentro, que tuvo la activa participación de más de 70 periodistas de diversos medios locales y regionales, fue la interrelación directa entre los trabajadores de prensa y los científicos de la CNEA, motivado por el proyecto que llevará a la nortea provincia un reactor del tipo CAREM. El encuentro permitió a los presentes indagar sobre diversos temas relacionados con el proyecto CAREM en particular y con la energía nuclear en general.

### Primera Jornada de Energía Nuclear en la UTN Avellaneda

Con el objetivo de actuar como espacio de intercambio, transferencia de conocimientos e integración, a fin de destacar el modo en que la energía nuclear y sus aplicaciones contribuyen al desarrollo del país y a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes, la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, y la CNEA organizaron el 27 de setiembre la Primera Jornada de Energía Nuclear, celebrada en el Campus Villa Dominico de esa Facultad. La apertura de la Jornada estuvo a cargo del Decano de la Regional, Ing. Jorge Omar Del Gener, mientras que el cierre lo realizó la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero.

El encuentro estuvo destinado a docentes, investigadores, estudiantes y graduados. Además de conferencias y exposiciones, se desarrollaron actividades institucionales y de formación, y se premiaron los mejores trabajos presentados.



### Reactor de investigación conjunto argentino-brasileño

La CNEA y la Comisión Nacional de Energía Nuclear del Brasil, en el marco de la Comisión Binacional de Cooperación Nuclear (COBAEN), han elaborado un proyecto de cooperación conjunto consistente en el diseño y desarrollo de un reactor de investigación y producción, con la intención de la ulterior construcción de una unidad en cada uno de ambos países, en lugares aún a determinar.

### El E-ICES 6 en San Rafael

A partir del 5 de octubre se celebró en la ciudad de San Rafael, provincia de Mendoza, el E-ICES 6, la sexta reunión internacional del International Center For Earth Sciences (ICES), organizada por la filial local integrada por la CNEA, con el objetivo de reunir a investigadores nacionales e internacionales en las diversas disciplinas involucradas en el estudio de las ciencias de la tierra, en la que se presentaron y debatieron numerosos trabajos referidos a esa temática.

### Feria Provincial de Ciencia y Tecnología de Río Negro

El Ministerio de Educación y la Subsecretaría de Ciencia, Tecnología y Desarrollo para la Producción de la Provincia de Río Negro, con el apoyo de la CNEA a través del Centro Atómico Bariloche, organizaron la Feria Provincial de Ciencia y Tecnología, que se desarrolló en esa ciudad los días 4 y 5 de octubre.

En la Feria, alumnos de nivel primario y medio de diversas localidades de la provincia presentaron proyectos de investigación que abordaban diversos temas de ciencia y tecnología, muchos de ellos relacionados en forma directa con su región. Estas Ferias forman parte del proceso de aprendizaje, proponen a los estudiantes acercarse a los métodos que se utilizan en la ciencia, la tecnología y la innovación, utilizarlos para conocer más sobre sus propias realidades regionales y elaborar alternativas para el desarrollo de la región y el cuidado del ambiente; además les brindan la oportunidad de trabajar en grupo de un modo efectivo y enriquecedor. Cabe destacar que a lo largo de la historia de las Ferias de Ciencia y Tecnología de esa provincia, los estudiantes rionegrinos han realizado aportes concretos que redundaron en mejoras en las condiciones de vida de sus comunidades. Asimismo, muchos de ellos pasaron a instancias nacionales en las que recibieron becas para continuar sus estudios en el nivel universitario.

### De rosa contra el cáncer. La CNEA se suma a la campaña de lucha contra el cáncer de mama

En adhesión al "Mes de Concientización sobre el Cáncer de Mama" se realizó en Buenos Aires el acto de lanzamiento de la Campaña Global de Estée Lauder Companies, cuyo capítulo argentino se desarrolla en asociación con la Obra Social de Personal de Dirección (OSIM). La Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero, expresó en el curso de ese acto la adhesión del sector científico a la misma.

Además, en el marco de esa Campaña y auspiciado por la Presidencia de la Nación, el 5 de octubre se realizó el "Seminario de políticas nacionales de prevención, diagnóstico y tratamiento para la lucha contra el cáncer de mama", en la que la CNEA estuvo presente participando con diversas exposiciones en el Seminario, que se realizó en el edificio del Centro Cultural del Bicentenario, y su Presidenta estuvo a cargo del cierre del mismo.

Finalmente, siempre en adhesión a esta Campaña, la CNEA iluminó el frente del edificio de su Sede Central con color rosa, distintivo de la misma.

### Seminario Argentina-India sobre Cooperación en los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear

Con la participación de una delegación de expertos de la India, se realizó a fines de septiembre en la Sede Central de la CNEA el 1° Seminario Bilateral Argentina-India sobre Cooperación en los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear.

El Seminario se focalizó sobre cuatro áreas temáticas principales: centrales nucleares de potencia de agua pesada y su ciclo de combustible, aleaciones especiales, molibdeno-99 y seguridad tecnológica nuclear, con el objetivo de identificar las áreas concretas en las cuales se puedan desarrollar proyectos conjuntos a futuro, a partir del Acuerdo de Cooperación en los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear firmado por la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero, en representación de la Argentina, y su par de la India, SrikumarBanerjee, en el marco de la 54° Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica celebrada en Viena.

Los expertos de la India visitaron la Centrales Nucleares Atucha I y II y recorrieron las instalaciones de los Centros Atómicos Constituyentes y Ezeiza.

### La CNEA en el Congreso Mundial de Ingeniería

La CNEA participó mediante un espacio en un "stand" en el Congreso Mundial de Ingeniería y Exposición de Ingeniería 2010 "Tecnología, Innovación y Producción para el Desarrollo Sostenible" celebrado en Buenos Aires en octubre.

El mismo fue inaugurado por el Ministro de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Arq. Julio De Vido, quien visitó la "isla nuclear", "stand" en el que expusieron diversas empresas del sector, siendo recibido en el espacio correspondiente a la CNEA por la Presidenta del organismo, Lic. Norma Boero.

El evento fue organizado por la Unión Argentina de Asociaciones de Ingenieros (UADI) y el Centro Argentino de Ingenieros (CAI), con la colaboración de diversas instituciones vinculadas con la ingeniería y disciplinas afines de todo el país, y forma parte de las actividades centrales que realiza la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros, que cuenta con la adhesión de 90 países y convoca a 15 millones de ingenieros. La iniciativa fue declarada de Interés Nacional por el Honorable Senado de la Nación y cuenta con el auspicio de la UNESCO y del Ministerio de Educación de la Nación.

### Premio DuPont-Conicet edición 2010

El premio DuPont-Conicet edición 2010 del Programa de Apoyo al Desarrollo Científico Tecnológico, consistente en U\$S 25.000, fue otorgado al equipo liderado por Dr. Pablo Levy, investigador de la CNEA, por el desarrollo de una tecnología emergente para realizar memorias permanentes, que pueden resultar veloces, miniaturizables y capaces de soportar ambientes adversos, basada en el mecanismo de conmutación resistiva.

El equipo premiado, estuvo compuesto por investigadores de la CNEA, el Conicet, la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires y la Universidad Nacional de San Martín.

### La Presidenta de la Nación visita Pilcaniyeu

La Presidenta de Nación, Dra. Cristina Fernández de Kirchner, realizó una visita técnica a las instalaciones de enriquecimiento de uranio de la CNEA. La Jefa de Estado recorrió las instalaciones del Complejo Tecnológico Pilcaniyeu que están siendo reacondicionadas y actualizadas en el marco del relanzamiento del Plan Nuclear Argentino dispuesto por el Poder Ejecutivo Nacional en agosto de 2006, acompañada por el Ministro de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Arq. Julio De Vido, el Secretario General de la Presidencia de la Nación, Dr. Oscar Parrilli, la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero y el Presidente de la Autoridad Regulatoria Nuclear, Lic. Francisco Spano.

La Presidenta de la Nación felicitó a quienes "durante los años de olvido estuvieron custodiando estas instalaciones, porque estaban custodiando el patrimonio de todos los argentinos", y reafirmó la decisión del Gobierno Nacional de continuar impulsando el desarrollo nuclear nacional con fines pacíficos, en el marco del respeto a los compromisos internacionales asumidos en materia de no proliferación de las armas nucleares.

### Concurso de Fotografía 60 años, 60 fotos

Los ganadores del "Concurso de Fotografía 60 años, 60 fotos", organizado por la CNEA en el marco de los festejos del sexagésimo aniversario de su creación, fueron: Guadalupe Blasco de la Regional Noroeste, que con su foto "Buscando energía" obtuvo el 1er premio haciéndose acreedora a una cámara digital de 10 megapíxeles y un pasaje para dos personas a un lugar del país donde la CNEA posea una dependencia, y Sebastián Gortari, del Centro Atómico Bariloche, que logró el segundo, también consistente en un viaje asimilar para dos personas, por su fotografía "Esther probando su bomba". Las fotografías premiadas y aquellas que recibieron menciones especiales pueden ser vistas en el link: [http://intranet.cnea.gov.ar/novedades/concurso\\_fotografia/](http://intranet.cnea.gov.ar/novedades/concurso_fotografia/)

### El Instituto Balseiro premia a jóvenes emprendedores

El Instituto Balseiro premió a jóvenes emprendedores en el marco del "Concurso de planes de negocios de base tecnológica IB50K", que cuenta con el auspicio de la CNEA, la Universidad Nacional de Cuyo, la Fundación Balseiro y el Centro de ex-alumnos del Instituto Balseiro, y los siguientes patrocinadores: Banco Patagonia, TECHINT/FUDETEC, Fundación YPF, TOYOTA, INVAP, ARSAT, ALTEC, ALUAR, CONUAR, TECNA.

El certamen propone un desafío para que alumnos universitarios y profesionales del país generen proyectos con aplicación concreta en el corto plazo. En la edición 2010 se presentaron 17 trabajos que fueron evaluados por 26 destacados expertos quienes consideraron el grado de innovación, el corto tiempo de lanzamiento al mercado y el potencial de crecimiento. Los ganadores recibieron un premio en efectivo que consistió en 30 mil dólares para el primer puesto, 15 mil para el segundo y 5 mil para el tercero.

El máximo galardón se lo llevó el trabajo "Microviscosímetro de sangre" del Instituto Balseiro, que plantea la producción de un viscosímetro para análisis clínicos, especialmente desarrollado para neonatología.

El segundo puesto fue para el proyecto "Desarrollo de un bioreactor de uso único para la proliferación de *stem cells* hematopoyéticas", apto para trasplante de médula ósea, realizado por la Universidad Nacional del Sur.

Por último, el tercer lugar lo compartieron el programa de *software* "Simulación del proceso de rotomoldeo plástico" de la Universidad Nacional de Mar del Plata, y el trabajo "Semáforos independientes autoabastecidos" de la Universidad Nacional de Cuyo.

### Avanza el proyecto CAREM

El 12 de diciembre, el Ministro de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Arq. Julio De Vido, y la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero, inauguraron en el Centro Atómico Ezeiza, el "Circuito de alta presión para ensayo de mecanismos" (CAPEM) para el proyecto CAREM, primer reactor de potencia diseñado y desarrollado en la Argentina.

### Nuevas instalaciones de la Regional Centro

En la ciudad de Córdoba la CNEA inauguró un moderno edificio para mejorar la capacidad del trabajo de la Regional Centro de más de 500 m<sup>2</sup>, que cuenta con una sala de reuniones y videoconferencias, un aula de mapas y archivo de información geológica, catorce oficinas y un centro de datos y comunicaciones. El acto fue presidido por la Presidenta de la CNEA, Lic. Norma Boero, acompañada por el Presidente y el Vicepresidente de DIOXITEK.

La Regional Centro lleva adelante estudios de geología del uranio y de prospección y exploración de minerales nucleares, analizando la favorabilidad uranífera de diferentes cuencas, sierras y sistemas de la zona central de nuestro país. El principal proyecto de esta Regional se desarrolla en La Rioja donde se está avanzando en la prospección y exploración de esos recursos. Otra importante actividad es la digitalización del completo archivo que contiene la información de la tarea desarrollada en esta materia por la CNEA desde el año 1953.



# Mutual Cnea

cumplió ya 30 Años  
acompañando a la  
Actividad Nuclear



1980 - 2010

La Mutual CNEA es el exitoso fruto de la inquietud de un grupo de empleados de la CNEA que, con espíritu solidario, concibió la creación de un fondo compensador que mejorase la situación de jubilados y pensionados de la actividad nuclear

14 DELEGACIONES EN TODO EL PAÍS  
MÁS DE 1700 ASOCIADOS

743 COMPLEMENTOS JUBILATORIOS Y  
525 COMPLEMENTOS PENSIONARIOS  
OTORGADOS VIGENTE

**BENEFICIOS PARA LOS ASOCIADOS**  
Complementos jubilatorio o pensionario  
Créditos hipotecarios, personales y otros

Subsidios por casamiento,  
nacimiento/adopción o fallecimiento  
Descuentos en comercios y hoteles  
adheridos

**CONSULTE CONDICIONES DE  
INGRESO O REINGRESO EN  
SU DELEGACIÓN**

**MUTUAL DEL PERSONAL DE  
LA COMISIÓN NACIONAL DE  
ENERGÍA ATÓMICA**

**FONDO COMPENSADOR DE  
LA ACTIVIDAD NUCLEAR**

Administración Central:  
Tel/Fax: 011-4701-0355 / 5059  
11 de septiembre N° 4366/68  
(C1429BJF) C. A. de Buenos Aires  
Info @mutualcnea.com.ar



## EMPRESAS Y FUNDACIONES DEL SECTOR NUCLEAR ARGENTINO ASOCIADAS O VINCULADAS CON LA CNEA

### COMBUSTIBLES NUCLEARES ARGENTINOS S.A. (CONUAR)

CONUAR fue creada por Decreto N° 1719/81. Es una sociedad anónima cuyo capital accionario corresponde el 33,33% a la CNEA y el 66,67% restante a la empresa privada SUDACIA S.A., estando su planta de producción situada en el Centro Atómico Ezeiza, provincia de Buenos Aires. Tiene como objetivo producir, a partir de la utilización de tecnología suministrada por la CNEA, elementos combustibles para el abastecimiento de las centrales nucleoelectricas y de los reactores de investigación argentinos. Su dirección es Prebistero Juan González y Aragón N° 15 - Centro Atómico Ezeiza – (B1802AYA) Ezeiza – Buenos Aires – Argentina - Teléfono: (54 – 11) 6326-1300 - Fax: (54 – 11) 6326-1490 - <http://www.conuar.com.ar>

### DIOXITEK S. A.

DIOXITEK fue creada en 1996 por Decreto N° 1286/96. Es una sociedad anónima cuyo capital accionario corresponde en un 99% a la CNEA y el 1% restante a la provincia de Mendoza. Su objetivo inicial fue garantizar el suministro del dióxido de uranio que se utiliza en la fabricación de los elementos combustibles para las centrales nucleares de potencia. En 2002 incorporó a su actividad la producción y comercialización de fuentes selladas de cobalto 60 para uso medicinal e industrial. Su planta de producción de dióxido de uranio se encuentra en la ciudad de Córdoba y la planta industrial de elaboración de fuentes selladas de cobalto 60 en el Centro Atómico de Ezeiza, provincia de Buenos Aires. Su dirección es Avenida del Libertador 8.250 (1429) Buenos Aires – Argentina - Teléfono: (54 – 11) 4704 - 1035/1236 - Fax: (54 – 11) 4704 - 1043 - <http://www.dioxitek.com.ar>

### EMPRESA NEUQUINA DE SERVICIOS DE INGENIERÍA S. E. (ENSI)

ENSI fue constituida el 21 de diciembre de 1989 entre el Gobierno del Neuquén y la CNEA. Es una sociedad del estado neuquino cuyo capital accionario corresponde en un 51% a dicho estado y un 49% a la CNEA y su sede se encuentra en la localidad de Arroyito de la citada provincia. Su objetivo principal es operar plantas químicas a escala piloto e industrial y elaborar y comercializar productos químicos. Por contrato con la CNEA se hizo cargo de la operación de la Planta Industrial de Agua Pesada (PIAP) situada en la citada localidad de Arroyito. ENSI, además, presta servicios de ingeniería a empresas dedicadas a la producción de petróleo, gas y energía eléctrica que operan en la región. Su dirección es Ruta Nacional 237 km. 1278 Arroyito (8313) Neuquén – Argentina - Teléfono: (54 – 299) 440706/440411/440572 - Fax: (54 – 299) 440534 – <http://www.ensi.com.ar>

### FABRICA DE ALEACIONES ESPECIALES S.A. (FAE)

FAE fue creada por Decreto N° 1088/86. Es una sociedad anónima cuyo capital accionario corresponde un 32% a la CNEA y el 68% restante a la empresa CONUAR S.A., estando su planta de producción situada en el Centro Atómico Ezeiza, provincia de Buenos Aires. Tiene por objetivo la producción, a partir de la utilización de tecnología suministrada por la CNEA, de vainas y semiterminados de zircaloy 4 para la fabricación de elementos combustibles para reactores de potencia y la producción de tubos de acero inoxidable y aceros especiales de alta calidad. Su dirección es Prebistero Juan González y Aragón N° 15 - Centro Atómico Ezeiza – (B1802AYA) Ezeiza – Buenos Aires – Argentina - Teléfono: (54 – 11) 6326-1493 - Fax: (54 – 11) 6326-1496 - <http://www.fae.com.ar>

### INVAP S. E.

INVAP fue creada por Decreto del Gobierno de Río Negro N° 661/76. Es una empresa de tecnología cuyo capital accionario corresponde en un 100% al estado rionegrino, estando vinculada a la CNEA mediante un acuerdo con la referida provincia. Su sede se encuentra en San Carlos de Bariloche. Su objetivo estatutario original es servir al desarrollo nuclear argentino, aunque más tarde ha extendido sus actividades a otros campos tecnológicos como el aerospacial. Se dedica principalmente al desarrollo y construcción de reactores de investigación e instalaciones nucleares de todo tipo, así como también de sistemas de aplicación médica y científica. Además, participa en el desarrollo y la construcción de satélites. Su dirección es Francisco Perito Moreno 1089 - C.C. 961 – (R8400AMU) San Carlos de Bariloche - Río Negro – Argentina - Teléfono: (54 – 2944) 445400 - Fax: (54 – 2944) 423051 - <http://www.invap.com.ar>

### POLO TECNOLÓGICO CONSTITUYENTES S.A. (PTC)

El PTC fue creado por Decreto N° 894/98 y está constituido por la asociación de instituciones de desarrollo tecnológico con capacidades distintas y complementarias (CNEA, Universidad Nacional de General San Martín, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa y Servicio Geológico Minero Argentino) radicadas en el área geográfica vecina al Centro Atómico Constituyentes, provincia de Buenos Aires. La CNEA es poseedora del 20% del capital accionario. El PTC tiene por objeto prestar servicios en las áreas de la investigación y el desarrollo tecnológico cuando ellos requieran complementar las capacidades de sus integrantes. Su dirección es Parque Tecnológico Miguelete – Edificio 1 - Avda. General Paz (entre Constituyentes y Albarellos) (1650) - San Martín - Pcia. de Buenos Aires – Argentina - Teléfono / fax: (54 – 11) 754 – 4070 – <http://www.cnea.edu.ar/polo>

### FUNDACIÓN CENTRO DE DIAGNÓSTICO NUCLEAR (FCDN)

La FCDN constituye un emprendimiento conjunto de la CNEA y la FUESMEN con el objeto de dotar al conglomerado bonaerense de un centro de última generación de diagnóstico por técnica de emisión de positrones (PET). Fue creada el 14 de diciembre de 2004 y su Centro de Diagnóstico Nuclear fue inaugurado el 23 de mayo de 2007. Su dirección es Avenida Nazca 3449 (1429) Buenos Aires – Argentina - Teléfono / fax: (54 – 11) 4566-7597 - E-mail: [info@fcdn.org.ar](mailto:info@fcdn.org.ar) - <http://fcdn.org.ar>

### FUNDACIÓN ESCUELA DE MEDICINA NUCLEAR (FUESMEN)

La FUESMEN fue creada por convenio suscripto el 21 de diciembre de 1990 entre la CNEA, el Gobierno de Mendoza y la Universidad Nacional de Cuyo, con el objetivo de desarrollar actividades científicas, docentes y asistenciales en un marco de excelencia técnica y humana en el campo de la medicina nuclear y el radiodiagnóstico. Su dirección es: Garibaldi 405 (M5500CJI) Mendoza – Argentina - Teléfono: (54 – 261) 4201615 - Fax: (54 – 261) 4203288 - E-mail: [info@fuesmen.edu.ar](mailto:info@fuesmen.edu.ar) <http://fuesmen.edu.ar>



**COMISIÓN NACIONAL  
DE ENERGÍA ATÓMICA**



AV. DEL LIBERTADOR 8250  
C1429BNP - C.A. DE BUENOS AIRES  
REPÚBLICA ARGENTINA  
TEL: (011) 4704-1215  
REVISTA@CNEA.GOV.AR  
WWW.CNEA.GOV.AR