

# REVISIÓN CRÍTICA DE ALGUNAS TEORÍAS DE ACCIDENTES ASOCIADAS A LA INFRAESTRUCTURA

Luis A. Godoy<sup>1</sup>, Claudio Escaudar<sup>2</sup>, Rossana Jaca<sup>2</sup>, Federico Pinto<sup>3</sup>

RESUMEN: En este trabajo se analizan varias teorías cuyo objeto de estudio son los accidentes de sistemas de ingeniería. Se analizaron tres teorías, independientemente propuestas por Perrow, Petroski y Dörner. Petroski presenta un argumento para la valorización de casos históricos, sean antiguos o modernos, iluminando los factores del error humano en el proceso de diseño. Perrow atribuye la generación de accidentes a la complejidad misma del sistema, que produce interacción no esperada entre fallas. Dörner pone énfasis en el esquema de razonamiento utilizado por las personas a cargo de la toma de decisiones sobre la operación de sistemas dinámicos, pero no contempla errores humanos en la etapa de diseño del sistema. Se estudian las componentes principales de las teorías desde el punto de vista epistemológico de Lakatos, en el marco de los programas de investigación científica. A los fines de comparar las interpretaciones de dichas teorías entre sí, se estudia el accidente de la central nuclear de Chernobyl (Ucrania) desde el punto de vista de cada una de ellas. Se observa que cada teoría propone una interpretación particular del evento y las interpretaciones de cada teoría no son conflictivas, sino más bien complementarias. Se enfatiza la necesidad de considerar el sistema físico y los postulados que podrían incluirse para lograr una teoría más abarcadora.

## INTRODUCCIÓN

A través de la historia de la ingeniería ha ocurrido una gran cantidad de accidentes en infraestructura civil. Las consecuencias de algunos de esos accidentes han sido dramáticas y han producido pérdidas humanas, materiales y económicas significativas. Debido a ese impacto, hay una literatura importante que se ocupa de accidentes, tanto de tipo educativo (Volland 1998, Hendley 1998), desde el punto de vista de la seguridad (Blockley 1992) y desde el punto de vista de las causas (Sibly y Walker 1977, Ferry 1984, Lancaster 2000). Sin embargo, en la mayoría de los estudios el tratamiento es de tipo casuístico y no se llegan a presentar aportes sistemáticos más generales. Hay una gran necesidad de contar con estudios más abarcadores, en los que se conceptualicen los accidentes de tal manera que sirvan como marco de análisis de casos específicos.

En este trabajo se analiza el estado actual del arte referido a teorías de accidentes, teniendo presente que coexisten varias teorías, sin poder todavía discernir cuál es la más adecuada para explicar accidentes en infraestructura civil. Se adopta un punto de vista para llevar a cabo el análisis de las teorías, que es el de los “programas de investigación científica” de Lakatos; a partir de esa óptica se presentan tres teorías para analizar sus diferencias y similitudes. Adicionalmente se utiliza un caso real (el accidente de Chernobyl en 1986) para mostrar los puntos de vista diferentes de cada teoría. Finalmente se presentan algunas conclusiones orientadas a mostrar qué elementos deberían enfatizarse en una teoría superadora.

## ACCIDENTES

Consideremos, por ejemplo, la siguiente definición de accidentes: “es un evento no deseado y no direccionado que provoca daño a personas, objetos o ambos, interrumpiendo la continuidad de las tareas actuales o futuras que le están siendo o le serán requeridas a tales objetos o personas, y que es el causante de grandes pérdidas y controversias”.

Esa definición resulta demasiado abarcadora y contempla múltiples situaciones, por lo cual introduciremos algunas restricciones al objeto de estudio. En esta definición aparecen los siguientes elementos, que serán usados para organizar la discusión:

- El **sistema físico**. En este estudio nos concentraremos en accidentes que afectan a la infraestructura civil e industrial, dejando de lado accidentes asociados a la transportación. El tipo de infraestructura estudiada puede ser una planta industrial o de generación de energía, un puente, un reservorio, una plataforma petrolífera, etc.

<sup>1</sup> Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Departamento de Ingeniería Civil, Mayagüez, PR 00681-9041.

<sup>2</sup> Universidad Nacional del Comahue, Departamento de Ingeniería Civil, Neuquén, Argentina.

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Córdoba, Departamento de Estructuras, FCEFyN, Córdoba, Argentina.

También podemos considerarlo por componente, como recipientes de presión (Dermenjian 1996), cáscaras en plataformas petrolíferas costa afuera (Walker y Sibly 1976), etc.

- El **evento no deseado**. No consideraremos eventos asociados a desastres naturales, ni tampoco a acciones voluntarias (como actos criminales o demolición planificada). Dejaremos también afuera casos de notoria negligencia de diseño o de construcción. Un evento puede ocurrir por deficiencias operativas (como en el caso de Chernobyl en 1986, Poyarkov *et al.* 1999) o asociado a problemas no previstos en la concepción del sistema (como en el colapso de varias torres de enfriamiento en la planta de generación eléctrica de Ferrybridge, Inglaterra, CEGB 1966). Este último caso ocurre cuando en el momento del diseño no se conoce con detalle algún aspecto del funcionamiento del sistema o de los mecanismos resistentes.
- Las **causas del evento**. Un evento no deseado tiene causas que lo producen, aunque esas causas pueden referirse a diferentes niveles de análisis. En la investigación de un accidente pueden aparecer claramente el sistema físico, los daños y las consecuencias; el evento puede ser más complicado de determinar, pero las causas son la parte más difícil y en muchos casos sólo se formulan especulaciones o hipótesis. En el accidente de la plataforma Alex Kielland en el mar del Norte en 1980, el evento puede considerarse como la falla de un elemento tubular, pero debe haber una causa (o varias) que explica porqué se ha producido ese evento. El mecanismo en ese caso parece haber sido fractura por fatiga iniciada en zonas de concentración de esfuerzos (Anónimo 1981).
- Los **daños**. Pueden incluir la falla parcial o el colapso de una estructura, la muerte de personas, etc. De especial interés resultarán eventos que provocan daños a construcciones en primer lugar, aunque ese daño puede extenderse también a personas u otras facilidades construidas o naturales.
- Las **consecuencias** de los daños. Pueden ser la pérdida de la construcción misma, la pérdida de la función que desempeñaba la construcción, etc. El colapso de las torres de enfriamiento de Ferrybridge tuvo consecuencias de parar la planta eléctrica en 1965, con pérdidas económicas y de servicios, pero no humanas. El accidente de Chernobyl tuvo consecuencias para la planta, para la ciudad vecina, para Ucrania, para la Unión Soviética y para los países vecinos de Europa; las consecuencias se han mantenido por generaciones y aun hoy no se ha logrado aislar totalmente el sistema (OECD 1995, Poyarkov *et al.* 1999).

Adicionalmente, resulta conveniente diferenciar por una parte aquellas construcciones de infraestructura en las que se lleva a cabo un proceso que tiene una dinámica propia (y el accidente está asociado a esa dinámica), de aquellas que no lo tienen. Por ejemplo, las centrales nucleares de energía llevan a cabo un proceso de generación con una entrada en régimen y estados estacionarios; ese proceso desempeñó un papel importante en el accidente de la central Three Mile Island en Estados Unidos (Toth 1986, Williams y McCormick 1981). Infraestructura más simple, como plantas químicas (Kharbanda y Stallworthy 1988, Kletz 1998) o de tratamiento de líquidos cloacales (Godoy y Lopez-Bobonis 2001), también llevan a cabo procesos y son susceptibles a tener accidentes. Por otra parte hay construcciones en las que no se realiza ningún proceso, o en las que esa dinámica no juega un papel en el accidente. Por ejemplo, las torres de enfriamiento que colapsaron en Ferrybridge llevaban a cabo un proceso de enfriamiento de agua por pasaje natural de aire por su interior, pero ese proceso de enfriamiento no estuvo asociado al accidente (CEGB 1966).

La escala del accidente es muy importante y las causas que los ocasionan pueden diferir mucho dependiendo de la escala. Para concentrar el estudio, sólo consideraremos autores que analizan accidentes importantes. En general, la importancia de los accidentes está inversamente relacionada con su frecuencia: los accidentes grandes son relativamente raros y están asociados a innovaciones tecnológicas e ingenierías avanzadas, mientras que los accidentes pequeños e incidentes ocurren con frecuencia en cualquier industria. El grado de perturbación que se genera en el sistema debido a un accidente está relacionado con lo que se defina como sistema. Por ejemplo, una falla en un tubo de un generador de vapor en una planta nuclear se puede considerar un accidente si el sistema analizado es la planta nuclear misma, pero tendrá poco efecto sobre el sistema de energía nuclear de todo un país, en cuyo caso se lo considera sólo como un incidente en ese contexto.

El material de insumo para generar teorías de accidentes son, en general, los informes de las investigaciones llevadas a cabo con posterioridad al accidente. Típicamente, un informe consiste en un detalle de las facilidades afectadas, las condiciones previas y en el momento del accidente, y diferentes escenarios que permitan explicar lo ocurrido, descartándose algunos y conservándose otros como causa más probable.

## MARCO DE ANÁLISIS

El marco de análisis que usan muchos trabajos de accidentes es casuístico, ya que realizan un estudio de diversos casos de manera no sistemática, como en Lancaster (2000). Pero hay algunas teorías formuladas de manera más rigurosa y esas se consideran en este artículo.

Para estudiar las teorías de accidentes es necesario contar con un enfoque epistemológico de manera de proveer un único tipo de estructura conceptual para todas las teorías que se analicen. La metodología utilizada en este trabajo es la conocida como “programas de investigación científica”, de Imre Lakatos (Lakatos 1982).

En la conceptualización de Lakatos, las estructuras de análisis son los programas de investigación, que tienen una estructura formada por:

- (a) Un **núcleo firme**, en el cual se encuentran los supuestos básicos subyacentes al programa. En el núcleo firme se concentran los supuestos básicos o hipótesis generales de la teoría, y a partir de ese núcleo se construye el programa de investigación.
- (b) Las hipótesis del núcleo no permiten realizar predicciones o explicaciones en detalle, y por eso deben ser ampliadas con una serie de elementos que dan cuerpo al núcleo. Esos elementos forman un **cinturón protector**, que contiene hipótesis auxiliares, condiciones iniciales, definiciones, y otros elementos que permiten especificar situaciones particulares. El cinturón protege al núcleo contra la falsación.
- (c) Una **heurística** positiva, que muestra como desarrollar el programa de investigación. La heurística está formada por un conjunto de técnicas (matemáticas, experimentales u operacionales) y aporta la metodología para complementar el núcleo y enriquecer el cinturón, de manera que el programa pueda explicar (y predecir, si es posible) los casos derivados de la realidad. La heurística sirve para guiar la investigación futura dentro del programa. Hay también una heurística negativa, que establece lo que no se debe hacer dentro del programa porque entra en conflicto con el núcleo firme.

Los programas de Lakatos son una herramienta muy buena para encuadrar las diversas teorías de forma tal de hacerlas más comprensibles. Por el contrario, tanto el inductivismo (ver, por ejemplo, Chalmers 1999) como el falsacionismo (Popper 1969) no proveen una estructura en la cual se pueda reflejar cualquier teoría, ya que estas dos tendencias están más asociadas a la forma de validar conocimientos, dejando de lado la estructuración misma de la teoría. Tampoco es ventajoso utilizar las estructuras de Kuhn (1970) debido a que, desde el punto de vista de este autor, en el caso de accidentes se estaría en una etapa de preciencia, ya que aún la comunidad no se ha adherido a un único paradigma. Kuhn enfatiza especialmente el cambio de paradigma.

## TEORÍAS DE ACCIDENTES CONSIDERADAS

Ninguna de las teorías que se presentan vienen organizadas según los programas de Lakatos, se modo que aquí se las reformula desde ese punto de vista para sistematizar la discusión.

### Teoría de Accidentes de Perrow

Una de las teorías existentes que intenta explicar la ocurrencia de accidentes en ingeniería es la formulada por Charles Perrow. Este autor realizó sus estudios en la Universidad de California, Berkeley, alcanzando el grado doctoral en Sociología en 1960. Desde 1981 es profesor de Sociología en la Universidad de Yale. Es autor de varios libros y en 1979 actuó como consultor en la Comisión Presidencial de Estados Unidos sobre el accidente de la planta nuclear Three Mile Island. Su teoría de accidentes ocupa el libro “*Normal Accidentes*” (Perrow 1984).

Esta teoría examina sistemáticamente los sistemas de alto riesgo y constituye una teoría de sistemas, de su potencial de falla y de la recuperación de la falla. Los enunciados y conceptos adquieren significado preciso e informativo en su marco de referencia para describir los hechos analizados. Entre los elementos que caracterizan un programa de investigación la unidad definitoria es su núcleo firme. En este caso se pueden plantear los siguientes postulados constitutivos del núcleo:

- ❑ **Postulado de complejidad:** El potencial de accidentes aumenta en sistemas complejos, formados por muchas componentes y diversos modos de fallas posibles.
- ❑ **Postulado de acoplamiento:** El potencial de accidentes aumenta en sistemas acoplados. Una característica fundamental de los sistemas de alto riesgo es el grado de acoplamiento de fallas y la capacidad de interacciones entre fallas.
- ❑ **Postulado de inevitabilidad:** Los sistemas de alto riesgo tienen características especiales que hacen que los accidentes se produzcan inevitablemente.

Según Perrow, la causa de un accidente se encuentra en la complejidad del sistema, de manera que fallas triviales en sí mismas se convierten en serias cuando interactúan. El término normal tiene el sentido de propiedad inherente al sistema que hace que ocasionalmente aparezcan interacciones múltiples e inesperadas entre fallas. El autor aclara: “Tal vez el aspecto más original del análisis es que se enfoca en las propiedades del sistema mismo, antes que en los errores de los propietarios, diseñadores y operarios” (Perrow 1984, pp.63).

Otro elemento importante del programa es su cinturón protector, encargado de proteger el núcleo firme con un conjunto de hipótesis auxiliares y condiciones. Este cinturón incluye las definiciones necesarias para poder manejarse dentro de la teoría, como los conceptos de accidente e incidente, tipos de víctimas, accidente por falla de componente o accidente de sistema, interacción lineal o compleja, acoplamiento fuerte o débil.

El autor diferencia dos tipos de accidentes de acuerdo a si las interacciones entre dos o más fallas pueda ser anticipada, esperada o comprendida por los diseñadores del sistema y aquellos entrenados para operarlo. De esta forma define:

- ❑ **Accidente por falla de componente:** involucra una o más fallas de componentes (o sea, de parte, unidad o subsistema) que están vinculados en una secuencia anticipada.
- ❑ **Accidente de sistema:** involucra interacción no anticipada de fallas múltiples.

Un concepto importante en la teoría es el referido al tipo de interacciones que puede haber entre fallas. La existencia de muchas partes en un sistema no es un gran problema para los diseñadores u operarios del sistema si sus interacciones son esperadas u obvias. Perrow lo explica así: “Lo que distingue estas interacciones complejas es que no son diseñadas en el sistema, nadie pretende que estén vinculadas. Nos confunden ya que actuamos en términos de nuestros propios diseños de un mundo que esperamos que exista, pero el mundo es otro” (Perrow 1984). De esta manera los sistemas pueden ser clasificados en lineales o complejos, con las siguientes características principales:

- ❑ **Sistema lineal:** Las interacciones esperadas ocurren en secuencia de producción y mantenimiento. Pude efectuarse fácil aislamiento de componentes fallados. Hay segregación espacial de componentes del sistema.
- ❑ **Sistema complejo:** Las interacciones ocurren fuera de una secuencia esperada entre componentes. Hay limitada comprensión del proceso (proceso de transformación). Pude efectuarse aislamiento limitado de un componente con falla. Ocurren lazos de realimentación no familiares o no pretendidos. Hay información indirecta e inferencial.

Según Perrow, “la complejidad es inherente a algunos procesos de producción. Tenemos sistemas complejos porque no sabemos como producir algo a través de sistemas lineales. Si estos sistemas complejos también tienen potencial catastrófico, entonces tenemos que considerar maneras alternativas de obtener el producto o abandonarlo totalmente” (Perrow 1984).

Otro concepto importante es el de acoplamiento, que tiene el sentido de analizar en el sistema si lo que ocurre a un componente afecta directamente a lo que le sucede a otro. Esta característica (acoplamiento fuerte o débil) es independiente de interacciones complejas o lineales y permite clasificar a los sistemas en:

- ❑ **Sistemas fuertemente acoplados.** Los procesos son dependientes del tiempo (no pueden esperar o mantenerse hasta ser atendidos). Hay secuencias invariantes, que son la única forma de llegar a la meta (como en una línea de ensamble o en una planta nuclear). Hay margen para pocos descuidos (las cantidades deben ser precisas, los suministros adecuados).
- ❑ **Sistemas ligeramente acoplados.** Los procesos son menos dependientes del tiempo y aceptan posibles demoras. Las normas son más ambiguas. Puede haber incorporación de fallas sin desestabilizar el sistema. El orden de secuencia puede ser cambiado (por ejemplo, el ensamble de un avión).

La heurística es la maquinaria que permite la solución de problemas. En este caso la heurística positiva son los caminos a seguir para caracterizar sistemas muy disímiles y determinar si son propensas a producir incidentes o accidentes, y de que tipo, analizándolos con los elementos del cinturón protector. Para ello se considera un proceso determinado, por ejemplo el realizado en una planta nuclear, tratando de identificar las características del cinturón protector, analizando si es propensa a interacción entre fallas, si esas interacciones son previstas o no, si hay un conocimiento preciso del proceso, si es posible la sustitución de materias primas y personal. En definitiva, se analizan los elementos que diferencian los sistemas complejos de los lineales. Además, se evalúa el proceso para identificar aspectos que presentan los sistemas con acoplamiento fuerte o débil, si son dependientes del tiempo, si son admisibles descuidos, si las secuencias del proceso pueden cambiar o no.

Consideremos alguna de las aplicaciones específicas para casos concretos de interés en infraestructura. Basándose en este análisis se concluye que las plantas nucleares y las plantas petroquímicas son sistemas altamente complejos y fuertemente acoplados, las primeras con tecnologías nuevas (procesos no bien entendidos y tolerancias pequeñas en algunos componentes), mientras que las segundas muestran la presencia de accidente de sistemas en una industria madura (bien manejada, con sustanciales incentivos económicos para prevenir accidentes), sugiriendo que hay algo intrínseco a los procesos mismos que origina los problemas.

Las presas tienen gran potencial catastrófico pero no forman accidente de sistemas. El sistema es fuertemente acoplado (el rescate de la falla es extremadamente limitado), pero lineal (no aparecen interacciones inesperadas). Los tipos de fallas repentinas más frecuentes en presas de hormigón son (a) insuficiente investigación preliminar y caracterización de la roca, (b) falta de consideración de mecanismo real de falla, (c) insuficiente monitoreo de la subpresión en la interfase roca-hormigón. En presas de materiales sueltos hay falla gradual: (a) mal sellado de fundación y unión presa-fundación por lechada con erosión a lo largo del cuerpo de la presa, (b) grietas en el cuerpo de la presa causadas por fractura hidráulica o asentamientos diferenciales. De aquí se tiene conocimiento insuficiente, información incompleta o errónea, práctica ineficiente o no controlada, error en toma de decisiones.

A través de un análisis del sistema en el marco de esta teoría, es posible predecir hechos nuevos o prevenir acerca de la posible aparición de accidentes. A partir de un mejor entendimiento de por qué ocurren los accidentes se está en una mejor posición para argumentar que ciertas tecnologías deberían ser abandonadas y otras, que no pueden ser abandonadas porque la sociedad tiene mucho construido sobre ellas, deberían ser al menos modificadas.

Esta teoría tiene una base inductiva porque surge de la observación y análisis de accidentes, acumulación de lecturas de reportes de accidentes, visitas realizadas en los diferentes medio ambientes y conocimiento general de distintos sistemas. Con todos estos elementos, sobre la base de una teoría interpretativa, se construye una teoría explicativa (acoplamiento-complejidad) caracterizando los sistemas para determinar su aptitud para producir accidentes de sistemas y prevenirlos o al menos regularlos.

La idea general de esta teoría podría resumirse en la siguiente frase: Los accidentes se producen por la complejidad e interacción del sistema que hace que las fallas sean inevitables.

### **Teoría de Accidentes de Petroski**

Henry Petroski recibió su educación y trabaja en los Estados Unidos. Obtuvo su grado en 1963 en el Manhattan College y su doctorado en la Universidad de Illinois en 1968. Actualmente es Profesor de Ingeniería Civil y de Historia en la Universidad de Duke. Su actividad de investigación se enfoca en áreas de la teoría del diseño y análisis de fallas y aspectos históricos de la ingeniería. Es autor de varios libros, entre ellos “To engineer is human: The role of failure in successful design” (1985), “The pencil: A history of design and circumstance” (1990), “Design paradigms: Case histories of error and judgment in engineering” (1994). En particular, se analizará aquí este último trabajo.

Aquí trataremos sus ideas que tratan de explicar causas de muchos accidentes que se han producido a lo largo de la historia. Este autor llama la atención sobre la forma en que repetitivamente se producen accidentes que podrían haber sido evitados si se hubiera generado, dentro de los participantes en el proceso de diseño, un juicio basado en la razón y en el estudio exhaustivo de otros casos de fallas conocidas.

Dentro del núcleo firme de la teoría de Petroski encontramos los siguientes postulados:

- **Postulado de recurrencia:** Las causas de fallas se deben a errores de diseño según patrones que se dan en la historia de la ingeniería de manera recurrente.

La idea general es que los accidentes se producen debido a errores en el proceso de diseño. Este punto de vista es bastante generalizado en la ingeniería civil. Por ejemplo, otros autores escriben: “las causas de las fallas han permanecido bastante consistentes: error humano. La gente parece estar haciendo las mismas equivocaciones que han hecho por décadas...” (Corley y Davis 2001).

En esta teoría el error humano más importante se introduce dentro del proceso de diseño en cualquiera de sus etapas y es el causante de los accidentes. Petroski (1994, pp.8) considera que “el elemento humano incrementa claramente las tasas de falla y por consiguiente reduce la fiabilidad de los artefactos y sistemas diseñados comparado con las predicciones analíticas que obviamente ignoran o subestiman el elemento humano en el diseño”.

- **Postulado de ejemplos paradigmáticos:** Los patrones de errores se pueden extraer de estudios de casos, mediante la identificación de ejemplos paradigmáticos o paradigma <sup>4</sup>.

Los casos de estudio histórico o paradigma son aquellos que contienen una gran cantidad de información y sabiduría sobre la naturaleza del diseño y el método ingenieril. En las propias palabras de Petroski (1994, pp.7): “Los casos de estudio clásicos e históricos tienen además la ventaja de que están arraigados en un contexto cerrado y más o menos estático, y pueden ser considerados como ejemplos virtualmente atemporales e invariables”. Como

---

<sup>4</sup> El término paradigma en Petroski (1994) significa ejemplo paradigmático, del cual se pueden aprender lecciones, a diferencia de paradigma en Kuhn (1970) que se refiere al consenso entre científicos con respecto a una teoría.

se menciona anteriormente, el autor utiliza muchos casos para reflejar cada uno de los paradigmas que se encuentran en el núcleo. De hecho, de esos ejemplos es que se deriva esta teoría. Los casos históricos de fallas y las estrategias para evitarlas, proveen una fuente fundamental de información sobre el diseño. Generalmente esta fuente no ha sido explotada más que en una manera *ad hoc*.

En el cinturón protector a este núcleo tenemos las reglas<sup>5</sup>, definiciones y ejemplos reales que dan sustancia al núcleo. El trabajo de Petroski está presentado como un conjunto de reglas para que diseñadores e ingenieros no cometan errores que ya han sido anteriormente cometidos por otros. Un listado de las principales reglas puede resumirse así:

- El hecho de mejorar las fallas en un diseño conocido a través de otro diseño, no lleva en si mismo directamente a un diseño superior.
- No se pueden usar sólo parámetros geométricos para pasar de un diseño a otro de mayor escala.
- Al modificar algunas condiciones en un problema, con la intención de mejorar su solución, pueden alterarse otros elementos que producen un contraefecto, de manera que se empeora dicha situación.
- Ninguna hipótesis puede ser probada de manera incontrovertible, sin importar cuántos diseños exitosos puedan haberse derivado de ella, ya que solamente una falla es suficiente para proveer un contraejemplo a dicha hipótesis.
- Todos los diseños se realizan en un estado de relativa ignorancia del comportamiento completo del sistema diseñado.
- La visión estrecha (o enfoque encasillado) impide a los diseñadores considerar las fallas tan cuidadosamente en los límites del diseño principal como dentro del mismo.
- El exceso de confianza que genera el éxito prolongado de un diseño es contraproducente, ya que relaja los estándares de seguridad en los diseñadores.

Dentro de la heurística positiva, encontramos la idea de que debemos usar concretamente los paradigmas existentes en el núcleo para explicar porqué se ha producido un accidente particular, buscando de encasillar dicho accidente específico en alguno de los enunciados enumerados en el núcleo.

Evidentemente, se pueden observar muchos aspectos de esta teoría, especialmente porque no surge como una teoría sino como un conjunto de reglas que varían con el tiempo y con las experiencias establecidas. El cinturón no es completo y definido, ya que es posible agregar nuevos paradigmas de casos históricos. Como teoría, no es susceptible de ser falsada en el sentido de Popper (1969), ya que si cualquiera de estas reglas fallara, se la quitaría sin generar grandes perjuicios al núcleo.

### Teoría de Accidentes de Dörner

El Prof. Dietrich Dörner trabaja en el área de psicología cognitiva en la Universidad de Bamberg en Alemania. Nació en 1938 en Berlín, realizó sus estudios de grado en el área de psicología en 1961-65, y recibió su doctorado en 1969. En 1989 publicó su libro “La lógica de la falla”, en el cual expone sus principales ideas con respecto a la causa de los accidentes y fallas en general (Dörner 1989).

Como núcleo central de esta teoría, pueden identificarse los siguientes postulados:

- Postulado de complejidad.** Los accidentes se dan en sistemas complejos. Considera complejos aquellos sistemas que presentan las siguientes características: (a) se trata de problemas que involucran sistemas complejos debido a la presencia de muchas variables interrelacionadas. (b) Dinámica interna: los sistemas funcionan por sí mismos, sin necesidad de estímulos externos. (c) Intransparencia: las características completas del sistema no pueden ser vistas claramente.
- Postulado de inteligencia operativa.** Las causas de los accidentes radican en el proceso racional de la toma de decisiones por parte de los agentes que controlan el funcionamiento del sistema. Es decir, en la “inteligencia operativa” que controla el proceso de toma de decisiones.

Otros autores también enfatizan el rol del error humano, como Kletz (1991).

En cuanto al cinturón protector de la teoría, los experimentos iniciales en la parte introductoria del libro muestran que las personas que toman decisiones generalmente actúan siguiendo patrones característicos negativos:

- Actúan sin previo análisis de la situación.
- Fallan en anticipar efectos secundarios.

---

<sup>5</sup> La epistemología está más acostumbrada a considerar teorías formadas por hipótesis o postulados, pero no a sistemas de reglas. Sin embargo, gran parte de la matematización computacional de bases de conocimiento se realizan en la actualidad mediante sistemas de reglas, como en sistemas expertos.

- ❑ Asumen como correctas sus decisiones basándose en la ausencia de efectos negativos inmediatos.
- ❑ Dejan que la “sobre-involucración” en proyectos los distraigan de necesidades emergentes.
- ❑ Son proclives a reacciones cónicas.

Mediante experimentos subsiguientes, el autor describe las características que atribuye al esquema de razonamiento que conduce a accidentes:

- ❑ Poca estabilidad (o mucha innovación) en las decisiones.
- ❑ Cambio de foco y pérdida de la capacidad de profundizar en el problema.
- ❑ Culpar de los fracasos a otras personas.
- ❑ Incapacidad de lidiar con sistemas dinámicos: No se estudia el efecto de las decisiones anteriores. Se trata con la situación y no con el proceso. Falta de consideración de efectos secundarios. Tendencia a pensar en términos de relaciones causa-efecto aisladas.
- ❑ No se elaboran hipótesis, sino “verdades”. Tendencia a confiar en la experiencia, en lugar de analizar.
- ❑ Violación de “normas de seguridad” por excesiva auto-confianza.
- ❑ Dificultad en la evaluación de procesos que se desarrollan temporalmente en forma no lineal.

La heurística de la teoría incluye (a) experimentos computacionales llevados a cabo mediante la modelación de sistemas complejos con herramientas computacionales o casos históricos y participantes, cuya función es interactuar con los sistemas modelados en la toma de decisiones. (b) Estudiar las estructuras de razonamiento utilizadas por las personas participantes de los experimentos. (c) En base a la bondad de la respuesta obtenida por los diferentes participantes, clasificarlos en exitosos y fracasados. (d) Postular los esquemas de razonamiento de los participantes exitosos como guías para la toma de decisiones para las demandas en cuestión.

Para analizar un caso histórico, a fines de determinar la causa de un accidente, el autor propone el siguiente procedimiento: (a) Recopilar la sucesión de los acontecimientos relacionados con las decisiones tomadas por las personas que interactuaban con el sistema y sus efectos en el mismo. (b) Identificar, desde un punto de vista sistémico, las interrelaciones, variables críticas y de control presentes en el sistema. Comprender las interacciones que llevaron a la falla del sistema y produjeron el accidente. (c) En base a las conclusiones obtenidas (identificadas en el cinturón protector de la teoría), identificar aquellos esquemas de razonamiento utilizados por los controladores del sistema, que el autor propone como causales de fallas. (d) Reconstruir los hechos en base a las conjeturas elaboradas en los pasos anteriores.

## DISCUSIÓN

Las teorías presentadas buscan generar un marco de referencia para explicar accidentes ocurridos, es decir a través del análisis de casos documentados se intenta comprender que fue lo que condujo a producir un evento en los sistemas. Estas teorías rescatan diferentes aspectos en el proceso de explicación otorgando distinta importancia a un mismo hecho, como por ejemplo el rol del error humano en la generación o proceso del accidente. Las principales diferencias y similitudes entre estas teorías serán remarcadas mediante un análisis de sus aspectos fundamentales que han sido planteados como núcleo central en cada teoría.

Las teorías presentadas por Dörner y Perrow consideran la complejidad del sistema como un elemento central en la explicación de “porqué se producen los accidentes”. Ambos concluyen que los accidentes se producen en sistemas complejos con interacción entre variables. Sin embargo, ambas teorías presentan una diferencia al establecer el origen del accidente: Perrow considera la complejidad misma del sistema, mientras que Dörner considera que la causa está instalada en el proceso de toma de decisiones de quienes manejan el sistema en sus distintas etapas.

Para caracterizar la complejidad de los sistemas, ambos autores presentan propuestas con elementos comunes (como interrelación entre variables, procesos dinámicos, visión general del proceso poco clara), aunque plantean aspectos diferentes para su análisis. Dörner propone analizar y modelar los sistemas mediante elementos de la teoría de sistemas definiendo diferentes tipos de variables, retroalimentación positiva y negativa, es decir, tratando de definir los llamados sistemas complejos. Perrow utiliza dos aspectos del sistema para caracterizar aquellos que son propensos a accidentes: “la complejidad interactiva” y “el fuerte acoplamiento”, indicando como tales su tendencia a interacciones imprevistas entre fallas y el hecho que los procesos suceden muy rápido y no permiten retroceder.

La teoría propuesta por Petroski otorga una importancia relevante al error humano en la generación de accidentes, pero sólo aquellos introducidos en la etapa de diseño. Establece como causa principal de un accidente el error de diseño y la forma en que éste se incorpora al sistema. Analizando las ideas generales planteadas en el núcleo central, se observa que todas apuntan a alertar a los diseñadores de sistemas acerca de posibles elementos o consideraciones generadoras de fallas sobre la base de un análisis de casos históricos.

Este punto de vista es común con las ideas de Dörner en cuanto a la consideración del error humano como aspecto importante a evaluar. Sin embargo, Dörner realiza un análisis más detallado del proceso de toma de decisiones de los agentes involucrados en las distintas etapas de evolución de un sistema, permitiendo explicar también la ocurrencia de accidentes en procesos dinámicos. Esto tiene su origen en que considera en los agentes aspectos tales como la estabilidad en las decisiones, capacidad de profundizar el problema, capacidad para analizar la evolución temporal del sistema; es decir lo que identifica como la inteligencia operativa en la toma de decisiones. Petroski no provee una explicación para accidentes que se producen en sistemas dinámicos, con procesos que evolucionan en el tiempo.

El rol del error humano es abordado por Perrow de manera diferente, ya que analiza la complejidad del sistema como factor fundamental en la producción del accidente. En este sentido Perrow plantea que “los accidentes pueden ser el resultado de fallas múltiples en los siguientes componentes: diseño, equipamiento, procedimiento, operarios, suministro y materiales, y medio ambiente. Los accidentes normales en sistemas de alto riesgo generalmente quieren decir que las interacciones entre fallas son no solamente inesperadas sino incomprensibles en algún período crítico de tiempo” (Perrow 1984, pp.8-9). A pesar que un 60 a 80 % de los reportes de accidentes atribuyen como causa al “error de operario”, Perrow sostiene que la interacción entre pequeñas fallas lleva a los operarios a construir un mundo totalmente erróneo en sus mentes, ya que son confrontados a interacciones inesperadas entre fallas. Es decir, antes del accidente no se conocía lo que estaba ocurriendo y que debería hacerse. En este sentido concluye que el error humano es comprensible debido al desconocimiento que se tiene del proceso, la poca claridad de los indicadores de la evolución del mismo generada por las múltiples interacciones no esperadas y su rápida evolución en el tiempo (complejidad - acoplamiento). Los aspectos analizados se resumen en la Tabla 1.

En alguna de las teorías se enfatiza el papel desempeñado por las acciones erróneas de operadores del sistema. Johnson (1999) reconoce que la complejidad en el manejo del proceso aumenta cuando hay equipos de operadores que trabajan de manera concurrente, interactuando entre si. Los problemas tienen que ver con la interacción entre operario y equipamiento y con la comunicación entre operarios o personal. Tales interacciones también ocurren en etapas de diseño, especialmente en proyectos que requieren alrededor de cientos de miles de horas de ingeniero durante el diseño.

	<b>Perrow</b>	<b>Dörner</b>	<b>Petroski</b>
<b>Causa del accidente</b>	Complejidad del sistema.	Proceso racional de toma de decisiones de los agentes involucrados.	Error humano.
<b>Complejidad del sistema</b>	Interacción entre fallas fuera de una secuencia esperada.	Muchas variables interrelacionadas. Teoría de sistemas	No lo considera.
<b>Relevancia del error humano</b>	Secundaria. En la etapa de diseño y operación.	Fundamental en las distintas etapas de evolución del sistema.	Fundamental en etapa de diseño (en el amplio sentido del concepto).

**Tabla 1: Comparación de teorías de accidentes.**

## **ESTUDIO DE UN CASO: EL ACCIDENTE DE CHERNOBYL**

Para ilustrar de que manera estas teorías enfocan el análisis de un accidente, consideraremos en esta sección el muy conocido accidente de Chernobyl (Ucrania) de 1986 (ver, por ejemplo, Poyarkov *et al.* 1999). El 26 de Abril de 1986, el Reactor 4 de la planta de energía nuclear de Chernobyl explotó, destruyendo el techo. Esta explosión causó destrucción física, muerte directa e indirecta y una contaminación ambiental de proporciones gigantescas en la zona, en los territorios vecinos y toda Europa. Este accidente intensificó las discusiones sobre los pro y las contras de la tecnología nuclear en el mundo y generó controversias acerca de si este tipo de accidente podría ocurrir nuevamente en esa o en otra industria (OECD 1995).

### **Los principales acontecimientos relevantes a la falla**

La reactividad del núcleo del reactor era controlada por 211 barras de control. Para disminuir la reactividad, se insertaban más barras, mientras que para aumentarla, éstas eran retiradas. Como medida de seguridad, debía haber al menos 15 barras insertadas en el núcleo en todo momento. El núcleo del reactor consistía en 1800 toneladas de bloques de grafito. A través del núcleo de grafito pasaban cientos de canales, por los cuales circulaban barras de combustibles nucleares que producen calor y agua que lo absorbe a fines de enfriar el núcleo y, de esta manera,



disminuir la reactividad. Si el calor no fuera absorbido, la temperatura en el núcleo ascendería vertiginosamente y causaría una explosión o un escape nuclear, llamado “derretimiento”.

El agua, al absorber calor, se transforma en vapor. Este vapor era conducido hacia turbinas mediante tuberías para generar electricidad. Luego de pasar por las turbinas, el vapor volvía al estado líquido y el ciclo comenzaba nuevamente. Mientras el sistema se mantenía cerrado, la radiación era contenida. Como medida de seguridad, existía un sistema de enfriamiento de emergencia.

En la época del accidente, el reactor debía ser sometido a operaciones de mantenimiento. Antes de realizar el mantenimiento, los ingenieros a cargo deseaban realizar un experimento a fines de mejorar el sistema de seguridad y se planeaba completar los experimentos antes de los feriados de mayo. De esta manera, los ingenieros comenzaron a disminuir la potencia del reactor el viernes 25 de abril a la 1:00 p.m.<sup>6</sup>, con la intención de llegar al 25% de la capacidad total: la intención era realizar los experimentos en este nivel de operación. Una hora después, a las 2:00 p.m., el sistema de enfriamiento de emergencia fue cerrado. Esto se realizó para evitar que este sistema se active mientras se realizaba el experimento. Por otra parte, a esa misma hora, los proveedores en Kiev requirieron que el reactor no fuese desconectado de la red, ya que estaban enfrentando una demanda de energía inesperada. No fue sino hasta las 11:00 p.m. de ese día que el reactor fue finalmente desconectado de la red. Los ingenieros, entonces, comenzaron a bajar la capacidad al 25% para realizar los experimentos.

Sin embargo, en vez de disminuir la capacidad hasta el 25%, ésta disminuyó al 1% en la primera hora del sábado (12:30 a.m.). El operador había desconectado los controles automáticos y, utilizando los controles manuales, había intentado llegar al 25%. Dado que el operador no tuvo en cuenta el comportamiento amortiguado del sistema, la capacidad disminuyó al 1%.

La operación del reactor de Chernobyl en este nivel es peligrosa, ya que se vuelve inestable. Pueden ocurrir pequeñas irregularidades en la fisión nuclear y quemaduras locales de reactividad, y éstas pueden llevar a un repentino comienzo de fisión a lo largo del reactor. Los operadores estaban al tanto de estos peligros y por eso estaba terminantemente prohibido disminuir la capacidad del reactor por debajo del 20%.

Los operadores, al notar esta caída brusca, se concentraron en aumentar la capacidad del reactor para alejarse de la zona inestable. Luego de media hora habían logrado una capacidad del 7%, pero a costo de retirar un gran número de barras de control del núcleo. Sin embargo, a pesar de que el reactor se encontraba en una zona inestable, se decidió seguir adelante con el experimento. Luego de esto, el proceso no podría ser interrumpido.

A las 1:03 a.m., inmediatamente después de que el reactor se encontraba en un 7% de capacidad, los operadores encendieron las dos últimas bombas de acuerdo con el programa del experimento. De esta manera, las ocho bombas del sistema de circulación primario se encontraban en operación, produciendo un mayor flujo de agua y, consecuentemente, mayor enfriamiento. Este enfriamiento adicional causó que un mecanismo automático retirara una gran cantidad de barras de control, las cuales controlan el ritmo de fisión en el reactor. Otra consecuencia de encender las ocho bombas fue que la presión del vapor disminuyó debido a que el agua circulaba a mayor velocidad, no permitiendo un calentamiento eficiente de la misma. Dado que era necesario contar con la turbina de vapor para el experimento, los operarios triplicaron el flujo de agua. Esto produjo una disminución aún mayor de la presión del vapor; adicionalmente, la reactividad en el núcleo se vio disminuida. Los operarios respondieron a esto retirando aún más barras de control.

A la 1:22 a.m., satisfecho con el nivel de vapor, el capataz redujo abruptamente el flujo de agua. El agua que llegaba al núcleo iba a calentarse más, incrementando de esta manera la producción de vapor y la reactividad. El capataz luego requirió un informe sobre el número de barras de control en el reactor. El informe indicaba que sólo quedaban activas de seis a ocho barras restantes, una cantidad mucho menor que la requerida por el estándar de seguridad. Sin embargo, el capataz decidió seguir adelante con el experimento. Para propósitos prácticos, manejaban ahora un reactor “sin frenos”.

A la 1:23 p.m., como paso necesario para el experimento, los operarios cerraron uno de los conductos de vapor que llegaba a una de las turbinas. La consecuencia fue que la presión de vapor y la reactividad se vieron incrementadas. Un minuto después, habiendo notado el peligro, los operarios intentaron un frenado de emergencia intentando introducir barras de control en el reactor. Esto no fue posible, ya que debido al calor, los tubos en los cuales las barras debían insertarse estaban deformados.

En ese momento ocurrieron dos explosiones, levantando el blindaje de la parte superior del núcleo. Fragmentos de combustible y grafito en llamas fueron lanzados hacia fuera, cayendo sobre el techo de turbinas adyacentes, causando varios incendios. Para las 5:00 a.m., los bomberos habían apagado la mayoría de los incendios, con un terrible costo en vidas por la sobre-exposición a la radiación.

Luego de fracasar en su intento de inundar el núcleo, los responsables de la facilidad decidieron cubrirla con materiales absorbentes de neutrones y rayos gamma (plomo, sustancias boradas, arena, arcilla, dolomita). También se excavó un túnel por debajo de la central para introducir un piso de hormigón y evitar la contaminación de las napas de agua subterránea. Así consiguieron que cesaran las grandes emisiones de material radiactivo. El reactor

---

<sup>6</sup> En esta narración se incluyen las horas a fin de enfatizar la velocidad a la que ocurrieron los eventos.

fue finalmente recubierto con un "sarcófago" de hormigón, a fin de proveer un blindaje suficiente como para trabajar en los alrededores. Para evacuar el calor residual, se instalaron ventiladores y filtros. La consecuencia inmediata del accidente fue la muerte de 31 personas del personal de la planta (dos por la explosión y 29 a causa de la radiación). Muchas hectáreas de campo quedaron inutilizadas por la deposición de material radiactivo. Teniendo en cuenta las dosis recibidas por los 135,000 habitantes de los alrededores, las tasas de aumento de muerte por cáncer en el área aumentaron significativamente.

### **Enfoque de estudio según la teoría de Perrow**

De acuerdo al análisis realizado en el marco de la teoría de Perrow, las plantas nucleares son sistemas altamente complejos y fuertemente acoplados, propensos a generar accidentes con posibles consecuencias catastróficas. En la edición de 1984 Perrow realiza un análisis detallado del accidente ocurrido en la planta nuclear de Three Mile Island en Estados Unidos (Toth 1986, Williams y Maccormick 1981) y se pregunta porqué no han ocurrido mas accidentes de esas características? La misma pregunta fue planteada antes por Walker y Sibly (1976) para plataformas costa afuera. Según Perrow, "la respuesta a esa pregunta podría ser que se ha trabajado sobre el sistema de seguridad limitando la causa de accidentes. Pero una respuesta más adecuada y menos tranquilizadora es que simplemente no hemos dado al sistema de energía nuclear razonable cantidad de tiempo para mostrar su potencia pp.32". También plantea que la Unión Soviética no construía en sus primeras plantas nucleares edificios contenedores rodeando el reactor nuclear, un elemento de seguridad importante que evita o disminuye escapes de radioactividad. Además Perrow previene que si un accidente similar al de Three Mile Island ocurriera allí los operarios estarían potencialmente expuestos a dosis letales y se irradiaría a una gran población. Esto fue precisamente lo que ocurrió en 1986 en la planta nuclear de Chernobyl.

En la descripción anterior del accidente se puede observar que en sistemas altamente complejos se pueden generar accidentes catastróficos aún manejados por personal experto con intenciones de mejorar la seguridad en base a un procedimiento que ya había sido realizado en otro reactor de la misma planta.

Esta planta nuclear contaba con una serie de errores en el diseño, como no tener previsto la demora en el inicio de operación del generador diesel de emergencia, no tener enclavamiento en el mecanismo de barras de control del núcleo (que originaron que las fallas interactuaran) sumado a una serie de errores en la toma de decisiones de quienes operaban el sistema y que lo llevaron al colapso.

Como se puede advertir de la secuencia narrada, todo el proceso fue muy rápido y no permitió adoptar decisiones adecuadas. En este caso, precauciones típicas agregaron complejidad al sistema, creando un accidente. Perrow menciona: "Otra vez tenemos una lección en el significado de las advertencias y en la dificultad que aún los expertos tienen en entender un sistema complejo hecho por el hombre como es una planta nuclear" (Perrow 1984, pp.29).

### **Enfoque de estudio según la teoría de Petroski**

En la literatura de este autor no se encuentra una mención directa al caso del accidente de la planta nuclear de Chernobyl, el cual, aunque encuadra en lo que sería uno de sus casos de estudio histórico, no encuadra en el interés de su estudio.

Así en la teoría de Petroski uno estaría inclinado a afirmar que la falla fue producto del error humano en alguna de las etapas de diseño. Recordemos que para este autor el concepto de diseño es bastante amplio, ya que va desde la concepción de la idea a la operación de dicho sistema, pasando por la ejecución del mismo.

En particular, se detecta que se ha producido un gran error en la etapa de diseño propiamente dicha, ya que no se tuvo en cuenta que pudiera ocurrir una explosión nuclear. Esto queda manifestado explícitamente en el hecho que no se construyó sobre los reactores un elemento estructural, como la cáscara de contención que es típica en otras plantas nucleares. Evidentemente una cáscara no evita una explosión nuclear pero sí evita que se expanda la radiación a cientos de Km. del lugar del accidente.

Por otro lado, el accidente en sí, fue provocado debido a la realización de un experimento manipulado por seres humanos, y el error que produjo su participación e interacción con el sistema condujo a la catástrofe ya conocida. Por lo tanto, como puede apreciarse, hubieron fundamentalmente dos errores, uno de diseño propiamente dicho y otro de operación. De modo que en esta teoría se pondría énfasis en que dos errores relacionados con el factor humano fueron los que llevaron al desastre de Chernobyl.

### **Enfoque de estudio según la teoría de Dörner**

El desastre de Chernobyl, a la luz de la teoría de Dörner, se interpreta exclusivamente como un error humano. El sistema en cuestión (esto es, la planta nuclear) es un sistema dinámico controlado por operarios que toman

decisiones sobre el curso del mismo. Esto es un punto de partida básico consistente con los sistemas contemplados por la teoría de Dörner.

Diversas afirmaciones de dicha teoría son directamente aplicables al caso en estudio. A continuación se detallan algunas de las principales interpretaciones de este accidente según la teoría de Dörner.

- ❑ Hubo dificultad en la evaluación de procesos no lineales en el tiempo. Cuando se intentó disminuir la capacidad del reactor al 25% para realizar los experimentos, el operador no tuvo en cuenta el comportamiento amortiguado del sistema. Esto es, la respuesta del sistema está desfasada con respecto a los estímulos externos. Dado que las personas, generalmente, tienden a operar en secuencias de tiempo lineales, el resultado es que se logra un resultado bastante alejado del deseado. En este caso, el operario disminuyó la capacidad al 1%, en vez de lograr su objetivo de 25%.
- ❑ Falta de consideración de efectos de decisiones anteriores. Al aumentar el caudal de agua en las bombas se ignoró el hecho de que esto produciría una menor presión de vapor. Este efecto había sido anteriormente observado al encender las ocho bombas de circulación.
- ❑ Se lidia con la situación y no con el proceso. Al reducirse la presión de vapor y consecuentemente la reactividad, se retiraron más barras de control. No se consideró que esta decisión iba a producir problemas en las próximas etapas del proceso.
- ❑ Violación de normas de seguridad. Esto se puede notar claramente en que el experimento fue llevado a cabo mientras el reactor funcionaba con una cantidad de barras de control notablemente inferior a las requeridas por los estándares de seguridad. Puede interpretarse que esto fue así debido a la excesiva autoconfianza del grupo de controladores del sistema, el cual estaba formado por profesionales altamente calificados, con mucho más experiencia y conocimiento que las personas que redactaron las normas de seguridad.
- ❑ Falta de consideración de efectos secundarios. Al cerrar uno de los conductos de vapor, como paso necesario para el experimento, la presión de vapor y la reactividad se vieron incrementadas. Esto ocasionó un peligro inminente, seguido por la explosión del reactor.

## CONCLUSIONES

Las teorías presentadas intentan decodificar las señales que se recogen de las catástrofes con el propósito de identificar las posibles causas de accidentes, mejorar la capacidad de los sistemas, rediseñarlos e intentar regularlos. Las tres teorías analizadas son en algunos aspectos complementarias y ninguna es completa respecto al conjunto de parámetros que utiliza para caracterizar la falla.

Estas teorías son adecuadas y útiles para caracterizar diferentes sistemas y alertar sobre posibles causas de accidentes a pesar que consideren distintos aspectos como relevantes. De la revisión realizada se concluye que ninguna de las tres teorías analizadas es eminentemente predictiva, sino que en general son explicativas y prescriptivas. Esto no es una limitación demasiado severa, debido a que muchas teorías exitosas en ciencia no son predictivas. No hay aún una teoría general que contemple en sí misma todos los aspectos considerados en cada una de las teorías analizadas.

El factor humano debe ser enfocado para no caer en tautologías. Las facilidades industriales mencionadas pertenecen al universo de lo artificial, creado por seres humanos con alguna finalidad, de manera que son diseñados, construidos y operados por seres humanos. Cualquier accidente puede ser relacionado con alguna de esas etapas y encontrar en donde se produjo la carencia o falta de previsión. De modo que siempre puede señalarse el factor humano como responsable del accidente. Sin embargo, tal explicación circular no serviría demasiado para entender a los sistemas mismos que han fallado, sino que sería de utilidad en una corte de justicia que intenta delimitar responsabilidades.

Pero desde el punto de vista de la ingeniería resulta más productivo concentrar el estudio en el sistema mismo con el fin de aprender lecciones más que castigar a responsables. En ese caso las teorías deberían poner el acento en los factores de diseño que hacen que la facilidad trabaje de la manera que se intenta. En este sentido, la teoría de Perrow aparece como la única en concentrar su análisis en el sistema, e identifica dos factores: complejidad e interacción.

En los ejemplos de Perrow, ambos factores se refieren a procesos (por ejemplo industriales), pero el mismo enfoque puede adoptarse para estudiar los objetos, específicamente las estructuras o sus elementos componentes. Así, una viga con carga lateral presenta modos simples de falla y que no interactúan, en contraposición a un cilindro con carga axial en el cual aparecen múltiples modos de inestabilidad e interacción entre ellos.

Entendemos que el enfoque de Perrow podría ser complementado con un postulado adicional sobre redundancia como el que sigue:

**Postulado de redundancia.** Los mecanismos de redundancia en sistemas de alto riesgo aumentan la complejidad pero disminuyen el riesgo de falla.

En muchos accidentes la falta de redundancia en un sistema ha contribuido a hacer que un incidente llegue a proporciones de supercatástrofes (como las define Lancaster, 1999). Por ejemplo, en el colapso de la plataforma Alex Kielland en el mar del Norte, el diseño francés consistía en un arreglo pentagonal no simétrico, en el cual la falla de uno de los miembros tubulares no estaba compensada por mecanismos resistentes alternativos que permitieran operar aun en condiciones de falla parcial. Por el contrario, la falla de un miembro tubular condujo a la pérdida de una de las patas y al vuelco de la plataforma. El edificio del reactor de Chernobyl tampoco tenía sistemas redundantes de aislamiento del ambiente, que si están presentes en otros diseños mediante una estructura de contención primaria (metálica) y otra secundaria (de hormigón pretensado). El tópico de falta de redundancia aparece también en el colapso del edificio de Ronan Point en Londres (Griffiths *et al.* 1968), en el que una explosión en la cocina de uno de los apartamentos produjo el colapso tipo castillo de naipes de toda la construcción.

Los sistemas redundantes sin duda agregan complejidad al sistema al introducir nuevos elementos interactuantes, pero pueden reducir el acoplamiento catastrófico de modos de falla.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de una investigación apoyada por la agencia FEMA (Federal Emergency Management Administration) mediante un subsidio PR-0060-A, y por NSF (National Science Foundation) mediante un subsidio CMS-9907440, ambas de Estados Unidos. También fue apoyado por la Universidad Nacional del Comahue en Argentina.

## REFERENCIAS

- Anónimo (1981). The Alexander Kielland Accident, Norwegian Public Reports, 11, Noviembre.
- Blockley, D. (Ed.) (1992). *Engineering Safety*, McGraw-Hill International, London.
- Chalmers, A. (1999). *What is this Thing Called Science?*, Tercera edición, University of Queensland Press. Traducido al español como *Qué es esa Cosa Llamada Ciencia?*, Siglo Veintiuno, Madrid, 2000.
- CEGB (1966). *Report of the Committee of Inquiry into the Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge, Monday 1 November 1965*, Central Electricity Generating Board, London.
- Corley, W. G. y Davies, A. G. (2001). "Forensic engineering moves forward", *ASCE Civil Engineering*, Junio, pp. 64-65.
- Dermenjian, A. A. (Ed.) (1996). *Pressure Vessels and Piping Design Analysis and Severe Accidents*, ASME Press New York.
- Dörner, D. (1989). *The Logic of Failure*, Perseus Books.
- Ferry, T. S. (Ed.) (1984). *Readings in Accident Investigation: Examples of the Scope, Depth and Sources*, Charles C Thomas Publisher.
- Godoy, L. A. y Lopez-Bobonis, S. J. (2001) "On the collapse of a reinforced concrete digester tank", en: *Thin Walled Structures: Advances and Developments*, Elsevier, Oxford, pp. 669-676.
- Griffiths, H., Pugsley, A. y Saunders, O. (1968). *Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Canning Town*, Minister of Housing and Local Government, HMSO, Londres.
- Hendley, V. (1998). "The importance of failure", *ASEE Prism*, pp. 19-23.
- Johnson, C. (1999). "Why human error analysis fails to help system development", *Journal Interacting with Computers*, 11(5), pp. 517-524.
- Kletz, T. A. (1991) *Engineers View of Human Error*, Gulf Publishing.
- Kletz, T. A. (1998). *What went wrong?: Case histories of process plant disasters*, Butterworth-Heinemann.
- Lakatos, I. (1982). *La Metodología de los Programas de Investigación Científica*, Alianza Editorial, Madrid.
- Lancaster, J. (2000). *Engineering Catastrophes: Causes and Effects of Major Accidents*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kharbanda, O. P. y Stallworthy, E. A. (1988). *Safety in the Chemical Industry: Lessons from Major Disasters*, G P Publishing.
- Kuhn, T. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago University Press. Traducido al español como *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1971.
- OECD (Ed.) (1995). *Sarcophagus Safety, '94: The State of the Chernobyl Nuclear Power Plant*, Vol. 4, Organization for Economic Cooperation & Development.
- Perrow, C. (1984). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*, Princeton University Press.
- Petroski, H. (1994). *Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgment in Engineering*, Cambridge University Press.
- Popper, K. (1969). *Conjectures and Refutations*, Routledge and Kegan Paul, Londres.
- Poyarkov, V. *et al.* (Eds.) (1999). *The Chernobyl Accident: A Comprehensive Risk Assessment*, Battelle Press.

- Sibly, P. y Walker, A. C. (1977). "Structural accidents and their causes", *Proc. Inst. Civil Engineers (UK)*, vol. 62, pp. 191-208.
- Toth, L. M. *et al.* (Eds.) (1986). *The Three Mile Island Accident*, American Chemical Society.
- Voland, G. (1998). *Engineering by Design*, Addison-Wesley.
- Walker, A. C. y Sibly, P. (1976). "When will an oil platform fail?" *The New Scientist*, pp. 326-328.
- Williams, M. M. y McCormick, N. J. (Eds.) (1981). *Staff Reports to the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: Selected Reports from the Technical Assessment Task Force, the Public Health and Safety Task Force, the Office of the Chief Counsel*, Vol. 6, Elsevier.

