

# **¿SOMOS CAPACES DE ANTICIPAR Y EVALUAR LOS RIESGOS TECNOLÓGICOS?**

*Comunicación efectuada  
por el Académico Titular Dr. Ing. Mario Solari  
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires,  
en la sesión plenaria del 29 de agosto 2011*

La publicación de los trabajos de los académicos y disertantes invitados se realiza bajo el principio de libertad académica y no implica ningún grado de adhesión por parte de otros miembros de la Academia, ni de ésta como entidad colectiva, a las ideas o puntos de vista de los autores.

# ¿SOMOS CAPACES DE ANTICIPAR Y EVALUAR LOS RIESGOS TECNOLÓGICOS?

Dr. Ing. MARIO SOLARI

## Introducción

El objeto de esta comunicación es presentar algunas reflexiones concernientes a la capacidad de la ciencia y la tecnología para anticipar y evaluar los riesgos tecnológicos. Esta capacidad es necesaria para prevenir las catástrofes para la salud y el ambiente.

En la conferencia “La ingeniería en la sociedad del riesgo”<sup>1</sup>, que pronuncié en esta Academia con motivo de mi incorporación, cité al sociólogo Ulrich Beck<sup>2</sup>, autor de *La sociedad del riesgo mundial*, quien dijo que el proyecto de la modernidad ha fallado en controlar los riesgos que ha producido.

Voy a mostrar con algunos ejemplos que, a pesar de los extraordinarios avances de la técnica, aún es limitada la capacidad para controlar los denominados “riesgos fabricados”. Compararemos los riesgos en la “era del vapor” con los riesgos en la compleja “era atómica”. Mientras que los primeros han sido controlados en forma exitosa, los accidentes nucleares severos, como los acontecidos recientemente en la central nuclear de Fukushima, y el ocurrido hace 25 años en Chernóbil, aún tienen final abierto.

Concluyo en esta comunicación que la opción de la energía nuclear, merece ser considerada como una alternativa válida para un mundo necesitado de energía, siempre que se tomen responsablemente las decisiones basadas tanto en el estado del arte de la ciencia y la tecnología, como en consideraciones sociales y morales.

<sup>1</sup> Mario Solari, “La ingeniería en la sociedad del riesgo”, conferencia pronunciada en ocasión de su incorporación como Académico Titular a la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 3 de noviembre de 2010.

<sup>2</sup> Ulrich Beck, *La sociedad del riesgo mundial*, Ediciones Paidós Ibérica, 2008, p. 20.

## 1. Riesgos “fabricados” en la “era del vapor”

La primera etapa de la revolución industrial giró alrededor de las máquinas a vapor, capaces de mover ferrocarriles, barcos y maquinarias. Sin embargo, este progreso que a fines del siglo XIX había logrado reconfigurar el mundo, tuvo un alto costo en vidas humanas. El dominio de la tecnología del vapor requirió disponer de recipientes y cañerías capaces de contenerlo a presiones relativamente elevadas. No siempre se logró ese objetivo.

En las últimas décadas del siglo XIX y comienzo del siglo XX, la cantidad de explosiones de calderas en Estados Unidos se incrementó en forma alarmante, tal como muestra el gráfico de la Figura 1. Ante esta situación insostenible, los ingenieros estadounidenses establecieron estrictas normas de seguridad logrando minimizar drásticamente el problema. La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers, ASME) elaboró por primera vez en 1914 el Código de Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Code).

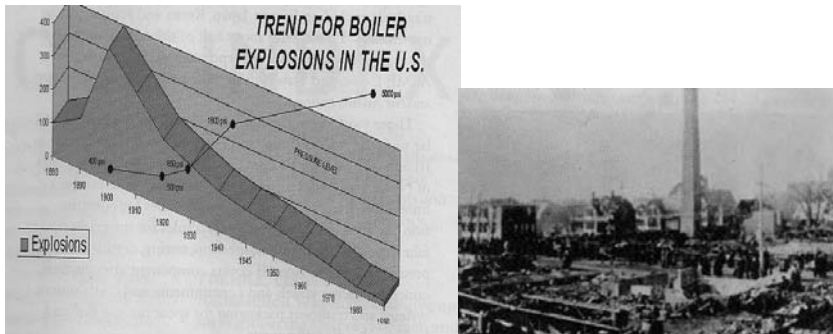


Figura 1

*Número de explosiones de calderas en USA desde 1880 a 1980 y la explosión de una planta industrial en USA*

El Código ASME es la resultante de esos logros y fracasos, basado primariamente en el método de “pruebas y error”, que fue paulatinamente iluminado con los crecientes aportes de la ciencia y tecnología desarrollados durante el siglo XX. Actualmente el Código ASME constituye un estándar internacional empleado para el diseño, construcción, inspección, y ensayos de recipientes a presión, que incluyen desde calderas domiciliarias hasta reactores nucleares.

El éxito en controlar los riesgos “fabricados” durante la era del vapor se debió tanto al conocimiento experimental y teórico desarrollado por los ingenieros, científicos y tecnólogos, como al rol destacado de otros sectores de la sociedad, que hicieron de esta sistematización del conocimiento reglas obligatorias y dispusieron formas de control para su efectivo empleo.

A partir de este ejemplo exitoso podríamos concluir, quizás apresuradamente, que el progreso siempre es capaz de controlar los riesgos “fabricados” que produce. Contradiciendo la hipótesis referida inicialmente respecto a que la modernidad ha fallado en controlar los riesgos que ha originado.

## 2. Riesgos “fabricados” en la “era atómica”

Ahora voy a analizar otra máquina, bastante más compleja que las mencionadas anteriormente. Me referiré a las centrales nucleares. Todos los esfuerzos exitosos por evitar las explosiones de los recipientes a presión, asegurando su integridad mecánica, son aplicables tanto a la industria convencional como a la nuclear.

Los avances en integridad mecánica de centrales nucleares permitieron elaborar en Alemania, a fines de los años 70, el concepto preventivo de exclusión de rotura o “break preclusion”<sup>3,4</sup>. Se trata de excluir la posibilidad de rotura espontánea de una cañería por medio del empleo de exigentes medidas para optimizar el ciclo de vida de los sistemas y componentes relacionados con la seguridad nuclear. El BPC es un requerimiento legal en Alemania<sup>5</sup>.

La exclusión de roturas se basa en la prevención. Primero deben satisfacerse requisitos básicos de seguridad, asegurando el empleo de componentes de alta calidad y una operación controlada. Luego se debe satisfacer la premisa de exclusión de fallas catastróficas o protección contra fallas espontáneas. La protección contra fallas es-

<sup>3</sup> *Guidelines of the German Reactor Safety Commission (RSK-Guidelines) for Pressurised Water Reactors*; 3rd Edition, October 14, 1981; Revised Section 21.1 of 03/1984 and Section 21.2 of 12/1982; associated general specification “Basis Safety of Pressurised Components”; Editor: Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS).

<sup>4</sup> *RKS Guidelines for Pressurised Water Reactors*; 2nd Edition, January 24, 1979; Editor: Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS)

<sup>5</sup> *General Concept for the Integrity of Pressurized Components Eberhard Roos1), Karl-Heinz Herter1), Frank Otremba1) and Klaus-Jürgen Metzner 2) 1) Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart, Germany 2) E.ON, Kernkraft GmbH, Tresckowstraße 5, 30457 Hannover, Germany, Transactions, SMiRT 16, Washington DC, August 2001*

pontáneas debe demostrarse a través del Análisis Fractomecánico preventivo del comportamiento LBB (*Leak Before Break*). El LBB es ampliamente utilizado para describir las condiciones que aseguran que una cañería desarrollará una pérdida detectable antes de que ocurra una rotura catastrófica.

Finalmente, para cumplir la totalidad de los requerimientos del “Break Preclusion Concept”, se debe satisfacer el denominado principio de incredibilidad de falla catastrófica, por medio de un análisis probabilístico de sucesos o procesos capaz de determinar la probabilidad de ocurrencia de los escenarios de riesgo evaluados. Para el análisis probabilístico del diseño generalmente se consideran dos escenarios básicos: i) Accidente base de diseño (*design basis accident*), y ii) Accidente que sobrepasa al de base de diseño (*beyond design basis accident*).

La creciente complejidad de este tipo de instalaciones y razones financieras hace que antes de construir una central nuclear, solo podamos ensayarla virtualmente. La simulación es una tercera vía para conocer la realidad, que no es teoría ni experiencia, pero puede jugar, si conviene, el papel de cualquiera de las dos<sup>6</sup>. La relación entre teoría y experiencia ha sido el motor de la ciencia de la simplicidad. Para minimizar los riesgos de la “era del vapor” esto fue suficiente. Ahora, la complejidad de los sistemas hace imprescindible el empleo de la simulación computacional.

Las conclusiones obtenidas a partir de los modelos constituyen la base de nuestras decisiones tecnológicas. Limitar el alcance y las predicciones de los modelos, a lo que realmente está validado con la experiencia, constituye todo un desafío de la tecnología actual, y merece un debate para resolver algunas contradicciones metodológicas.

La tecnología disponible permite asegurar la integridad estructural de los componentes para el conjunto de sollicitaciones que surgen de los accidentes postulados. Sin embargo ¿la integridad de las centrales nucleares está asegurada? La respuesta es negativa si consideramos los accidentes nucleares severos que han ocurrido.

### **3. El accidente severo de Fukushima**

Para analizar ordenadamente el accidente de Fukushima seguiré la secuencia típica de un accidente: i) Eventos preliminares, ii)

<sup>6</sup> Jorge Wagensberg, *Ideas sobre la complejidad del mundo*, Tusquets Editores, Barcelona, 1985.

Evento iniciador o gatillo, iii) Eventos intermedios, iv) Accidente, v) Consecuencias, vi) Contención, vii) y eventualmente nuevos eventos iniciadores.

Inicialmente, emplearé la información que presenta el *Report* de la Misión<sup>7</sup> realizada entre el 24 mayo a 2 junio de 2011, por los expertos de la Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, al sitio del accidente de Fukushima. Lo que sigue es un resumen extraído del Report de OIEA:

### ***La secuencia del accidente: el evento iniciador fue el Terremoto + Tsunami***

“El 11 de marzo de 2011, el Gran Terremoto del Este en Japón, de magnitud 9, generó un tsunami con una serie de olas de gran tamaño que azotó la costa este de Japón, llegando a una altura máxima de 38,9 m. Varias instalaciones de energía nuclear se vieron afectados. Los sistemas automáticos instalados, como parte del diseño de las centrales nucleares, actuaron exitosamente al detectar el terremoto provocando el *shutdown* de las plantas. Todos los sistemas disponibles de emergencia de generadores diesel entraron en funcionamiento de acuerdo con el diseño. Sin embargo, las consecuencias mas graves ocurrieron en Fukushima”.

“La primera ola del tsunami llegó al sitio de Fukushima unos 46 minutos después del terremoto. Estas ondas de tsunami superaron las defensas de la planta de Fukushima, que sólo fueron diseñados para resistir olas de tsunami de un máximo de 5,7 m de altura. Las olas más grandes se estimaron en más de 14 m de altura. Las olas del tsunami penetraron hasta el interior de la unidad, causando la pérdida de todas las fuentes de generación, a excepción del generador diesel de emergencia (6 B), que alcanzó solo para suministrar energía a las Unidades 5 y 6”.

“Por el apagón y el impacto del tsunami, los operadores de las Unidades 1 al 4 tuvieron que trabajar en la oscuridad, casi sin sistemas de instrumentación y control, y con los sistemas de comunicaciones gravemente afectados”.

<sup>7</sup> Iaea Mission Report, “The Great East Japan Earthquake Expert Mission Iaea International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Dai-Ichi Npp Accident Following The Great East Japan Earthquake And Tsunami”, Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ni NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan, *24 May – 2 June 2011*, Division Of Nuclear Installation Safety, Department Of Nuclear Safety And Security.

Table IV-1-1 Power Generating Facilities of Fukushima Daiichi NPS

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
Electric output (10,000 kW)	46.0	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
Start of construction	Sep. 1967	May 1969	Oct. 1970	Sep. 1972	Dec. 1971	May 1973
Commissioning	Mar. 1971	Jul. 1974	Mar. 1976	Oct. 1978	Apr. 1978	Oct. 1979
Reactor type	BWR-3	BWR-4			BWR-5	
Containment type	Mark I					Mark II
Number of fuel assemblies	400	548	548	548	548	764
Number of control rods	97	137	137	137	137	185

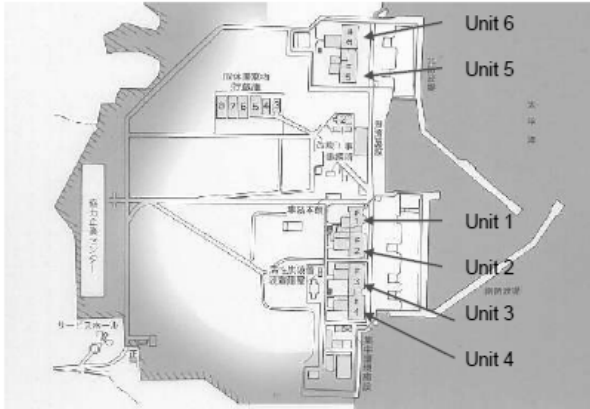


Figura 2

*Layout general de Fukushima Daiichi NPS (Report of Japanese Government to the IAEA)*

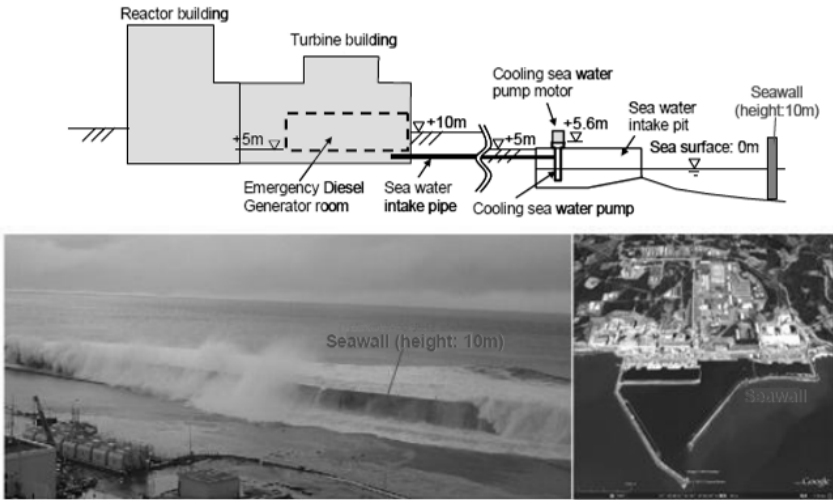
“Los tres reactores de Fukushima que estaban en funcionamiento hasta el momento del terremoto se calentaron rápidamente. A pesar de los intentos del personal de operaciones para restablecer el control y enfriar los reactores y el combustible nuclear gastado, hubo graves daños en el combustible y una serie de explosiones”. Las Figuras 3, y 4 muestran detalles de la inundación de la Planta de Fukushima.

***La secuencia del accidente: Eventos intermedios posteriores al evento iniciador, refrigeración insuficiente, emisión de material radiactivo y las explosiones de hidrógeno.***

Para describir la naturaleza de las explosiones utilizaré primariamente el “*Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO’s Fukushima*”



### Cross section of Fukushima Dai-ichi (Unit-1)



Reference: The Tokyo Electric Power Co., Inc. Release  
 [Online]. <http://www.tepco.co.jp/tepconews/pressroom/110311/index-j.html>

Figura 3  
*Inundación de la Central Nuclear de Fukushima debida al Tsunami.  
 (Report of Japanese Government to the IAEA June 2011)*

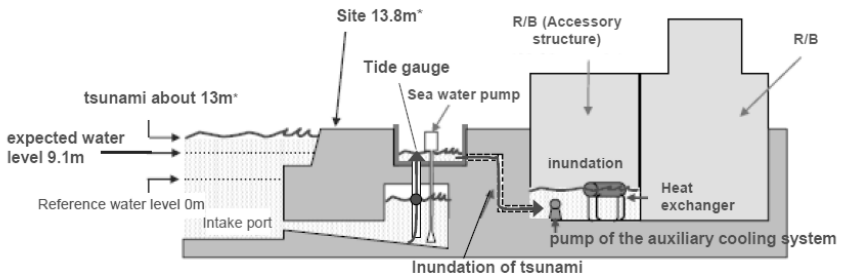


Figura 4  
*Inundación del edificio del sistema de enfriamiento debida al Tsunami  
 (Report of Japanese Government to the IAEA June 2011)*

*Nuclear Power Stations*<sup>8</sup> -June 2011, Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan junto con algunos otros informes técnicos.

La Figura 5 presenta un esquema del Recipiente del Reactor (*Reactor Pressure Vessel*, RPV) y el *Primary Containment Vessel* (PCV). Emplearemos el esquema para seguir la secuencia del accidente a partir de la falta de refrigeración del núcleo originada como consecuencia del terremoto más el Tsunami.

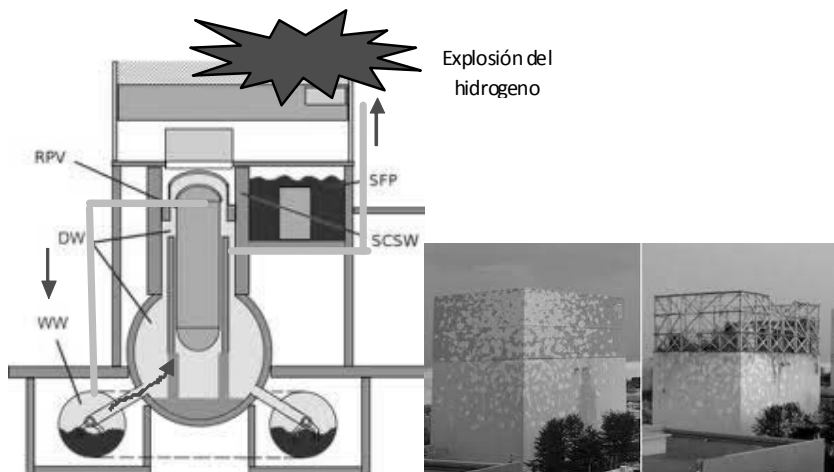


Figura 5

Esquema del Recipiente del Reactor (*Reactor Pressure Vessel*, RPV), del *Primary Containment Vessel* (PCV) y el edificio del reactor. Las fotos corresponden al edificio del reactor antes y después de la explosión de hidrógeno.

### ***Refrigeración del núcleo insuficiente***

Al quedar el núcleo del reactor parcialmente cubierto con agua, por la insuficiente refrigeración, en el interior del Recipiente del Reactor (RPV) hubo un incremento de la temperatura y la presión. Con 75 % de núcleo expuesto, la temperatura excedió los 1200° C en el *cladding* y el Zirconio reaccionó con el agua en una atmósfera de vapor liberando hidrógeno ( $Zr+2H_2O \leftrightarrow ZrO_2 + 2H_2$ ), por medio de una reacción exotérmica que incrementó aún más la temperatura del

<sup>8</sup> Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -June 2011, Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan

núcleo. A mayores temperaturas (2500° C) se produjo la ruptura de los elementos combustibles y fusión de metales. Como consecuencia se liberó en el interior del RPV una gran cantidad de hidrógeno y material radiactivo.

Se incrementó la presión interior de los tres RPV hasta que actuaron las válvulas de seguridad liberando vapor, hidrógeno y material de fisión hacia la cámara de condensación (WW *wet-well*) del recipiente de contención primario (*Primary Containment Vessel - PCV*), y de allí hacia la parte seca del PCV (*dry well*), ver Figura 5.

La presión interior de los PCVs de las Unidades 1 a 3 aumentó gradualmente. El *Containment* (PCV) es la última barrera entre los productos de fisión y el ambiente, y estaba diseñado para soportar del orden de 4 bares. La presión interior, debida al nitrógeno que normalmente lo llena, aumentó hasta aproximadamente 8 bar por el hidrógeno proveniente de las reacciones en el núcleo y por la ebullición en la cámara de condensación. Para evitar el estallido de PCV, se provocó su despresurización, esta operación tuvo el beneficio de liberar parte de la energía, aunque originó la emisión fuera del containment de elementos de fisión, gases nobles e hidrógeno.

El gas fue liberado hacia el piso de servicio, que se encuentra en la parte superior del edificio del reactor, y que poseía una estructura de acero. Allí fue donde se produjeron las explosiones del hidrógeno acumulado, con destrucción parcial del edificio (estructura de acero) y la emisión de contaminación radiológica en el medio ambiente<sup>9</sup>.

La parte de concreto reforzado del edificio del reactor permaneció sin daños significativos. Tampoco se produjo la rotura de los recipientes y cañerías retenedoras de presión cumpliéndose con los postulados de exclusión de rotura ya analizados. Cabe destacar que los avances tecnológicos en salvaguardar la integridad mecánica y estructural mostraron ser adecuados aún luego de producido un terremoto de gran magnitud.

### ***Las consecuencias. Lecciones y conclusiones del informe de OIEA***

La misión del OIEA instó a la comunidad nuclear internacional a que considere un conjunto de 15 conclusiones y 16 lecciones a fin

<sup>9</sup> Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -June 2011, Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan

de aprovechar la oportunidad única creada por el accidente de Fukushima para tratar de aprender y mejorar la seguridad nuclear en todo el mundo.

Solo resumiré las conclusiones más relevantes del Informe de la Misión de OIEA: El riesgo de Tsunami fue subestimado. No estaba previsto un “lugar seco”. Las medidas de protección adoptadas no fueron suficientes para hacer frente al tsunami y todos los fenómenos peligrosos asociados (fuerzas hidrodinámicas y el impacto dinámico de los desechos de gran tamaño con alta energía). Se detectaron irregularidades en cuando a la revisión y aprobación de medidas por parte de las autoridades regulatorias. Inadecuada capacidad para gestionar accidentes en las tres plantas. Las complejas estructuras de decisión provocaron retrasos en la toma de decisiones urgentes. No parece haber sido efectivo el control de la exposición a la radiación en los lugares afectados, a pesar de los graves trastornos por los acontecimientos. Los requisitos de seguridad del OIEA deben ser revisados para garantizar que las necesidades especiales en el diseño y gestión de accidentes graves de sitios con múltiples plantas tengan una cobertura adecuada.

Las consecuencias del terremoto que sacudió Japón en marzo siguen aún vivas meses después. Actualmente se sigue intentando controlar la radiactividad en la zona. Más del 70 % de los 54 reactores atómicos de los que dispone el país aún están paralizados. Por este motivo para intentar paliar esta escasez energética, el Gobierno japonés pidió a los ciudadanos una reducción en su consumo energético del 15 % para que el suministro pueda estar asegurado.

Por otra parte, los daños en sectores como el ganadero, la agricultura y la pesca son millonarios, y motivan una creciente preocupación por la contaminación en alimentos. Varios países, como Estados Unidos y China, prohibieron la importación de cualquier tipo de alimento que vengan de la zona de Fukushima.

El 12 de septiembre de 2011, el Director General de OIEA Yukiya Amano manifestó que los reactores de Fukushima, luego de estar en una situación muy seria durante seis meses, recién ahora han alcanzado una condición esencialmente estable y se espera lograr la parada en frío de todos los reactores de acuerdo a lo planificado.

#### **4. Las advertencias: los accidentes nucleares de Three Mile Island y Chernóbil**

La primera gran advertencia sobre las posibles catástrofes nu-

cleares civiles surgió en Estados Unidos. El accidente de la central nuclear de Three Mile Island (TMI)<sup>10</sup>, en Middletown (EE.UU.), fue noticia de alcance mundial en marzo y abril de 1979. Prácticamente todos los expertos coinciden en que Three Mile Island no fue un accidente grave.

El caso de Chernóbil, ocurrido el 26 de abril de 1986, sí fue un accidente nuclear severo, el más severo de la historia. Diversas estimaciones hechas en los años noventa sitúan los costos a lo largo de dos decenios en cientos de miles de millones de dólares. (Más de 10<sup>11</sup> u\$s). El cuarto reactor de Chernóbil, fue cubierto luego del accidente por un sarcófago de acero y hormigón, que ahora presenta grietas y fugas, por lo que será cubierto por otro nuevo de 110 metros de alto y más de 150 de largo, diseñado para garantizar la seguridad de la planta y su entorno durante un período de cien años. Las consecuencias son incalculables si consideramos los efectos prolongados en el tiempo.

## **5. ¿La ciencia y la tecnología actualmente disponen de suficiente capacidad para anticipar y evaluar los riesgos tecnológicos?**

Con estos ejemplos de accidentes nucleares mayores aún sin resolver no resulta creíble afirmar que la ciencia y la tecnología actualmente disponen de una adecuada capacidad para anticipar y evaluar los riesgos tecnológicos mayores.

Como consecuencia de Fukushima, el Gobierno alemán ha decidido el 30/5/2011 la desconexión de todas las centrales nucleares del país antes del año 2022. La coalición que preside la canciller, Doctora en Física Ángela Merkel, da así marcha atrás a la ampliación de la vida útil de las nucleares alemanas que había aprobado hace solo ocho meses. Las siete centrales más viejas permanecerán apagadas por lo que quedarán solo 10 centrales en funcionamiento hasta el 2022. La canciller Ángela Merkel ha insistido en que la liberación de radiactividad tras el terremoto “ha demostrado que la interpretación hasta ahora de las fuerzas de la naturaleza sobre las estructuras de las plantas no es lo suficientemente fiable”.

El accidente de Fukushima disparó un debate internacional sobre la justificación moral y económica de los daños de los accidentes nucleares. Mientras que la comunidad nuclear propone satisfacer las

<sup>10</sup> *Boletín del OIEA*, 47/2 Marzo de 2006.

crecientes necesidades energéticas con más energía nuclear empleando diseños intrínsecamente seguros, el ciudadano común escucha diversas voces contrapuestas.

Después del accidente de Fukushima, en Francia, país que genera más del 70 % de su energía eléctrica a partir de la energía nuclear, algunos intelectuales se preguntaban: ¿es hora de dar un paso atrás?, ¿hay que salir tan pronto como sea posible del empleo de la energía nuclear?, ¿hemos perdido la razón?<sup>11</sup>. Para la comunidad nuclear esta es una reacción exagerada e irracional al evento.

¿Cuáles son los límites de la razón? ¿Quién está del lado de la razón? Los expertos y funcionarios de los programas nucleares, que son “gente seria” y pueden tomar decisiones muy bien fundadas, o los activistas de la causa ecológica que ven el mundo a través de un prisma de prejuicios ideológicos<sup>12</sup>.

Para Paul Virilio “inventar el barco a vela o de vapor es inventar el naufragio, ... hacer que despegue un objeto más pesado que el aire, el avión, es inventar la caída de aeronaves..... En cuanto al transbordador Challenger, su explosión es el accidente original de un nuevo artefacto”<sup>13</sup>. Por lo que podríamos agregar que inventar una central nuclear es inventar un Chernóbil o Fukushima.

¿Cómo considerar los escenarios impensables o improbables? ¿Cómo considerar aquellos aspectos que, por desconocimiento o porque nunca fueron observados, quedan fuera de los análisis de riesgo? No tenemos aún adecuadas respuestas a estas preguntas.

Otro aspecto a considerar se refiere a que para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos se requiere disponer de crecientes cantidades de energía. ¿Cómo define la sociedad a la calidad de vida?, ¿Cuánta energía se requiere para satisfacer las necesidades básicas y cuánta para satisfacer los caprichos del consumismo? ¿Cuánta energía se requiere para mantener encendido los televisores para ver programas de dudosa calidad? Una redefinición de la idea de “calidad de vida” podría ahorrar suficiente energía como para minimizar los riesgos. La cultura consumista es la forma en que los miembros de una sociedad actúan irreflexivamente<sup>14</sup>. De una sociedad de productores pasamos a una sociedad de consumidores que estimula la

<sup>11</sup> *Philosophie Mag* n°49, mayo 2011, Paris, France.

<sup>12</sup> *Philosophie Mag* n°49, mayo 2011, Paris, France.

<sup>13</sup> Paul Virilio, *El accidente original*, Buenos Aires-Madrid, Amorrortu Editores, 2009, p. 25.

<sup>14</sup> Zygmunt Bauman, *Vida de consumo*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires, 2007.

insatisfacción de sus miembros. Se promueven los estados de negación de la responsabilidad moral y legal, transformando “consecuencias imprevistas” en “daños colaterales”, justificando los daños sobre la base de que “no fue intencional”.

Los acontecimientos de Fukushima nos reubicar en el centro de las contradicciones de la razón humana, dividido entre sus temas científicos y técnicos, y la capacidad de considerar los valores, entre el cálculo y la moral.

## 6. ¿Cuál es el límite de consecuencias que una sociedad puede aceptar?

La Figura 6 compara consecuencias económicas causadas por catástrofes naturales con las causadas por las catástrofes “fabricadas”. Entre las catástrofes naturales se destacan por su gran magnitud el sismo y tsunami de Japón, que representó alrededor de un 3% de su PBI, y el Huracán Katrina (1% del PBI de USA), mientras que entre las mayores catástrofes originadas por la actividad humana están Chernóbil y el derrame de petróleo en el Golfo de México. Hasta el presente, los costos de los mega desastres son del mismo orden del PBI Argentino. El terremoto de Haití (2010) superó su PBI, mientras que los de Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) representaron un 10% de sus PBI respectivos.

Los desastres naturales producen numerosas víctimas, particularmente en los países menos desarrollados, mientras que los daños

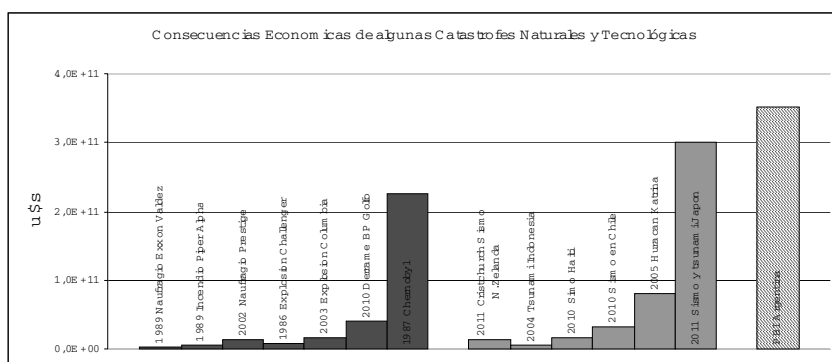


Figura 6

Consecuencias económicas de las catástrofes naturales y tecnológicas

materiales son más relevantes en los países desarrollados. La educación para la prevención y la contingencia de las catástrofes permite reducir las víctimas humanas. Esto se logra con un desarrollo cultural y tecnológico adecuado, y no solo con crecimiento económico.

A pesar del poder económico de las empresas Exxon y BP, estos siniestros son capaces de golpear fuertemente sus resultados económicos. La empresa TEPCO, responsable de la planta nuclear de Fukushima, ha pedido créditos por  $2,5 \times 10^{10}$  u\$s para financiar las acciones de mitigación que realiza en la planta siniestrada.

Cuando las consecuencias de las catástrofes son del orden del PBI de las naciones, todos los ciudadanos resultan significativamente involucrados con los costos, por consiguiente deben estar lo suficientemente informados respecto de los riesgos antes de que se materialicen las catástrofes.

Para decidir si un riesgo es aceptable, además de la comunidad científico-tecnológica, entran otros actores: el poder político, el poder judicial, grandes intereses económicos y ONG. Empleando el poder de los medios masivos de comunicación, estos actores pueden influir y controlar a través del miedo a todo el conjunto de la sociedad y su percepción del riesgo.

El riesgo social es vulnerable a estas manipulaciones del poder. Los peligros se desmitifican o exageran motorizados por la necesidad de manipulación y control de la naturaleza por imperativos del crecimiento económico. La propia comunidad científico-tecnológica, atraída por el deseo de dominar la naturaleza, de ampliar el horizonte, vencer sus limitaciones físicas, también es atraída por el poder. No siempre el hombre responde a esta atracción de la técnica con decisiones fruto de su responsabilidad moral.

¿Quién se responsabiliza por los daños materiales? En el caso de los desastres naturales generalmente es el Estado y, por consiguiente, sus ciudadanos, quienes deben afrontar las pérdidas. En las catástrofes “fabricadas” las empresas responsables deben tener capacidad suficiente como para afrontar las consecuencias económicas. La mayor parte de los países y aun de las grandes corporaciones no están en condiciones de afrontar solos estas severas consecuencias.

## **7. Conclusiones**

La evolución de la humanidad permitió crear, para su beneficio, poderosas herramientas transformadoras basadas en el conocimiento



científico y tecnológico. Con el crecimiento del poder tecnológico también se originaron nuevas amenazas y peligros.

Para responder a la pregunta de si somos capaces de anticipar y evaluar los riesgos tecnológicos, primero analicé lo acontecido durante la “era del vapor”. Mostrando cómo la ingeniería logró minimizar el número de explosiones de calderas hasta un nivel aceptable a comienzo del siglo XX. Por la simplicidad del problema, la clave del éxito fue el empleo del método de prueba y error iluminado por el conocimiento científico. En este caso la sociedad pudo controlar exitosamente los riesgos que produjo.

Sin embargo, en la “era atómica” la experiencia nos muestra que se han producido accidentes nucleares severos. Comencé analizando ordenadamente la secuencia del accidente de la Planta Nuclear de Fukushima, Japón. Revisando los eventos preliminares (errores de diseño), el evento iniciador (terremoto más tsunami) y los eventos intermedios (refrigeración insuficiente, emisión de hidrógeno y material radiactivo) que originaron el severo accidente. Se comprobaron fallas en los análisis de seguridad de las plantas, que condujeron a errores de diseño, fallas en los sistemas de alternativos de emergencia, fallas en el diseño de los centros de respuesta a emergencia, fallas en evaluar y disponer de suficientes recursos para afrontar un accidente severo en centrales con reactores múltiples, fallas en la evaluación y control del riesgo a explosiones de hidrógeno, fallas en la actuación de los entes reguladores, fallas en los requisitos de seguridad de OIEA, fallas en la cadena de toma de decisiones ante la emergencia y fallas en el control de la exposición a radiación en los lugares afectados. El accidente de Fukushima, junto con el de Chernóbil, aún tiene final abierto, contribuyendo a que la respuesta a la pregunta que motiva esta comunicación resulte negativa.

Cabe destacar que durante el accidente de Fukushima no se produjeron roturas en los recipientes y cañerías retenedoras de presión, pudiéndose afirmar que la tecnología actual permite asegurar la integridad estructural y mecánica de los componentes para el conjunto de sollicitaciones que surgen de los accidentes postulados.

La complejidad de los desarrollos tecnológicos y la magnitud de sus consecuencias hacen económicamente y moralmente inadmisibles aprender de los fracasos. La simulación computacional enriquece los desarrollos científico-tecnológicos y origina una esperanza respecto de alcanzar la capacidad para anticipar y evaluar los riesgos de sistemas complejos.

El consumismo de la sociedad genera requerimientos energéticos superfluos, que para ser satisfechos promueven el empleo de tecnologías aún no maduras, aceptando grandes riesgos por consecuencias imprevistas.

Los costos de los accidentes “fabricados” han llegado a valores superiores a los de los PBI de la mayoría de los países y de la capacidad de respuesta de las mayores empresas globales, compitiendo con las consecuencias de las mayores catástrofes naturales. Toda la sociedad termina afrontando los costos.

Por lo tanto, la ciudadanía debe estar suficientemente informada de los riesgos a que es sometida, evitándose la manipulación de la información. La gestión de los riesgos nucleares requiere una nueva forma de deliberación política que excede el marco de la comunidad científico-tecnológica.

Los miembros de la comunidad nuclear argentina debemos aprender con humildad de estos éxitos y fracasos, reconociendo las limitaciones de las tecnologías disponibles en el campo nuclear, y siendo conscientes de sus potenciales consecuencias. Debemos evitar que el orgullo de los logros del pasado y la natural atracción que ejerce el conocimiento y el poder, induzcan al poder político de nuestro país a tomar decisiones erróneas en cuanto a la localización, al diseño y a la construcción de nuevas centrales nucleares.

Concluyo que la opción de la energía nuclear merece ser considerada como una alternativa válida para un mundo necesitado de energía, siempre que se tomen responsablemente las decisiones basadas tanto en el estado del arte de la ciencia y la tecnología, como en consideraciones sociales y morales.

MESA DIRECTIVA

- 2011-2013 -

Presidente

Dr. HUGO FRANCISCO BAUZÁ

Vicepresidente 1°

Dr. MARCELO A. DANKERT

Vicepresidente 2°

Dr. FAUSTO T. L. GRATTON

Secretario

Ing. JUAN CARLOS FERRERI

Prosecretaria

Dra. AMALIA SANGUINETTI DE BÓRMIDA

Tesorero

Ing. LUIS ALBERTO DE VEDIA

Protesorero

Ing. ANTONIO A. QUIJANO

Director de *Anales*  
Académico Titular Dr. Alberto Rodríguez Galán

Consejo Asesor de *Anales*  
Académico Titular Dr. Amílcar E. Argüelles  
Académico Titular Dr. Mariano N. Castex  
Académico Titular Dr. Roberto J. Walton

Secretaria de Redacción  
Dra. Isabel Laura Cárdenas

Impreso en el mes de diciembre de 2011 en *Ronaldo J. Pellegrini Impresiones*,  
Bacacay 2664, Depto. 23, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina  
correo-e: [pellegrinirj@gmail.com](mailto:pellegrinirj@gmail.com)