



# El futuro del sector eléctrico

## La producción y el transporte de energía eléctrica en el largo plazo

Por *Hugo Alberto Carranza*

La presente edición de *Petrotecnia* está orientada al análisis del futuro del sector eléctrico, en particular, a indagar sobre la conformación de la futura matriz de generación eléctrica, es decir, a analizar las fuentes y las tecnologías que pueden ser utilizadas en el largo y muy largo plazo en el mundo y en la República Argentina. También se analiza la evolución del transporte y se muestran algunos emprendimientos eléctricos importantes realizados por el sector petrolero para garantizar la plena producción en sus yacimientos.

## Introducción

El mundo consume cada vez más cantidades de energía eléctrica. La generación de electricidad creció desde 6.000 TWh en 1970 a 20.000 TWh en 2008, pasó de representar el 11% del consumo final de energía en 1970, al 18% en 2008.

Desde su consolidación como un nuevo energético secundario en los inicios del siglo xx, el sector eléctrico ha basado su producción de energía eléctrica (EE) en la transformación, en primer lugar, de un energético primario en energía mecánica en el eje de una turbina y, luego, esta energía mecánica es transformada en eléctrica en un generador eléctrico de corriente alterna trifásica.

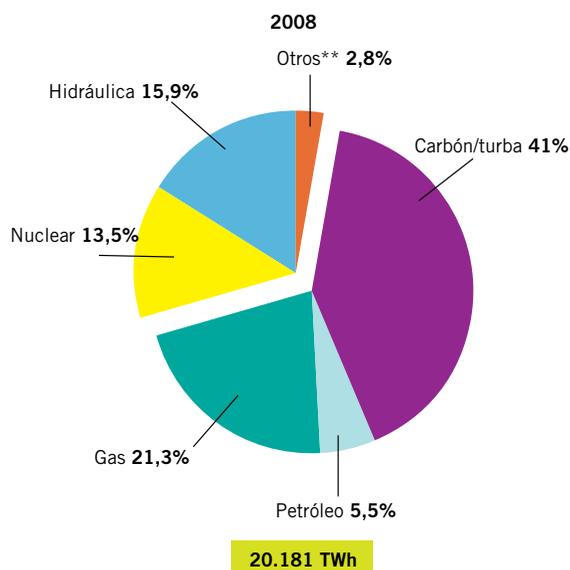
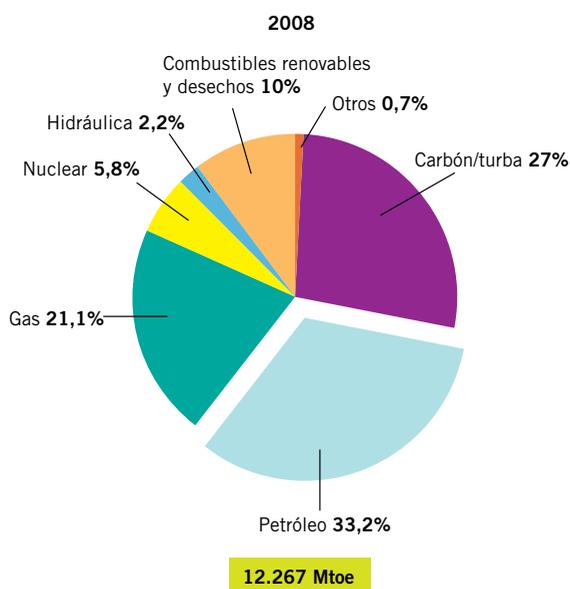
El generador utilizado desde el inicio del siglo xx, y se estima seguirá siendo usado en el futuro, es un tipo de máquina eléctrica llamada *generador sincrónico*. Los cambios que se han operado en la forma de producir la EE y los que se estima que se producirán en el horizonte de largo plazo, están localizados entonces en los energéticos primarios y en las tecnologías que se empleen para transformar estos energéticos en energía mecánica en el eje de la turbina. La irrupción producida en los últimos años con la instalación de los modernos parques eólicos

que utilizan mayoritariamente generadores asincrónicos de rotor bobinado no invalida esta afirmación porque estos parques son un porcentaje muy bajo en el total y, además, siempre son conectados a una red de corriente alterna trifásica que opera en sincronismo.

La principal fuente de energía primaria utilizada en el mundo es el carbón, este ha sido responsable de abastecer el 40% de la matriz de generación de EE en forma casi constante desde 1970 hasta la actualidad. En conjunto, los energéticos primarios llamados fósiles pasaron del 75% en 1970 a los actuales 68% del total producido debido a la incorporación de la energía hidráulica y nuclear.

Las tecnología más plenamente utilizada en el sector térmico y nuclear en el mundo ha sido la central de vapor (*Steam Turbine*) operando en ciclo Rankine, y en segundo lugar, bastante más atrás, está la turbina de gas operando en ciclo Brayton. En las últimas décadas, se utiliza en forma creciente el ciclo combinado que genera un 67% de su energía en ciclo Brayton y el restante 33% es producido por un ciclo Rankine.

Para pensar en el futuro, en primer lugar, consultamos qué piensan los expertos de la Agencia Internacional de la Energía expresado en su informe anual *World Energy Outlook 2010* y en el informe anual *2010 International Energy*



Oferta total de energía mundial y producción de energía eléctrica por fuente

### Producción por fuente según IEO 2010

Mundo	2007	2015	2020	2025	2030	2035	Cambios en los promedios porcentuales anuales: 2007-2035
Líquidos	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	-0,4
Gas natural	3,9	4,2	5,0	5,8	6,4	6,8	2,1
Carbón	7,9	8,8	9,8	11,2	12,9	15,0	2,3
Nuclear	2,6	3,1	3,6	3,9	4,2	4,5	2,0
Renovables	3,5	5,0	5,8	6,6	7,3	8,0	3,0
<b>Total mundo</b>	<b>18,8</b>	<b>21,9</b>	<b>25,0</b>	<b>28,3</b>	<b>31,6</b>	<b>35,2</b>	<b>2,3</b>

Nota: Los totales pueden no igualar a la suma de sus componentes debido al redondeo. Fuente DOE- EIA - IEO 2010

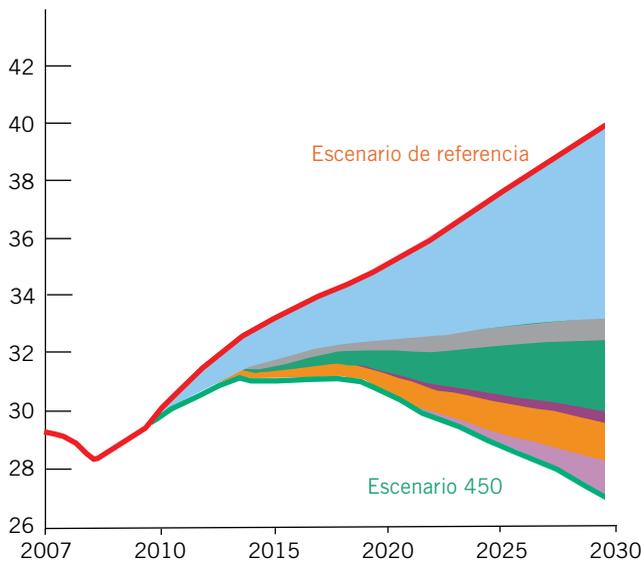
Outlook producido por la Energy Information Administration del Departamento de Energía de los EE.UU.

Según este último informe, en su escenario de referencia, indica que si bien la cantidad de origen fósil se reduce al 64%, lo hace a expensas de reducir el consumo de líquidos manteniendo la cantidad de carbón en un nivel ligeramente superior a sus niveles actuales del 41%.

Estos escenarios de referencia, que elaboran las Agencias, son escenarios contruados según la demanda asumida, prácticamente sin restricciones de oferta, suponiendo que no hay cambios importantes en la política energética global.

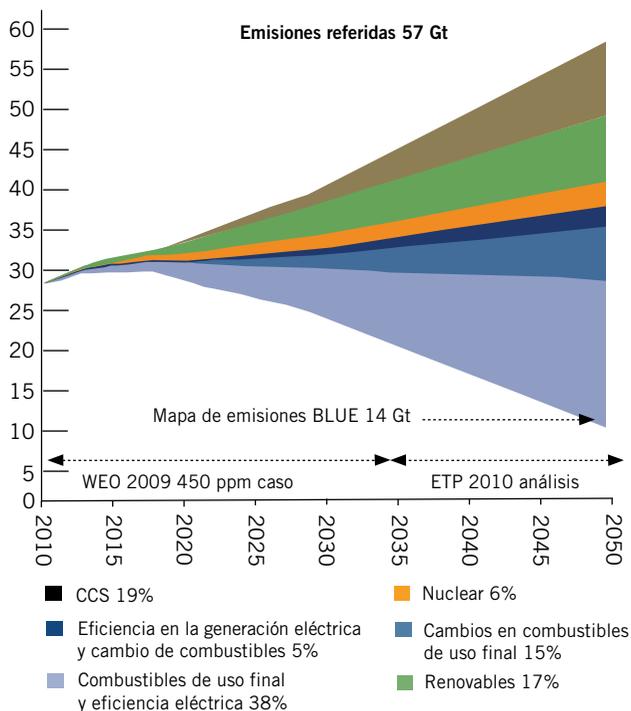
Desde hace algunos años atrás, se comenzó el estudio de escenarios alternativos, con especial énfasis en las restricciones que impone los efectos visibles del cambio climático. La IEA produce, desde el 2006, un informe bianual llamado *Energy Technology Perspectives* que plantea escenarios concurrentes a la reducción de emisiones. El escenario alternativo que muestra el informe es el BLUE en el cual se plantean diferentes alternativas para reducir los niveles de emisiones al año 2050 a la mitad de los valores actuales. En el WEO 2009 (*World Energy Outlook*) se utilizó el Escenario 450. El Escenario 450 asume que el mundo acepta estabilizar en 450 ppm CO<sub>2</sub> la concentración de GEI. Para ello se requiere actuar simultáneamente sobre la oferta y la demanda.

El escenario BLUE se extiende hasta el año 2050 de manera que incluye el Escenario 450.



	2020	2030
Reducción (Mt CO <sub>2</sub> )		
□ Eficiencia	2.517	7.880
■ Utilización final	2.284	7.145
■ Plantas eléctricas	233	735
■ Renovables	680	2.741
■ Biocombustibles	57	429
■ Nuclear	493	1.380
■ CCs	102	1.410

Energía mundial en relación con emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por mediciones de control en el Escenario 450



Tecnologías claves para reducir emisiones de CO<sub>2</sub> en el escenario del mapa BLUE

Es interesante observar que el esfuerzo principal está concentrado en programas de utilización final eficiente de la energía (>50%), mientras del lado de la oferta, además de incrementar el uso de energías renovables y la nuclear, continúa utilizando carbón asociado a proyectos de mejora de eficiencia del ciclo térmico con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

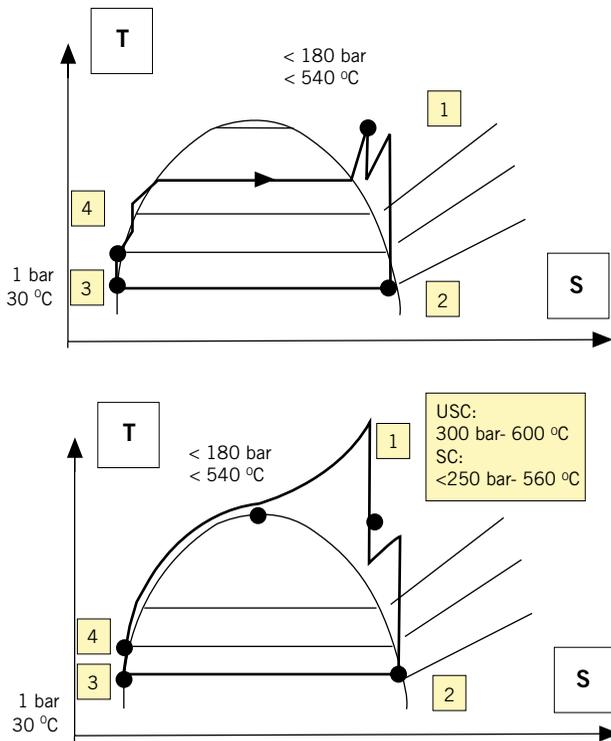
## Tendencias de la generación con carbón

El carbón es el energético que tiene mayor cantidad de reservas en el mundo. Las reservas probadas de carbón superan los 500.000 MTOE. El 83% de estas reservas están localizadas en el hemisferio norte. El 60% concentrado en solo tres países: China, los EE.UU. y Rusia.

La producción mundial del 2007 de carbón alcanzó las 3.186 MTOE de las cuales el 66%, es decir 2.100 MTOE, fue destinado a la producción de electricidad. Con estos niveles de producción hay más de 150 años de reservas, pero el carbón también es responsable de 42% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, el 97% de la potencia instalada abastecida con carbón es del tipo ciclo convencional de vapor alimentado con carbón pulverizado PCC (*Pulverized Coal Combustion*). La gran mayoría (75%) son del tipo subcríticas, que operan a presiones <180 bar, y temperaturas <540 °C, con eficiencias del 35-36%. El 22% restante son del tipo ciclo de vapor supercríticas SC y ultrasupercríticas USC, que operan a presiones entre 250/350 bar y temperaturas de 560-600 °C.

La tendencia de largo plazo se orienta a continuar utilizando carbón en centrales convencionales, pero trabajando en condición supercrítica, de mayor eficiencia, con instalaciones de captura de partículas y de gases de efecto invernadero.

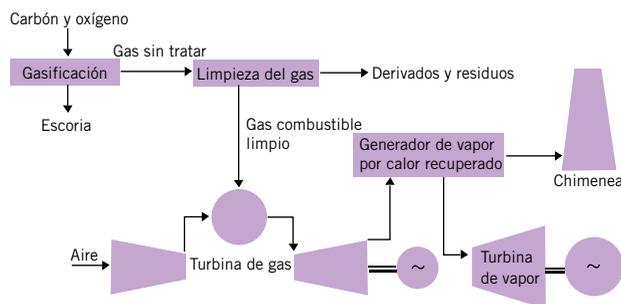


Fuente: CIAB, IEA, MPS

Por ejemplo, si consideramos una eficiencia media del parque instalado del 33%, se necesitan 2.100 MTOE para generar 8.300 TWh, si, en cambio, el equipamiento tuviera una eficiencia del 50%, utilizaría 1.400 MTOE (33% menos).

Otras tecnologías en etapa de desarrollo son: el ciclo combinado con gasificación integrada (IGCC) y combustión en lecho fluidizado FBC, atmosférica o presurizada.

El carbón es el mayor contribuyente a la generación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes de manera que la posibilidad de su utilización está condicionada a la aplicación simultánea de instalaciones y dispositivos de tratamiento de gases residuales como por ejemplo instalaciones de desulfuración, (FGD *flue gas desulfurization*), de NOx óxido de nitrógeno, de reducción catalítica y de control de partículas y cenizas. La futura utilización de carbón se plantea en términos de cero emisiones mediante el concepto CCS (*Carbon Capture and Storage*), mediante el cual, los gases de combustión son depositados en reservorios.



Fuente: Generación de electricidad mediante quemado de combustibles fósiles – IEA - 2007

Para la República Argentina, no parece ser una alternativa importante excepto en un escenario en que se transforme en importador neto de energéticos, donde por costos de importación, podría desplazar a otras alternativas.

## Tendencias en la generación con gas natural

Una de las alternativas preferenciales de generación eléctrica en todo el mundo es el uso del gas natural en ciclos combinados de eficiencia de alrededor del 60%.

Las reservas probadas de gas natural en el mundo alcanzan los 160 GTOE, de las cuales el 61% están localizadas en: Rusia 27%, Irán 16%, Qatar y Arabia Saudita 18%. La producción en el 2007 fue de 2,52 GTOE (el 36%, es decir 0,9 GTOE, fueron destinados a centrales para generación eléctrica en ciclos combinados GTCC con rendimientos >60%). Con los niveles actuales de reservas probadas y de consumo anual, las reservas alcanzan para más de 60 años.

Las reservas de hidrocarburos se clasifican según el grado de certidumbre de su existencia física y de su posibilidad de ser comercializada por condición de precio y existencia de infraestructura de transporte. Así se habla de reserva probada, probable y posible, y de recursos contingentes y prospectivos. La reserva probada es aquella que tiene verificada su existencia y sus posibilidades de comercialización, en el otro extremo, el recurso prospectivo es aquel aún no descubierto, pero que se espera encontrar y es determinado probabilísticamente. A su vez, los recursos se clasifican en convencionales y no convencionales. La IEA estima en más de 900 GTOE los recursos totales, cuyo factor de recuperación dependerá de la tecnología empleada.

La incorporación de los recursos a calidad de reservas implica la aplicación de mayores tecnologías e inversiones, mayor gasto en operación y el empleo de recursos humanos calificados.

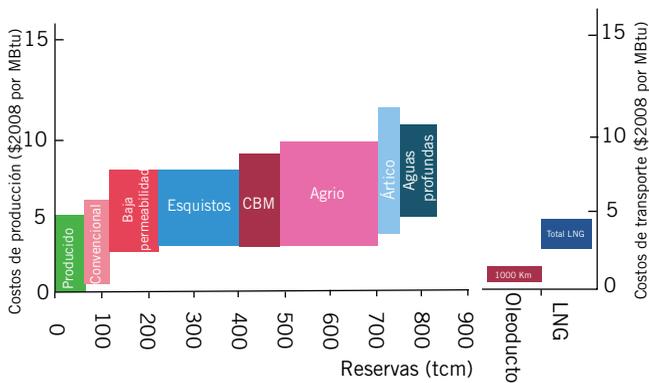
Adicionalmente, en el transporte de gas, necesario para movilizar las reservas geográficamente concentradas, se plantean problemas nuevos como el transporte en fase densa, el flujo multifásico asociado a la producción costa afuera, y al desarrollo y uso de las calidades X80 y X100. En casos en los que existen alternativas de transporte a través de espacios marítimos, se plantean alternativas de transporte de gas natural licuado (LNG, según su nombre en inglés).



Fuentes: Masters (1979); Holdich (2006)

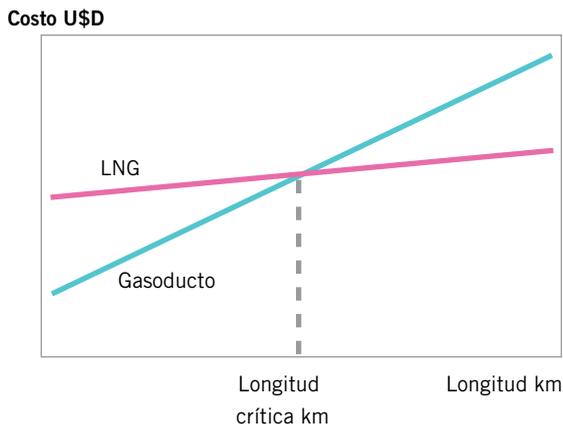
## Clasificación de los recursos de gas natural.

Fuente: World Energy Outlook 2009-IEA



Fuente: World Energy Outlook 2009-IEA

Argentina abastece casi el 50% de su matriz energética con gas natural, aun con un escenario de producción declinante como el actual, se tienen razonables expectativas de incorporar reservas y recursos de gas no convencionales, e incluso convencionales, de cuencas inexploradas que garanticen el suministro confiable en el largo plazo. Naturalmente adoptando efectivas políticas de Estado.



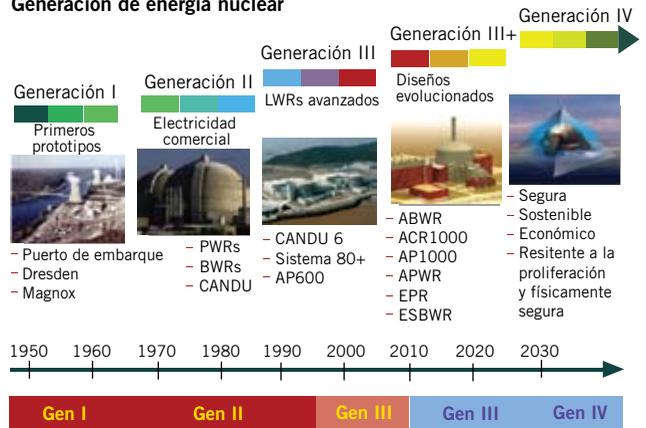
## Tendencias de la generación nuclear

El 13,5% de la generación de los 20.000 TWh producidos en el mundo corresponden a generación por fisión nuclear, de estos 2.700 TWh, el 56% es generado por 3 países, Rusia (31%), Francia (16%) y Japón (9%). Sumando la producción de Corea, Rusia y Alemania, en solo 6 países se concentra el 73% de la producción mundial.

Los accidentes de Three Mile Island (EE. UU. 1979), Chernóbil (Ucrania 1986) y el reciente de Fukushima (Japón 2011), han elevado los niveles de preocupación sobre las condiciones de seguridad de instalaciones y, simultáneamente, han constituido desafíos que serán volcados en los diseños de la llamada Generación III y IV.

Los reactores de fisión actualmente en uso utilizan uranio como combustible, este es un recurso finito, por lo que en el muy largo plazo, sin ser considerado en los informes prospectivos, se encuentra la posibilidad de contar con reactores de fusión todavía en etapa de experimentación. La principal ventaja de la fusión sobre la fisión la constituye que el combustible es deuterio, de disponibilidad casi ilimitada frente a los niveles esperados de consumo.

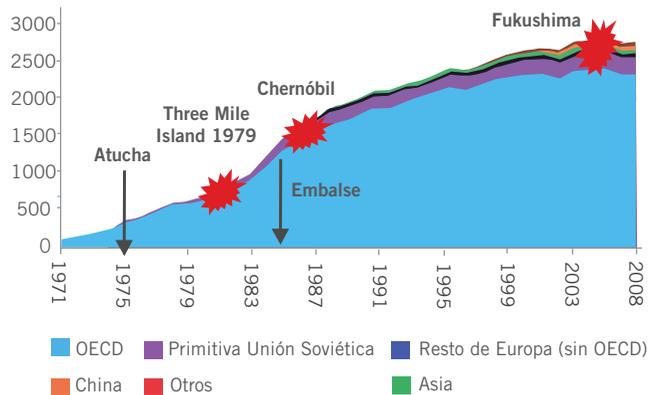
## Generación de energía nuclear



Argentina tiene el privilegio de haber participado en la actividad nuclear desde casi el inicio de su utilización pacífica. Hoy posee un activo intangible tal como es ser una nación reconocida como actora probada en más de 50 años en el uso pacífico de la energía nuclear.

Producción nuclear.

Evolución desde 1971 hasta 2008 de la producción nuclear por región [TWh]



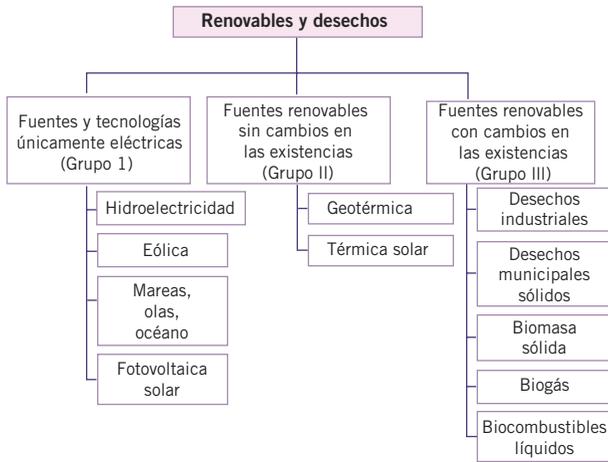
Argentina ha reiniciado su actividad nuclear encarando la finalización y puesta en marcha de la central Atucha II y comenzado los estudios para la construcción de la cuarta central.

## Los recursos renovables en el largo plazo

La IEA clasifica los recursos renovables en tres grupos: fuentes de uso estrictamente eléctrico, fuentes sin recambio y fuentes con recambio de existencias.

A pesar de la diversidad de fuentes, excepto la hidráulica que aporta el 15,9% del total generado en el mundo, el resto de las renovables aporta sólo el 2,8% y no tiene una incidencia significativa en la matriz de generación eléctrica mundial. Sin embargo, se está planificando una inserción más profunda que permita alcanzar objetivos de reducción de gases de efecto invernadero.

El cuadro siguiente compara el escenario de referencia del DOE con el Escenario 450 ppm de la IEA. Se observa que a pesar del gran crecimiento porcentual de la energía eólica y otras renovables, estas alcanzan apenas a completar el 16% de la generación prevista en el Escenario 450 ppm de las IEA.



Fuentes renovables y desechos. Clasificación en tres grupos.  
Fuente: Manual de Estadísticas Energéticas - IEA

Miles TWh	2006	2030 DOE- caso de referencia	2030-IEA 450ppm
Hidro	2,9	4,3	5,7
Eólico	0,1	1,2	2,7
Otros	0,4	0,6	2,0
Subtotal renovables	3,4	6,1	10,4
Total generación	18,0	31,2	29,2
% renovables/total	19%	20%	36%
% renov. no hidro/total	2,8%	5,8%	16,1%

En otras palabras, a pesar del considerable aporte que el desarrollo de los recursos renovables podría hacer al abastecimiento de energía, el ritmo de incorporación, y las restricciones físicas y económicas existentes muestran la necesidad de, además de brindar todo el soporte gubernamental y privado para su desarrollo, seguir pensando en otras alternativas para generación eléctrica.

Los recursos energéticos del océano estimados por la IEA superan el consumo anual mundial: mareas y corrientes > 800 TWh, olas entre 10 y 80 mil TWh, térmica 10 mil TWh. La eólica onshore se estima en 50.000 TWh. Aún en fase experimental, con más de 100 dispositivos tecnológicos conocidos, las renovables marítimas y la eólica constituyen un recurso valioso.

La Argentina posee recursos hidroeléctricos y mareomotrices por 110 TWh anuales. Además, posee una de las regiones de mayor potencial eólico del mundo, amplias áreas de fuerte intensidad solar, zonas incorporables al cultivo de insumos para la producción de biocombustibles, además de 5.000 km de costa marítima con un potencial aún no cuantificado energía renovable.

## El petróleo y el transporte

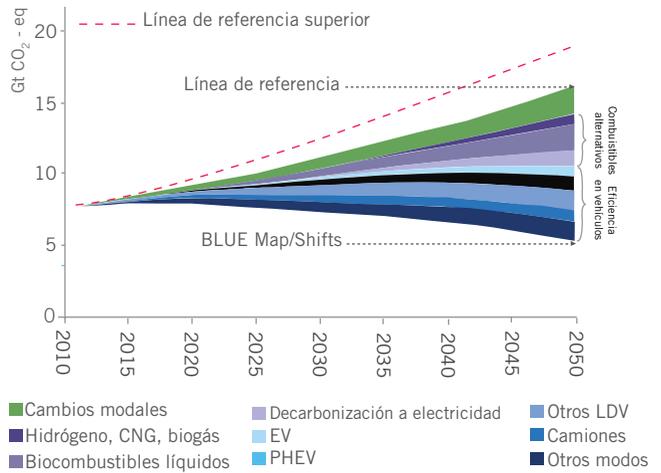
El petróleo aporta el 35% de la oferta primaria de energía que, luego de ser transformado en derivados de petróleo en las refinерías, se utiliza mayoritariamente para el transporte. El transporte consume 2.200 MTOE (el 50% del petróleo producido y el 30% de la energía final consumida).

Los programas de eficiencia energética siguen tres direcciones:

- Ordenamiento y reglamentación del uso vehicular,

promoción de medios confortables de desplazamiento masivo.

- Incorporación de vehículos eficientes: *Fuel Cells* FCV, eléctrico puro PEV, eléctricos de conexión, híbridos.
- Incorporación de biocombustibles como sustitución de combustibles fósiles.

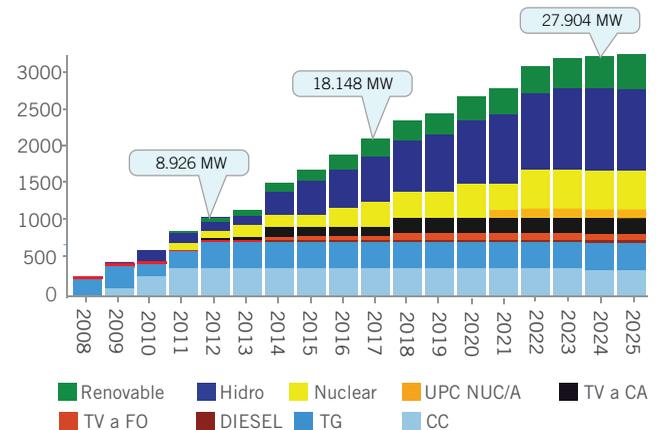


Reducción de fuentes de emisiones de gas con efecto invernadero, sector transporte. Fuente: ETP 2010 - IEA

La incorporación de vehículos eléctricos conectables a redes eléctricas abre un nuevo campo de utilización de la energía eléctrica y una transferencia de la demanda hacia el correspondiente sector.

## El futuro de la matriz eléctrica argentina

La Secretaría de Energía ha elaborado un plan, que aún cuando no haya sido presentado oficialmente, representa una referencia válida sobre el futuro de la matriz eléctrica. El estudio preparado por la Secretaría de Energía, a partir del 2006, plantea la necesidad de incorporar 27 GW hasta 2025.



Fuente: SEE presentación en el V Seminario Estratégico de la SPE- Daniel Cameron

De la presentación se deduce que la energía hidráulica, la nuclear y las renovables serán los soportes de la nueva matriz de oferta eléctrica argentina. Es fundamental comprender que cualquier pronóstico que se elabore nunca se

	Unidad	Gas (CCGT)	Carbón ultra-supercrítico	Carbón IGCC	Carbón IGCC con CCS	Energía nuclear	Eólica continental
Factor de capacidad	%	80%	80%	80%	80%	90%	27%
Eficiencia térmica (valores netos, de bajas calorías)	%	58%	47%	48%	38%	33%	n.a.
Costo de capital (durante la noche)	\$2008/kW	900	2.400	2.800	3.400	3.800	1.700
Tiempo de construcción	años	3	4	4	5	5	2
Vida económica de planta	años	25	35	35	35	40	20
Costo unitario del combustible	varios*	11	95	95	95	10	n.a.
Costo O&M sin combustible	\$2008/kW	13	49	83	72	117	40
Costo marginal de funcionamiento	\$2008/MWh	78	69	78	95	72	94

\* Basados en los precios de la energía supuestos en el Escenario de Referencia. Unidades de los distintos combustibles: gas en \$/MBtu; carbón en \$/tonne; nuclear en \$/MWh.

Fuentes: Base de datos de IEA; IEA/NEA (en preparación).

cumplirá tal como se planificó, es necesario el control y la rectificación periódica del pronóstico.

Como ejemplo de alteración de las condiciones de borde establecidas para cualquier plan están las recientes evaluaciones de los recursos gasíferos como el shale gas, que de confirmarse, aún como un bajo porcentaje de recuperación abren otra posibilidad cierta de suministro primario.

## La tecnología, la investigación y la formación de recursos humanos

Para duplicar la potencia instalada en menos de 20 años, se requiere, además de recursos financieros y organización, recursos humanos capaces de seleccionar las mejores alternativas disponibles de menor costo marginal de largo plazo.

Según la IEA, sólo en investigación y desarrollo se invierten en los países de la OCDE: U\$D 12.500 millones por el sector público (2008), U\$D 40.000 a 60.000 millones por el sector privado. Considerando que la OCDE concentra más del 90% de la inversión en I&D en energía, se da la posibilidad cierta de que el resto del mundo ni siquiera pueda discernir entre distintas alternativas.

Sin institutos especializados, sin políticas de Estado consensuadas, sin continuidad ni formación de cuadros técnicos no solo es más difícil la adquisición del conocimiento y de los avances de la tecnología, sino que hasta los criterios de selección de alternativas óptimas pueden resultar errados en detrimento de los intereses de la Nación.

No se trata de reinventar nada, pero sí de tener capacidad crítica y conocimiento para validar la relación costo-beneficio de cada alternativa y determinar las diferencias entre los datos formales de cada alternativa de generación, sus condiciones de borde y las incertidumbres. Por ejemplo, la tabla de esta página muestra costos genéricos para distintas alternativas, pero la selección de proyectos de determinada área de negocios requiere la reconstrucción de esta tabla determinando los valores estimados y actualizados de cada proyecto en cartera.

## Conclusión

La Argentina posee una vasta experiencia, casi pionera en la generación y distribución de energía eléctrica. Ha sufrido sistemáticamente la merma de su capacidad crítica y operativa como Estado. Durante años ni se intentó formular un plan energético consistente, adaptable y flexible, que permitiera a la autoridad tomar mejores decisiones en pos del beneficio general.

Recursos no faltan en el mundo ni en la Argentina, lo que quizás falte sea la inteligencia para prepararse a tomar las mejores decisiones y la grandeza de espíritu para dejar de lado los intereses personales en pos del beneficio general. ■

## Reconocimiento

Al escribir un artículo, uno se pregunta en cada párrafo qué es pertinente, qué es válido. En síntesis, nos preguntamos dónde nace la seguridad con la que afirmamos ciertas cosas. Reconozco en cada etapa, la influencia de los maestros que hemos tenido, aquellos que nos han ayudado a trabajar mejor, a forjar una identidad. Vaya entonces mi agradecimiento a don Víctor Fumbarg: Ingeniero, músico, hombre de cultura, maestro y amigo.

**Bibliografía:** IEA: *Manual de estadísticas*; IEA: *Key world Statistics 2010*; DOE-EIA: *International Energy Outlook 2010*; IEA: *World Energy Outlook 2009*; IEA: *Energy Technology Perspectives 2010*; Daniel Cameron: Presentación de la SEE en el V Seminario Estratégico de la SPE.

**Hugo Alberto Carranza** es ingeniero eléctrico por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), especialista en Transmisión de la Energía. También en Gas Natural en el IGPUBA, de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Es docente de grado en la UTN y de posgrado en el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA) así como en la UBA. Es el actual presidente de la Society of Petroleum Engineers (SPE), sección argentina.