

1.2

# REACTORES NUCLEARES DE GENERACIÓN IV

Por el Cnl A (R) OIM Dr. Osvaldo Azpitarte\*

## RESUMEN

La energía nuclear comenzó a utilizarse para producir electricidad en reactores nucleares a partir de la década del '50. Desde entonces, esta energía ha probado ser una fuente segura, económica y limpia de energía eléctrica.

Los avances tecnológicos en distintas áreas han dado lugar a sucesivas generaciones de reactores nucleares, desde los primeros reactores prototipo (Generación I), pasando por los reactores actualmente en operación (Generación II), los reactores avanzados evolutivos de Generación III, actualmente en construcción, hasta los reactores innovativos de Generación IV, en etapa de investigación y desarrollo. Las características propias de estos últimos les permite, aparte de sobresalir en seguridad y confiabilidad, la reproducción de material fisible (*breeding*) y la transmutación y quemado de Actínidos Menores (principales responsables de la carga radiotóxica y térmica de los residuos nucleares), asegurando de esta forma la sustentabilidad de la energía nuclear.

---

Palabras clave: energía nuclear, reactores nucleares, Generación IV

## ABSTRACT

Nuclear energy began to be used to produce electricity in nuclear reactors in the '50s. Since then, this energy has proved to be a safe, economic and clean source of electricity.

Technological advance in different areas allowed for the deployment of successive generations of nuclear reactors, from the early prototype reactors (Generation I), through the current operating reactors (Generation II), the advanced evolutive Generation III reactors, currently under construction, to the innovative Generation IV reactors, under research and development phase. The features of these Generation IV reactors, allow them, apart from excelling in safety and reliability, to reproduce fissile material (*breeding*) and to transmute and burnup Minor Actinides (which is the main responsible for the radiotoxicity and thermal burden of the nuclear wastes), thus assuring sustainability of the nuclear energy.

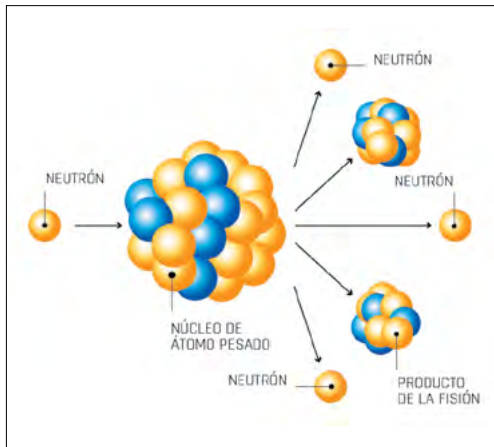
---

Key words: nuclear energy, nuclear reactors, Generation IV

## INTRODUCCIÓN

Se da el nombre genérico de “energía nuclear” a la energía que se libera en las reacciones nucleares de fusión o fisión. En la reacción de fisión (Figura 1), un átomo pesado (normalmente  $U_{92}^{235}$ ) absorbe un neutrón y se escinde dando como resultado dos productos de fisión, 2 o 3 neutrones libres, y energía. Esta energía, aproximadamente 200 MEV por fisión, se manifiesta en energía cinética de los productos de la fisión. El origen de esa energía reside en que la masa inicial en la reacción es mayor que la sumatoria de la masa de los productos de la reacción y esa diferencia de masa se transforma en energía según la bien conocida ecuación de Einstein,  $E=mc^2$ , donde  $E$  es energía,  $m$  es masa y  $c$  es la velocidad de la luz.

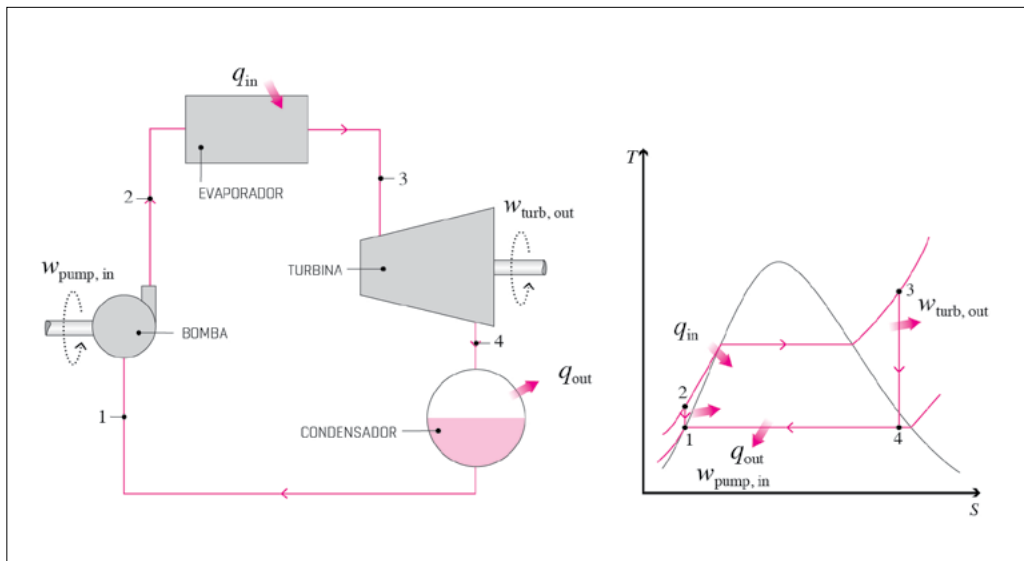
FIGURA 1: REACCIÓN DE FISIÓN



La mayoría de los reactores nucleares emplean el calor liberado en las reacciones de fisión para hacer evaporar agua y utilizar el vapor resultante para hacer girar una turbina asociada a un generador eléctrico, en un ciclo termodinámico denominado ciclo Rankine. En la Figura 2, el reactor nuclear proporciona el calor necesario al evaporador,  $q_{in}$ .

Un reactor nuclear se compone de tres ciclos, uno primario, otro secundario, y uno terciario, como se muestra en la Figura 3. El ciclo primario, dentro del edificio de contención, incluye el reactor propiamente dicho, que contiene las barras de combustible nuclear y las barras de control, una bomba centrífuga que hace circular el refrigerante que extrae el calor generado en el núcleo del reactor, y un generador de va-

FIGURA 2: CICLO RANKINE



por que recibe ese calor y lo utiliza para evaporar el agua del circuito secundario. El circuito secundario es un ciclo Rankine compuesto por una turbina, un condensador y una bomba centrífuga, como el mostrado en la Figura 2. El terciario es un ciclo abierto que toma agua de un sumidero de calor (río, lago o mar) y la utiliza para condensar el vapor del ciclo secundario en el condensador.

Es importante destacar que la producción de energía eléctrica es una de las principales responsables del fenómeno de calentamiento global causado por la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, las emisiones provenientes de la energía nuclear pueden considerarse ínfimas, y comparables con las de las energías hidráulicas o eólicas, como se muestra en la Figura 4. Por consiguiente, puede considerarse a la energía nuclear como una energía limpia.

## Situación actual de la energía nuclear en el mundo

En la actualidad, los 448 reactores nucleares que operan en el mundo representan una capacidad instalada de más de 390000 megavatios eléctricos (MWe), lo que significa un 13,46 por ciento de participación porcentual global en la generación eléctrica (Figura 5). Además de estos, hay actualmente 59 reactores en construcción. La Tabla 1 muestra la cantidad actual de reactores por país.

La gran mayoría de los reactores que operan en la actualidad fueron construidos entre las décadas de los '60 y los '80, principalmente en Estados Unidos, Francia y Japón. A partir del año 1986, se produjo una paralización en la construcción de reactores nucleares como consecuencia del accidente nuclear de Chernobyl, en Ucrania. No obstante, a partir del año 2000, y a partir del reconocimiento final de la energía nuclear como una opción segura, limpia y económica para producir energía eléctrica, se produjo lo que se dio en llamar el “renacimiento nuclear”, que se manifiesta por la cantidad de reactores actualmente en construcción, principalmente en China, India y Rusia.

FIGURA 3: ESQUEMA DE UN REACTOR NUCLEAR

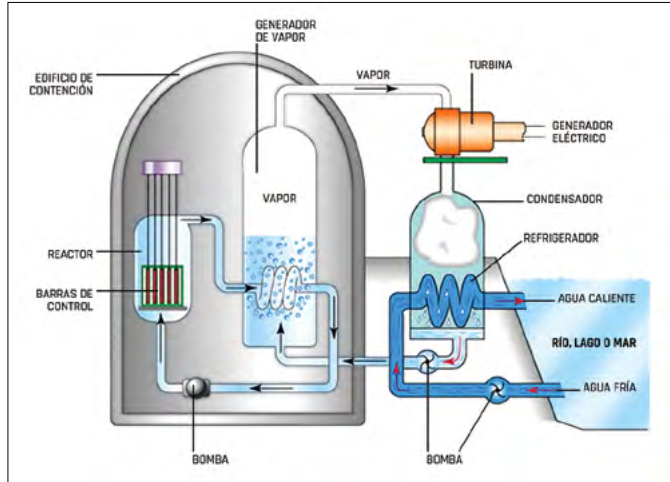


FIGURA 4: EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR FUENTE DE ENERGÍA

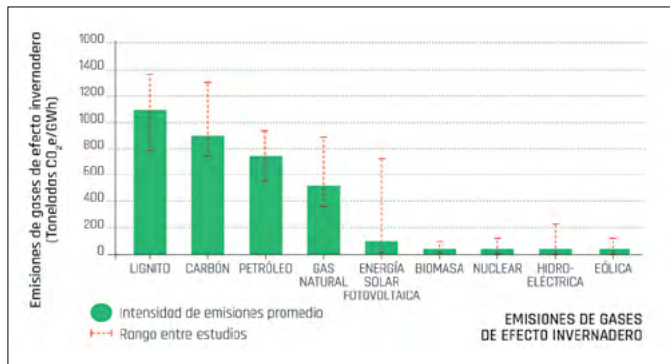
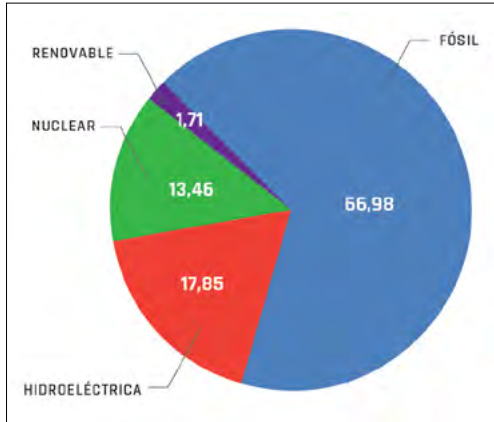


FIGURA 5: PARTICIPACIÓN PORCENTUAL GLOBAL EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA (RDS, 2011)



### Perspectiva actual de la energía nuclear

Las perspectivas sobre comportamiento de la demanda global de energía primaria para el siglo XXI muestran un crecimiento exponencial, impulsado principalmente por el crecimiento demográfico y una mejora en el promedio de la calidad de vida (OCDE/NEA, 2013). Como se muestra en la Figura 6, se pronostica que la demanda de energía se multiplicará por un factor de 3 para el año 2050 y por un factor de 7 para el año 2100.

Dentro de este marco de crecimiento, las estimaciones indican que la participación porcentual global de la energía nuclear mantendrá, como mínimo, el 14 por ciento actual. La Figura 7 muestra las proyecciones realizadas por el Organismo Internacional de Energía

Atómica (OIEA) (IAEA, 2010). En los estudios realizados se postularon tres escenarios de crecimiento hasta el año 2100: el Escenario Bajo (Low) donde se alcanzan los 2500 GWe, que representan el 14 por ciento de la demanda total; el Escenario Moderado (*Moderate*) que alcanza 5000 GWe, y considera que la energía nuclear incrementará su participación porcentual a expensas de las energías fósiles; y finalmente el Escenario Alto (*High*) que alcanza los 10000 GWe, lo que representará alrededor del 50 por ciento de la demanda total.

### Generaciones de reactores nucleares

El Generation IV International Forum (GIF) es un foro internacional establecido en el año 2000 a instancias del Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE, por sus siglas en inglés), con el fin de promover el desarrollo de reactores nucleares innovativos. El foro está actualmente integrado por catorce naciones y organismos internacionales: Argentina, Australia, Brasil, Canadá,

TABLA 1: REACTORES NUCLEARES EN EL MUNDO (IAEA, 2018)

PAÍS	REACTORES OPERANDO	REACTORES EN CONSTRUCCIÓN
Argentina	3	1
Armenia	1	
Bangladesh		1
Bielorrusia		2
Bélgica	7	
Brasil	2	1
Bulgaria	2	
Canadá	19	
China	39	18
República Checa	6	
Finlandia	4	1
Francia	58	1
Alemania	7	
Hungría	4	
India	22	7
República Islámica de Irán	1	
Japón	42	2
República de Corea	24	4
México	2	
Países Bajos	1	
Pakistan	5	2
Rumania	2	
Rusia	35	7
Eslovaquia	4	2
Eslovenia	1	
Sudáfrica	2	
España	7	
Suecia	8	
Suiza	5	
Emiratos Árabes Unidos		4
Reino Unido	15	
Ucrania	15	2
Estados Unidos	99	2
<b>Total</b>	<b>448</b>	<b>59</b>



El avance de la tecnología, sobre todo de la ciencia de materiales, permitió la aparición de una nueva generación de reactores avanzados evolutivos, la Generación III/III+. La totalidad de los reactores que se construyen en la actualidad pertenecen a esta generación.

Las principales diferencias entre la Generación II y la Generación III/III+ son las siguientes:

- > Generación III: combinación de sistemas de seguridad activos y pasivos. Generación II: activos
- > Generación III: diseño más simple y robusto.
- > Generación III: diseño modular que reduce el tiempo de construcción (3 a 5 años). Generación II: 5 a 7 años.
- > Generación III: vida útil típica de 60 años. Generación II: 40 años.
- > Generación III: reducida probabilidad de accidentes con daño al núcleo: CFD (Core Frequency Damage)-10-6 /año. Generación II: CFD-10-5 /año
- > Generación III: mitigación de las consecuencias en el caso extremo de fusión del combustible nuclear, mediante el uso de los llamados "core catchers", que retienen el combustible fundido y evitan que dañe o atraviese el edificio de contención.
- > Generación III: edificio de contención de doble pared. Generación II: edificio de contención de pared simple.
- > Generación III: mayor quemado promedio de extracción (Q-60000 MWd/ton). Generación II: Q ~30000 MWd/ton.

El quemado de extracción (Q) mide la cantidad de energía extraída (en unidades de megawatt. día - MWd) por unidad de masa de combustible quemado (en toneladas de uranio), dando una idea del rendimiento y de la eficiencia en el uso del combustible nuclear.

- > Generación III: posibilidad de operar haciendo que la potencia entregada a la red haga seguimiento de la demanda eléctrica
- > Generación III: mayor período de gracia. Se entiende por tal al período en que la central nuclear puede permanecer segura sin recibir suministros externos (agua, combustible, electricidad) luego de ocurrido un evento accidental que demande una parada de emergencia.

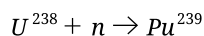
## Reactores nucleares de Generación IV

El proyecto GIF dio origen a los denominados reactores de Generación IV, siendo que su objetivo principal es el de coordinar el desarrollo de reactores nucleares innovativos que, aparte de reunir las características propias de los reactores de Generación III, satisfagan, también, requerimientos de excelencia vinculados a sustentabilidad, seguridad nuclear, economía y resistencia a la proliferación. A partir de ese objetivo, se definieron las metas tecnológicas que deberían satisfacer estos reactores en cada una de las siguientes áreas: sustentabilidad, seguridad y confiabilidad, economía y resistencia a la proliferación y seguridad física.

### Sustentabilidad:

- > Generar energía en forma sustentable, facilitando la disponibilidad de combustible nuclear a largo plazo.

Los reactores rápidos de Generación IV generan más combustible del que consumen. Esto es posible porque el ritmo de creación de material fisil ( $Pu^{239}$ ) por captura neutrónica en material fértil ( $U^{238}$ ) en el núcleo del reactor, como se muestra en la ecuación de abajo, es mayor que el ritmo de destrucción de material fisil por fisión. De esta forma, se extiende la disponibilidad de combustible nuclear a largo plazo.



- > Minimizar los residuos nucleares y disminuir la carga de su almacenamiento.

Para la mayoría de los reactores de Generación IV se utiliza el reprocesamiento del combustible quemado luego de su paso por el núcleo del reactor y antes de su disposición final. Éste es un proceso químico en el que se recupera el Uranio y el Plutonio no fisionado, para su reutilización como combustible fresco en otro nuevo ciclo. De esta forma se envía una menor cantidad de masa para su repositorio final.

Por otro lado, en los reactores nucleares de Generación IV de espectro neutrónico rápido ( $E_n > 1 \text{ MeV}$ ) se produce lo que se denomina ‘quemado y transmutación de Actínidos Menores’. Éstos son isótopos de Americio y Curio, elementos químicos posteriores al Uranio y al Plutonio, que se producen en el proceso de quemado del combustible nuclear, y que son responsables, en gran medida, de la carga radiotóxica y térmica de los residuos nucleares.

### 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 de combustible 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:

- > Presentar 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 significó evaluar a más de cien diseños de reactores innovativos de distinto origen, el proyecto GIF escogió finalmente seis conceptos para volcar en ellos los esfuerzos coordinados de investigación y desarrollo de los países miembro del proyecto. Los reactores seleccionados fueron el SFR (Sodium Fast Reactor), el GFR (Gas Fast Reactor), el LFR (Lead Fast Reactor), el SCWR – (Super Critical Water Reactor), el VHTR (Very High Temperature Reactor) y el MSR (Molten Salt Reactor). Estos reactores nucleares de Generación IV se encuentran actualmente en etapa de investigación y desa-

.....  
TABLA 2: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES DE GENERACIÓN IV (GIF, 2014)

	VHTR	GFR	SFR	SCWR	LFR	MSR
Espectro neutrónico	Térmico $E_n < 1 \text{ eV}$	Rápido $E_n > 1 \text{ MeV}$	Rápido	Térmico o rápido	Rápido	Rápido
Refrigerante	Helio	Helio	Na líquido	$\text{H}_2\text{O}$ supercrít.	Pb líquido	Sal fundida $\text{LiF}$
Temperatura primaria ( $^{\circ}\text{C}$ )		850	550	510-625	480-800	700 -800
Presión primaria (atm)	70	70	1	250	1	5
Material combustible	$\text{UO}_2$	MOX $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$	MOX	$\text{UO}_2$	MOX	Sal fundida $\text{UF}_4 - \text{PuF}_3$
Quemado (MWd/t)	150000 / 200000	140000	150000	45000	100000 / 150000	
Eficiencia térmica (%)	50	50	42	44	42 / 44	50

rollo. Se prevé su entrada en operación a partir de la década de 2030. En la Tabla II se muestran las principales características de estos reactores.

### Actividades de la CNEA relacionadas con los reactores nucleares de Generación IV

El Plan Estratégico 2010-2019 de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA, 2010), estableció los siguientes objetivos estratégicos en el área de reactores nucleares de Generación IV:

#### Objetivo Estratégico 3:

Implementar un programa de seguimiento de nuevas tecnologías de reactores nucleares de Generación IV y sus ciclos de combustible para evaluar y generar líneas de investigación y desarrollo asociadas.

- > Objetivo específico 3.1: Realizar estudios y evaluaciones con el objetivo de definir la o las líneas de Generación IV de mayor interés para el país.
- > Objetivo específico 3.2: Promover la participación en proyectos internacionales a través de la colaboración en proyectos específicos.
- > Objetivo específico 3.3: Desarrollar facilidades experimentales.

Con la finalidad de cumplir con el Objetivo específico 3.1, la CNEA llevó a cabo, durante los años 2010 y 2011, el estudio denominado "Evaluación comparativa de los seis diseños seleccionados en el marco del proyecto Generation IV International Forum" (CNEA, 2011). El estudio fue implementado por un grupo de expertos en distintas áreas, que evaluaron los reactores utilizando indicadores de rendimiento en distintas áreas: Viabilidad del Concepto, Seguridad Nuclear y Diseño, Economía, Sustentabilidad, Resistencia a la Proliferación, Combustible Nuclear, Materiales, Reprocesamiento y Balance de Planta. Se calificó a los reactores con un valor numérico entre 0 y 1, correspondiendo 1 al rendimiento ideal. La Tabla III muestra el resultado numérico final de la evaluación comparativa. Según este resultado, el SFR resultó el reactor mejor calificado, por lo que la CNEA seleccionó a este reactor y a la tecnología del sodio como la más adecuada para la aplicación futura de cursos humanos y económicos.

A fin de cumplir con el Objetivo específico 3.2, la CNEA participó en el proyecto del OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) denominado "Sodium Properties and Safe Operation of Experimental Facilities in Support of the Development and Deployment of Sodium-cooled Fast

.....  
TABLA 3: RESULTADOS FINALES DE LA EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS REACTORES DE GENERACIÓN IV (CNEA, 2011)

Áreas	Coef	SFR	GFR	LFR	SCWR		VHTR	MSR
					R	T		
Viabilidad del Concepto	2	0.88	0.46	0.33	0.25	0.29	0.83	0.25
Seguridad Nuclear y Diseño	3	0.69	0.66	0.71	0.68	0.67	0.78	0.63
Economía	2	0.67	0.79	0.67	0.69	0.55	0.74	0.69
Sustentabilidad	2	0.92	0.92	0.92	0.92	0.17	0.17	1.00
Resistencia a la Proliferación	2	0.42	0.42	0.42	0.33	0.92	0.75	0.75
Combustible	3	0.72	0.61	0.61	0.67	0.67	0.81	0.64
Materiales	2	0.66	0.61	0.52	0.52	0.61	0.64	0.42
Reprocesamiento	2	0.83	0.33	0.83	1.00	1.00	0.33	0.50
Balance de Planta	1	0.54	0.75	0.50	0.63	0.67	0.83	0.46
SUMA PESADA		13.52	11.61	11.84	12.09	11.77	12.52	11.49
SUMA NORMALIZADA		0.71	0.61	0.62	0.64	0.62	0.66	0.60



*Reactors*”, proyecto que se llevó a cabo entre los años 2013 y 2017. CNEA contribuyó al proyecto analizando las propiedades termodinámicas del sodio y su ecuación de estado.

También enmarcado en el Objetivo específico 3.2, la CNEA participa actualmente de un proyecto bilateral con Estados Unidos, para el cálculo neutrónico y termohidráulico de un reactor SFR experimental norteamericano, el EBR II, utilizando herramientas avanzadas de cálculo numérico.

Para cumplir con el Objetivo específico 3.3, la CNEA se encuentra actualmente abocada a la construcción de un laboratorio experimental de sodio, que incluye una caja de guantes hermética para la manipulación de sodio líquido en atmósfera inerte (argón o nitrógeno). La manipulación del sodio líquido requiere de mucha precaución y medidas de seguridad, ya que es inflamable en presencia de aire y reacciona explosivamente en contacto con agua.

Finalmente, en lo referente a actividades académicas relacionadas con los reactores de Generación IV, en los institutos de la CNEA (Instituto Balseiro e Instituto Dan Beninson) se dictan cursos regulares de grado y de posgrado relacionados con éstos. También se han llevado a cabo varios seminarios conjuntos CNEA/OIEA, con la presencia de público y expertos internacionales: CNEA/IAEA Education and Training Seminar/Workshop on Sodium Cooled Fast Reactor Science and Technology, Bariloche, Argentina, 2011 y 2012.

## Conclusiones

Las perspectivas mundiales de demanda de energía eléctrica muestran un crecimiento exponencial, impulsado principalmente por el crecimiento demográfico y la mejora en el promedio de calidad de vida. Este hecho plantea desafíos para la producción de energía eléctrica. Uno de ellos, tal vez el más importante, es la emisión de gases de efecto invernadero causantes del fenómeno de calentamiento global. En este sentido, la energía nuclear representa una opción limpia y libre de tales emisiones.

Dentro de este panorama de crecimiento de demanda de energía, las perspectivas indican un aumento de la capacidad instalada de energía nuclear desde los 400 GWe actuales hasta, aproximadamente, 4000 GWe para el año 2100.

En este contexto, cobra cada vez más importancia el concepto de sustentabilidad, que incluye el uso racional de los recursos naturales y la preservación del medio ambiente. En el marco de la energía nuclear, los reactores rápidos de Generación IV, dadas sus características únicas, pueden hacer una contribución importante en ese sentido. En efecto, pueden generar más material fisible que el que consumen, y por las características de su ciclo de combustible, pueden reducir la masa, radiotoxicidad y carga térmica de los residuos nucleares.

Las potencias nucleares mundiales, reunidas en el proyecto GIF, están haciendo grandes esfuerzos para que los reactores de Generación IV estén disponibles a corto o mediano plazo, para luego aumentar su participación en forma constante.

La Comisión Nacional de Energía Atómica, atenta al interés internacional creciente en temas relacionados con los reactores de Generación IV, ha incluido a éstos en su Plan Estratégico, y ha creado un grupo de trabajo dedicado exclusivamente a su estudio.

## Referencias

- > Plan Estratégico 2010-2019, CNEA, 2010.
- > Evaluación comparativa de los seis diseños seleccionados en el marco del proyecto Generation IV International Forum, CNEA, 2011.
- > Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, 2014.

- > Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends – IAEA Nuclear Energy Series N° NP-T-1.8, 2010.
- > Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No 2, IAEA, 2018.
- > Transitions Towards a Sustainable Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, 2013.
- > Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series N° 1, IAEA, RDS, 2011.
- > Greenhouse gas emissions avoided through use of nuclear energy, World Nuclear Association,
- > <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/greenhouse-gas-emissions-avoided.aspx>, WNA, 2018

(\*) **Cnl (R) A DIM Dr Osvaldo Azpitarte:** Coronel retirado de Artillería, promoción 107 del Colegio Militar de la Nación. Egresado de la Escuela Superior Técnica como Ingeniero Químico, en 1993. Egresado del Instituto Balseiro (CNEA), como Ingeniero Nuclear, en 1993. Doctor en Ingeniería Nuclear, por el Instituto Balseiro, en el año 2003.