

INNOVACIÓN Y CAPACIDADES ORGANIZACIONALES EN EL SECTOR NUCLEAR ARGENTINO: EL CASO DE LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA ATUCHA II.

JAVIER CANTERO

Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Industria (IdeI), Argentina
jcantero@ungs.edu.ar

NATALIA GONZALEZ

Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Industria (IdeI), Argentina
ngonzale@ungs.edu.ar

DAIANA DIAZ

Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Industria (IdeI), Argentina
ddiaz@ungs.edu.ar

CECILIA CHOSCO DIAZ

Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Industria (IdeI), Argentina
cdiaz@ungs.edu.ar

PALOMA FIDMAY

Universidad Nacional de General Sarmiento, Instituto de Industria (IdeI), Argentina
pfidmay@ungs.edu.ar

RESUMEN

Diseñar, construir y operar una central nucleoelectrica plantean desafios tecnologicos y de innovacion a las organizaciones involucradas. La presente ponencia analiza las fuentes de innovacion y los desarrollos tecnologicos del proceso de construccion y puesta en marcha de la central nucleoelectrica Atucha II.

Abordar el estudio de una organizacion concebida desde la teoria como altamente riesgosa pero confiable en la practica plantea multiples interrogantes. ¿Cuáles son las características que hacen de Atucha II una organizacion de alta confiabilidad? ¿Qué tipo de innovaciones y desarrollos se pueden dar en una industria madura como la nuclear civil, en Argentina? ¿Cómo se afrontaron los desafios tecnologicos a partir de la reactivacion de un proyecto abandonado durante más de una década? Este es el conjunto de preguntas de investigacion formuladas en el presente estudio.

El trabajo propuesto posee las características de un estudio de caso intrínseco. De ahí la necesaria produccion de informacion primaria. La entrevista semi-estructurada a interlocutores clave fue el instrumento de intervencion predominantemente utilizado. Se adoptó el enfoque metodológico de la teoria fundada.

Del analisis del caso surgen diversas fuentes de desarrollos tecnologicos prevaleciendo un patron de I+D incremental. Se trata de innovacion en red en el marco de un modelo de triple hélice liderado por el Estado. En efecto, una de las resultantes de la construccion de Atucha II es el desarrollo del entramado del sector nuclear argentino junto con el desarrollo de

capacidades organizacionales. En ese sentido, la tercera central nuclear de potencia argentina retoma la trayectoria socio-técnica del sector nuclear argentino.

Finalmente, el presente trabajo plantea dos temas de discusión: 1) una comparación de los accidentes catastróficos del sector nuclear *vis-à-vis* la central Atucha II, 2) los desafíos del sector nuclear argentino en la era post-Atucha II.

INTRODUCCIÓN

“...la central nuclear es algo más que una fábrica de Kilovatios/Hora; es un instrumento para la transformación tecnológica del país.”
Jorge A. Sabato, 1970 [2014]: 72

“(...) uno de los objetivos del sector nuclear argentino fue promover la conformación de una industria nuclear nacional con hábitos que tendieran al ideal schumpeteriano, capaz de modificar una cultura empresarial dominante reactiva a las inversiones de riesgo, con hábitos rentísticos y, en el caso de las grandes empresas, predatorios hacia el sector público.”
Diego Hurtado de Mendoza, 2014: 17

Diseñar, construir y operar una central nucleoelectrica plantea desafíos tecnológicos y de innovación a las organizaciones involucradas. La presente ponencia describe y analiza las fuentes de innovación y los desarrollos tecnológicos derivados de la construcción y puesta en marcha de la central nucleoelectrica Atucha II.

Desde su inicio en 1980, el proyecto de la tercera central nucleoelectrica argentina sufrió recurrentes demoras que tuvieron como corolario la paralización total en 1994. Como parte del Plan Nuclear Argentino, Atucha II se reactiva en 2006 y con la construcción de la central se retoma la trayectoria tecnológica del sector nuclear argentino.

Si bien es válido utilizar los conceptos de la economía de la innovación a las organizaciones del sector nuclear, es dable señalar que se trata de organizaciones riesgosas u organizaciones de alta confiabilidad (HROs), situación que exige establecer distinciones *vis-à-vis* los procesos de I+D que se dan en las organizaciones de alta eficiencia (HEOs). En otras palabras, la naturaleza de los procesos de innovación y los márgenes de maniobra que tiene una empresa automotriz –uno entre innumerables ejemplos de HEO– no se condicen (o difieren sustancialmente) con los que se pueden realizar en HROs del sector nuclear ya que se trata de organizaciones que deberían funcionar libres de errores.

La industria nuclear es causa y consecuencia de procesos de innovación. En algunos casos se trata de innovaciones radicales (e.g. fusión nuclear, procesos de enriquecimiento de uranio por láser, reactores nucleares de Generación IV, nuevos elementos combustibles), que han constituido hitos en el desarrollo de la industria; en otros casos se trata de innovaciones incrementales que implicaron mejoras tanto de productos como de procesos.

El enfoque organizacional y el interés por superar la clásica oposición entre investigación hipotético-deductiva e inductiva impone un proceso de construcción teórica a través de un caso de estudio (Eisenhardt, 1989, 2007; Yin, 2003). La entrevista semi-estructurada fue el instrumento de intervención predominantemente utilizado en las tres visitas a planta realizadas. Fueron entrevistados *in situ* diversos interlocutores clave (e.g. responsables de planta, de seguridad industrial y de sala de control), dando lugar a más de veinte horas de entrevistas, posteriormente desgrabadas y analizadas con el enfoque metodológico de la teoría fundada (Glaser & Strauss, 1967).

Del análisis del caso surgen diversas fuentes de desarrollos tecnológicos prevaleciendo un patrón de I+D incremental –tanto de producto como de procesos– generado por Nucleoeléctrica Argentina S.A. (empresa a cargo de la construcción) y del conjunto de organizaciones públicas y privadas involucradas en el proyecto (e.g. CNEA, ARN, empresas subcontratistas), dando lugar a la innovación en red en el marco de un modelo de triple hélice liderado por el Estado. En efecto, una de las resultantes de la construcción de Atucha II es el desarrollo del entramado del sector nuclear argentino junto con el desarrollo de capacidades organizacionales. En ese sentido, la tercera central nuclear de potencia argentina retoma el sendero evolutivo o trayectoria socio-técnica del sector nuclear argentino posibilitando procesos de I+D y actuando como palanca del desarrollo industrial local.

Finalmente, el presente trabajo plantea dos temas de discusión. En primer lugar, una comparación de los accidentes catastróficos del sector nuclear (i.e. TMI, Chernobil y Fukushima) *vis-à-vis* la central Atucha II. En segundo lugar, los desafíos del sector nuclear argentino en la era post-Atucha II.

ESTADO DEL ARTE DE LA I+D EN HROs DEL SECTOR NUCLEAR

Procesos de innovación y desarrollo son omnipresentes en las HROs, en particular en las del sector nuclear que buscan diseños inherentemente seguros y económicamente competitivos. En este apartado se da cuenta del *corpus* teórico y empírico de la innovación en las HROs desde la perspectiva de los estudios organizacionales.

El sector nuclear bajo el prisma de los estudios organizacionales

Antes que asociar el sector nuclear a la innovación, los estudios organizacionales se destacan por tratar de comprender las grandes catástrofes ocurridas en centrales nucleares. El accidente de Three Mile Island (TMI) dio lugar al análisis de Ch. Perrow (1984) que permitió caracterizar a las organizaciones riesgosas como sistemas complejos y de alto nivel de acoplamiento. Este accidente también fue objeto de numerosos trabajos abordados desde la perspectiva histórica (Walker, 2004), la societal (Osif *et al*, 2004), la tecnológica (Perrow, 1984 [1999, 2009]) y la organizacional (Hopkins, 2001).

Por su parte, la catástrofe de Chernobil fue objeto de innumerables trabajos que intentan dar una explicación a lo ocurrido el 26 de abril de 1986, sus consecuencias y las lecciones aprendidas (Busby & Yablokov, 2006; Gale & Baranov, 2011; Gorbachev, 2011; Ingram, 2005; Kapitza, 1993; Kriesberg & Boley, 1988; Lerouge, 2008; Mara, 2011; Mould, 2000; Ramberg, 1987; Schmid, 2011).

Más recientemente, el accidente de la central de Fukushima abrió el capítulo de estudios que apuntan a la confluencia de riesgos tecnológicos y riesgos naturales en el sector nuclear (Eisler, 2013; The Nacional Diet of Japan, 2012), junto con el rol de los organismos de regulación de las actividades nucleares (Perrow, 2011) y el futuro de la industria nuclear en la era post-Fukushima (Pellaud, 2012; Butler *et al.*, 2011).

Hasta aquí se observa un predominio del abordaje de las vulnerabilidades del sector nuclear, complementado con el enfoque técnico-ingenieril –propio de los informes de AIEA y otras organismos internacionales y nacionales del sector nuclear– que hace énfasis en las especificidades técnicas de la operación de centrales nucleares.

Con respecto al estudio de las organizaciones del sector nuclear desde la perspectiva de las HROs se destacan los trabajos de Bierle y Spender (1995), Wilpert e Itoigawa (2001), Rollenhagen *et al.* (2013) y Reiman *et al.* (2005) sobre cultura de la seguridad en centrales nucleares, los procesos decisorios ante eventos precursores (Smith & Borgonovo, 2007), los modelos de confiabilidad (Bourrier, 1996, 1999), los límites de la redundancia en tanto que dispositivo generador de confiabilidad (Sagan, 2004), los estudios sobre armamento nuclear y disuasión (Sagan, 1993; Delpeche, 2012), la necesidad de gestionar los desechos nucleares (LaPorte, 1978) y la perspectiva del factor humano (Misumi *et al.*, 1999). También se desarrolló otra línea de estudio, concentrada en las demandas societales de seguridad *vis-à-vis* las centrales nucleares (Itoigawa *et al.*, 2005).

En Argentina predominan los abordajes técnico-ingenieriles, históricos y/o biográficos. Los artículos sobre el desarrollo de elementos combustibles (Brasnarof *et al.*, 2006), la energía nuclear de fusión (Schoijet, 2005), los trabajos publicados por la CNEA sobre energía nuclear (Jinchuk, 2003), el reactor nuclear argentino multipropósito RA-10, la extensión de la vida útil de Embalse (De Dicco, 2011), el análisis probabilístico de seguridad (Torres-Valle, 2012) y las publicaciones de la ARN (Autoridad de Regulación Nuclear)¹ forman parte del primero de los enfoques.²

Una segunda línea de abordaje del sector nuclear argentino es la historiográfica. Los trabajos de D. Hurtado de Mendoza aportan evidencia acerca del desarrollo de una tecnología capital-intensiva en un contexto de país periférico con cierta capacidad industrial (Hurtado, 2014: 15). Por su parte, Alegría *et al.* (1972) realizan un *racconto* de la historia de la CNEA (Comisión Nacional de Energía Nuclear), sinónimo de sector nuclear en Argentina, dando cuenta de los antecedentes jurídicos que institucionalizaron y estructuraron el sector nuclear en el país. A lo largo de la historia de la CNEA, los autores destacan el rol de sus directores y los hitos alcanzados.

Asimismo, el análisis del desarrollo de radioisótopos y los desarrollos de reactores de investigación y de potencia fueron el objeto de estudio de Coll y Radicella (2000). Por su parte, el trabajo de Guillermo Lamuedra (2006) puso en evidencia las presiones contextuales que intentan restringir el desarrollo nuclear en países en desarrollo.

¹ ARN (2000) *Manual de radioprotección en las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes*. ARN (2012) *Informe de evaluación de resistencia realizada a las centrales nucleares argentinas*, Foro Iberoamericano de Organismos reguladores radiológicos y nucleares.

² Existen numerosos artículos publicados en revistas como *Nuclear Engineering and Design*, *Annals in Nuclear Energy* y *Reliability Engineering and System Safety* que abordan temáticas científico-tecnológicas de la energía nuclear y de los reactores nucleares argentinos.

De particular interés y vigencia resulta el artículo de Jean-Marie Martin (1969) que, a pesar de su antigüedad, plantea la extroversión general de la economía argentina, la atomización e insuficiente basamento técnico, económico y financiero de las empresas locales y las fluctuaciones en la demanda de las empresas públicas como los obstáculos al desarrollo del sector nuclear. De ahí la necesaria acción de los poderes públicos para superar el cortoplacismo empresarial y para estimular los procesos de I+D en el sector nuclear y las industrias conexas.

Otros temas nucleares abordados desde la perspectiva histórica son: los orígenes de la energía nuclear en Argentina a través del proyecto Huemul y el intento fallido de Ronald Richter de lograr la fusión nuclear (Mariscotti, 1984); la comunidad científica nuclear y la “utopía” del desarrollo científico-tecnológico autónomo (Marzorati, 2012); el Plan Nuclear de 1979 y la contradicción entre la política económica de la dictadura militar argentina y el desarrollo del sector nuclear (Rodríguez, 2014).

A través del estudio de Domingo Quilici (2008) sobre el desarrollo de proveedores para la industria nuclear se pone de manifiesto la construcción del entramado productivo a partir de la “apertura del paquete tecnológico” y la transferencia de tecnología de las centrales nucleares de potencia adquiridas por Argentina. De ahí la influencia del Plan Nuclear Argentino como pilar de un patrón de desarrollo tecnológico endógeno.

Entre las organizaciones constitutivas del sector nuclear argentino se destaca INVAP. Esta Sociedad del Estado ha sido objeto de estudios que dan cuenta de sus trayectorias socio-técnicas (Thomas *et al*, 2008) y sus procesos de generación y desarrollo de tecnologías de investigación (Seijo y Cantero, 2013). También ha dado lugar a un debate en torno a la venta de un reactor nuclear a Australia.³

Finalmente, el trabajo de Javier Fernández (2010) adquiere particular relevancia para el enfoque organizacional ya que toma como unidad de análisis el proceso decisorio que condujo a la construcción y puesta en funcionamiento de la central nuclear Atucha I. En ese sentido, las decisiones que desembocaron en la construcción y puesta en marcha de Atucha II se inscriben en un sendero evolutivo o trayectoria socio-técnica que profundiza el desarrollo de competencias organizacionales e implica poner en marcha procesos de I+D endógenos.

Teoría de la innovación en el sector nuclear

Escasos son los estudios acerca de los procesos de I+D en las organizaciones del sector nuclear. Entre ellos se destaca el análisis comparativo de los patrones de innovación estadounidense y ruso relativos al diseño de submarinos nucleares (Bierly *et al.*, 2008). Por su parte, Lester y McCabe (1993) estudian el vínculo entre experiencia, *learning by doing* y desempeño de las centrales nucleares francesas y norteamericanas, llegando a la conclusión de que la estructura industrial francesa, caracterizada por la estandarización del diseño de las plantas y el predominio de los multisitios nucleares, se impone frente al modelo norteamericano.

Alfred Marcus (1988) introdujo la noción de innovación inducida externamente. Aquellas centrales nucleares que presentan un bajo desempeño adoptan un enfoque ceñido a la regla emanada desde la autoridad de regulación nuclear mientras que las centrales nucleares de alto

³ c.f. Revista Redes N° 19(10) : 119-148.

desempeño mantienen un enfoque autónomo durante la etapa de implementación de las innovaciones inducidas. El resultado tiende a profundizar el discreto desempeño de aquellas centrales que se ciñen a las reglas, desbaratando la mejora tecnológica y la innovación. En contraposición, aquellas centrales nucleares con perspectivas autónomas mejoran su desempeño.

Las hipótesis planteadas por Marcus (1988) tienen sustento empírico en las innovaciones introducidas por la autoridad de regulación nuclear estadounidense (v.g. NRC) luego del accidente de Three Mile Island (TMI). En particular, la introducción de grupos independientes de ingenieros de seguridad en las centrales nucleares que constituyó una innovación estructural ya que ingenieros de seguridad apartados de la cadena de mando interactuaban con operadores y trataban de influir en sus comportamientos.

Más allá de los escasos trabajos sobre innovación en el sector nuclear, se trata de estudios que analizan los resultados antes que los procesos de I+D. Se prioriza el producto de la I+D antes que las trayectorias tecnológicas.

Práctica de la innovación en el sector nuclear

Organizaciones que funcionan en la práctica pero no en la teoría es una de las definiciones más utilizadas para caracterizar a las organizaciones de alta confiabilidad (HROs) (La Porte y Consolini, 1991). Al extrapolar el contrapunto entre teoría y práctica en los procesos de I+D de las organizaciones del sector nuclear, se puede sostener que, a pesar de la escasez de estudios teóricos sobre la innovación, en la práctica el sector nuclear está plagado de hitos innovadores. En otras palabras, se trata de un sector innovador que no ha sido suficientemente estudiado por los teóricos.

En la actualidad, cuatro son las áreas de innovación en el sector nuclear: separación isotópica para enriquecimiento de uranio, diseño de reactores, diseño de combustibles robustos y reciclado de combustibles desgastados (Hore-Lacy, 2012). Por su parte, el trabajo “Innovation in nuclear energy technology” de la Nuclear Energy Agency (OCDE) amplía el espectro de los terrenos de innovación en el sector nuclear a la preservación de fuentes y minimización de desechos, eliminación práctica de eventos catastróficos al exterior de las centrales nucleares, mantenimiento de la competitividad económica y reducción de la restricción financiera, penetración de nuevos sectores energéticos y la expulsión de malos usos de materiales nucleares. También se estimula la integración de conocimientos interdisciplinarios (Shinn, 2005; Shinn y Joerges, 2002) en los casos particulares de materiales, procesos, automatización y simulación y gestión del riesgo (OCDE, 2007).

De esta manera se corrobora la paradoja de que se trata de una industria madura, riesgosa, al mismo tiempo que presenta un amplio espectro para la innovación y los desarrollos nucleares.

Algo similar sucede en el sector nuclear argentino. Desde la creación de la CNEA en el año 1950, la trayectoria socio-técnica (Thomas *et al*, 2008) del sector nuclear argentino ofrece un conjunto de adaptaciones y desarrollos tecnológicos entre los que se destacan la construcción de los reactores experimentales y de producción de radioisótopos, el dominio tecnológico del conjunto de las etapas del ciclo del combustible, la fabricación de elementos combustibles, la utilización de uranio levemente enriquecido y la construcción y puesta en marcha de Atucha II.

En este contexto internacional y según las características de la innovación en el sector nuclear, es dable estudiar cómo se manifiestan las fuerzas innovadoras en el caso argentino, haciendo hincapié en el hito más importante en los últimos años: la central nucleoelectrica Atucha II.

DESCRIPCION DEL CASO DE ESTUDIO

La NA-SA argentina: Nucleoelectrica Argentina S.A.

Nucleoelectrica Argentina S.A. es una empresa creada en 1994 mediante el decreto 1540, en el marco de las políticas de privatización y concesión de servicios públicos adoptados por el gobierno de la época. De ahí surge la división de funciones en tres organismos: CNEA encargada del desarrollo científico-tecnológico, el Ente Nacional Regulador Nuclear (actualmente, ARN) a cargo de la fiscalización y regulación del sector y Nucleoelectrica Argentina S.A. (i.e. NA-SA) cuyo objetivo central es la operación de las centrales nucleares de potencia.

NA-SA es una sociedad anónima cuyo paquete accionario está en poder de la Secretaría de Energía (79%), la CNEA (20%) y 1% correspondiente al Ente binacional de Emprendimientos Energéticos. Originalmente concebida como operadora de las centrales nucleares de potencia, en el año 2005, a través del decreto 981/2005 se conforma la Unidad de Gestión Central Nuclear Atucha II “cuyo objeto será llevar a cabo los actos que se requieren para la puesta en operación de la central nuclear Atucha II”.

En la actualidad, NA-SA opera las tres centrales nucleares de potencia argentinas (i.e. Embalse, Atucha I y II), generando y comercializando la totalidad de la energía nucleoelectrica argentina. Además, la reactivación del Plan Nuclear Argentino a partir de 2006 le asignó un rol esencial a NA-SA: la extensión de la vida útil de la central Embalse y la construcción de la cuarta central nuclear.

En tanto que operador de centrales nucleoelectricas, NA-SA gestiona sistemas complejos y de alto nivel de acoplamiento, razón por la cual se trata de una HRO. Complejos porque las centrales nucleares poseen sistemas y componentes que interactúan de acuerdo a secuencias, algunas de las cuales pueden ser inesperadas. Altamente integrados porque los procesos de funcionamiento del sistema (i.e. la central nuclear) presentan una dependencia mutua; lo que ocurre en un componente, sistema o subsistema afecta directamente al otro (Perrow, 1984).

Con el proyecto de construcción y puesta en marcha de la tercera central nucleoelectrica, NA-SA no sólo adquiere su rol de operador sino que asume la tarea de construcción de la central, situación que refuerza su naturaleza de sistema riesgoso y la necesaria confiabilidad que debe alcanzar.

Los avatares históricos del proyecto Atucha II: 35 años desde la concepción hasta la conexión a la red eléctrica nacional.

Atucha II es una central nucleoelectrica de una potencia de 745 MWe, posee un reactor de la línea PHWR, con recipiente de presión y agua pesada como moderador y refrigerante. El combustible utilizado es uranio natural, no obstante lo cual podrá operar con uranio levemente enriquecido. Su ficha técnica indica que la parte convencional está dotada de dos generadores

de vapor verticales y el turbogenerador está compuesto por una turbina de condensación de tres etapas.

Es la tercera central nucleoelectrica argentina. Está emplazada en la localidad de Lima, a 115 Km de la ciudad de Buenos Aires, sobre la margen derecha del río Paraná, en el mismo predio donde se encuentra la central nuclear Atucha I.

En 1980 la CNEA firma un contrato con KWU –empresa subsidiaria de Siemens– para la provisión de servicios y suministro tendientes a la construcción de la tercera central nuclear. Al año siguiente se constituye ENACE, consorcio integrado por CNEA (75%) y Siemens (25%) para la construcción de la central nuclear. En 1982 se coloca la piedra fundamental, sin embargo es el comienzo de un período de demoras en la ejecución del Plan Nuclear y de sucesivas reprogramaciones de la fecha prevista para que Atucha II se pusiera en marcha. Primero fue 1987, luego 1989, 1991, 1993 y finalmente en 1994 el proyecto permanece en estado de virtual abandono. Recién en 2006, con la reactivación del Plan Nuclear Argentino renace el proyecto de construcción y puesta en marcha de la tercera central nuclear argentina.

Durante los doce años transcurridos desde que se paralizó el proyecto tuvieron lugar cambios societarios (i.e. KWU dejó de existir, ENACE fue disuelta, se creó NA-SA), tecnológicos (e.g. nuevos sistemas de instrumentación y control, desarrollo de nueva generación de centrales nucleares de potencia) y políticos (i.e. distintos gobiernos con diversas políticas *vis-à-vis* el sector nuclear). En 2006 NA-SA asume el rol de constructor de la tercera central nuclear y logra la primera criticidad del reactor el 3 de junio de 2014. Luego se procedió al aumento gradual de la potencia al mismo tiempo que se realizaban pruebas nucleares. En febrero de 2015 se alcanzó por primera vez el 100% de la potencia instalada y posteriormente su conexión a la red eléctrica nacional.

METODOLOGIA

Abordar el estudio de una organización concebida desde la teoría como altamente riesgosa pero confiable en la práctica plantea múltiples interrogantes (LaPorte y Consolini, 1991). ¿Cuáles son las características que hacen de Atucha II una organización de alta confiabilidad (Cantero y Seijo, 2012; Perrow, 1984; Rochlin, 1993; Roberts, 1990)? ¿Qué tipo de innovaciones y desarrollos se pueden dar en una industria madura como la nuclear civil, en Argentina? ¿Cómo se afrontaron los desafíos tecnológicos a partir de la reactivación de un proyecto abandonado durante más de una década? Este es el conjunto de preguntas de investigación que se plantea en el presente trabajo.

El enfoque organizacional y el interés por superar la clásica oposición entre investigación hipotético-deductiva e inductiva impone un proceso de construcción teórica a través de un caso de estudio (Eisenhardt, 1989, 2007; Yin, 2003). El trabajo propuesto posee las características de un estudio de caso intrínseco, caso único cuyas conclusiones no aspiran a alcanzar generalizaciones aplicables al universo organizacional (Creswell, 2007). De ahí lo determinante del acceso al campo para producir información primaria y mantener un contacto directo con el objeto de análisis.

La entrevista semi-estructurada fue el instrumento de intervención predominantemente utilizado en las tres visitas a planta realizadas. Fueron entrevistados *in situ* diversos interlocutores clave (e.g. responsables de planta, de seguridad industrial y de sala de control),

dando lugar a más de veinte horas de entrevistas grabadas digitalmente, posteriormente desgrabadas y analizadas con el enfoque metodológico de la teoría fundada (Glaser & Strauss, 1967).

Los cuestionarios agruparon preguntas relativas a cinco temáticas exploratorias: historia del proyecto Atucha II; características de NA-SA en tanto que HRO; procesos de I+D durante el proceso de construcción de Atucha II; relaciones interorganizacionales en el sector nuclear argentino; obstáculos y desafíos futuros. A partir de la información recolectada se construyeron once categorías analíticas entre las que se destacan: desarrollo tecnológico, actualizaciones tecnológicas, características de alta confiabilidad, procesos de I+D, aprendizaje organizacional, relaciones interorganizacionales y desafíos del sector nuclear.

La información primaria fue complementada con una minuciosa recopilación y análisis bibliográfico sobre organizaciones de alta confiabilidad, sector nuclear argentino e innovación en organizaciones riesgosas. Se recurrió a fuentes de información secundaria como *papers* en revistas académicas, informes de organismos nacionales e internacionales del sector nuclear, el Plan Nuclear Argentino, el Plan Estratégico de CNEA (2010-2019), publicaciones institucionales (especialmente de NA-SA) y artículos en medios periodísticos y de divulgación.

I+D EN CONSTRUCCIÓN DE REACTORES NUCLEARES: EL CASO DE LA TERCERA CENTRAL NUCLEAR DE POTENCIA ARGENTINA

Más allá de los terrenos disponibles para la innovación en la industria nuclear, en este trabajo nos centraremos en los procesos de I+D que se generaron a partir del proyecto de construcción y puesta en marcha de la central nuclear Atucha II. En otras palabras, focalizaremos el análisis en una de las áreas de innovación del sector nuclear –el diseño y construcción de centrales nucleoelectricas– a partir de la cual se abren posibilidades de desarrollos tecnológicos innovadores en otras áreas.

Productos y procesos de I+D en la central nuclear Atucha II

Atucha II se inscribe en una trayectoria tecnológica o socio-técnica (Thomas *et al.*, 2008) de adaptaciones y desarrollos en el área nuclear. Significa continuidad y profundización en la política de apertura del paquete tecnológico de una central nuclear de potencia y constituye una palanca al desarrollo industrial argentino.⁴

Del trabajo de campo realizado surge una serie de desarrollos tecnológicos que permiten comprender las fuentes y el patrón de I+D relativo a la construcción y puesta en marcha de la central nuclear Atucha II. Se trata de desarrollos tecnológicos que exceden la mera adaptación de tecnología madura a las condiciones y especificidades locales. En un hipotético *continuum* de procesos de I+D cuyos polos fueran la imitación y la innovación radical, Atucha II generó procesos de adaptación y desarrollos tecnológicos que superan el estadio de la mera copia e imitación e incluso se ubican, en ciertos casos, en la categoría de innovaciones incrementales.

⁴ Si la participación de la industria nacional en la construcción de Atucha I alcanzó el 36,7% y en Embalse al 51%, en Atucha II se ubica en torno al 62% y desde la etapa de terminación y puesta en marcha (año 2006 hasta el 2015) la participación de la industrial nacional alcanzó el 88% (CNEA, 2010; De Dicco, 2015).

Treinta y cuatro años transcurrieron desde el inicio del proyecto de la tercera central nuclear de potencia hasta la puesta a crítico del reactor en junio de 2014. La particularidad del proyecto Atucha II radica en su estado de latencia durante un lapso de tiempo prolongado y el abandono del proyecto por parte del diseñador y constructor original. De ahí que la primera fuente de I+D esté dada por la asunción del rol de constructor de NA-SA, original y exclusivamente concebida como operadora de las centrales nucleares y devenida empresa constructora de centrales de potencia. En ese sentido, una fuerza exógena (i.e. desaparición del constructor KWU) se sumó a las motivaciones endógenas para lograr un alto nivel de participación de la industria argentina en la construcción de la tercera central nuclear de potencia en Argentina.

Los cambios normativos a nivel internacional posteriores a los accidentes nucleares de TMI, Chernobil y Fukushima constituyeron otra fuente exógena de estímulo a la innovación en el diseño, construcción y gestión de centrales nucleoelectricas.

A lo largo del proceso de construcción y puesta en marcha de la central nuclear Atucha II se fue configurando un patrón de I+D en red cuyos nodos principales fueron NA-SA y CNEA junto con empresas subcontratistas (e.g. INVAP, BHR-Electroingeniería, Electroingeniería S.A., Dycasa, IECSA, Siemens, Techint, AREVA, CONUAR, SCK), que se suman al entramado del sector nuclear argentino (i.e. CONUAR, FAE, DIOXITEK, ENSI, INVAP). El patrón de I+D puede ser catalogado como *exógenamente dependiente* (OCDE, 2007) ya que la infraestructura tecnológica necesaria no se ha desarrollado completamente y el diseño original de las centrales no ha sido de origen nacional.

No obstante ello, los resultados del entramado interorganizacional nuclear argentino, en términos de I+D, implicaron el desarrollo de un sistema de carga de elementos combustibles, desarrollos para los sistemas de instrumentación y control, construcción de un simulador, diseño y construcción de los elementos combustibles; desarrollo de un sistema de inyección de boro; desarrollo de una planta de cementado para almacenar residuos radioactivos; modificación de los canales de refrigeración y desarrollo de una soldadora y cortadora de labios del reactor.

Desde el inicio de la energía atómica en Argentina se concibió como una decisión estratégica dominar los procesos de diseño, desarrollo y construcción de los elementos combustibles. En 1957 comienza la fabricación de elementos combustibles de los reactores nucleares de investigación y quince años más tarde se logra la manufactura del primer elemento combustible para centrales de potencia (Sabato, 1972). Este patrón decisorio se mantuvo para el diseño y fabricación de los elementos combustibles de Atucha II y se amplió el espectro de sistemas desarrollados localmente. De ahí que se haya desarrollado un sistema de carga de elementos combustibles, al mismo tiempo que se realizaron modificaciones en los canales de refrigeración y en el sistema de deslizamiento de los elementos combustibles.

Tanto CNEA como CONUAR contribuyeron al desarrollo de los elementos combustibles. En el primer caso, desarrollando la ingeniería de diseño y en el segundo caso, fabricando los elementos combustibles.

En los reactores de uranio natural –como es el caso de Atucha II– es necesario cambiar los elementos combustibles quemados con cierta frecuencia, de ahí la importancia del desarrollo de un sistema que permita, a la vez, remover los elementos combustibles consumidos y cargar nuevos elementos combustibles en los canales refrigerantes, tarea catalogada como estratégica

en el tipo de reactor de Atucha II. Este proceso debe realizarse con el reactor en funcionamiento, exigencia que pone en evidencia la importancia de desarrollar un sistema capaz de cumplir con ambos objetivos. En ese sentido, el proyecto de construcción de la tercera central nuclear argentina dio lugar al desarrollo de un sistema de carga de los 451 elementos combustibles del reactor de Atucha II. Dicho sistema se compone de un subsistema de posicionamiento de la máquina de carga y otro para el transporte de combustible.

Dada la especificidad del reactor de Atucha II, hubo que modificar los canales de refrigeración, desarrollo que estuvo a cargo de NA-SA junto con CONUAR. También se sumaron modificaciones en el sistema de deslizamiento de los elementos combustibles.

Si bien en la actualidad Atucha II está funcionando con uranio natural, el Programa de Ciclo de Combustible de CNEA, en colaboración con CONUAR y NA-SA apunta a utilizar uranio enriquecido con el objetivo de mejorar el desempeño del reactor así como reducir la cantidad de elementos combustibles. En ese sentido Atucha II sirvió para aplicar el desarrollo del elemento combustible CARA a una central nuclear de agua pesada.⁵

Los desarrollos relativos al elemento combustible exigieron el diseño de sistemas de acople, sistemas de separadores y ensamble, además de la ingeniería del elemento combustible, diseño de las barras combustibles y el desarrollo de un nuevo método de soldadura. Estos desarrollos están a cargo de CNEA en colaboración con CONUAR y NA-SA.

Otro de los desarrollos surgidos mediante la colaboración entre CNEA, AREVA y NA-SA son el diseño, desarrollo y provisión de los sistemas de instrumentación y control colocados en el núcleo del reactor para las pruebas de vibración de los canales y elementos combustibles. Desarrollo tecnológico sin precedentes en el país.

Anteriormente sostuvimos que Atucha II es un sistema complejo y altamente integrado ergo se trata de una HRO. Organización riesgosa que introduce sistemas de seguridad, algunos redundantes, para alcanzar altos niveles de confiabilidad. El desarrollo de un sistema de inyección de boro es uno de los dos sistemas de parada independientes con que cuenta la central Atucha II. El dispositivo desarrollado inyecta en el reactor agua a presión con boro disuelto, sustancia altamente absorbente de neutrones que permite detener una reacción nuclear de inmediato. En la misma línea, CNEA diseñó y desarrolló un sistema de instrumentación y control alternativo del sistema de parada por inyección de boro, que permite reducir sustancialmente el tiempo de respuesta del sistema original.

Los cables eléctricos son uno de los elementos más importantes en las centrales nucleares de potencia. De ahí que se hayan desarrollado y fabricado los dispositivos para controlar el estado de envejecimiento de cables eléctricos para Atucha II. En este caso se trató de un desarrollo conjunto entre CNEA y NA-SA.

Una estrategia utilizada por las HROs para aprender a partir de la acción es apelar a las técnicas de simulación. En ese sentido, resulta de particular interés el desarrollo de un simulador de alcance total, cuya plataforma tecnológica fue desarrollada por la empresa española Tecnatom con colaboración del personal de NA-SA. Incluye tecnología de

⁵ Cabe consignar que Argentina alcanza el dominio de la tecnología de enriquecimiento de uranio por el método de difusión gaseosa a partir de un desarrollo de CNEA en el año 1983. Trece años más tarde Atucha I utilizará uranio enriquecido y desde 2001 será la única central de agua pesada que opera totalmente con uranio levemente enriquecido.

simulación avanzada, software de simulación termohidráulica y lógica y hardware de adquisición y procesado de señales.

Además de los riesgos inherentes a la operación de una central nucleoelectrica, el sistema genera residuos radioactivos que deben ser tratados y almacenados en condiciones seguras. INVAP y CNEA desarrollaron una planta de cementado de residuos radioactivos que permitirá su almacenamiento y disposición final.

El proceso de construcción de la central nuclear también fue fuente de procesos de I+D en Atucha II. Tanto el desarrollo de una máquina para cortar y soldar los labios del reactor como la elaboración de una guía para la construcción de reactores nucleares cuyos procesos fueron interrumpidos durante prolongados lapsos de tiempo⁶, constituyen desarrollos de productos y procesos, determinantes para la puesta en marcha de las centrales de potencia.

Patrones de innovación y desarrollo en Atucha II

Una primera lectura de los ejemplos mencionados nos permite constatar que mayoritariamente se trata de adaptaciones, desarrollos e innovaciones incrementales que superan el patrón de innovación por imitación. Se trata de un patrón de I+D por explotación antes que por exploración (March, 1991). En ese sentido, la construcción de Atucha II constituye un avance en la trayectoria tecnológica nuclear argentina.

Por otra parte, el hecho de que el operador de centrales nucleares de potencia asuma el rol de constructor por primera vez en su historia habilita nuevos procesos de I+D antes vedados a las empresas nacionales del sector nuclear ya que dependían de los diseños originales de empresas extranjeras.

Una tercera característica del patrón de I+D originado en la construcción de Atucha II está dada por la colaboración interorganizacional en los desarrollos e innovaciones. La configuración del entramado industrial asociado a organismos públicos y academia vinculada reedita la idea del triángulo de Sabato y da lugar a un sistema de triple hélice estatista (Etzkowitz, 2008), donde el Estado asume el rol protagónico en los procesos de I+D.

El caso de la central nuclear Atucha II da cuenta de la profundización de un sendero evolutivo o trayectoria tecnológica de desarrollo endógeno del sector nuclear, tanto por la participación de la industria nacional en la construcción y puesta en marcha de la central nucleoelectrica como por la naturaleza de las innovaciones y desarrollos a que dio lugar. Desde el punto de vista de la naturaleza de los procesos de innovación y aprendizaje se refuerza el sendero del aprendizaje a través de la acción y el incrementalismo, a lo que se suma cierta dosis de innovación incremental teniendo en cuenta las particularidades del proyecto y el hecho de constituir la primera experiencia en Argentina donde el operador de las centrales nucleares asumió también el rol de constructor.

En definitiva, una de las resultantes de la construcción de Atucha II es el desarrollo del entramado del sector nuclear argentino junto con la generación de capacidades

⁶ Según el responsable de planta de Atucha II, el proceso de conservación de las piezas durante el período de abandono del proyecto se tomó como caso testigo para una guía de la Agencia Internacional de Energía Atómica que ayuda a los clientes de proyectos de construcción de centrales nucleares de potencia que fueron interrumpidos.

(inter)organizacionales y la posibilidad de apalancar el desarrollo del sector nuclear con la industrialización de sectores conexos.

Desarrollo de capacidades organizacionales

Estudiar las organizaciones a partir de sus recursos, capacidades o competencias implica adoptar una postura epistemológica que, en las ciencias de la gestión, se materializa en la perspectiva basada en los recursos (i.e. *Resource View Perspective*, RVP según sus siglas en inglés). La idea subyacente es que las organizaciones poseen y desarrollan dinámicas y competencias internas que se imponen a los determinismos contextuales (v.g. mercado).

Los procesos de I+D requieren como condición *sine qua non* de capacidades organizacionales para poder desarrollarse. De ahí la pertinencia y necesidad de evidenciar las trayectorias tecnológicas del constructor de Atucha II haciendo foco en sus competencias organizacionales.

La transformación de operador a constructor de centrales nucleares de potencia significó para NA-SA el desarrollo de competencias organizacionales dinámicas (Teece *et al*, 1997) que incluyen desarrollos tecnológicos, nuevas formas organizacionales⁷ y modalidades de gestión vinculadas a los desarrollos tecnológicos. En efecto, la construcción de Atucha II exigió desarrollos tecnológicos locales que no hubieran existido si NA-SA conservaba su rol de operador de centrales nucleoelectricas.

Desagregando el conjunto de competencias organizacionales se pueden identificar capacidades tecnológicas inherentes al diseño y construcción de la central –en particular del reactor nuclear– entre las que podemos señalar: capacidades ingenieriles, de desarrollo de componentes nucleares y convencionales; capacidad de gestión de una red interorganizacional y capacidades para cumplir con normas nacionales e internacionales derivadas de los organismos de regulación. Este trípode de competencias organizacionales es el basamento de los procesos de I+D en Atucha II y la plataforma a partir de la cual NA-SA y el sector nuclear en su conjunto puedan ampliar su participación en las futuras centrales nucleares de potencia.

Las capacidades técnicas y organizacionales no provienen exclusivamente de NA-SA sino de una red de organizaciones: CONUAR, CNEA, INVAP y una miríada de empresas subcontratistas que pusieron en marcha Atucha II y un *know how* que permitió conciliar conocimientos y realizar la transferencia adecuada. Más allá de las capacidades técnicas, la construcción de Atucha II significó el desarrollo de una competencia de gestión de redes interorganizacionales para la consecución de un proyecto tecnológico complejo por parte de NA-SA. A su vez, la configuración de una red interorganizacional contribuye al desarrollo de una competencia para integrar paquetes tecnológicos.

Así como los procesos de I+D se sustentan en capacidades organizacionales, *know-how* y *savoir-faire* del factor humano resultan imprescindible para viabilizar proyectos tecnológicos complejos como la construcción de una central nuclear de potencia.

Los avatares de la política nuclear en Argentina condujeron a la pérdida de una masa crítica de recursos humanos especializados. Algunos emigraron para continuar sus carreras en el

⁷ Se crea la Unidad de Gestión Central Nuclear Atucha II, estructuralmente dentro de NA-SA, se conformó con personal propio, de CNEA y recursos humanos provenientes de ENACE.

sector nuclear, otros se reconvirtieron en sectores económicos no relacionados al nuclear. De esta manera, en 2003, el sector nuclear argentino sólo disponía de 3.000 puestos de trabajo. Recién con la reactivación del Plan Nuclear Argentino se invierte la curva de nivel de empleo en el sector para llegar a la actualidad con un total 8.220 puestos de trabajo, de los cuales 1.780 son científicos y expertos, 1.100 son profesionales adultos, 390 profesionales jóvenes y 620 son técnicos (National Geographic, 2014).

Recuperación cuantitativa y cualitativa ya que el proceso de reclutamiento y selección de recursos humanos logró repatriar ingenieros y tecnólogos nucleares al mismo tiempo que incorporó personas con escasa o nula experiencia en el sector nuclear. En ese sentido, uno de los temas recurrentes de los interlocutores clave entrevistados fue la creación de la escuela de soldadura en la que se capacitaron más de mil personas en un *métier a priori* en vías de extinción.

En definitiva, las innovaciones y desarrollos tecnológicos generados por la construcción y puesta en marcha de Atucha II no sólo se traducen en términos de productos y procesos, también se generaron capacidades organizacionales e individuales que son la materia prima necesaria tanto para mantener los logros en materia nuclear como para que actúen como palancas de innovaciones y desarrollos futuros en otros sectores industriales.

ELEMENTOS PARA LA DISCUSION

Aún en la actualidad, el sector nuclear se percibe como una industria riesgosa, tanto a nivel local como internacionalmente. La catástrofe de Fukushima significó una reconsideración de las vulnerabilidades inherentes a las centrales nucleoelectricas y un replanteo de los desafíos futuros de las HROs del sector nuclear. De ahí que se propongan dos temas de discusión. En primer lugar un análisis comparativo entre las centrales nucleoelectricas involucradas en las grandes catástrofes nucleares y Atucha II. En segundo lugar, los desafíos futuros del sector nuclear argentino, una vez puesta en marcha su tercera central de potencia.

Aprendizaje a partir de las experiencias catastróficas de TMI, Chernobil y Fukushima

El riesgo cero no existe, especialmente cuando se trata de HROs del sector nuclear cuyos sistemas tecnológicos son complejos y altamente integrados. No obstante ello, las centrales nucleares de Atucha lejos están de Chernobil y Fukushima, tanto desde el punto de vista geográfico como tecnológico y de gestión.

Por mucho tiempo la opacidad informativa y el escaso desarrollo de vínculos con la comunidad contribuyeron al desarrollo de un imaginario popular temeroso de las actividades nucleares. De ahí que ante cada accidente catastrófico se manifiesten los temores de contar con sistemas altamente riesgosos en las cercanías e incluso se replantee la viabilidad futura de la energía nucleoelectrica.

Three Mile Island (1979), Chernobil (1986) y Fukushima (2011) son los accidentes catastrófico que han puesto de manifiesto las vulnerabilidades de las centrales nucleoelectricas. El primero, catalogado como un accidente nivel 5 en la escala INES⁸, quizás sea el menos conocido por los neófitos en la materia, aunque el más preocupante ya que se

⁸ International Nuclear Event Scale

produjo una fusión parcial del núcleo del reactor a partir de un fallo en el circuito secundario de la planta que desencadenó una serie de fallas y errores de gestión inesperados y desconocidos por quienes estaban operando la central. Charles Perrow (1984) construyó la teoría de los accidentes normales a partir de TMI y ofreció un conjunto de preconizaciones para la gestión tendientes a evitar otros accidentes similares. Por su parte, la OIEA⁹ incorporó las lecciones aprendidas a sus normas internacionales.

A casi treinta años de Chernobil –accidente que alcanzó el máximo nivel (7) en la escala INES– resulta difícil no caer en la tentación de catalogarlo como la crónica de una catástrofe nuclear anunciada. Ya sea por los problemas de diseño y construcción del reactor RBMK (Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy) ruso, el incumplimiento de los procedimientos esenciales de operación de la central, la incompetencia del operador de la central, el déficit en materia de recursos humanos adecuadamente formados y los problemas de comunicación y gestión de la catástrofe, el accidente de Chernobil se transformó en un *leading case* de gestión no confiable de un sistema riesgoso.

Por su parte, la catástrofe nuclear de Fukushima –segundo accidente nuclear nivel 7 en la historia– pone en evidencia la confluencia de riesgos tecnológicos y naturales. En efecto, a los problemas de ubicación, diseño y gestión de los reactores nucleares de Fukushima se sumaron dos eventos naturales catastróficos y secuenciales, esto es, un movimiento telúrico inusitado seguido de un tsunami de magnitud inédita.

La pregunta que subyace es: ¿Se puede producir un accidente nuclear similar a los reseñados en la central Atucha II (o en las otras centrales nucleares de potencia argentinas)?

Las diferencias en cuanto al tipo de reactor, la ubicación de la central, las características geográficas y sísmicas del emplazamiento de las centrales Atucha I y II permiten dar una contundente respuesta negativa con respecto a la posibilidad de ocurrencia de una catástrofe similar a la de Chernobil o Fukushima. Menos terminante resulta la respuesta con respecto a la ocurrencia de un accidente normal *à la TMI*. En efecto, desde el punto de vista teórico siempre está abierta la posibilidad de un accidente normal. Por eso la incorporación de barreras redundantes de seguridad, modificaciones en el diseño de reactores y el esencial desarrollo de una infraestructura cognitiva organizacional que permita lidiar con lo inesperado (Weick y Sutcliffe, 2007).

En resumen, este breve *racconto* de las mayores catástrofes nucleares a nivel internacional no tiene por objeto negar o subestimar la posibilidad de accidentes nucleares en las centrales nucleares argentinas. Se trata de establecer un equilibrio entre el temor infundado y/o ideológico de actores sociales concernidos y la necesaria confiabilidad de las organizaciones que deben gestionar sistemas altamente riesgosos.

Los desafíos del sector nuclear argentino en la era post-Atucha II

El desafío inmediato, luego de la puesta en marcha de Atucha II, es lograr la confiabilidad operativa y organizacional. Como todo sistema productivo, la etapa de puesta a punto conlleva una curva de aprendizaje que deriva en mejoras progresivas de la eficiencia productiva. En el mediano y largo plazo, se habilitarán procesos de I+D para actualizar tecnológicamente una central nuclear concebida en la década de 1980.

⁹ Organismo Internacional de Energía Atómica

La trayectoria o sendero evolutivo tecnológico del sector nuclear argentino experimentó un salto cualitativo con el proyecto de construcción y puesta en marcha de la tercera central nucleoelectrónica: es la primera vez que se asume el rol de constructor. La profundización del sendero evolutivo tecnológico se proyecta en la cuarta y quinta central de potencia, actualmente en la etapa de concepción. La adopción de la tecnología CANDU para el reactor permitirá aumentar la participación de la industria nacional y alcanzar la autonomía tecnológica.

En cierto sentido, el Proyecto CAREM se inscribe en la misma trayectoria tecnológica ya que con su consecución el sector nuclear argentino ingresaría al selecto club de países diseñadores de centrales nucleares de potencia, logrando la autonomía tecnológica. Ciertamente se trata de la construcción y puesta en marcha de un reactor prototipo diseñado para acceder al mercado de las centrales nucleares de baja y mediana potencia. Concretar este proyecto le permitirá a Argentina reposicionarse como exportador de alta tecnología mejorando su posicionamiento y prestigio en el mercado internacional de reactores de investigación a la vez que ubicará al país al frente del mercado de centrales de baja potencia, adecuadas para las necesidades de los países con economías en desarrollo (De Dicco, 2013)

Extender la vida útil de centrales nucleares de potencia también implicará desafíos para el sector nuclear argentino. En primer lugar, la extensión de la vida útil de la central Embalse y posteriormente la de Atucha I.

El proceso de extensión de vida útil de Embalse promete darle otros 30 años al reactor y aumentar la potencia eléctrica un 6% con respecto a la capacidad actual. Para ello, se reemplazarán los componentes internos del reactor por otros producidos en Argentina. Actualmente Argentina se encuentra desarrollando la tecnología de fabricación de tubos de presión CANDU que reemplazarán a los que permanecen instalados en el núcleo de la central. La importancia estratégica de este desarrollo redunda en la generación de capacidades nacionales para responder a demandas futuras del sector (Antúnez, 2014; De Dicco, 2013)

Por su parte, la central Atucha I agotará su vida útil por diseño a mediados del 2018. En este sentido, Antúnez (2014) sostiene que las decisiones respecto a la optimización de la seguridad y disponibilidad de la central han sido consideradas y programadas en función de una planificación que contempla la extensión de vida útil de la central.

Otros desafíos son reafirmar el desarrollo y provisión nacional de elementos combustibles para los reactores, asegurar las reservas de uranio y consolidar el dominio tecnológico del ciclo de combustible nuclear. Más allá de los desafíos tecnológicos, el sector nuclear argentino deberá asumir el desafío de la difusión de sus actividades *vis-à-vis* los actores externos a las centrales nucleares y demás instalaciones. En este caso se trata de inaugurar un sendero evolutivo de la confiabilidad tendiente a la construcción de dispositivos de concertación con los actores concernidos por la actividad nuclear.

Finalmente, el desafío de mayor exigencia para el sector nuclear argentino se refiere al mantenimiento de las políticas públicas orientadas a su desarrollo independientemente de los avatares políticos. En otras palabras, se requiere de sustentabilidad política e institucionalización a largo plazo en materia de energía nuclear que permita la continuación de los proyectos emprendidos como así también la profundización de las trayectorias tecnológicas emprendidas. En última instancia, se apunta al logro de un desarrollo industrial

autónomo a través de un sector de tecnología intensiva en un país periférico de desarrollo industrial y económico intermedio.

CONCLUSIONES

Treinta y cinco años duró el proceso de concepción, diseño, construcción, puesta en marcha y conexión a la red eléctrica nacional de la tercera central nuclear de potencia. En ese lapso de tiempo se produjeron cambios en las políticas públicas relativas al sector nuclear –nacional e internacional–, catástrofes nucleares que impactaron en la expansión de la energía de origen nuclear (i.e. Chernobil, 1986; Fukushima, 2011) y dinámicas sectoriales que determinaron modificaciones en la presencia de empresas diseñadoras de reactores nucleares.

La paralización del proyecto de construcción de la central nuclear Atucha II en 1994 y el posterior retiro del área nuclear por parte del diseñador original –KWU-Siemens– pusieron entre paréntesis las trayectorias tecnológicas del sector nuclear argentino; *interregno* que finalizó en el año 2006 con el relanzamiento del Plan Nuclear Argentino. A partir de ahí, se experimenta una reactivación del sector nuclear argentino y la obra inconclusa de la tercera central nuclear de potencia se retoma asignándole la tarea a NA-SA, operadora de las centrales nucleares argentinas.

El reemplazo del diseñador original por un “ingeniero-arquitecto” nacional, que resulta ser el operador de las centrales nucleares, habilitó diversos procesos de I+D en el sector nuclear. En efecto, la construcción de la tercera central generó desarrollos tecnológicos en el diseño y construcción de los elementos combustibles y su sistema de carga, desarrollos para los sistemas de instrumentación y control, construcción de un simulador, desarrollo de un sistema de inyección de boro, desarrollo de una planta de cementado para almacenar residuos radioactivos, modificación de los canales de refrigeración y desarrollo de una soldadora y cortadora de labios del reactor.

De esta manera, Atucha II se inscribe en una trayectoria tecnológica o socio-técnica (Thomas *et al.*, 2008) de adaptaciones y desarrollos en el área nuclear. Se trata de desarrollos tecnológicos que exceden la mera adaptación de tecnología madura a las condiciones y especificidades locales y se ubican en la categoría de innovaciones incrementales. Es de destacar que el patrón de I+D originado en la construcción de Atucha II está dado por la colaboración interorganizacional para los desarrollos e innovaciones. Junto con NA-SA, CNEA asume un rol central en los procesos de I+D a los que se suman el resto de las empresas de la industria nuclear (i.e. INVAP, CONUAR, FAE, ENSI) y, en cierto grado, las empresas subcontratistas.

Así, se retoma la trayectoria tecnológica nuclear argentina, incorporando el rol de diseñador de reactores de potencia y con ello la posibilidad de ampliar el terreno de I+D al conjunto del sector nuclear y las industrias conexas. De causalidad recíproca, se da un proceso de desarrollo de capacidades organizacionales que retroalimentan los procesos de I+D: capacidades ingenieriles, de desarrollo de componentes nucleares y convencionales; capacidad de gestión de una red interorganizacional y capacidades para cumplir con normas nacionales e internacionales.

Del trabajo de campo se infiere que el patrón de I+D responde al modelo de triple hélice (Etzkowit, 2008) liderado por el Estado, coherente con la concepción del *triángulo de Sabato*

en el que resultan determinantes las interrelaciones entre los actores estatales, el entramado productivo y la infraestructura científico-tecnológica.

En esta instancia se renuevan tres interrogantes: ¿Se mantendrán las políticas públicas de estímulo al desarrollo de un modelo de triple hélice liderado por el Estado en el sector nuclear? ¿podrá el sector nuclear actuar como palanca para el desarrollo industrial argentino? Los procesos de I+D del área nuclear ¿podrán despertar los extremadamente civilizados *animal spirits* innovadores de los industriales argentinos?

Más allá de las incertidumbres futuras y la vulnerabilidad latente de los sistemas riesgosos, la puesta en marcha de la tercera central nuclear argentina de potencia retoma la trayectoria tecnológica del sector nuclear y plantea un conjunto de desafíos futuros de naturaleza científico-tecnológica, organizacional y de gestión de organizaciones de alta confiabilidad. Proyectos como la extensión de la vida útil de la central nuclear Embalse, la cuarta y quinta centrales nucleares de potencia y el proyecto CAREM constituyen una oportunidad para consolidar la trayectoria tecnológica nuclear de Argentina.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alegría, J.; Coll, J. y Suter, T. (1972) *Una breve reseña histórica de la CNEA*. Mimeo CNEA-P: Buenos Aires.
- Antúnez, J. (2014) Es un año histórico para la industria nuclear argentina. *Revista Energía nuclear hoy*. Año 6. Suplemento Especial AATN, Argentina.
- Bierly, P. y Spender, J-C. (1995) Culture and high reliability organizations: the case of the nuclear submarine. *Journal of management*, 21(4): 639-656.
- Bierly, P; Gallagher, S. y Spender, J. (2008) Innovation and learning in high-reliability organizations: a case study of United states and russian nuclear attack submarines, 1970-2000. *IEEE Transactions in Engineering Management*, 35: 393-408.
- Bourrier, M. (1999) *Le nucléaire à l'épreuve de l'organisation*. Collection Le travail humain. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bourrier, M. (1996) Organizing maintenance work at two american nuclear power plants. *Journal of contingencies and crisis management*, 4(2): 104-112.
- Brasnarof, D; Marino, A; Munoz, C; Bianchi, D. Giorgis, M. y Florido, P. (2006) Proyecto CARA: desarrollo del elemento combustible ULE avanzado para centrales nucleares de agua pesada. *Revista CNEA*, N° 21-22, enero/junio, 5-18.
- Busby, C. y Yablokov, A. (2006) *Chernobyl: 20 years on. Health effects of the Chernobyl accident*. European Committee on Radiation Risk. Documents of the ECRR. Aberystwyth, UK: Green Audit Press.
- Butler, C.; Parkhill, K. y Pidgeon, N. (2011) Nuclear power after Japan: the social dimensions. *Environment: Science and policy for sustainable development*, 53(6): 3-14.
- Cantero, J. y Seijo, G. (2012) Rasgos ontológicos de las Organizaciones de Alta Confiabilidad (HROs): precisiones epistemológicas para la comprensión de un objeto de estudio en debate. *Revista del Centro de Estudios de Sociología del Trabajo*. N° 4: 69-96.
- CNEA (2014) De Atucha II a la Central Nuclear Néstor Kirchner. *Revista Energía Interna*, 1(4): 6-9.
- CNEA (2013) RA-10. Reactor nuclear argentino multipropósito. *Documento de la CNEA*.
- CNEA (2010) Plan estratégico 2010-2019.
- Coll, J. y Radicella, R. (2000) La actividad nuclear argentina. Una breve reseña. *Ciencia e Investigación*, 53(3 y 4): 38-43.
- Creswell, J. (2007) *Qualitative inquiry and research design: choosing among five approaches*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- De Dicco, R. (2015) Atucha II y la industria nacional. *Diario Página 12*, Suplemento Especial, 22 de febrero de 2015.
- De Dicco, R. (2013) *Avances del Plan Nuclear Argentino: el caso del parque de generación nucleoelectrico*. Buenos Aires: Centro Latinoamericano de Investigaciones Científicas y Técnicas (CLICeT).
- De Dicco, R. (2011) *Extensión de vida útil de Embalse y avances de obra en Atucha II y en el Proyecto CAREM-25*. Buenos Aires: Centro Latinoamericano de Investigaciones Científicas y Técnicas (CLICeT).

- Delpeche, Th. (2012) *Deterrence in the 21st century. Lessons from the cold war for a new era of strategic piracy*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Eisenhardt, K. (2007) Theory building from cases: opportunities and challenges. *Academy of Management Journal*, 50(1): 25-32.
- Eisenhardt, K. (1989) Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4): 532-550.
- Eisler, R. (2013) *The Fukushima 2011 disaster*. Boca Raton: CRC Press.
- Etzkowitz, H. (2008) *The Triple Helix. University–Industry–Government. Innovation in Action*. NY: Routledge.
- Fernández, J. (2010) Importación de tecnologías capital-intensivas en contextos periféricos: el caso de Atucha I (1964-1974). *Revista CTS*, 6(16): 1-26.
- Gale, R. y Baranov, A. (2011) If the unlikely becomes likely: medical response to nuclear accidents. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(2): 10-18.
- Glaser, B. & Strauss, A. (1967) *The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research*. New York: Aldine Publishing Company.
- Gorvachev, M. (2011) Chernobyl 25 years later: many lessons learned. *Bulletin of Atomic Scientists*, 67(2): 77-80.
- Harriague, S. y Quilici, D. (2014) *Estado, política y gestión de la tecnología. Obras escogidas (1962-1983) Jorge A. Sabato*. Buenos Aires: UNSAM EDITA, Universidad Nacional de General San Martín.
- Hopkins, A. (2001) Was Three Mile Island a ‘Normal Accident’? *Journal of contingencies and crisis management*, 9(2): 65-72.
- Hore-Lacy, I. (2012) Innovation in nuclear power. *Energy & Environment*, 23(6 y 7): 979-992.
- Hurtado de Mendoza, D. (2014) *El sueño de la Argentina atómica. Política, tecnología y desarrollo nacional (1945-2006)*. Buenos Aires: Edhasa.
- Hurtado de Mendoza, D. (2009) Periferia y fronteras tecnológicas. Energía nuclear y dictadura militar en Argentina (1976-1983). *Revista CTS*, 5(13): 27-64.
- Ingram, W. (2005) *The Chernobyl Nuclear Disaster*. New York: Facts On File, Inc.
- Itoigawa, N.; Wilpert, B. y Fahlbruch, B. (2005) *Emerging demands for the safety of nuclear power operations. Challenge and response*. Boca Raton: CRC Press.
- Jinchuk, D. (2003) *Energía nucleoelectrica*. Comisión Nacional de Energía eléctrica (CNEA).
- Kapitza, S. (1993) Lessons of Chernobyl. The cultural causes of the Meltdown. *Foreign Affairs*, Summer 93, 72(3): 7-11.
- Kriesberg, J. y Boley, K. (1988) Can Chernobyl happen in the United States ? The lemons of the nuclear power industry. *Business & Society Review*, Spring 88, 65: 51-53.
- Lamuedra, G. (2006) *La historia de la Argentina nuclear*. Buenos Aires: Ediciones Camino Propio.
- La Porte, T. y Consolini, P. (1991) Working in practice but not in theory: theoretical challenges of “High-reliability organizations”. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 1(1): 19-47.
- La Porte, T. (1978) Nuclear waste: increasing scale and sociopolitical impacts. *Science*, New Series, 201(4350): 22-28.
- Lerouge, B. (2008) *Tchernobyl. Un “nuage” passé...Les faits et las controverses*. Paris: L’Harmattan.
- Lester, R. y McCabe, M. (1993) The effect of industrial structure on learning by doing in nuclear power plant operation. *RAND Journal of Economics*, 24(3): 418-438.
- Mara, W. (2011) *The Chernobyl disaster: legacy and impact on the future of nuclear energy*. New York: Marshall Cavendish Corporation
- March, J. (1991) Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science*, 2(1): 71-87.
- Marcus, A. (1988) Implementing externally induced innovations: a comparison of rule-bound and autonomous approaches. *Academy of Management Journal*, 31(2): 235-256.
- Mariscotti, M. (1984 [1987]) *El secreto atómico de Huelmul. Crónica del origen de la energía atómica en la Argentina*. Buenos Aires: Sudamericana-Planeta.
- Martin, J-M. (1969) El papel posible de la industria nuclear en la consolidación de la industrialización en la Argentina. *Desarrollo Económico*, 9, julio-septiembre: 235-257.
- Marzorati, Z. (2011) *Plantear utopías: la conformación del campo científico tecnológico nuclear en Argentina (1950-1955)*. Buenos Aires: Fundación Centro de Integración, Comunicación, Cultura y Sociedad – CICCUS.
- Misumi, J.; Wilpert, B. y Miller, R. (1999) (Comp.) *Nuclear safety: a human factors perspective*. London: Taylor & Francis.
- Mould, R. F. (2000) *Chernobyl Record. The definitive history of the Chernobyl catastrophe*. London: IOP Publishing Ltd.
- National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission (2012) *The official report of the Fukushima nuclear accident*.
- National Geographic (2014) *El regreso de la energía nuclear*. Special Issue.

- OCDE - Nuclear Energy Agency (2007) *Innovation in nuclear energy technology*. OCDE.
- Osif, B. ; Baratta A. y Conkling T. (2004) *TMI 25 Years Later. The Three Mile Island Nuclear Power Plant Accident and Its Impact*. Pennsylvania: The Pennsylvania State University Press.
- Pellaud, B. (2012) *Nucléaires: relançons le débat. Il y a de l'avenir malgré Fukushima*. Lausanne: Editions Favre.
- Perrow, Ch. (2011) Fukushima and the inevitability of accidents. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67(6): 44-52.
- Perrow, Ch. (2009) *Accidentes Normales. Convivir con las tecnologías de alto riesgo*. Madrid: Modus Laborandi.
- Perrow, Ch. (1999). *Normal Accidents: living with high-risk technologies*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Perrow, Ch. (1984) *Normal Accidents: living with high-risk technologies*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Quilici, D. (2008) Desarrollo de proveedores para la industria nuclear argentina. Visión desde las centrales nucleares. *H-Industri@*, 2(2): 1-24.
- Ramberg, B. (1987) Learning from Chernobyl. *Foreign Affairs*, 65(2): 304-328.
- Reiman, T.; Oedewald, P. y Rollenhagen, C. (2005) Characteristics of organizational culture at the maintenance units of two Nordic nuclear power plants. *Reliability Engineering and System Safety*, 89: 331-345.
- Roberts, K. (1990) Some characteristics of one type of high reliability organization. *Organization Science*, 1(2): 160-175.
- Rochlin, G. (1993) Defining "high reliability" organisations in practice: a taxonomic prologue. En *New Challenges to Understanding Organisations*, Roberts, K. (ed). New York: Macmillan, 11-32.
- Rodríguez, M. (2014) Avatares de la energía nuclear en Argentina. Análisis y contextualización del Plan Nuclear de 1979. *H-Industri@*, 8(15): 30-55.
- Rollenhagen, C.; Westerlund, J. y Näswall, K. (2013) Professional subcultures in nuclear power plants. *Safety Science*, 59: 78-85.
- Sábato, J. (1972) Quince años de metalurgia en la Comisión Nacional de Energía Atómica. *Ciencia Nueva*, 15: 7-15.
- Sagan, S. (1993) *The limits of safety: organizations, accidents and nuclear weapons*. New Jersey: Princeton University Press.
- Sagan, S. (2004) The problem of redundancy problem: why more nuclear security forces may produce less nuclear security. *Risk Analysis*, 24(4): 935-946.
- Schoijet, M. (2005) La energía nuclear de fusion: aspectos históricos. *Revista Redes*, 11(22): 177-207.
- Seijo, G. & Cantero, J. (2013) ¿Cómo hacer un satélite espacial a partir de un reactor nuclear? Elogio de las tecnologías de investigación en INVAP. *Revista Redes*, 18: 13-44.
- Shinn, T. (2005) New sources of radical innovation: research-technologies, transversality and distributed learning in a post-industrial order", *Social Science Information*, 44(4): 731-764.
- Shinn, T. & Joerges, B. (2002) The transverse science and technology culture: dynamics and roles of research-technology", *Social Science Information*, 41(2): 207-251.
- Schmid, S. (2011) When safe enough is not good enough: organizing safety at Chernobyl. *Bulletin of Atomic Scientists*, 67(2): 19-29.
- Smith, C.L. y Borgonovo, E. (2007) Decision making during nuclear power plant incidents. A new approach to the evaluation of precursor events. *Risk Analysis*, 27(4): 1027-1042.
- Teece, D.J., Pisano, G. y Shuen, A. (1997) Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7): 509-533.
- Thomas, H., Versino, M. & Lalouf, A. (2008) La producción de tecnología nuclear en Argentina. El caso de la empresa Invap, *Desarrollo Económico*, 47(188): 543-575.
- Torres-Valle, A. (2012) Rol del fallo mecánico en la optimización del mantenimiento en una central nuclear. *Ingeniería Mecánica*, 15(2): 105-114.
- Walker, J. (2004) *Three Mile Island. A Nuclear Crisis in Historical Perspective*. The University of California Press. Berkeley and Los Angeles, California.
- Weick, K. y Sutcliffe, K. (2007) *Managing the unexpected: resilient performance in an age of uncertainty*. 2nd Ed. San Francisco: John Wiley & Sons, Inc.
- Wilpert, B. e Itoigawa, N. (2001) *Safety culture in nuclear power operations*. London: Taylor & Francis.
- Yin, R. (2003) *Case study research. Design and methods*. 3rd Ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.