

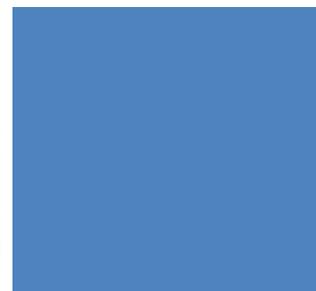
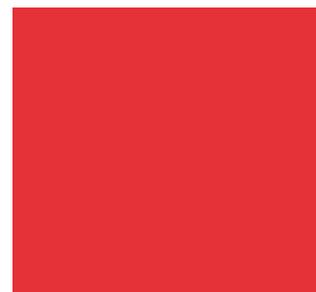


CENTRO DE
**POLÍTICAS
PÚBLICAS UC**

TEMAS DE LA AGENDA PÚBLICA

Energía nucleoeléctrica en Chile

JULIO VERGARA
Facultad de Ingeniería



TEMAS DE LA AGENDA PÚBLICA

Energía nucleoelectrica en Chile

JULIO VERGARA

Facultad de Ingeniería

Energía nucleoelectrica en Chile

JULIO VERGARA¹

Facultad de Ingeniería

Chile requiere energías sustentables para su economía. La dependencia de los combustibles fósiles encarecidos y la creciente amenaza de cambio climático nos señalan la necesidad de cambiar la matriz eléctrica y energética. El artículo aborda la situación actual y elementos de proyectos nucleares, permitiendo concluir que es una empresa difícil, pero abordable, que exige realizar cambios institucionales y formar nuevos recursos humanos. La energía nuclear nos acerca al esperado desarrollo socio-económico con menor ofensa al medio ambiente global.

Introducción

La sociedad moderna depende de suministros energéticos para subsistir establemente tanto como los seres vivos dependen de sus alimentos. Esa dependencia se inicia con la organización urbana y se acelera en la revolución industrial, permitiendo un rápido crecimiento de la población que hoy alcanza los 6,7 mil millones de habitantes y una empinada producción energética global, que supera los 500 ExaJoules (EJ) al año, en la cual domina la utilización de combustibles fósiles (33% petróleo, 27% carbón, 21% gas), seguido de combustibles de biomasa (10%) y energía nuclear (6%). La diferencia es hidroelectricidad y, en menor escala, otras fuentes renovables.

La dependencia de los fósiles obedece a varios factores, entre los cuales destaca su facilidad relativa de extracción y conversión con un bajo costo directo, y el establecimiento de los sistemas logísticos asociados que moderan la evolución hacia otras fuentes energéticas.

El petróleo genera problemas geopolíticos derivados de la concentración geográfica, que redundan en tensiones y conflictos. La elevada tasa de consumo nos acerca al momento en que se alcanzaría el máximo nivel de producción, que resultaría en alza e inestabilidad de precios. Eventualmente, acelerará la extracción de petróleos de arcillas y esquistos. Algo similar ocurre con el gas natural, con un rezago por inicio tardío del consumo y de las tecnologías de utilización, por lo que tendrá un poco más de autonomía. El carbón es más ubicuo y abundante, y puede ser sintetizado en sustitutos del diésel y gas mediante procesos químicos para extender el uso actual de los fósiles.

Sin embargo, el mayor problema de los combustibles fósiles no parece ser su autonomía, sino la alteración de la capacidad radiativa de la atmósfera por las emisiones de anhídrido carbónico (CO₂) y otros gases de efecto de invernadero (GEI). Éstas modificaron la relativa estabilidad previa a la revolución industrial, aumentando en más de un tercio el valor de CO₂ que perduró durante

¹ Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería de la UC. Licenciado en Ciencias Navales e ingeniero naval mecánico de la Academia Politécnica Naval. MBA de la Universidad Adolfo Ibáñez. MSc in Naval Architecture and Marine Engineering, MSc in Materials Engineering, MSc in Nuclear Engineering y PhD in Nuclear Materials Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

el Holoceno. Las proyecciones de la concentración actual, cercana a las 385 partes por millón (ppm) podrían superar las 550 ppm hacia fin de siglo si seguimos una trayectoria optimista de emisiones, e incluso acercarse a las 1.000 ppm en caso de seguir la trayectoria vigente como se muestra en la Figura 1, lo cual se traduciría en un aumento de temperatura de 3°C a 6°C y más, pudiendo desencadenar un efecto contrario si se debilita la circulación termohalina que ayuda a regular la temperatura del planeta.

Diversas iniciativas han intentado frenar esta tendencia. Antes fue el Protocolo de Kioto (2005) que quedó lejos de la meta inicial. La reciente Conferencia de Copenhague (2009) no tuvo el efecto anticipado de fijar nuevas metas, esta vez globales, aunque hubo un par de aspectos notables; el primero fue el compromiso cualitativo de China y Estados Unidos de sumarse a los esfuerzos que realiza la Unión Europea, y el segundo fue el reconocimiento colectivo de estabilizar el clima no más allá de 2°C sobre la temperatura media actual, que implica tender a la difícil meta de 450 ppm de CO₂ al mediano plazo.

Lo anterior exigirá modificaciones sustanciales en los sistemas energéticos, con desafíos en la sustentabilidad, que se manifestarán en el mayor costo futuro de la ener-

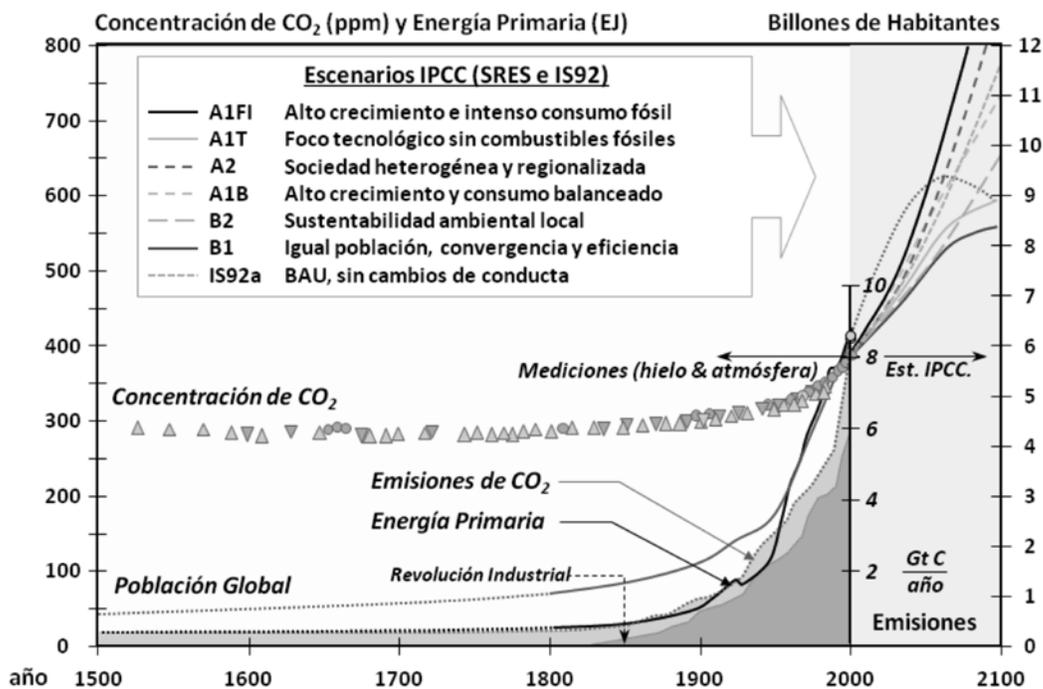
gía y de otros servicios básicos, reacomodando los grandes sectores de la matriz de consumo final (transporte, residencia, industria) en sus principales demandas (movimiento, luz y calor) para bajar las emisiones.

Menos de un quinto de la energía primaria se convierte en electricidad (75 EJ) para enlazar algunas de las fuentes a distintos sectores de demanda. Lo esperado es que su proporción aumente, llegando eventualmente al 30% en un par de décadas. Junto al hidrógeno, posible complemento de la electricidad, puede ayudar a bajar el nivel de emisiones siempre que sus fuentes no produzcan CO₂.

Aunque es difícil apostar a un resultado, hay varias fuentes y tecnologías energéticas candidatas compitiendo por incrementar su posición, con o sin la ayuda de subsidios de algunos Estados. Las fuentes energéticas basadas en la combustión de fósiles probablemente bajarán su participación, sin embargo, pueden perdurar por un tiempo si incorporan caros sistemas de captura y secuestro de CO₂ (CSC) y/o de captura y reciclaje de CO₂ (CRC).

En este contexto, la energía nuclear tiene el importante desafío de aumentar su contribución, pues su funcionamiento no emite GEI en forma directa. Según James Lovelock, connotado científico proponente de la teoría

Figura 1. | Evolución de la población, las emisiones y concentración global



Gaia, es la única fuente con tecnología madura disponible para frenar los efectos del cambio climático a tiempo. Él agrega que la tasa de avance de las tecnologías renovables no responde al nivel de urgencia y que el infundado miedo a la energía nuclear debiera terminar cuando ceda la ignorancia.

¿Qué es energía?, la que resulta de procesos de transformación de la materia a través de la ruptura de sus formas de enlace. En la dominante combustión, las moléculas pierden enlaces débiles produciendo calor. En procesos “renovables”, los átomos transfieren energía en algún medio (aire, agua) de la biósfera por interacciones electromagnéticas externas al núcleo atómico, los que fueron, en su mayoría, dispuestos por la energía radiante del sol, que surge de la fusión y ruptura de los enlaces de los protones que constituyen su combustible. El centro de la Tierra también entrega calor, por fisión de núcleos pesados y ruptura radiactiva de núcleos de masa intermedia. En definitiva, la energía es aquella que enlaza la materia, que se dispensa si se rompe o transforma. Por ello, la energía nuclear no es muy diferente, salvo que implica procesos más energéticos, a nivel del núcleo atómico.

Un reactor nuclear es un aparato que obtiene calor a partir de la fisión de núcleos minoritarios (^{235}U) del uranio con la acción de neutrones producidos en fisiones previas, el cual se extrae con un refrigerante, para algún proceso industrial o para generar electricidad mediante un turbogenerador. A largo plazo, se podrá obtener calor de la fusión de núcleos minoritarios (^2H y ^3H) del hidrógeno, separados del agua o producidos del litio, respectivamente.

Por ende, la energía nuclear es una fuente energética sustentable, ya que posee recursos ubicuos suficientes para muchos siglos, con bajo impacto ambiental (nula emisión directa de CO_2) y a costos moderados. La tecnología puede ayudar a mejorar su sustentabilidad.

Dado el descalce energético actual, dominado por los fósiles, el autor estima que la energía nuclear es un imperativo global, lo que no significa que todos los países puedan adoptarla. En este contexto, el objetivo de este trabajo es difundir aspectos relativos a la energía nucleoelectrónica y demostrar que Chile es uno de los países que debiera considerar su adopción, recomendando acciones de política para facilitar su ingreso y utilización efectiva.

Evolución de la tecnología nuclear

Los reactores nucleares nacieron para diferentes propósitos. El reproductor experimental EBR-I, refrigerado por una aleación de sodio-potasio, iluminó cuatro ampollitas de 200 watts en Idaho en 1951. Le siguió el APS-1, que produjo 5 megawatts (MW) en 1954 en el pueblo de Obninsk. Disputa la primera generación comercial con un reactor inglés de 50 MW, refrigerado por CO_2 , de la central Calder Hall, que operó 47 años desde 1956. Ninguno de esos reactores fue el diseño dominante, sino el reactor de agua presurizada (PWR), desarrollado inicialmente para la propulsión nuclear. El primer PWR, instalado en Shippingport, Pennsylvania, era una unidad de 60 MW, parecido a los 267 (61%) que existen hoy. De forma análoga, los 92 (21%) reactores de agua en ebullición (BWR/ABWR) se inician en el orden de los 20 MW a comienzos de los años sesenta. Otros 81 (18%) reactores de variados diseños y orígenes cierran una lista que pudo ser más numerosa, pero una combinación de sucesos y tendencias frenó el ímpetu.

A mediados de los años sesenta, ingresan los reactores de segunda generación con un crecimiento de la potencia unitaria que prontamente supera los 500 MW. A comienzos de los años setenta, excedían los 1.000 MW por unidad en una carrera por incorporar nuevos dispositivos y atributos. La gestión de grandes proyectos en algunos países no fue acuciosa, no hubo estandarización y la operación de algunos reactores fue desprolija.

Los usos políticos de la energía nuclear no pasaron inadvertidos en la sociedad. Surgió la Guerra Fría, aumentaron los arsenales y hoy persisten los ensayos nucleares y el temor a una confrontación nuclear, germinando movimientos antinucleares, inicialmente proponentes de un desarme, que derivó luego en una oposición a la tecnología nuclear con fines pacíficos. Estos grupos encontraron debilidades y el desempeño global de la industria se estancó.

Varios reactores tuvieron incidentes y dos experimentaron notables accidentes. Una unidad de la central de Three Mile Island funde parcialmente su corazón en el año 1979. No tuvo impacto en la salud humana, pero resintió la salud de la industria nuclear norteamericana. Las nuevas regulaciones frenaron la licencia de nuevas unidades desde 1980, cediendo en el liderazgo alcanzado en esta tecnología.

En 1986, el accidente de una unidad tipo RBMK de la central de Chernobyl remeció la debilitada Unión Soviética.

tica y casi acabó con el resto de la industria nuclear. Los errores e ignorancia de operación y despacho se sumaron a carencias graves de diseño, en especial la falta de un edificio de contención. Una prueba mal preparada puso a este inusual tipo de reactor en una condición inestable, produjo una excursión crítica y destrucción severa, creando un incendio que levantó cenizas radiactivas que el viento esparció en Europa.

La principal carga de este accidente pesó en los miles de bomberos y militares “liquidadores”, dedicados a apagar un incendio que tardó algunos días. Más de 150 de ellos sufrieron el síndrome de radiación aguda (ARS), de los cuales 29 murieron en 1986. Otros veinte han fallecido hasta el presente, aunque las causas son menos directas. La operación fue tan mala como la gestión del accidente. Intentos de ocultamiento e incapacidad de las autoridades fallaron en decretar medidas de apoyo, contención y evacuación, lo cual agravó el problema a la población aledaña. Una veintena de niños murieron por causas ligadas al accidente, principalmente por ingerir leche con yodo radiactivo precipitado desde la columna de cenizas. Los daños económicos al país fueron irreversibles, así como la imagen del sector, que todavía no revierte completamente la censura de ciertas comunidades ambientalistas y políticas.

Aunque las fatalidades medidas por energía generada fueron bajas respecto de otros sistemas energéticos (carbón, gas o petróleo, que cada año superan en varias

veces la mortalidad total de Chernobyl), sensibilizó a varios países europeos a frenar o renunciar a esta tecnología. En efecto, Italia cerró unidades operativas, España frenó la expansión, mientras que Alemania y Suecia diseñaron planes de salida programada. Atentos a estos eventos, Japón, República de Corea y Taiwán continuaron sus planes nucleares y hoy comparten el liderazgo tecnológico con Francia, que no cedió su desarrollo.

A nivel global, la capacidad y la generación nucleoelectrica siguieron aumentando a una menor tasa, como se aprecia en la Figura 2. Hoy 441 reactores producen alrededor de 2.600 terawatts hora (TWh) con una potencia neta de 376 gigawatts, mientras la industria de generación termoeléctrica sigue creciendo más aceleradamente, superando los 14.500 TWh con una potencia instalada de más de 3.000 gigawatts (GW) y reduciendo la participación de otras fuentes.

La liberación de los mercados eléctricos, iniciada en los años ochenta, hizo temer acerca de la competitividad de las centrales nucleares. No obstante, con resultados disímiles según el operador, se ha demostrado que esta tecnología es robusta a este cambio de paradigma.

El tamaño unitario de los reactores creció otro poco, llegando algunos diseños a superar los 1.500 MW en el presente. No obstante, se divisa la salida de reactores más pequeños.

Otra lista de sucesos y tendencias ha comenzado a re-

Figura 2. | Evolución de la industria, número de reactores y capacidad instalada

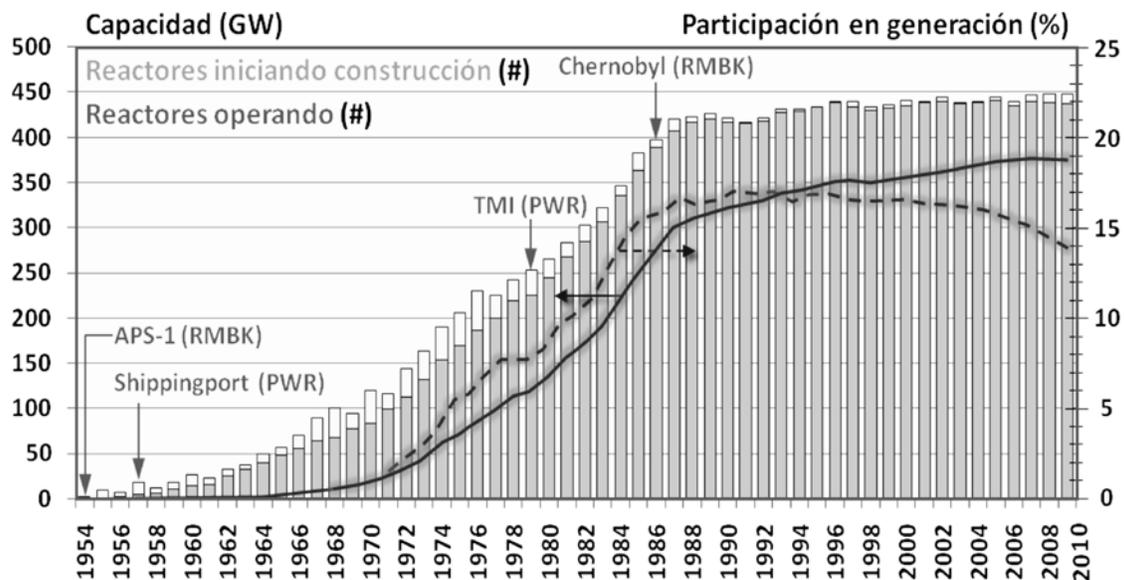
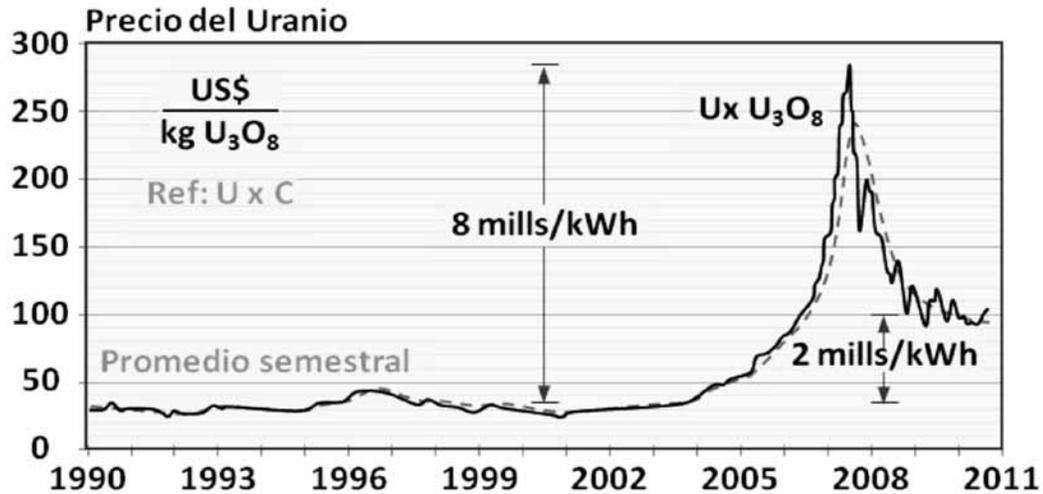


Figura 3. | Evolución del precio del recurso uranio en los últimos 20 años



vertir la tendencia anterior, enfilándose hacia el denominado “renacimiento nuclear”. En lo político-internacional, la Guerra Fría cesó, las potencias colaboran más en abordar problemas comunes, los ensayos nucleares fueron prohibidos, etc.; debilitando la justificación ambientalista original. Algunos de esos grupos se han difuminado y varios ambientalistas aceptan la tecnología nuclear.

En lo económico, los países enfrentaron problemas de suministros energéticos fósiles, con alza y volatilidad de precios, algunos de los cuales persisten. Causas recientes fueron la crisis de los *commodities*, la crisis del gas en Europa y el huracán Katrina, entre otros, llevando el precio del barril a un máximo de US\$147 en julio de 2008, el doble del actual. El precio del uranio sufrió similar consecuencia por las señales de inversión y escasez de proyectos mineros, empujándose doce veces desde los US\$20 por kg U_3O_8 antes de la crisis, retornando a un tercio del valor máximo, como se señala en la Figura 3. No obstante, por razones tecnológicas, el costo de generación es poco sensible al precio del uranio, y esa alza de precio solo representó algunos mills/kWh adicionales.

En lo operacional, tres años después de Chernobyl se creó la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO), que reúne a todas las organizaciones que operan centrales nucleares, para homologar la seguridad nuclear y confiabilidad operacional de la industria, a través de la comunicación e inspecciones cruzadas. El resultado ha sido notable, medido en el incremento global

de la tasa de utilización de los reactores, y el decremento de las tasas de incidentes y de paradas no programadas. En promedio, los reactores operan con una disponibilidad de 87%, y a tasa creciente de seguridad industrial por encima de otras actividades. Muchas centrales han tenido aumentos de potencia y extensiones de vida útil. Por ejemplo, 57 de los 104 reactores de Estados Unidos ya han logrado extensión de vida y otros 20 están bajo revisión.

En lo ambiental, el fenómeno de cambio climático aún no logra medidas de control eficaz, las emisiones del uso de los combustibles fósiles siguen creciendo —dominadas por el uso del carbón— y no se encuentra respuesta efectiva en las tecnologías renovables como alguna vez se creyó. Por otro lado, los Foros Internacionales de Chernobyl han racionalizado las causas y han comunicado el impacto real del accidente.

En resumen, la tecnología se reposiciona lentamente. Los países nucleares, como Estados Unidos e Inglaterra, anuncian relanzamiento de sus programas. Otros con programas de salida, como Suecia, revierten sus decisiones. Italia reingresaría y Alemania posterga su decisión de cierre y extendería la vida útil de sus unidades. En la vecindad, Argentina evalúa dos unidades aparte de la concreción de Atucha II; México y Brasil también expandirían sus programas. Nuevos actores se suman. Más de treinta países están en algún proceso de estudio y tal vez unos quince de ellos decidan su ingreso. Por ejemplo, los Emiratos Árabes Unidos adquirieron cuatro uni-

dades APR1400 (5600 MW) de la República de Corea. Algunos países del Norte de África estudian producir agua además de electricidad. Kuwait iniciará un proceso similar, algo llamativo en el contexto energético del Medio Oriente. Vietnam anuncia decenas de unidades, etc.

El renacimiento nuclear comenzó a conceptualizarse en el año 2001, debido a las perspectivas de demanda, cambio climático, seguridad energética y otros problemas ya mencionados. Por ello, a los reactores en operación se sumarán 61 unidades, con planes por 148 más, y propuestas por 344 unidades adicionales. La capacidad podría superar los 450 GW en la próxima década.

La política energética en Chile

Chile tiene una política energética implícita, que es seguida con relativa coherencia desde que constitucionalmente esta actividad está en el sector privado. Sin embargo, un investigador no la encontrará. No está escrita y de vez en cuando las autoridades del área han expuesto lineamientos, según la coyuntura. Es decir, son parte de los programas de gobierno. La idea ha sido no tener política energética y dejar que el mercado opere con ciertas reglas que impone el Estado. Esto permite grados de libertad para modificarla, pero no facilita la planificación en el largo plazo. Asimismo, han habido intentos esporádicos de integrarse con los países vecinos, con anillos, ductos o redes, hasta ahora sin éxito o con malas experiencias.

Más coordinada, por razones obvias, es la generación de electricidad, que requiere instalaciones técnicamente afines, que aseguren el servicio mediante costos de falla, fomenten la operación más económica y el derecho de servidumbre de la transmisión. La neutralidad tecnológica inicial se ha ido perdiendo y existen beneficios para el fomento selectivo, por una mezcla de factores técnicos y presiones de grupos ambientalistas. Existe el convencimiento de las bondades de la diversificación, aunque sin prescripción ni cuantificación.

Recientemente, se ha incorporado la idea de la planificación integrada de largo plazo. Ello porque las políticas energéticas de los gobiernos no garantizan la predictibilidad para que las inversiones de proyectos complejos trasciendan de un gobierno a otro.

Un caso es el nuclear, cuyo desarrollo excedería a varios períodos presidenciales, y por ende, se puede cancelar antes de concluir. Otro menos complejo es el hidroeléctrico, pues Chile es rico en este recurso, relativamente eficiente por la forma de las cuencas, aunque debe enfrentar situaciones geográficas puntuales con una posición austral que ofrece bajas emisiones de GEI. Los proyectos deben ser, en general, ejecutados dentro de un mandato, lo cual es difícil con períodos gubernamentales breves. Esta situación fomenta proyectos de rápido desarrollo o de bajo costo inicial, como los termoeléctricos.

El tema ambiental es más reciente y su regulación ope-

Figura 4. | Capacidad instalada y en construcción en el SING y SIC, en MW

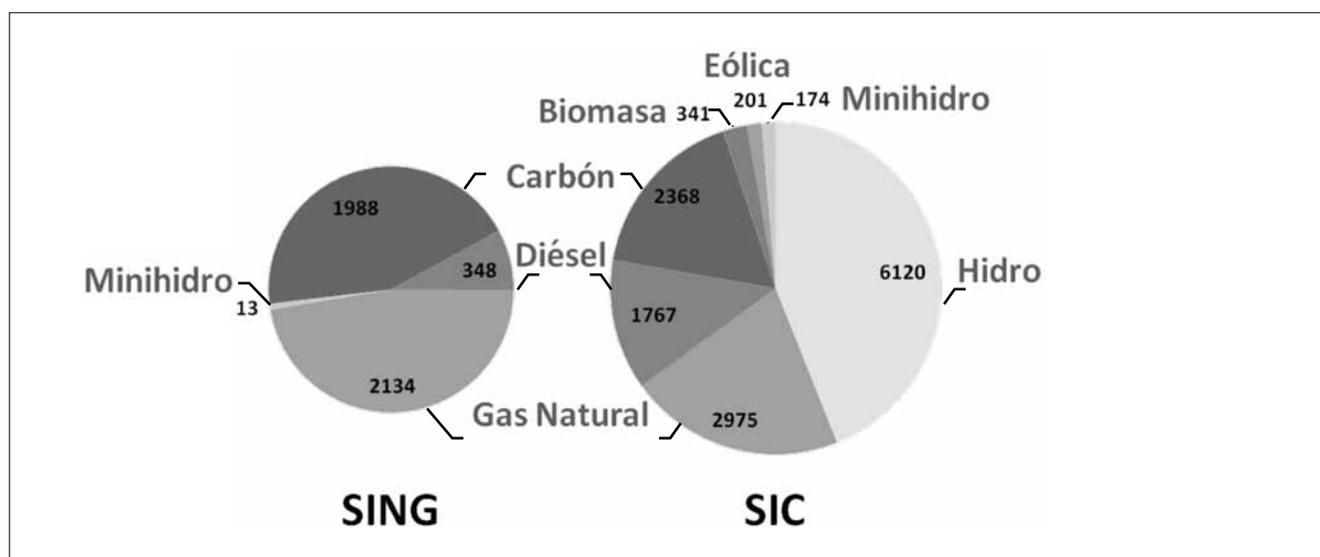
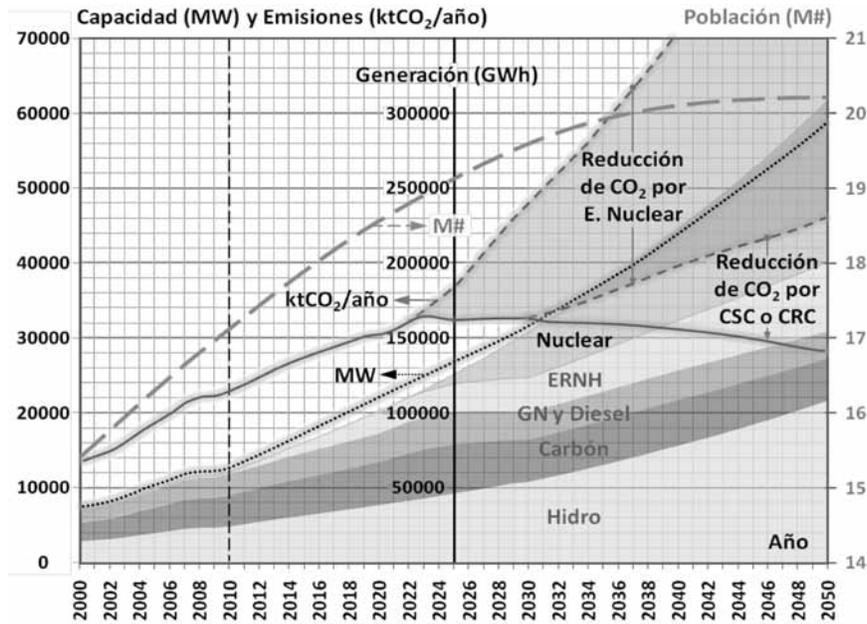


Figura 5. | **Proyección de población, emisiones y capacidad instalada**



ra en forma paralela con creciente estrictez, en especial para las emisiones locales y las descargas térmicas. Hoy se deben compatibilizar los aspectos ambientales, económicos y seguridad, aunque persisten algunas visiones extremas que intentan focalizarse en mínimos precios, sin considerar las emisiones de CO₂, o en cero emisiones sin considerar los costos. Hay quienes sostienen que Chile tiene poca significación a escala global y por ende, sería excluido de obligaciones de reducción. No obstante, su crecimiento económico, su posición económica absoluta, el tamaño de su población y sus actuales emisiones totales y per cápita hacen poco creíble esa hipótesis. Es posible suponer que los países en desarrollo seguirán el curso que siga China.

La Figura 4 muestra la capacidad eléctrica instalada en el Sistema Interconectado Central (SIC) y Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), con 15.309 MW; y las plantas en construcción, con 3.121 MW, en que dominan las fuentes emisoras de GEI (65%). La capacidad de los sistemas de Aisén (SA) y de Magallanes (SM) no supera los 150 MW, combinados.

Un análisis riguroso de una proyección de demanda obliga a prever las tecnologías de ciertos mercados de consumo, la política internacional, el cambio climático, etc. Por ejemplo, la eventual introducción del automóvil eléctrico puede comenzar a alterar la matriz, según lo

haga por baterías o por celdas, y siempre que los distribuidores de vehículos traspan los beneficios a los usuarios. Ciertas políticas de construcción y de salud pueden potenciar más uso de electricidad. Las energías renovables seguirán bajando sus costos y reduciendo sus actuales restricciones técnicas. En Chile parecen ser más favorables las hidroeléctricas pequeñas hasta que se cope su potencial, la geotermia y la eólica. Las energías solares y del mar se ven más alejadas en el horizonte tecnológico. Por otro lado, las tendencias ambientales globales pueden alterar el relativo *status quo* chileno en esta materia y alterar la participación de la generación térmica, la cual a su vez puede ser contrarrestada por avances logrados en plantas más eficientes a carbón con sistemas CSC y/o CRC. Una proyección de población, de emisiones de la generación eléctrica y su reducción tanto por energía nuclear como por CSC o CRC, así como de la capacidad total requerida, se muestra en la Figura 5.

Como país exportador de materias primas, Chile requerirá adoptar sistemas energéticos de bajo costo y bajas emisiones. Lo primero permitirá a los productores la viabilidad económica con márgenes en sus operaciones. Lo segundo permitirá a la sociedad asumir su responsabilidad en la reducción de las emisiones de GEI.

Con estos elementos, y por su característica geográfica, el paradigma energético chileno de largo plazo debiera

Tabla 1. | **Proyección de generación eléctrica y capacidad instalada**

Tecnología/recurso	Participación (%) y Generación (TWh)						Capacidad Instalada (GW)		
	2010		2030		2050		2010	2030	2050
Hidroeléctrica	40%	24,4	40%	61,8	30%	92,6	4,6	11,8	17,6
Nucleoeléctrica	0%	0,0	15%	23,2	35%	108,1	0,0	3,1	14,5
Otras renovables	3%	1,8	15%	23,2	15 %	46,3	0,5	6,6	13,2
Fósiles	57%	34,8	30%	46,4	20%	61,8	7,9	10,6	14,1
Total	100%	61,0	100%	154,5	100%	308,8	13,1	32,0	59,4

tender a acrecentar el uso de electricidad económica y de bajas emisiones, basada en: a) energía hidroeléctrica, sin restricción de tamaño de planta, lo más austral posible, con niveles de generación del 40% al 30% hacia el 2050, acercándose a su potencial económico; b) energía nucleoeléctrica, en pocas centrales de varias unidades estándares de mediana o pequeña escala, según el sistema interconectado, aisladas sísmicamente, con niveles de generación creciendo hasta 35% hacia el 2050; c) otras energías renovables, geotérmicas, eólicas y bioenergía, con niveles máximos de generación cercanos al 15%; y d) fuentes fósiles, gas natural y sistemas eficientes a carbón con CSC o CRC, con niveles de generación cayendo del 57% al 20% hacia el 2050. Al año 2010, 2030 y 2050, se tendría lo que se propone en la Tabla 1, que permitiría las reducciones de CO₂ señaladas en la Figura 5 anteriormente.

Desarrollo actual de la energía nuclear en Chile

En Chile se aplica tecnología nuclear desde los años sesenta. Hace 45 años se creó la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) que progresivamente desarrolló instalaciones y preparó a profesionales. En infraestructura creó y sostiene dos centros nucleares con un reactor experimental en cada uno, irradiadores, aceleradores, laboratorios y sistemas de apoyo, y fue capaz de realizar las etapas de fabricación del combustible nuclear para esos reactores. Varios de los sistemas y productos han sido logrados con tecnología nacional aunque la mayoría de los componentes importantes ha sido de origen extranjero.

La actividad de la CCHEN se ciñe a las disposiciones que rigen para entidades del sector público, con recur-

sos presupuestarios modestos que definen el alcance y la proyección. Su principal contribución ha sido la producción de variados radioisótopos para el sector salud y otros, usando reactores y aceleradores; y la esterilización de alimentos, mediante irradiadores. Para lo anterior ha tenido una dotación promedio histórica de unas 300 personas que incluye a quienes fiscalizan la actividad nuclear y radiológica del país.

En la década de los setenta, participó junto a ENDESA en un estudio nucleoelectrico. Aunque este no superó la etapa de factibilidad y tempranamente la autoridad declinó progresar hacia la nucleoelectricidad, no obstante tuvo el mérito de formar recursos humanos y generar capacidades. Después de ese esfuerzo, varias de esas personas se dispersaron y la CCHEN se contrajo.

La privatización del sector eléctrico a mediados de los años ochenta produjo mejoras en eficiencia, inversión y empleo, con efectos en diferentes mercados. En este sector se aplicó un modelo económico que separó las actividades de generación, transmisión y distribución, y dotó de herramientas de competitividad en cada segmento, dejando ciertas regulaciones en el sector público, en especial para asegurar suministros a clientes atomizados. En este contexto, las empresas de generación comienzan a competir a través del modelo de costo marginal, que prioriza el despacho de las unidades de menor costo de producción.

Hacia fines de los años noventa, se agregaron los procedimientos para desarrollar la evaluación ambiental de los proyectos según la Ley de Bases del Medio Ambiente. Normas recientes han impuesto cuotas de generación renovable, para iniciar una diversificación conducente a una mayor seguridad energética sin metas de reducción de GEI.

Las firmas generadoras, en su forma privada, no desarrollaron estudios nucleoelectricos, privilegiando proyectos hidroeléctricos hasta fines de los años noventa, seguidos por proyectos térmicos a gas desde que existe la infraestructura respectiva y centrales térmicas a carbón desde que decae el suministro gasífero. Es decir, las empresas siguieron una política empresarial de coyuntura, buscando la certeza de corto o mediano plazo.

Desde la privatización, los gobiernos no avanzaron en el tema nuclear, debido en parte, a que las empresas no abordaban proyectos con carencias de infraestructura pública específica que requerían actividades coordinadas del Estado, a través de un programa nuclear.

A pesar que se marginó el tema nuclear del programa del gobierno anterior, por presiones de entidades gremiales y académicas en el año 2007, se allanó a formar un comité asesor para evaluar estudios que identificasen oportunidades, ventajas, desafíos y riesgos del uso de la energía nucleoelectrica en Chile. Un grupo de 10 personas se reunió semanalmente por varios meses, entrevistando a diferentes actores y reuniendo antecedentes. Concluyó que no se podía descartar la energía nuclear como opción energética futura y sugirió estudios específicos en materia institucional, económica, de demanda, ambiental, de emplazamiento, regulatorio de emergencias, de recursos humanos y de opinión pública.

Se recomendó una veintena de estudios, de los cuales se ha realizado un tercio, con montos limitados, siendo varios de ellos llevados a cabo por distintas firmas extranjeras en una asociación forzada con instituciones nacionales. Destacaron los siguientes grupos: Stuk de Finlandia, Amec de Inglaterra, Senes de Canadá, Atom-Prom de Rusia. Aunque la experiencia extranjera es vasta, dichos estudios, de relativa simplicidad, debieron haberse realizado con capacidades nacionales que además hubiesen integrado conclusiones compatibles, desde una perspectiva nacional. El resultado del proceso ha sido la recopilación de información, que en su mayoría se encuentra disponible en agencias nucleares internacionales (ej. IAEA, AEN, NRC, NEI, WNA, WANO, etc.).

La conclusión principal no era obvia para las personas del grupo, lo cual legitima la opción aún más. No obstante, se ganó tiempo político, ante una conclusión más destacable: *“la decisión de incorporación es estratégica en lo técnico, en lo político y en lo geopolítico, que exige del Estado un papel activo y distinto al mantenido hasta hoy, tanto en la evaluación como en la selección de las opciones técnicas posibles”* (Gobierno de Chile, 2007).

Figura 6. | Elementos de una política nuclear nacional



Lineamientos de política nuclear en Chile

Aunque no se desprende directamente del estudio iniciado el año 2007, se infiere la necesidad de una política nuclear de consenso. La mayoría de los países ha iniciado programas nucleares -requisito para realizar los proyectos- a través de una postura oficial y legal que define los aspectos estratégicos de la energía nuclear como: localización tecnológica, naturaleza tecnológica, acuerdos internacionales, suministro de combustible, gestión de combustible gastado, estructura industrial, seguridad y protección física.

La política nuclear debe promover el desarrollo nuclear con fines pacíficos y alinear a otras políticas de Estado, como la energética y tecnológica. No obstante, hay pocos ejemplos recientes en nuestro país. La única que tiene este alcance es la política de defensa, que ha ido desarrollando documentos, sin un carácter de ley, pues es más simple de definir por su arraigo cultural.

En algunos países, la política se denomina *Nuclear Energy Act* y su objetivo es guiar el desarrollo nuclear según los intereses permanentes de la nación, que oriente inversiones en las aplicaciones, estandarice ciertas tecnologías, disponga de recursos humanos calificados, haga participar a la comunidad y asegure que las actividades subyacentes consideren la protección a las personas y los compromisos internacionales. En consecuencia, la política nuclear que oriente un programa nuclear debe considerar los elementos de la Figura 6.

De ingresar Chile a la industria nuclear sería un caso único. En el pasado, los gobiernos eran los impulsores del tema nuclear. Los proyectos estaban vinculados a comisiones nucleares y eran regulados internamente. Incluso hoy, varios operadores de centrales nucleares son empresas estatales. La francesa EDF es una de ellas. No hay ejemplo de un país que haya adoptado esta tecnología en un contexto totalmente privado. Eventualmente, el caso chileno será mixto, lo cual podría implicar alguna revisión constitucional.

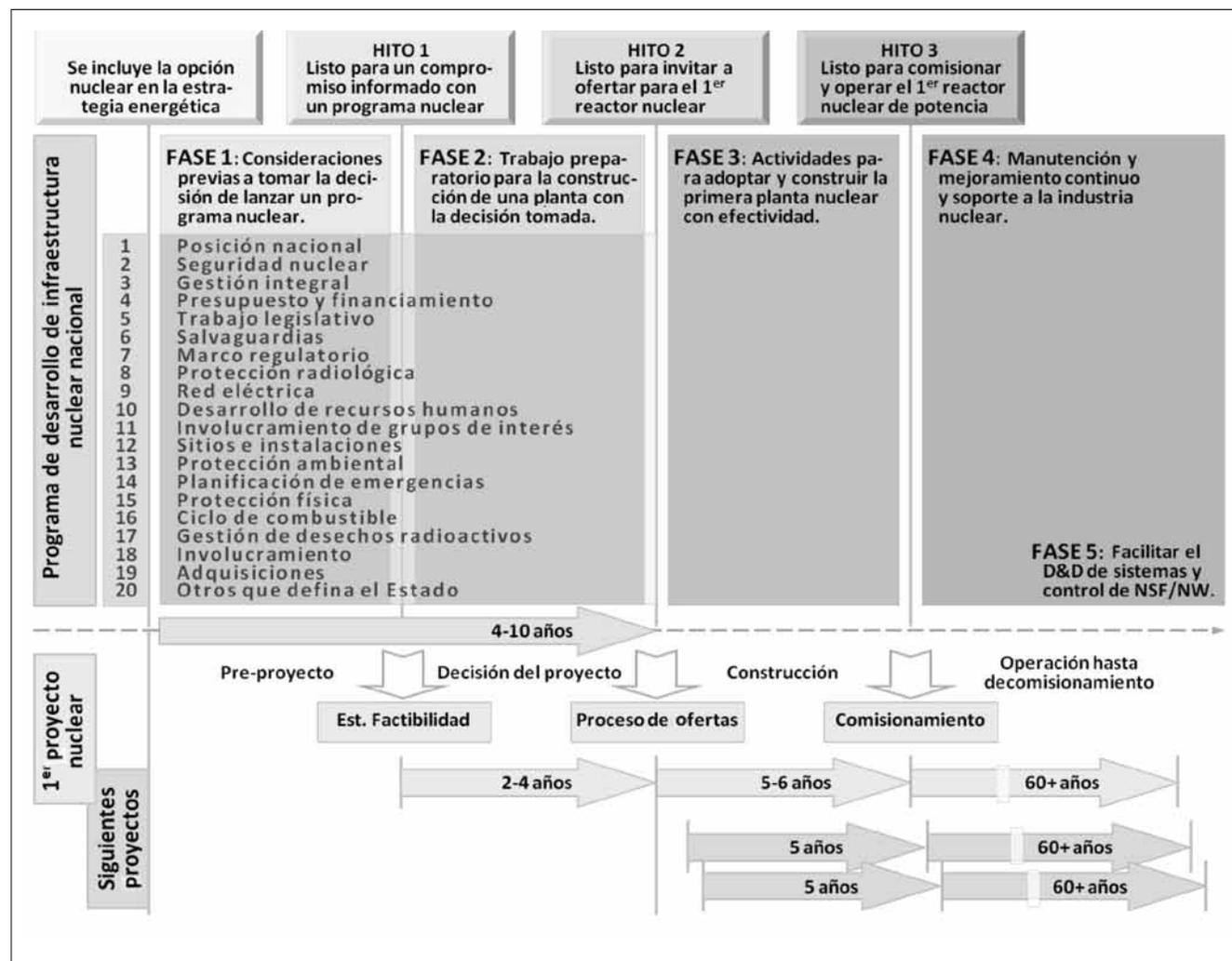
Viabilidad nuclear en Chile

La introducción de la energía nuclear requiere un marco técnico, así como apoyo político y ciudadano. Los

proyectos deberán estar sincronizados en un programa nuclear. Un atributo esperado es que las normas que definan la regulación nuclear y ambiental sean exigentes y aplicadas en forma expedita.

La energía nuclear suele polarizar a las personas al ser sus fundamentos relativamente desconocidos y al existir temores arraigados que se asocian a accidentes, guerras y algo de ficción. Por ello, se espera que su implementación en Chile esté sujeta a presiones mayores a las que ha habido antes para centrales hidro y termoeléctricas. Luego, requiere un programa previo de educación, abierto y equilibrado, enmarcado en una estrategia de aceptación, que considere los beneficios y problemas de todas las opciones energéticas, así como los problemas globales referidos a energía—en que la opción nuclear es

Figura 7. | **Secuencia general de desarrollo de la infraestructura nuclear nacional**



una más, imperfecta—, seguido de conceptos científicos, técnicos y abstractos para despejar temores. El resultado esperado de ese programa de educación es la aceptación política y del público general, con un posicionamiento comparable al de las opciones renovables.

Un programa nuclear de potencia debe proveer los aspectos que no puede asumir una empresa: debe preparar el contexto, proveer una capacidad técnica y humana, imponer requisitos a la red eléctrica, generar servicios de soporte, sugerir tecnologías y unificar de antemano las actividades del combustible nuclear y de la gestión final de residuos. Debe dar seguridades de buen uso a la sociedad nacional y representar compromisos internacionales.

Para maximizar el éxito, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha preparado un protocolo que recomienda a los Estados un proceso que examina al menos 19 elementos de infraestructura nacional, en cinco fases de desarrollo ayudando al programa a responder los elementos de política. El proceso general del programa y proyectos se resume en la Figura 7.

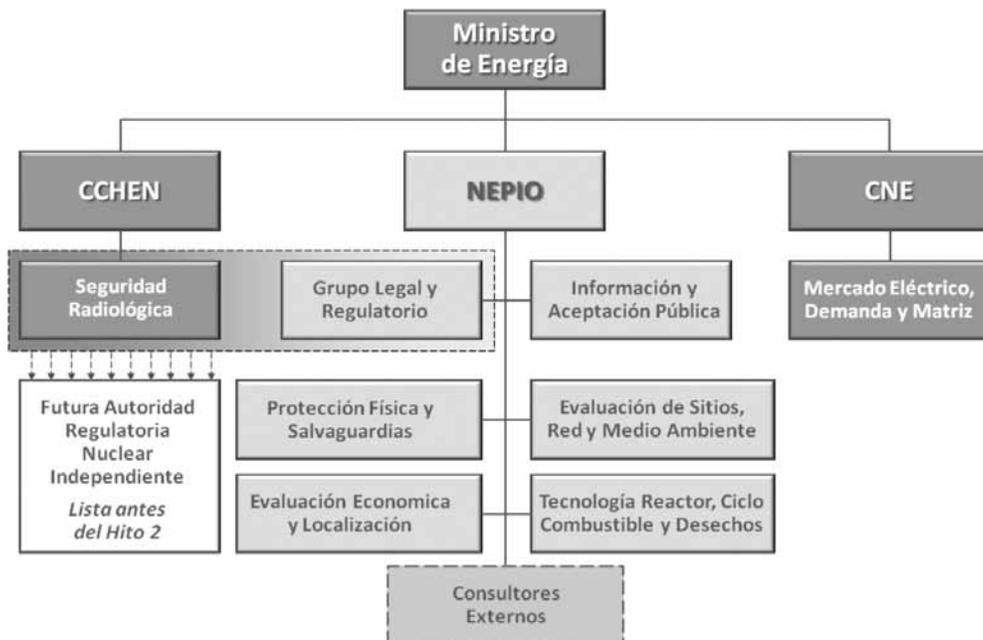
Un proyecto debe considerar aspectos técnicos, económicos y de gestión en un horizonte superior a 50 años, proveyendo electricidad y otros servicios energéticos (agua, hidrógeno, calor) con una ventaja de costo total.

El OIEA también ha preparado un cuerpo extenso de recomendaciones para la gestión de los proyectos nucleoelectrónicos.

El programa es la contraparte pública que establece las bases para el emprendimiento de muchos actores. Una recomendación internacional es la creación de una agencia preparatoria (NEPIO: *Nuclear Energy Program Implementation Organization*), alojada en el ministerio responsable de la energía, que establece la política nuclear y desarrolla los elementos de infraestructura necesarios para un programa efectivo. El NEPIO, cuya estructura sugerida para el caso chileno se encuentra en la Figura 8, existe hasta alcanzar el Hito 2. Algunos de sus elementos se difunden y otros se transfieren. El cuadro solo muestra los roles afines al programa de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y de CCHEN. El costo de un programa nuclear nacional puede ser de unos US\$30 millones en 4 años, con beneficios que trascienden al sector nuclear.

El aspecto más relevante es el establecimiento de una Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) independiente de los operadores y promotores privados y públicos de la energía nuclear, que vele por la seguridad del público y de sus bienes. La ARN, junto a la Superintendencia del Medio Ambiente, autorizaría a los operadores con pro-

Figura 8. | Estructura institucional de un programa nucleoelectrónico



yectos coherentes dando certeza estructural de realización de estos. El proceso de construcción no debe tener pausas innecesarias debido a la relativa intensidad de las inversiones iniciales.

Bajo una nueva ley, que ampliaría la existente, la ARN deberá regular y fiscalizar la actividad nuclear en lo referente a seguridad nuclear y radiológica, a protección física de instalaciones nucleares, y a las salvaguardias a los materiales nucleares asociados a los tratados de no proliferación de armas nucleares; adoptando o generando un cuerpo de reglamentos y directivas acorde a la experiencia internacional.

La ARN genera las licencias o permisos a las personas y empresas. El operador de las centrales nucleares, una empresa privada o mixta, debe presentar un Análisis de Seguridad Preliminar (PSAR) cuya aprobación permita la construcción, y un Análisis de Seguridad Definitivo (FSAR) cuya aprobación genere una licencia para operar la planta. A continuación, la ARN fiscaliza el buen uso de las licencias y genera autorizaciones para eventos como recambio de combustible, variaciones al diseño y cese de operación al término de la vida útil.

La experiencia internacional no es concluyente en cuanto a la forma de propiedad de las centrales nucleares. En Francia, 59 reactores son operados eficientemente por una empresa estatal. En el otro extremo, en Estados Unidos, más de 100 reactores son operados en forma dispersa por un gran número de empresas. En otros países hay asociaciones entre privados y el Estado con diferentes participaciones. Un Estado también podría participar como dueño de la instalación licitando su operación.

Una ventaja de la presencia estatal es el acceso a créditos de menor riesgo, que reducen el costo de la generación. En algunos casos, la propiedad puede ser cooperativa y dedicada a la autogeneración en sectores de alta intensidad energética, reduciendo el costo de la electricidad y relajando la oferta energética pública. La eficiencia de operación ha sido variada, con reactores bien y mal operados en contextos públicos y privados, dando una leve ventaja a la forma de operación privada.

La estructura industrial en Chile está por definirse, pero sería posible concebir una empresa única enfocada a operar reactores nucleares en cuya propiedad confluyen las empresas privadas y públicas interesadas.

El costo de desarrollo de cada proyecto depende de un conjunto de variables, destacando el costo básico del equipo, la tasa exigida por los accionistas, el costo de en-

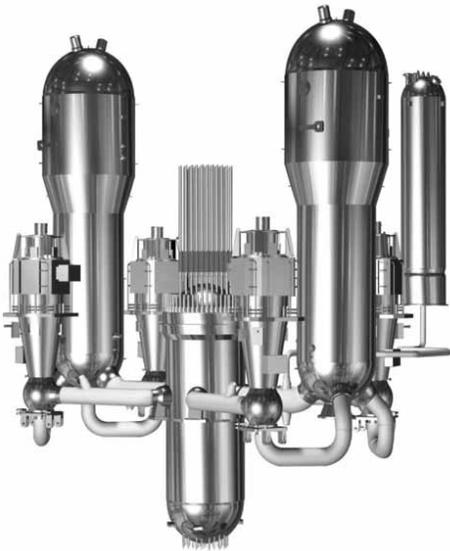
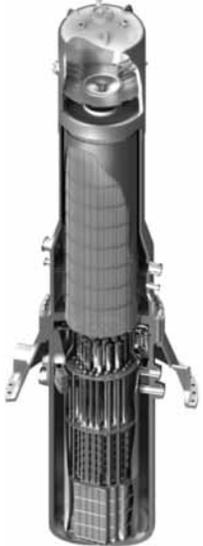
deudamiento, el tiempo de construcción, el factor de utilización y, en menor medida, el horizonte del proyecto. El costo básico depende a su vez del costo de los materiales y de los servicios energéticos para la manufactura de los equipos y obras. El costo financiero depende del modelo de negocio. El costo de combustible, que incluye las instalaciones y servicios para la preparación y disposición final de los desechos, es bajo y estable a la variación del costo del recurso energético, lo cual permite un despacho temprano y una operación en base. El costo de mantenimiento es comparable al de proyectos térmicos.

Este se minimiza mediante una gestión integral de los proyectos dentro de un programa coherente, basado en reactores seguros y probados, de componentes estandarizados, pudiendo ser unidades avanzadas de potencia superior a 1.000 MW, que es la tendencia de las potencias con grandes redes, o unidades innovativas de una fracción de esa potencia, i.e. 200 MW. La diferencia en estos bloques es el nivel de innovación y cambios en una industria esencialmente conservadora que, en general, exige a los conceptos innovativos un prototipo operacional. Además, estos últimos suelen ser de baja o mediana potencia (menos de 300 MW y 700 MW, respectivamente) y sus componentes pueden estar integrados.

Un PWR de gran tamaño no es muy distinto de una versión PWR integrada, aparte que tiene una raíz común en la Marina de EUA. Es otro arreglo arquitectónico de los mismos elementos básicos, ventajoso para países como Chile, que posibilita adoptar economías de escala por aprendizaje. La energía almacenada en el corazón de tal PWR es elevada y requiere de sistemas activos y redundantes de seguridad, que encarecen innecesariamente un sistema. Además, la planta debe ser capaz de resistir eventos como la colisión intencionada de un avión comercial.

El menor tamaño de la contraparte permite integrar los componentes en una sola vasija, reduciendo la demanda a la industria pesada y facilita el aislamiento sísmico del conjunto. Al evitar circuitos críticos entre componentes, se reduce el riesgo de accidente de pérdida de refrigeración y la seguridad es superior. Además, es posible dificultar algunos escenarios de accidente o sabotaje. La Tabla 2 resume diseños avanzados y muestra el sistema de suministro de vapor nuclear (NSSS) de un diseño representativo de cada familia.

Tabla 2. | Resumen de reactores en el mercado y conceptos en desarrollo

Reactores evolutivos				Reactores innovativos			
Modelo	Tipo	Fabricante/ Diseño	MW	Modelo	Tipo	Fabricante/Diseño	MW
APWR	PWR	Mitsubishi	1.700	SCOR	IPWR	CEA	600
EPR	PWR	Areva	1.600	IMR	IPWR	CRIEPI	350
ESBWR	BWR	General Electric	1.550	IRIS	IPWR	IRIS Consortium	335
VVER1500	PWR	Gidropress	1.500	AHWR	PHWR	BARC	300
APR1400	PWR	KNHP	1.450	PEACER	LMR	SNU	300
ABWR	BWR	General Electric	1.300	VBER300	PWR	OKBM	295
SWR1000	BWR	Areva	1.250	GT-MHR	HTGR	GA-OKBM	265
VVER1200	PWR	Gidropress	1.200	HTR PM	HTGR	INET	210
AP1000	PWR	Westinghouse	1.114	mPower	IPWR	Babcock & Wilcox	125
ATMEA1	PWR	Areva-Mitsubishi	1.100	SMART	IPWR	KAERI	100
VVER1000	PWR	Gidropress	1.000	PBMR	HTGR	Eskom	170
ACR1000	PHWR	AECL	1.080	KALIMER	LMR	KAERI	150
OPR1000	PWR	KNHP	950	MRX	LWR	JAERI	100
CANDU 6	PHWR	AECL	600	MASLWR	IPWR	NuScale Power	45
VPBER600	PWR	OKBM	750	KLT 40	PWR	OBKM	35
SBWR	BWR	General Electric	600	CAREM	IPWR	CNEA-INVAP	27
BN 600	LMR	OKBM	560	4S	LMR	CRIEPI	10
APR1400 (1400 MW)				Módulo mPower (125 MW)			
							

Varios de los países candidatos tienen redes pequeñas y no se ajustan a la potencia unitaria de los reactores de gran tamaño. Para ellos, hay varios proyectos y conceptos en diferentes grados de desarrollo. Algunos van rápido y otros no muestran progreso. Otros diseños se superponen y las corporaciones optan por el modelo de mayor rentabilidad esperada.

Aunque el costo específico de la unidad compacta es mayor y el consumo de combustible es menos eficiente, es posible que el menor riesgo comercial y la mayor seguridad justifiquen a las unidades más pequeñas para ciertos mercados. La construcción toma menos tiempo por el prearmado, pudiendo acelerar un programa de desarrollo, como se aprecia en la Figura 9.

Un ejercicio simplificado de costos de generación de un proyecto nuclear en Chile, permite apreciar, con los datos y supuestos de la Tabla 3, que una vez alcanzada la madurez y dominio de su gestión (i.e. 3^{er} proyecto), ambos diseños logran costos similares, alrededor de 73 mills/kWh, inferior a las centrales térmicas.

La generación nucleoelectrica es económicamente competitiva con las fuentes convencionales y no tradicionales. Esta aplicación puede ofrecer un costo de generación entre los 50 y los 100 mills/kWh según una gama

de variables tecnológicas, financieras y del modelo de gestión. En general, en el presente, es más cara que la hidroelectricidad y más económica que la termoelectricidad a carbón y gas natural sin CSC y que las alternativas renovables. La ventaja para la opción nuclear se consolida si las tecnologías que emiten gases de efecto de invernadero deben incorporar dispositivos de mitigación o pagar alguna multa.

Sin embargo, este no es necesariamente el costo de suministro en una modalidad llave en mano, sino que el costo del arquitecto desarrollador, de lo cual se desprende la necesidad de considerar una localización tecnológica creciente en las siguientes unidades, cuya decisión dependerá, junto a los servicios asociados, del tamaño esperado del parque.

Un proyecto llave en mano tiene la ventaja de un cumplimiento predecible en tiempo y costo, a un mayor valor. Con más experiencia, el propietario puede abordar un contrato por paquetes de componentes o por islas, en que bajará el costo de desarrollo, pero evidenciará un mayor riesgo de desconfiguración. El proyecto nucleoelectrico requiere de una estructura de gestión adecuada para cumplir el proyecto en el tiempo y con los recursos previstos, en un contexto estricto de calidad supervisado por la ARN.

Figura 9. | Cronograma de realización de un proyecto de reactor convencional v/s integrado

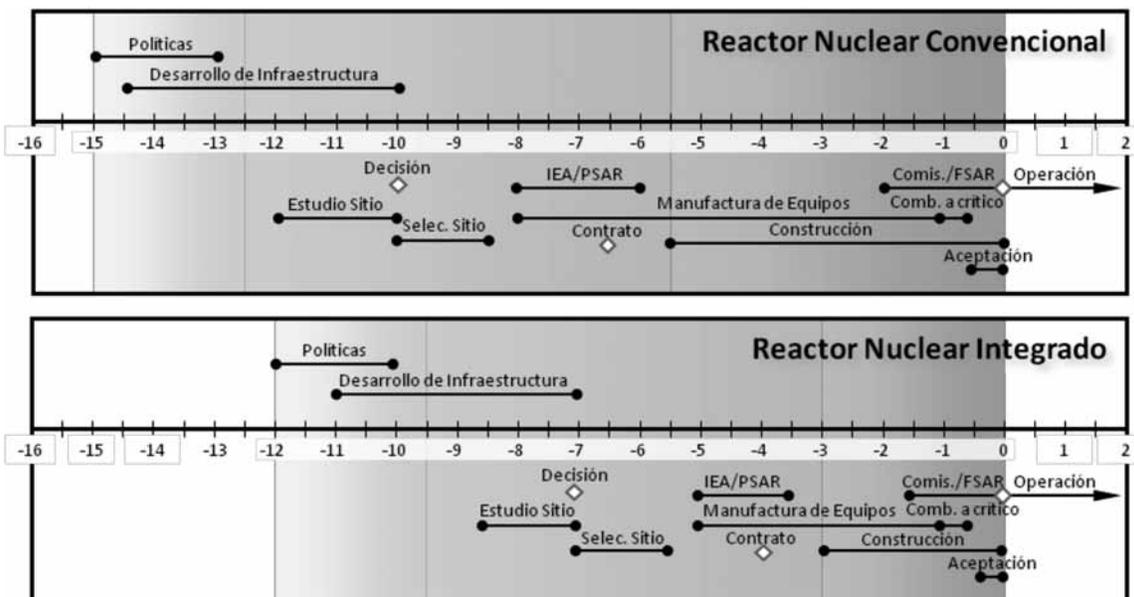
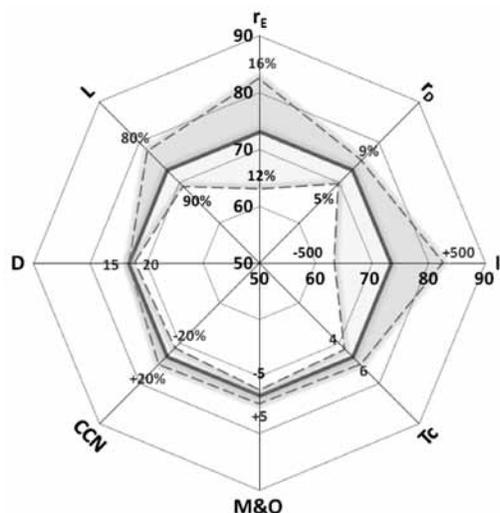


Tabla 3. | Variables para ejercicio de costo de un proyecto nuclear

Variable	Medida	Tecnología		Sensibilización
		APWR	IPWR	
Potencia unitaria	P	MW	1.000	200
Energía anual	E	GWh	7.450	1.550
Vida útil	TO	años	40+	40+
Tiempo de construcción	TC	años	5	3
Costo básico (NSSS)	OCN	\$/kW	2.600	3.200
Costo básico (combustible)	OCF	\$/kW	200	200
Tasa de inflación	I	%	3%	3%
Tasa de endeudamiento	r_D	%	7%	6%
Tasa de capital	r_E	%	14%	13%
Pago por combustible	CCN	mill/kWh	9	10
Costo de generación	e_G	mill/kWh	73	73



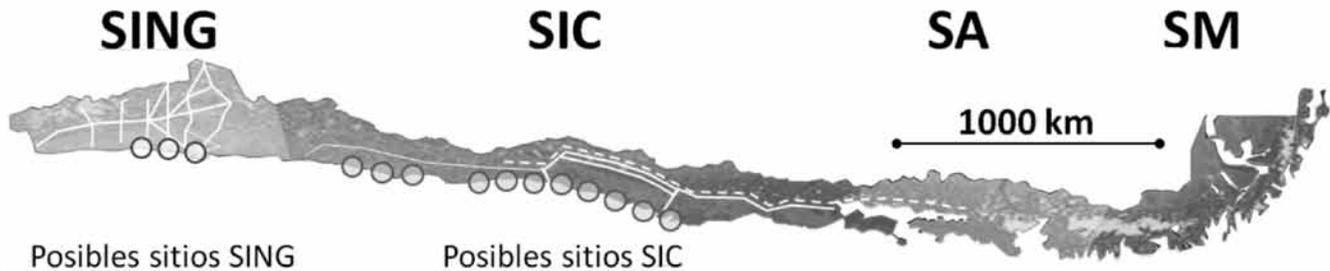
La central debe emplazarse en lugares cuyos riesgos naturales (terremotos, maremotos, aludes, inundaciones) son conocidos y neutros a los sistemas de seguridad de cada unidad, cercana a centros de apoyo logístico y nodos de la red eléctrica, con acceso a agua de refrigeración (costa o ríos de caudal adecuado); y alejado de lugares sensibles, áreas protegidas o de interés patrimonial. La distancia mínima a los lugares habitados depende de la densidad poblacional, la geografía y las vías requeridas para una eventual evacuación. Usualmente bastará una distancia de 10 a 20 kilómetros. Algunas centrales existentes se ubican más cerca. La Figura 10 muestra emplazamientos generales, de los cuales se sugiere dos centrales iniciales (SING y SIC) de varias unidades según los diseños seleccionados, a las que se puede agregar una tercera.

Los lugares exactos son materia de un estudio detallado, cuidando que no trascienda la selección para evitar especulación inmobiliaria e iniciativas ambientalistas de cambio de uso de suelo. Cada unidad de la central debe-

rá tener correspondencia con el tamaño de la red, no superando el 10% de la capacidad de la red que alimenta para impedir que la salida abrupta de alguna implique cambios de frecuencia y afecte el sistema interconectado. Esta restricción es menor si se consideran reactores integrados. Según el tamaño de las unidades, hoy se pueden hacer furtivas para proveer la mejor protección física y del reactor, que dentro de su contenedor, puede estar bajo el nivel del suelo, mejorando la armonía de la central en su entorno natural.

Según el tamaño esperado del sector nuclear en el país, se torna deseable que se considere una creciente localización tecnológica e industrial de valor. Además de las obras civiles, los primeros elementos a localizar son los periféricos al reactor, y los últimos serán los grandes componentes de alta presión. En cuanto al combustible, las primeras unidades debieran asegurar suministros externos de largo plazo (15 años). El primer proceso del ciclo de combustible a localizar es la fabricación de elementos combustibles y el último, es el repositorio de

Figura 10. | Posibles emplazamientos de centrales nucleares



desechos, algunos con socios extranjeros. El requisito clave para esta localización es contar con ingenieros con conocimientos y herramientas avanzadas de diseño de productos y procesos.

Un programa nucleoelectrico demanda varios tipos de profesionales de diferente nivel de especialización. En un comienzo se requerirá profesionales más generalistas con conocimiento amplio de las formas de generación eléctrica, incluida la nuclear, de modo de colaborar en establecer una política nuclear coherente.

La dotación estimada del NEPIO será de unas 30 personas de amplio espectro profesional, para desarrollar la infraestructura nuclear mínima. Incorporará ingenieros y otros profesionales, varios de la especialidad nuclear, algunos logrables en programas nacionales. Al terminar la fase 2, se difunden en las instituciones permanentes (ARN, CCHEN) o en las empresas operadoras.

La dotación de la ARN es de unas 60 a 80 personas de competencias técnicas robustecidas con formación de postgrado y entrenamiento en las disciplinas de la ingeniería de reactores nucleares (sistemas térmicos, física de reactores, control e instrumentación nuclear, análisis probabilístico de seguridad, materiales nucleares, estructuras, blindajes, salvaguardias, etc). En régimen, se requiere una capacidad adicional de I&D en regulación, la que puede estar dentro de la ARN, en un organismo científico técnico nacional (OCT) como la CCHEN, u otro, que puede ser de unas 40-60 personas. Si el mercado adoptara varios tipos de tecnologías, el número de personas en la ARN aumentará por el entrenamiento dedicado que se requiere para cada uno.

La dotación de la fase de proyecto, abordado por el dueño, es de hasta 500 personas durante un par de años, en que dominan las especialidades técnicas propias de un proyecto de generación eléctrica, al cual se suma un

grupo de unos veinte ingenieros nucleares. La dotación de la fase de construcción, que durará unos 5 a 6 años en el primer proyecto, puede alcanzar un máximo de unas 4.000 personas durante un par de años según el tipo de tecnología y tamaño. Habrá personal de las empresas proveedoras y contratistas en un número no determinado.

Se deberá desarrollar empresas capaces de dar servicios a las centrales, como el recambio de combustible y mantenimiento específico. En un principio estas pueden ser parte del contrato, pero es conveniente apresurar su localización en el país.

Uno de los aspectos que permiten facilitar una introducción confiable es una cultura de trabajo bien hecho, que considere la seguridad y la responsabilidad social. Como sociedad hemos soportado algunas experiencias contrarias, con lo cual se espera que estemos más cerca de las buenas prácticas.

Hay aspectos de los riesgos de la energía nuclear que requieren aclaraciones. Los desechos nucleares, que son menos del 5% del combustible gastado, deben removerse y confinarse por muchos años en una facilidad adecuada, mientras que el resto puede ser aprovechado si se dan las condiciones. El volumen es pequeño, un par de metros cúbicos al año en el parque nuclear supuesto al año 2050, con tecnología existente y supervisión para evitar el ingreso de compuestos indeseables a la biósfera. La decisión tecnológica de recuperar materiales puede tomarse en fecha posterior en función de la escala del programa.

El riesgo de proliferación de armas y uso político o terrorista se reduce adoptando protocolos internacionales de salvaguardias. Cabe agregar que el desarrollo de armas nucleares ha tenido lugar en un contexto típicamente clandestino, sin centrales nucleares de potencia.

Los accidentes nucleares ocupan a ingenieros y técnicos para hacerlos poco probables, aún en casos en que se combinen malas prácticas con mala suerte. En tecnología no se pueden descartar fallas, pero se ha logrado desarrollar sistemas nucleares con una frecuencia esperada de destrucción del corazón de 10^{-7} casos/reactor-año. Esa es una cifra probabilística más simple de entender si se invierte su valor, es decir, el corazón de un reactor moderno se podría fundir una vez en diez millones de años, sin que implique emisión al medio ambiente.

Conclusiones para la agenda política

La adopción de la tecnología nuclear es compleja y requiere cuidados, pero no es una empresa inalcanzable. Chile es un país en vías de desarrollo y posee, aparte de la demanda energética, elementos de infraestructura que permiten acceder a esta tecnología. Posee empresas que han sido capaces de desarrollar y gestionar proyectos de ingeniería complejos y existe una comisión (CCHEN) con más de 40 años de experiencia que ha entregado servicios, ha formado a un centenar de profesionales en Chile y en el extranjero, y ha capacitado a miles de chilenos en disciplinas radiológicas. La mayoría de las universidades chilenas e institutos de formación técnica egresan a profesionales con herramientas adecuadas a los desafíos naturales del país, lo que constituye una base sólida sobre la cual deberán agregarse algunas especialidades y avanzar en el entrenamiento, con amplia colaboración internacional.

Por otro lado, el país basa el 70% de su energía primaria en recursos importados, dominados por fuentes fósiles que requieren ceder dada la amenaza de cambio climático y la dislocación que esta podría ocasionar a la sociedad. Las alternativas de conversión a energías renovables no hidroeléctricas han sido difíciles en Chile y en el mundo (bordean el 1% a nivel global), por lo cual resulta complejo aventurar una reconversión a sistemas

libres de GEI a tiempo. La energía nuclear está madura y su tecnología progresa cada día.

Por lo tanto, Chile debe mirar con detenimiento esta alternativa y realizar los pasos para convertirse en un usuario responsable. Lo que obtendrá a cambio es más energía eléctrica (y otros servicios) de bajo costo para facilitar el desarrollo económico del país, con autonomía y creciente independencia energética, y menos GEI, usando tecnologías seguras y confiables.

Los riesgos y problemas potenciales de esta tecnología (los desechos, la proliferación nuclear, los accidentes) son acotados siempre que se cuente con un programa responsable, con proyectos bien desarrollados que incorporen tecnología de punta, sujetas a la fiscalización de instituciones dotadas de profesionales capacitados y responsables bajo la supervisión permanente de la sociedad chilena e internacional. Los requisitos para el establecimiento de un programa efectivo son amplios y parten por una política nuclear que, a su vez, se sustenta en la disponibilidad de personas calificadas y una sociedad educada en la problemática energética y las consecuencias de su uso responsable.

Referencias bibliográficas

- International Atomic Energy Agency (IAEA)**, 2010. *Nuclear Power Reactors in the World*. Reference Data Series N° 2.
- International Atomic Energy Agency (IAEA)**, 2007. *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Nuclear Energy Series N° NG-G-3.1.
- International Atomic Energy Agency (IAEA)**, 2007. *Managing the First Nuclear Power Plant Project*. TECDOC Series N° 1555.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report, Summary for Policymakers*.
- Gobierno de Chile**, 2007. *La Opción Núcleo-Eléctrica en Chile*, Informe del Grupo de Trabajo en Nucleoelectricidad.
- OECD/International Energy Agency (IEA)**, 2010. *Key World Energy Statistics*. Paris.

www.uc.cl/politicaspublicas

politicaspublicas@uc.cl



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

SEDE CASA CENTRAL

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 324, piso 3, Santiago.
Teléfono (56-2) 354 6637.

SEDE LO CONTADOR

El Comendador 1916, Providencia.
Teléfono (56-2) 354 5658.

CENTRO DE POLÍTICAS PÚBLICAS UC

- Vicerrectoría de Comunicaciones y Educación Continua • Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos
- Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas • Facultad de Ciencias Sociales • Facultad de Derecho
- Facultad de Educación • Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política • Facultad de Ingeniería • Facultad de Medicina