

# Consecuencias en las centrales nucleares españolas tras la colisión de un avión de pasajeros

Greenpeace España, (en colaboración con Oda Becker)  
Diciembre 2011

GREENPEACE

## Oda Becker

Nacida el 7 de julio de 1962 en Emden (Alemania), es física y trabaja como consultora científica independiente en seguridad nuclear. Entre sus clientes se encuentran el Gobierno Federal Austriaco, así como varias organizaciones no gubernamentales. Dispone de conocimientos y experiencia en importantes aspectos de la tecnología y la seguridad nuclear. Desde 2001 ha participado en estudios acerca de los riesgos de las centrales nucleares y de las instalaciones de almacenamiento, analizando escenarios de accidentes que podrían ser el resultado de posibles ataques terroristas (la colisión de un avión comercial grande y el impacto de armas antitanque). Sus trabajos más recientes incluyen un análisis de la situación en la central nuclear de Chernóbil, diversos estudios acerca de graves accidentes en centrales nucleares alemanas (centrándose en ataques terroristas e inundaciones) y un documento acerca de las "Pruebas de Esfuerzo" europeas tras el accidente de Fukushima.

## Greenpeace España

San Bernardo, 107, 1  
28015 Madrid  
T. 91 444 14 00 F. 91 187 44 56

[info@greenpeace.es](mailto:info@greenpeace.es)

www.greenpeace.es

## **Índice**

- 1.- Introducción
- 2.- Las centrales nucleares en España
- 3.- Objetivos y su vulnerabilidad
- 4.- Normas de protección para las centrales nucleares
- 5.- Efectos de la colisión de un avión contra una central nuclear
- 6.- Protección de las centrales nucleares
- 7.- Consecuencias de un ataque a una central nuclear
- 8.- Conclusiones para las centrales nucleares españolas
- 9.- Las contramedidas y sus límites
- 10.- Conclusiones
- 11.- Referencias bibliográficas

## 1 Introducción

### El proceso de las pruebas de resistencia (*stress test*)

El 25 de marzo de 2011, solo dos semanas después del grave accidente de la central nuclear de Fukushima (Japón), el Consejo Europeo indicaba en su documento de conclusiones<sup>1</sup> que *"debería revisarse la seguridad de todas las centrales nucleares de la Unión Europea sobre la base de una valoración de riesgos integral y transparente ("pruebas de esfuerzo"); el Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG) y la Comisión están invitados a desarrollar lo antes posible el ámbito y las modalidades de dichas pruebas bajo un marco de trabajo coordinado a la luz de las lecciones aprendidas en el accidente de Japón..."*. [ENSREG 2011]

El 6 de abril el Parlamento Europeo debatió con el Consejo y la Comisión las lecciones extraíbles de la crisis nuclear en Japón. En líneas generales, los eurodiputados se mostraron de acuerdo acerca de la necesidad de realizar las pruebas, y algunos grupos políticos fueron muy críticos con el carácter voluntario y el enfoque nacional de las mismas<sup>2</sup>. La Comisión Europea (CE) anunció que celebraría el 20 de abril una segunda reunión de alto nivel para avanzar en la concreción del calendario y el formato de las llamadas "pruebas de resistencia" a las centrales nucleares europeas<sup>3</sup>.

En España, el 12 de abril, se aprobó en el Pleno del Congreso de los Diputados, sin ningún voto en contra, la Proposición no de Ley del Grupo Parlamentario Socialista, sobre la seguridad de las centrales nucleares españolas (núm. expte.162/000828). En ella se estima que se contemple la resistencia de las nucleares españolas y su vulnerabilidad, entre otras cosas, a posibles ataques terroristas e informáticos, sabotajes e impactos de aeronaves<sup>4</sup>.

La Comisión Europea tenía previsto dar a conocer el 12 de mayo el contenido y alcance de los *stress test*, el grupo de trabajo del WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) llevaría su propuesta al Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG). Ese día los expertos de las 27 autoridades nacionales de seguridad nuclear se reunieron en Bruselas con el objetivo de cerrar un acuerdo. La Comisión Europea iba a presionar para que el factor humano de un atentado terrorista o el choque de un avión fuera tenido en cuenta en los exámenes, y para promover la "transparencia". La Comisión contaba con el respaldo de los jefes de Estado y de Gobierno de la UE<sup>5</sup>. La reunión concluyó sin lograr un acuerdo, por lo que las discusiones continuaron los días 19 y 20 de mayo, en Praga<sup>6</sup>. Después de esto, Gunter Oettinger, Comisario de Energía, tuvo que reconocer que los parámetros para realizar las pruebas de resistencia de las

<sup>1</sup> 25/3/2011 Nr: EUCO 10/11 <http://www.european-council.europa.eu/council-meetings/conclusions.aspx?lang=es>

<sup>2</sup> <http://www.europarl.europa.eu/es/headlines/content/20110324FCS16438/11/html/Apoyo-mayoritario-de-los-eurodiputados-a-los-test-de-estr%C3%A9s-a-centrales-nucleares>

<sup>3</sup> <http://www.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=765856>

<sup>4</sup> [http://www.congreso.es/portal/page/portal/Congreso/Congreso/SalaPrensa/NotPre?piref73\\_7706063\\_73\\_1337373\\_1337373.next\\_page=wc/detalleNotaSalaPrensa&idNotaSalaPrensa=3788&anyo=2011&mes=4&pagina=1&mostrarvolver=S&movil=null](http://www.congreso.es/portal/page/portal/Congreso/Congreso/SalaPrensa/NotPre?piref73_7706063_73_1337373_1337373.next_page=wc/detalleNotaSalaPrensa&idNotaSalaPrensa=3788&anyo=2011&mes=4&pagina=1&mostrarvolver=S&movil=null)

<sup>5</sup> <http://www.levante-emv.com/internacional/2011/05/11/bruselas-estudia-incluir-atentados-riesgos-nucleares/806167.html>

<sup>6</sup> <http://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-economia-energia-27-no-logran-acuerdo-definir-criterios-pruebas-resistencia-nuclear-20110512164757.html>

centrales nucleares europeas no estarían listos antes de junio.

Ante la falta de acuerdo, los países empezaron a actuar por su cuenta e iniciaron las inspecciones por separado. La clave de la discordia eran Alemania y Austria (país que tiene prohibidas las nucleares en su Constitución) que exigían que se incluyese también riesgos como la posibilidad de un atentado terrorista o de un accidente de avión, y los operadores decían carecer de competencias y conocimientos para evaluar el riesgo terrorista. Pero detrás de ello aún había más. Sarkozy necesitaba el aval de la seguridad, porque su industria nuclear es un asunto de Estado y quiere que sus centrales pasen las pruebas. Merkel necesitaba lo contrario para favorecer su giro en materia de política nuclear. Finalmente se perdía la ocasión de llegar a un acuerdo y quedaban pocas oportunidades para cumplir el mandato que el Consejo Europeo aprobó el 25 de marzo. Ese acuerdo preveía que las pruebas empezasen el 1 de junio y que antes de la cumbre de diciembre estarían listos los resultados<sup>7</sup>.

El 25 de mayo la Unión Europea anunció que la Comisión Europea y el ENSREG habían llegado a un acuerdo sobre los criterios aplicables y el modo en que se llevarían a cabo los *stress test*. A partir del 1 de junio de 2011, las 143 centrales nucleares de la UE se someterían todas ellas a una reevaluación, sobre la base de criterios definidos a escala de la UE. Se trata de pruebas exhaustivas que la Comisión ha pedido y que abarcan riesgos tanto naturales como de origen humano (es decir, los efectos de accidentes aéreos y de ataques terroristas). ¿Cuál había sido la clave del acuerdo? Todos los aspectos relacionados con la seguridad tratados hasta entonces, como las medidas de prevención de ataques terroristas, serían tratados por separado, tras conversaciones con los Estados miembros, teniendo en cuenta la necesidad de respetar la confidencialidad<sup>8</sup>.

Se decidió que esos *stress test* fueran un cuestionario para los operadores, en el caso de España para Endesa e Iberdrola, que comprobara el regulador, en el caso de España el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), y que revisara un equipo multinacional de siete personas.

El 28 de junio comenzó en Bruselas (Bélgica) la I Conferencia Reguladora de Seguridad Nuclear en Europa organizada por el ENSREG, y la presidenta del CSN, Carmen Martínez Ten, fue la encargada de confirmar que las autoridades reguladoras nucleares remitirán antes del 15 de septiembre "un informe preliminar" a la Comisión Europea sobre los "primeros resultados" de las pruebas de resistencia y su informe "completo" el 31 de octubre. Antes del 31 de diciembre, el organismo regulador enviaría su informe a la Comisión Europea.

Günther Oettinger, siempre crítico, ponía el acento en "la rapidez" con que se habían realizado los *stress test* en algunos países. La duda era saber si las pruebas realizadas en Reino Unido y Alemania son homologables. En Reino Unido todos los reactores superaron el examen, sin embargo en Alemania no lo hizo ninguna<sup>9 10</sup>.

Consecuentemente, para llevar a cabo dicha valoración de riesgos habrían sido necesarias unas pruebas de esfuerzo que partieran de la causa última que subyace

<sup>7</sup> <http://www.abc.es/20110523/sociedad/abcp-dudas-merkel-atascan-pruebas-20110523.html>

<sup>8</sup> <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/640&format=HTML&aged=0&language=ES&guiLanguage=en>

<sup>9</sup> <http://www.publico.es/ciencias/376855/siete-nucleares-alemanas-suspenden-en-seguridad>

<sup>10</sup> <http://www.europapress.es/epsocial/noticia-amp-martinez-ten-confirma-27-reguladores-enviaran-bruselas-resultados-preliminares-pruebas-15-20110628170956.html>

al accidente de Fukushima: los acontecimientos inesperados ocurren, acontecimientos que no se prevén al determinar el diseño y las medidas de seguridad de una central nuclear. Y es algo que se refiere tanto a fenómenos naturales como a riesgos causados por el ser humano.

Sin embargo, ENSREG redefinió el objetivo original: *“Hasta ahora hemos definido una “prueba de esfuerzo” como una valoración orientada a establecer los márgenes de seguridad de una central nuclear a la luz de los sucesos ocurridos en Fukushima: fenómenos naturales extremos que desafían las funciones de seguridad de la central y conducen a graves accidentes”*. [ENSREG 2011]

Este cambio, desde la “valoración de riesgos” a la “valoración orientada a establecer los márgenes de seguridad”, tiene como consecuencia que las “pruebas de esfuerzo” no revelarán todos los defectos de diseño existentes que son cruciales para la seguridad de las centrales. Por otra parte, un enfoque adecuado requeriría un periodo de tiempo mayor. El tiempo es un factor importante, ya que lo deseable hubiera sido reaccionar rápidamente al accidente de Fukushima y tomar medidas para incrementar la seguridad (mejorar o cerrar las centrales atómicas) sin demoras indebidas.

Un posible compromiso podría consistir en un planteamiento de dos fases. La segunda fase podría cubrir un ámbito más amplio e incluir otros sucesos desencadenantes. En concreto, la colisión deliberada de un avión tiene que estar entre las cuestiones de seguridad nuclear que se estudien. ENSREG considera este escenario en términos de seguridad física (protección física del emplazamiento) y, por lo tanto, alega no ser competente para incluirlo en las pruebas.<sup>11</sup>

En cambio, el catálogo de requisitos de Alemania para una inspección específica de la seguridad de sus centrales atómicas —teniendo en cuenta los sucesos en Fukushima— establecido por la Comisión de Seguridad de los Reactores nucleares alemanes (RSK, por sus siglas en alemán) ha incluido sucesos relacionados con actividades humanas, como la colisión de un avión [RSK 2011]. Centrada en el riesgo de un accidente de avión, la RSK ha dividido los reactores en tres grupos, de acuerdo con la edad y el diseño. Según la RSK, los siete reactores más antiguos de ninguna manera podrían soportar el choque de una aeronave. La RSK no tomó posición acerca de si esas unidades deberían cerrarse.

El Gobierno alemán afirmó que utilizaría el informe de la RSK y el de la Comisión Ética, creada específicamente para tomar las decisiones correspondientes a este proceso, para tomar una decisión sobre el uso continuado de la energía nuclear [NW 2011a]. La Comisión Ética ad hoc fue encargada de valorar los aspectos sociales y éticos de continuar o abandonar la energía atómica. Finalmente, tras el accidente de la central nuclear de Fukushima, el Gobierno alemán revertió su posición sobre la extensión de la vida útil de las centrales. El 8 de julio de 2011 la Cámara alta del Parlamento alemán, el Bundersrat, aprobó una ley para el abandono gradual de la energía nuclear. Este abandono gradual es parte un amplio paquete de medidas energéticas propuesto por el Gobierno. Dentro del plan de abandono progresivo, el 6 de agosto de 2011 se cerraron de forma permanente los siete reactores más antiguos, además de otro reactor que ha registrado múltiples fallos de funcionamiento. Está previsto que los nueve reactores que siguen en

---

<sup>11</sup> Sin embargo, ENSREG también propone establecer un proceso para abordar los riesgos debidos a amenazas sobre la seguridad que no son parte del mandato de ENSREG [ENSREG 2011a].

funcionamiento se cierren a finales del año 2022 [NW 2011b].<sup>12</sup>

El 31 de octubre de 2011 los partidos políticos belgas alcanzaron un acuerdo para la eliminación progresiva de la energía nuclear para el año 2025, condicionado a la consecución de un suministro de energía adecuado basado en fuentes alternativas. Está previsto que los tres reactores más antiguos, que comenzaron a operar comercialmente en 1975, se cierren en 2015, mientras que los otros cuatro se desengancharían de la red en el año 2025 [DW 2011].

**Hay que resaltar que las especificaciones de las pruebas de esfuerzo belgas incluyeron los ataques terroristas. Junto a Alemania y Bélgica, Holanda también ha considerado sucesos externos de origen humano, incluyendo en sus pruebas de resistencia la colisión de aviones.**

Se vuelve a plantear la cuestión de qué podría pasar realmente si un avión de pasajeros chocara contra una central nuclear, de nuevo, diez años después del ataque terrorista del 11 de septiembre. Las centrales nucleares se diseñaron teóricamente para soportar terremotos de cierta magnitud, huracanes y otros fenómenos extremos. Pero cuando se establecieron los requisitos de diseño de los reactores actuales no se analizaron ataques deliberados por parte de aeronaves comerciales cargadas de combustible, como los que impactaron en 2001 contra las torres del World Trade Center y el Pentágono en Estados Unidos (EE.UU.).

Salvo, parcialmente, las excepciones anteriormente citadas, hasta la fecha no se han llevado a cabo investigaciones detalladas y específicas de las centrales en relación a las posibles consecuencias de la colisión de un avión con una central atómica, o no se han dado a conocer al público. Los Gobiernos y autoridades de los países de la OCDE han acordado no publicar ninguna información, métodos o resultados detallados de las investigaciones relacionadas con los efectos del impacto deliberado de un avión —por el bien del éxito de las medidas internacionales para la prevención del terrorismo y para no ofrecer ninguna información que pudiera ser utilizada en la planificación de ataques terroristas [ÖKO 2007].

Por la misma razón, el presente informe discute los aspectos relacionados con la seguridad solo en términos generales. No se utilizará ninguna información ni datos específicos de las centrales que vayan más allá de la información accesible al público. Este informe no tiene como objetivo ofrecer descripciones detalladas de cadenas de sucesos, sino que, más bien, persigue valorar las posibles consecuencias de un impacto deliberado de un avión contra las plantas nucleares (españolas) partiendo de la información accesible al público. Para terminar, se discuten las posibles contramedidas y sus limitaciones.

**La situación de las pruebas de resistencia en España, tras la presentación del informe preliminar del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) muestra que ninguna de las centrales nucleares españolas lograría superarlas. Además, se incumple el mandato del Congreso de los Diputados.**

---

<sup>12</sup>De los reactores restantes, uno se cerraría a finales del año 2015, otro en 2017, otro más en 2019, tres en 2021 y otros tres en 2022.

## 2 Las centrales nucleares en España

Las ocho centrales atómicas que se encuentran en funcionamiento en España son reactores de agua ligera, es decir, reactores refrigerados y moderados por agua. Seis de ellas tienen reactores de agua a presión (PWR, en sus siglas en inglés), con dos circuitos de refrigeración entre el reactor y la turbina, conectados por generadores de vapor; las otras dos se sirven de reactores de agua en ebullición (BWR, en sus siglas en inglés), con un circuito de refrigeración entre el reactor y la turbina.

Las centrales nucleares en España que hoy están en fase operativa corresponden a tres diferentes generaciones respecto a sus líneas de diseño, teniendo en cuenta la clasificación española<sup>13</sup> [CNS 1998]:

### Primera generación

Son las centrales que se diseñaron en la década de los años 60 y cuya construcción se completó al final de dicha década o principios de la siguiente. Se llevaron a cabo revisiones sistemáticas de la seguridad de las centrales de primera generación para incluir los cambios que se habían dado en la normativa desde la entrada en funcionamiento de dichas centrales.<sup>14</sup>

La central de **Santa María de Garoña** (Burgos), con 40 años de funcionamiento comercial, es la única central en funcionamiento perteneciente a esa primera generación de centrales nucleares. El 14 de julio de 2011, la Audiencia Nacional confirmó la decisión que el Gobierno tomó en 2009, por la cual ordena el cese definitivo de la explotación de esta central atómica en julio de 2013, aunque el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) había dicho previamente que la unidad podía operar de modo seguro hasta el año 2019 [NW 2011].<sup>15</sup>

General Electric diseñó y fabricó este tipo de reactor estadounidense (BWR/3 con sistema de contención Mark 1), que también está en funcionamiento en Suiza (central nuclear de Muehleberg) y que se ha hecho "famoso" por el grave accidente en Fukushima Daichi (Japón) en marzo de 2011 (Garoña es idéntica a la unidad número 1 de esta central japonesa).

### Segunda generación

A ella pertenecen las centrales que se diseñaron a comienzos de los años 70 y cuya construcción se inició en aquel momento pensando que empezarían a funcionar al final de esa década. Los retrasos en la construcción de dichas centrales tuvieron como resultado que la primera central no empezó a funcionar comercialmente hasta 1981, y la última en 1984.

---

<sup>13</sup> La "tercera generación" de centrales atómicas españolas no significa lo mismo que la expresión internacional utilizada para el nuevo reactor de Generación III (por ejemplo, el EPR). Todas las centrales nucleares españolas pertenecen a la Generación II.

<sup>14</sup> Estas revisiones condujeron a mejoras en los sistemas de seguridad de la central nuclear de Garoña (diseñada y completada en el periodo 1983-1986).

<sup>15</sup> *Bajo la legislación española, los operadores de los reactores tienen que solicitar la renovación de su licencia cada 10 años. La central nuclear de Santa María de Garoña fue la primera central de energía atómica que recibió en España una licencia para operar por encima de 40 años (en concreto, 42 años, hasta julio de 2013).*

Las centrales de energía nuclear de segunda generación fueron diseñadas y construidas de acuerdo con la normativa española de aquellos momentos, con las directrices y estándares propuestos por las organizaciones internacionales y con las normas en vigor en el país de origen del diseño de la central. Este país de origen para todas las centrales de segunda generación es Estados Unidos.

Las centrales de esta segunda generación son **Almaraz 1 y 2** (Cáceres), **Ascó 1 y 2** (Tarragona), así como **Cofrentes** (Valencia). Las centrales gemelas de Almaraz y Ascó son reactores estadounidenses de agua presurizada (PWR de 3 circuitos, Westinghouse). El mismo tipo de reactor que el de la central nuclear de Cofrentes, un reactor estadounidense de agua en ebullición (BWR/6 con sistema de contención Mark III, General Electric), está también en funcionamiento en Suiza (central atómica de Leibstadt).

### Tercera generación

Diseñadas a finales de los años 70, la construcción de estas centrales comenzó en 1979. **Vandellós 2** (Tarragona), un PWR (de 3 circuitos, Westinghouse), comenzó a operar comercialmente a finales de 1987 y la de **Trillo 1** (Guadalajara) (PWR) a mediados de 1988. Trillo 1 es la única central española de tecnología alemana. Se trata de una central estándar de KWU (Kraftwerk Union), cuyo diseño se basa en la filosofía alemana de seguridad, que hace un uso extensivo de códigos, normas y requisitos reglamentarios alemanes [GONZALEZ 1978]. Es comparable con los más recientes reactores de agua a presión alemanes de la tercera de cuatro líneas de diseño.<sup>16</sup>

El siguiente cuadro lista las centrales atómicas españolas que aún siguen en funcionamiento [PRIS 2011]:

Central nuclear	Tipo	Potencia (neta) [MWe]	Inicio de la construcción	Conexión a la Red Eléctrica	Tipo de reactor
GAROÑA	BWR	446	1966	1971	General Electric, BWR/3 Mark 1
ALMARAZ-1	PWR	1011	1973	1981	Westinghouse 3 circuitos
ALMARAZ-2	PWR	1006	1973	1984	Westinghouse 3 circuitos
ASCÓ-1	PWR	995	1974	1983	Westinghouse 3 circuitos

<sup>16</sup>La construcción de estas centrales alemanas comenzó entre 1975 y 1977. La construcción de las más recientes centrales alemanas empezó en 1982. La construcción de Trillo 1 se inició en 1979.

ASCÓ-2	PWR	997	1975	1985	Westinghouse 3 circuitos
COFRENTES	BWR	1064	1975	1984	General Electric, BWR/6 Mark 3
VANDELLÓS-2	PWR	1045	1980	1987	Westinghouse 3 circuitos
TRILLO-1	PWR	1003	1979	1988	KWU 3 circuitos

### Combustible nuclear gastado

En España, el combustible gastado se almacena temporalmente en piscinas de refrigeración, en las mismas centrales nucleares que lo han generado. En todas las centrales atómicas españolas se han llevado a cabo modificaciones de diseño en las piscinas de combustible gastado con el fin de aumentar su capacidad a través de la práctica del reracking.

Además, existen dos instalaciones de almacenamiento temporal con contenedores en seco. La central de **Trillo** tiene un Almacén Temporal Individualizado (ATI) desde 2002. Se trata de una nave de muros y techo de hormigón con capacidad de albergar 80 contenedores de doble uso (almacenamiento y transporte). Estos son contenedores cilíndricos de acero con un peso máximo de 118 toneladas una vez llenos, una altura de 5,02 metros y un diámetro de 2,36 metros. El ATI de la central de **José Cabrera** (comúnmente conocida como Zorita, situada en Guadalajara, en proceso de desmantelamiento) está también situado en la central y fue diseñado para albergar todo el combustible gastado descargado del reactor, actualmente clausurado desde 2006 y en proceso de desmantelamiento. Consiste en un bloque de hormigón armado que soportaría 12 módulos de almacenamiento. Se encuentra rodeado de un vallado exterior simple de protección radiológica y un vallado interior doble de seguridad [ENRESA 2011].

### 3.- Objetivos y su vulnerabilidad

Para comprender el impacto que podría tener la colisión de un avión, se detallan las características de las instalaciones de una central nuclear.

#### Edificio del reactor

El área que ocupa una central nuclear asciende a varias decenas de miles de metros cuadrados. El corazón de la central es el edificio del reactor, que contiene el reactor con combustible nuclear (en cantidades que rondan las 100 toneladas), sumamente radiactivo, así como importantes sistemas de refrigeración y de seguridad.

Es probable que el edificio del reactor fuera el objetivo prioritario en caso de una colisión de un avión. Si el reactor estuviera en funcionamiento cuando ocurriera la colisión y el sistema de refrigeración fuera interrumpido, podría darse una fusión del núcleo en un breve lapso de tiempo (alrededor de una hora). Tal accidente podría suceder con el reactor apagado, aunque tardaría algo más en producirse [HIRSCH 2005].

#### Piscina de combustible nuclear gastado

El combustible gastado, que se retira del núcleo del reactor, normalmente se almacena en piscinas de agua situadas en el edificio del reactor o en el edificio del combustible gastado. La piscina de almacenamiento de combustible es otro elemento vulnerable con un considerable inventario radiactivo.

En algunas centrales, puede contener varias veces más combustible (y, por lo tanto, más sustancias radioactivas de larga vida) que el propio reactor. Esta piscina, en ciertas centrales, se sitúa dentro de la contención y está protegida contra impactos externos por un casco de hormigón. Sin embargo, en muchos casos la piscina se encuentra en un edificio separado con menor protección (es el caso de muchas centrales atómicas estadounidenses).

Dado que las piscinas de almacenamiento de todos los reactores de Estados Unidos están situadas fuera de la estructura que contiene el reactor, tras los ataques terroristas del 11S ha aumentado en particular la preocupación acerca de la vulnerabilidad del combustible gastado frente a ataques terroristas. Un informe lanzado en abril de 2005 por el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias (NAS, por sus siglas en inglés) concluía que *"los ataques terroristas contra las piscinas de combustible gastado, aunque difíciles, son posibles"*. Los terroristas podrían abrir una brecha en las paredes de hormigón de la piscina y drenar el agua refrigerante y, *"si un ataque provoca el incendio del recubrimiento de circonio, podría conducir a la emisión de grandes cantidades de material radioactivo"*. [NSA 2006]

La probabilidad de que la colisión de un avión destruya o dañe gravemente la piscina de combustible gastado es alta en el caso de muchos reactores. Durante un cierto periodo de tiempo podría intervenir para suministrar refrigeración al combustible. Si, debido al accidente, el sistema de refrigeración de la piscina falla y el agua comienza a hervir, pasarán días o semanas (según la cantidad y los tiempos de refrigeración del combustible gastado de la piscina) hasta que la parte superior de las barras de combustible quede expuesta. Pero si se daña la piscina y se vacía de agua, obviamente dicho punto podría alcanzarse mucho más rápido. Una vez

que el combustible queda expuesto, el blindaje contra la radiación se pierde por completo. Cuando el nivel del agua es de 0,9 metros sobre el combustible, una intervención es ya imposible debido a la altísima dosis de radiación. En ese caso, el combustible recién descargado alcanzaría un punto en que ardería en el aire (900 °C) y en unas horas comenzarían a producirse muy serias emisiones radiactivas [ALVAREZ 2003; USNRC 2001].

Las piscinas de combustible gastado de los antiguos reactores de agua en ebullición se encuentran en el edificio del reactor, pero **en una posición más elevada** sobre la contención de la vasija y con un nivel de protección considerablemente inferior al del reactor. **Es especialmente alta la vulnerabilidad de las piscinas de almacenamiento de combustible gastado en los reactores de agua en ebullición (BWR) con sistema de contención Mark 1 de Estados Unidos, como es la de la central nuclear de Santa María de Garoña.** Partiendo del accidente de Fukushima de marzo de 2011, un consejo de revisión de peticiones de la NRC considerará si las modificaciones son necesarias para reforzar la seguridad de las piscinas de combustible gastado en los reactores con sistema de contención Mark 1 —un diseño similar a las unidades dañadas en el accidente de la central nuclear de Fukushima— tras admitir parte de una petición remitida por un grupo antinuclear que quiere el cierre de los reactores Mark 1 [NF 2011].

### Otros edificios

Además del edificio del reactor y, si es el caso, el edificio con las piscinas de combustible gastado, existen otros edificios e instalaciones de diferente importancia en cuanto a seguridad.

En caso de un reactor de agua presurizada (PWR), los más importantes son:

- El edificio del conmutador, con la sala de control de la central y las instalaciones eléctricas y electrónicas.
- El edificio auxiliar del reactor, con instalaciones para la purificación del agua y la ventilación.
- El edificio de la turbina, con la turbina y el generador.
- La estación transformadora, con conexión a la red y al transformador de la estación.
- El edificio de energía de emergencia, con unidades diésel de emergencia.
- El edificio del sistema de alimentación de agua de emergencia, con instalaciones para alimentación de emergencia de los generadores de vapor (por ejemplo, para refrigerar el reactor a través del circuito secundario de refrigeración), con estación de apagado remoto.
- Los edificios de suministro y vertido de agua para la refrigeración.

La situación es similar para un reactor de agua en ebullición (BWR). En este caso no existe un edificio de alimentación de emergencia, ya que los BWR solo disponen de un circuito de refrigeración y, por tanto, no hay generadores de vapor. En lugar del edificio de alimentación de emergencia, algunos BWR cuentan con un edificio de emergencia de reserva con una sala de control de emergencia que permite controlar

las más importantes funciones de seguridad.

Hasta ahora, ninguna central nuclear ha sido específicamente diseñada contra impactos externos de origen humano (por ejemplo, la colisión de un avión). En los casos en que lo han sido, solo se asume un impacto y en un punto (como, por ejemplo, la colisión de un pequeño avión militar). La contramedida más importante era la separación física de las instalaciones relevantes para la seguridad. Esto debería garantizar que un impacto solo podría destruir una instalación vital para la seguridad: una situación que podría compensarse.

Si, por ejemplo, el propio suministro de electricidad de la central fallase, se realizaría un suministro de emergencia desde los generadores diésel a través de un transformador adecuado. Si la sala de control, con las instalaciones de control relevantes, fuera destruida, las instalaciones del edificio de emergencia de reserva deberían poder garantizar las funciones de seguridad absolutamente necesarias (por ejemplo, la conducción del calor hacia fuera del reactor).

Incluso si, en caso de colisión, el edificio del reactor resultara intacto, seguiría siendo muy probable que la situación quedara fuera de control si se destruyera más de una instalación de seguridad importante de la central. Esto puede ocurrir incluso en el caso de que los componentes importantes se hayan distanciado, si el ataque tuviera efectos que se extendieran por la central. Por ejemplo, si fallaran el suministro de energía desde la red (a través de la estación transformadora) y el suministro de energía de emergencia al mismo tiempo, no habría ninguna otra bomba refrigerante en funcionamiento. En caso de que se destruyeran simultáneamente la sala de control y el edificio de suministro de emergencia (el edificio de emergencia de reserva), podría presentarse una situación en que los sistemas de seguridad necesarios aún podrían funcionar, pero ya no podrían regularse ni controlarse. Una destrucción de largo alcance del área de una central puede, además, tener efectos sobre el acceso del personal, lo que hace imposible las medidas de emergencia y la reparación o imposibles al menos dentro del lapso de tiempo necesario, unas horas.

Tan solo la destrucción del edificio de toma de agua de refrigeración ya produce la interrupción de la cadena de refrigerado de la central. Sin embargo, alcanzar una situación crítica llevaría más tiempo en este caso, ya que existen varias reservas de agua accesibles en el área de la central. Así, hay tiempo para medidas improvisadas, salvo si se ven dificultadas por la destrucción de otros elementos de la central [HIRSCH 2005].

#### 4.- Normas de protección para las centrales nucleares

Habitualmente, los muros del edificio del reactor son de hormigón armado. El grosor de esta estructura y, por tanto, su resistencia ante la colisión de un avión, varía según las revisiones de los criterios aplicados al diseño de los edificios.

En **Alemania**, por ejemplo, los muros de las centrales más antiguas (dos de las cuales se cerraron hace unos años, junto con las que quedaban y fueron permanentemente cerradas en el verano de 2011) son de hormigón armado de alrededor de 0,60 metros de grosor, solo suficiente para soportar el impacto de un avión deportivo (masa máxima de 10 toneladas, velocidad por debajo de 300 km/h).

Otras centrales nucleares antiguas, también permanentemente cerradas desde el verano de 2011, cuentan con muros de alrededor de un metro. Deberían soportar la colisión de un avión militar pequeño (Starfigther), de una masa aproximada de diez toneladas y una velocidad de unos 650 km/h. El diseño del sistema de protección frente a las consecuencias de la colisión de un avión militar pequeño se mejoró con el diseño de edificios y componentes en interacción con sistemas auxiliares de emergencia adicionales, separados físicamente del edificio del reactor [BMU 2010; HIRSCH 2001].

Según las directrices de la Comisión de Seguridad de los Reactores nucleares alemanes, las centrales atómicas "más recientes" de Alemania están diseñadas para soportar el impacto de un avión militar de mayor tamaño (Phantom, 20 toneladas y 770km/h de velocidad). Los edificios del reactor de estas centrales presentan un grosor en los muros de entre 1,60 y 2 metros. Su diseño contra el impacto de un avión militar de ese tipo cubre no solo el propio reactor, sino también las estructuras de contención de los sistemas que son necesarios para el control de este riesgo externo (por ejemplo, el edificio de toma de agua de emergencia). Además, las medidas de protección se tomaron para justificar las vibraciones de los componentes internos inducidas por las ondas de presión derivadas del choque de un avión, por ejemplo, consistentes en desconectar los techos y los muros interiores del muro exterior [BMU 2010].

La República Federal Alemana fue un país que estuvo durante mucho tiempo en primera línea durante la Guerra Fría. Su espacio aéreo tenía una alta densidad de aviones militares. Las preocupaciones sobre la colisión accidental de un avión militar en áreas importantes para la seguridad de una central surgieron de un historial de altos índices de colisiones de aviones militares durante la década de 1970,<sup>17</sup> lo cual se refleja en las normas de seguridad de protección exigidas contra accidentes aéreos. Éstas solo son de aplicación en relación a aviones militares, aunque en lo que concierne a Europa Occidental dichas normas son relativamente altas para todos los casos [HIRSCH 2001]. Requisitos similares solo los encontramos en Suiza [VDI]. Los edificios de los reactores nucleares en otros países tienden a tener menor protección que las centrales alemanas.

En **Estados Unidos**, de 103 reactores nucleares comerciales, solo cuatro fueron diseñados para soportar el impacto de una aeronave. La central nuclear de

---

<sup>17</sup>La base general ha sido el análisis de la frecuencia de accidentes (la probabilidad de excedencia de los impactos sobre los edificios relevantes para la seguridad está en alrededor de  $10^{-6}$ /año-central). Desde finales de la década de 1980 la tasa de accidentes de aeronaves militares ha disminuido considerablemente. El efecto que esto tiene es que la frecuencia de accidentes de hoy se puede suponer que es aproximadamente de un orden de magnitud menor.

Seabrook y las unidades 1 y 2 de la central de Limerick fueron diseñadas para soportar el impacto de un avión de seis toneladas de masa, mientras que la unidad 1 del reactor de Three Mile Island se diseñó para resistir la colisión de un avión de 90 toneladas (un avión comercial pequeño) [THOMPSON 2005].

En **España**, con la información disponible existente, el diseño de todas las centrales nucleares españolas, excepto Trillo 1, no soporta ni siquiera la colisión de un avión militar ligero (como un Starfighter). Debido al diseño de las centrales nucleares contra impactos externos, existen márgenes de seguridad. Sin embargo, aunque no puede excluirse que ninguna de estas siete centrales nucleares españolas pudiera resistir el choque de un avión militar, tiene que asumirse que es cierto al menos para las cinco centrales nucleares españolas más antiguas (Santa María de Garoña, Almaraz 1 y 2 y Ascó 1 y 2).

Incluso las centrales alemanas con mayor protección, en caso de que un avión colisionara contra ellas, podrían tener que afrontar un estrés y unas tensiones superiores a aquellas para las que fueron diseñadas para resistir. El impacto de la colisión de un avión puede ser incluso mayor que la de un Phantom.

El impacto de una colisión depende de la masa y la velocidad del avión que la cause y de la zona impactada, así como de la dimensión de la quiebra de las estructuras de hormigón (cuanto menor sea el área, el efecto será mayor y más concentrado). La enorme masa de un avión de pasajeros extendería el efecto de su impacto sobre un área mucho mayor. Al mismo tiempo, los motores son "misiles" compactos, que pueden tener una masa de varias toneladas. Es obvio que los efectos de los escombros lanzados por los aires y del combustible ardiendo serían mucho mayores en la colisión de un avión de pasajeros que los asumidos para el caso de un *jet* militar [HIRSCH 2001].

Sin embargo, en Alemania existen defectos en la protección frente a la colisión de un avión de pasajeros, incluso en las centrales más recientes y relativamente mejor protegidas.

## **5.- Efectos de la colisión de un avión contra una central nuclear**

Al considerar los posibles efectos de la colisión de una aeronave comercial contra una central nuclear se debería distinguir entre dos casos [HIRSCH 2001]:

- El impacto que causa un gran daño en el edificio del reactor (por ejemplo, los muros se derrumban y los escombros y, posiblemente, el combustible incendiado afectan al interior).
- El edificio del reactor permanece intacto o sufre daños leves; otros edificios de la central son destruidos, con un posible daño al interior del edificio del reactor como resultado de los impactos y vibraciones producidas por el accidente.

### **Con graves daños al edificio del reactor**

El edificio del reactor contiene el propio reactor, el circuito primario de refrigeración y los generadores de vapor (en el caso de reactores de agua presurizada; en los reactores de agua en ebullición, parte del circuito de refrigeración que va a la turbina) y los principales sistemas de seguridad, sobre todo el de emergencia, los sistemas secundarios de refrigeración y (en los reactores de agua en ebullición) el sistema de inundación del núcleo.

Si el impacto de un avión destruyera la estructura externa de hormigón armado del edificio del reactor, probablemente la contención también se colapsaría. La contención está diseñada para soportar los efectos procedentes del interior (por ejemplo, el aumento de la presión, resultado del incendio de una tubería) pero no tiene gran capacidad de resistencia ante impactos del exterior. Además, el circuito de refrigeración del reactor quedaría dañado, así como los sistemas de seguridad, que también sufrirían serios deterioros. Si las tuberías del sistema de refrigeración o la misma vasija del reactor sufrieran daños, sería irrelevante que el sistema de refrigeración de emergencia aún funcionase, porque ya no tendría alimentación.

Tal caso llevaría, en un lapso de tiempo muy breve (en una hora), a la fusión del núcleo del reactor. El combustible derretido liberaría sustancias radiactivas que, dado que la contención y el edificio de hormigón exterior habrían sido destruidos, podrían salir al medio ambiente casi inmediatamente, sin poder quedar retenidas dentro del edificio.

La fusión del núcleo en una contención abierta es el peor escenario concebible en todos los estudios de riesgo. El resultado sería la liberación de grandes y —aún peor— inmediatas emisiones de radioactividad. El plazo de tiempo disponible para tomar medidas de protección contra el desastre sería muy breve. Las cantidades de sustancias radiactivas liberadas podrían alcanzar, e incluso exceder, las constatadas en el desastre del reactor de Chernóbil o Fukushima.

### **Sin graves daños al edificio del reactor**

Si el edificio del reactor permanece intacto, existe, sin embargo, una considerable probabilidad de que la destrucción en la zona y las vibraciones causadas por el impacto dentro del propio edificio del reactor pudieran conducir a una fusión del núcleo.

Si el daño se limitara a una sola de las instalaciones de relevancia para la

seguridad, se crearía una situación de elevado riesgo, pero que probablemente podría ser controlada. Aunque puede parecer más o menos creíble que solo habría daños limitados si un avión (militar) pequeño chocara con una central, esto no puede asumirse en el caso de una aeronave comercial. Habría que temer una destrucción más extensa debido a los impactos de los escombros y los incendios. No podría garantizarse que la refrigeración del reactor pudiera funcionar, incluso si la integridad del sistema de refrigeración no hubiese resultado dañada. En dichos casos, lo que ocurre es la fusión del núcleo del reactor. Comparado con el escenario de la destrucción del edificio del reactor, las consecuencias serían menos graves.

El sistema de contención fallaría algunos días después o incluso algo más tarde; y la radiactividad liberada quedaría en cierta medida reducida por la condensación de radionucleidos en el interior. Además, y esto es también muy importante, habría más tiempo para tomar medidas de protección contra el desastre. Sin embargo, en este escenario, se liberaría gran cantidad de radiactividad, con consecuencias desastrosas en una zona muy extensa.

## 6.- Protección de las centrales nucleares

Todos los nuevos diseños de reactor tienen como objetivo protegerse frente a la colisión deliberada de una aeronave comercial. Un ejemplo de ello es el reactor europeo presurizado (EPR, por sus siglas en inglés): los muros externos del edificio del reactor, el edificio del combustible nuclear gastado y dos de los cuatro edificios de salvaguardias se han diseñado contra la penetración. Con el objetivo de disminuir las vibraciones inducidas, en esos edificios las estructuras internas están desacopladas respecto de los muros externos y además se evita colocar los correspondientes sistemas sensibles o de seguridad en los muros exteriores.

La colisión de un avión en una central nuclear podría dañar el techo y los muros del edificio, así como otros sistemas y componentes, tales como tuberías, motores eléctricos, suministros de energía y cables de transmisión de electricidad, que son muy importantes para la seguridad [NOH 2009].

Los efectos del choque de un avión contra los que una central tiene que estar protegida son los siguientes [PETRANGELI 2010]:

- Penetración tras la perforación de las paredes exteriores de los edificios en el punto de impacto.
- Vibraciones fuertes en los edificios y en los componentes de la central, causadas por los impactos.
- Incendio del combustible transportado en el avión.
- Incapacidad temporal del personal de la central para actuar.

Numerosos estudios investigan cuestiones especiales de esos efectos con el fin de proteger la próxima generación de centrales atómicas. Según un informe de reciente publicación, podría concluirse, a partir de varios estudios, que un muro de dos metros de espesor sería aproximadamente suficiente para evitar la perforación, incluso en el caso de un impacto de un Boeing-747.

Pero el problema que persiste es la fuerte sacudida de las estructuras y componentes. Algunos diseños de nuevos reactores aspiran a resolver este problema protegiendo el bloque externo o Isla Nuclear (NI, por sus siglas en inglés) con un grueso muro exterior, capaz de soportar el impacto de la aeronave, solamente conectado al resto de la NI por la losa de cimentación común. Según dicho informe, la medida en que se consigue atenuar la sacudida no es suficiente para algunas partes de las estructuras internas.

Por lo tanto, la experta Oda Becker sugiere una solución específica de diseño. Consistiría en conectar partes claves de las estructuras a la losa de cimentación con anclajes que tengan un grado de deformación suficiente, de modo que se minimice la transmisión de las fuerzas de alta frecuencia del impacto a otras partes de la estructura global [PETRANGELI 2010].

Las directrices del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) ilustran la complejidad de los efectos causados por la colisión de una aeronave. Según la guía NS-G-1.5 de la OIEA, en una evaluación de la colisión de un avión, en general se considerarían los siguientes asuntos [IAEA 2003]:

- Daño global de las estructuras afectadas, lo que incluye deformaciones

estructurales excesivas o desplazamientos que impidan que la estructura cumpla su función, su colapso o el derrumbe de la estructura.

- Fallo funcional de los sistemas, estructuras y componentes (SEC) debido a las vibraciones inducidas en los elementos de las estructuras y en el equipamiento de seguridad correspondiente ('efectos globales').
- Daños estructurales localizados debidos a los efectos del impacto de un misil, incluyendo la penetración, perforación, rotura del encofrado y desprendimientos, que llevarían al fallo de un elemento estructural o equipamiento de seguridad correspondiente como resultado de los efectos de misiles primarios y secundarios<sup>18</sup> ('efectos locales').
- Los efectos de incendios iniciados en el combustible nuclear y la posible explosión de los SEC, que incluye la siguiente relación de posibles consecuencias:
  - (a) Incendio del combustible de la aeronave en el exterior, que causaría daños a componentes exteriores de la central que son importantes para la seguridad.
  - (b) Explosión de parte o de todo el combustible en el exterior de los edificios.
  - (c) Entrada de productos de la combustión en los sistemas de ventilación o suministro de aire, lo que afectaría, por lo tanto, al personal o causaría malos funcionamientos, como fallos eléctricos o fallos en los generadores diésel de emergencia.
  - (d) Entrada de combustible en los edificios importantes para la seguridad a través de aperturas habituales o de orificios, provocados por el impacto, o en forma de vapor o aerosoles a través de los conductos de toma de aire, lo que derivaría en posteriores incendios o explosiones.

Las normativas de los distintos países en la actualidad y, por lo tanto, también los diseños de los nuevos reactores consideran la colisión de una aeronave grande. En Estados Unidos, por ejemplo, la vulnerabilidad de una central nuclear ante colisiones deliberadas de aeronaves ha sido una preocupación constante. Tras estudiarlo profundamente, la NRC publicó la normativa final el 12 de junio de 2009, para exigir que todas las nuevas centrales nucleares incorporasen características de diseño que garanticen que, en caso de que un avión comercial grande chocara con una central, el núcleo del reactor permanecería refrigerado o que el sistema de contención del reactor permanecería intacto y que la radioactividad liberada no procedería del combustible gastado almacenado en las piscinas [HOLT 2010].

En cuanto a las centrales nucleares existentes en operación en los Estados Unidos, dado que no es posible modernizar la estructura de los edificios de sus reactores, solo se llevaron a cabo de forma inconsistente mejoras en las centrales más recientes en relación a medidas antincendios, operaciones para mitigar los daños al combustible y acciones para minimizar la liberación de radioactividad.

---

<sup>18</sup>El efecto de un misil primario es el efecto sobre el objetivo, bien por choque directo o bien por golpe de rebote de un misil que se origina tras la rotura del equipo inicial. El efecto de un misil secundario es un efecto posterior debido a las consecuencias de los efectos de un misil primario.

## 7.- Consecuencias de un ataque a una central nuclear

Una colisión que causara **graves daños al edificio del reactor** provocaría un accidente de la categoría más grave, la fusión del núcleo en una contención abierta, con las emisiones más altas que pueden concebirse para cualquier secuencia de accidente en una central nuclear. Según Hahn, ex presidente de la Comisión de Seguridad de los Reactores nucleares alemanes (RSK), en un accidente en el que se funda el núcleo, la cantidad máxima liberada a la atmósfera, para un reactor de agua presurizada, puede ser de entre el 50 % - 90 % del inventario radiactivo de nucleidos volátiles, como el yodo y cesio, más algunos porcentajes menores de otros nucleidos, como el estroncio-90 [HAHN 1999].

En el caso de una central nuclear de 1.000 MW de potencia eléctrica, esa emisión radiactiva significaría varios cientos de miles de Terabequerelios<sup>19</sup> (TBq) de cesio-137 (en el accidente de Chernóbil se liberaron alrededor de 100.000 TBq [FAIRLI 2006] y en el de Fukushima unos 40.000 TBq de cesio-137 [STOHL 2011]). En alrededor de una hora, aproximadamente 10.000 km<sup>2</sup> tendrían que ser evacuados. Obviamente, esto es imposible.<sup>20</sup> Así pues, para una densidad de población típica de Alemania, habría unas 15.000 muertes por radiación aguda y hasta un millón de muertes por cáncer, así como incontables casos de daños genéticos. Áreas de la escala de 100.000 km<sup>2</sup> (mayor que la superficie de Portugal) podrían ser contaminadas a largo plazo, de forma que la población tendría que ser reasentada.

Las consecuencias de un escenario de accidente **sin graves daños al edificio del reactor**, comparado con el escenario de destrucción del edificio del reactor, son, de alguna manera, menos graves. La radiactividad liberada se reduce en cierta medida porque los radionucleidos se condensan dentro del edificio y se dispone de más tiempo para implementar medidas de intervención, especialmente para la evacuación de la población. En este escenario, sin embargo, se libera menos radiactividad que en Chernóbil o Fukushima, pero también se dan consecuencias desastrosas a lo largo de extensas zonas.

Según estudios realizados en Estados Unidos, alrededor del 10% del inventario de cesio-137 podría mobilizarse a través de una pluma (elementos radioactivos en suspensión atmosférica) generada por el incendio de la **piscina de combustible gastado**, lo que podría producir miles de muertes por cáncer, pérdida de decenas de miles de kilómetros cuadrados de terreno y pérdidas económicas de miles de millones de dólares [NSA 2006].

---

<sup>19</sup>Tera=10<sup>12</sup>

<sup>20</sup>Con frecuencia, el nivel de protección en los edificios (residenciales) es bastante bajo. Solo reducen a la mitad la dosis de inhalación. Como resultado, es muy probable que se diera una dosis de radiación letal en varios kilómetros a la redonda, incluso dentro de los edificios.

## 8.- Conclusiones para las centrales nucleares españolas

No existe ningún estudio conocido sobre las consecuencias de un accidente aéreo contra una central nuclear española. Sin embargo, sí que es posible extraer algunas conclusiones a partir de los resultados de los estudios llevados a cabo en Suiza, Alemania y Estados Unidos, así como de consideraciones generales en relación a los posibles efectos de dicho accidente aéreo.

Los resultados de las investigaciones y las exigencias de seguridad para la protección de las más recientes centrales nucleares ofrecen información adicional. Estos resultados revelan los déficits de las centrales nucleares que operan hoy en día.

Los resultados de los tres estudios elaborados en Alemania son conocidos, pero, como ya se ha mencionado, no se publicaron resultados detallados; solamente son accesibles al público unos resúmenes generales de los mismos.

En un estudio se examinaron las centrales nucleares más recientes de Alemania<sup>21</sup>, que cumplen con las más altas exigencias de construcción en términos de protección estructural. Se consideró la colisión de la más común de las grandes aeronaves utilizadas (Boeing 747). El resultado obtenido es que la deformación calculada y la destrucción mecánica están al límite de la carga máxima del edificio. De ello, pueden obtenerse dos conclusiones:

- a) los edificios de las centrales nucleares más recientes probablemente no soportarían el choque de un avión de mayor tamaño, como un Airbus A380<sup>22</sup>;
- b) los edificios de centrales nucleares más antiguas no soportarían la colisión deliberada de una aeronave, debido a que su protección estructural es menor [ILK 2002].

El segundo estudio examinó los efectos totales (los efectos térmicos y mecánicos sobre los edificios y los efectos del fuego y las sacudidas sobre el sistema) y la posible liberación de material radiactivo. Resultados adicionales: en una central nuclear más moderna puede ocurrir un accidente de fusión del núcleo tanto si resulta afectado el compartimiento de válvulas, como si bajo éste hubiera un incendio importante.

Un estudio genérico llevado a cabo por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania (BMU) reveló, entre otras cosas, que:

- En centrales nucleares antiguas,<sup>23</sup> en las que el edificio del reactor dispone de muros de 0,6 a 1 metro de grosor, el choque de incluso una aeronave comercial de pequeño tamaño (como un Airbus A320<sup>24</sup>) provocaría graves daños en el edificio del reactor.

---

<sup>21</sup>Son más recientes que las españolas; su construcción comenzó en 1982.

<sup>22</sup>Airbus A380: peso máximo de despegue 560 toneladas, máxima capacidad de combustible 320.000 litros, <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/a380-800/specifications/>

Boeing 747-400: peso máximo de despegue 397 toneladas, máxima capacidad de combustible 217.000 litros, [http://www.boeing.com/commercial/747family/pf/pf\\_400\\_prod.html](http://www.boeing.com/commercial/747family/pf/pf_400_prod.html)

<sup>23</sup>Construidas antes de 1975.

<sup>24</sup>Airbus A320: peso máximo de despegue 73,5 toneladas, máxima capacidad de combustible 24.000 litros <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/specifications/>

- En centrales nucleares más recientes, en las que el edificio del reactor presenta muros de casi dos metros de grosor, no habría que esperar graves daños al edificio del reactor [BMU 2002].

De este análisis, se concluye lo siguiente respecto a las centrales nucleares españolas:

**Santa María de Garoña**, una central nuclear de primera generación en España y con el mismo tipo de reactor que el utilizado en Fukushima 1, es obviamente el reactor español más vulnerable. En un estudio acerca del impacto de un avión contra una central nuclear suiza en Muelhleberg, en la que se usa el mismo tipo de reactor, el resultado es que se puede esperar un enorme daño al edificio del reactor. El grosor de las paredes del edificio del reactor es de solo 0,60 metros; el grosor de la bóveda es, en parte, de tan solo 0,15 metros [HSK 2003].

**Una colisión contra el edificio del reactor causaría la fusión del núcleo con la contención abierta: el peor escenario concebible, especialmente por la enorme y rápida liberación de radioactividad. Es de temer que esta catastrófica liberación de radiactividad ocurriría incluso en el caso de que un avión relativamente pequeño (como un Airbus A320) chocara contra el edificio.**

El término fuente de un accidente grave debido a fallos técnicos, calculado en el proyecto flexRISK<sup>25</sup>, es de 342.000 TBq para el yodo-131 y de 78.790 TBq para el cesio-137 (radiactividad liberada en Chernóbil => cesio-137: alrededor de 100.000 TBq; yodo-131: cerca de 2.000.000 TBq [FAIRLIE 2006]). En caso del choque de un avión, el término fuente sería considerablemente superior, debido a los efectos térmicos del combustible en llamas. La dispersión de las nubes de radiactividad como consecuencia de un serio accidente en la central nuclear Santa María de Garoña bajo diferentes condiciones climáticas puede verse en la página web de flexRISK [FLEXRISK 2011].

La piscina de combustible gastado está dentro del edificio del reactor y considerablemente menos protegida que el reactor. En caso del impacto de un avión, la piscina de combustible gastado podría resultar dañada, lo que significa que habría una liberación de radiactividad adicional.

**Centrales nucleares de Almaraz y Ascó.** La vulnerabilidad de las unidades de Almaraz y Ascó respecto a colisiones de aviones es la misma que para los antiguos reactores estadounidenses de este tipo. **El grosor de los muros es de alrededor de 0,60 metros, lo que significa que la vulnerabilidad del edificio del reactor es muy alta.** Tiene que asumirse que la colisión de una aeronave de tamaño medio o grande causaría un daño grande en el edificio del reactor.

Las piscinas de combustible gastado está situadas en edificios contiguos al del reactor y no están diseñadas contra una colisión aérea. El edificio que protege la piscina de combustible gastado es un edificio típico industrial de acero. Si las

---

<sup>25</sup>El proyecto "Herramientas Flexibles para la Valoración del Riesgo Nuclear en Europa" (Flexible Tools for Assessment of Nuclear Risk in Europe, flexRISK) estudia la distribución geográfica del riesgo por accidentes severos en instalaciones nucleares, especialmente en las centrales nucleares de Europa. Comenzando con los términos fuente y la frecuencia de accidentes, se simula la dispersión a gran escala de radionucleidos en la atmósfera para alrededor de 1.000 condiciones meteorológicas diferentes. Junto con el posterior cálculo de las dosis de radiación resultantes, se pueden examinar las consecuencias de accidentes graves.

paredes de la piscina resultaran dañadas, podrían liberarse enormes cantidades de material radiactivo. Sin embargo, estos edificios están localizados a menor altitud y, por lo tanto, no serían necesariamente impactados por un avión.

La central nuclear de **Cofrentes** es, si se observa el comienzo de su construcción y de su funcionamiento, comparable a la central nuclear de Leibstadt (Suiza). De acuerdo con las investigaciones desarrolladas en Suiza, no hay que esperar un grave daño en el edificio del reactor en caso de que un avión colisionara contra la central de Leibstadt [HSK 2002]. No obstante, no puede excluirse un accidente de fusión del núcleo causado por un incendio del queroseno y por las ondas expansivas. Tiene que asumirse que esto es válido para Cofrentes. En este escenario, sin embargo, se liberaría menos radiactividad que en Chernóbil o Fukushima, pero también habría consecuencias desastrosas para una zona muy extensa.

En la central nuclear de Leibstadt, la piscina de combustible está emplazada en un edificio separado, cercano al reactor, y que se encuentra protegido contra colisiones de aviones [HSK 2003]. Se desconoce si esto aplica a Cofrentes o no, especialmente porque la normativa de seguridad en Suiza, más rigurosa, tuvo que tener en cuenta el posible impacto de un avión (militar). Luego, no se puede excluir completamente que el edificio del reactor de Cofrentes también cuente con menos protección que el de Leibstadt. Además, no puede descartarse que el reactor quedara gravemente dañado en caso de que un Airbus A380 colisionara con la central.

Debido a la edad de la central nuclear de **Vandellós 2**, tiene que asumirse que el grosor de las paredes del edificio del reactor es de alrededor de o mayor que un metro. Como resultado, el edificio presumiblemente soportaría el impacto de una aeronave de tamaño medio. Es dudoso que resistiera el impacto de un avión mayor. La piscina de combustible gastado está situada en un edificio contiguo de menor altura. Los muros de la piscina son muy gruesos, por lo que el impacto de un avión no conllevaría inevitablemente a su destrucción.

**Trillo** es comparable a las centrales nucleares más recientes que aún operan en Alemania. El edificio del reactor (con muros de casi dos metros de grosor) probablemente podría soportar el impacto de una aeronave grande (Boeing 747). De acuerdo con investigaciones llevadas a cabo en Alemania, no puede excluirse una desastrosa liberación de radiactividad bajo condiciones específicas, incluso sin haber serios daños en el edificio del reactor [ILK 2002]. La piscina de combustible gastado está relativamente bien protegida dentro de la contención en el edificio del reactor. En términos generales, Trillo es probablemente la central nuclear española menos vulnerable ante este tipo de situaciones.

## 9.- Las contramedidas y sus límites

Se pueden concebir varias medidas que posiblemente podrían ofrecer a las centrales nucleares cierto grado de protección frente al impacto de una aeronave. Algunas ya han sido puestas en práctica o están en una fase concreta de la planificación, en algunos países aunque no en el caso de España.

Las valoraciones realizadas por los expertos, y las opciones más importantes son las siguientes:

- Apagado preventivo
- Modernización de las estructuras
- Cubrir los edificios con una cortina de humo
- Personal y equipamiento adicional en la central
- Medidas adicionales de gestión de accidentes
- Fortalecimiento de la guardia de seguridad
- Protección militar de las centrales
- Medidas policiales y administrativas
- Medidas respecto a las piscinas de combustible gastado

### Apagado preventivo

El apagado preventivo de una central nuclear, en caso de amenaza, puede aumentar el lapso de tiempo disponible para poner en marcha las contramedidas tras un presunto ataque. Sin embargo, la potencia térmica de los elementos del combustible nuclear (calor de desintegración) disminuye de forma bastante lenta en un reactor apagado.

Un problema fundamental en seguridad nuclear es que mientras que la reacción en cadena puede ser sin duda interrumpida mediante el apagado del reactor, el desarrollo del calor causado por la intensa radiactividad del combustible (calor de desintegración) no puede interrumpirse. Ese calor es el responsable de que, si falla la refrigeración, el núcleo se fusione en un plazo de tiempo muy corto. Las posibilidades de que las contramedidas tengan éxito son mayores si el reactor ha sido apagado y aumentan en función del tiempo que el reactor lleve apagado. La liberación de radiactividad puede ser menor si los radionucleidos de corta vida (como el yodo-131) ya han decaído. Si los sistemas de refrigeración fallan, pero el circuito de refrigeración permanece intacto en su mayor parte, es básicamente posible que aún se pueda inyectar agua a través de él.

En caso de que la destrucción en la central sea masiva, se necesitará alrededor de un día para poner en marcha las contramedidas, tales como disponer tuberías para la alimentación del agua o trasladar unidades de electricidad de emergencia y otros equipos. Para que esto sucediera así, el apagado de la central nuclear (reactor de agua ligera) tendría que haberse efectuado, como poco, meses antes del ataque [HIRSCH 2005a].

Si la vasija del reactor y/o el circuito de refrigeración resultan dañados, incluso un

apagado preventivo no podría garantizar que los plazos de tiempo para la intervención fueran los adecuados. Además, las posibles ventajas de un apagado preventivo son en su mayoría irrelevantes si la piscina de combustible gastado se encuentra en una posición expuesta en el edificio del reactor, como ocurre en la central nuclear de Santa María de Garoña.

### **Modernización de las estructuras**

En principio, la modernización de las estructuras podría ser una medida de protección frente a todo tipo de impacto desde el aire. Reforzar las estructuras de los edificios de la propia central, sin embargo, es algo casi inviable y que no ha sido seriamente discutido hasta ahora. Según un estudio alemán, la modernización de las estructuras del edificio del reactor no es ni útil ni posible por razones de índole técnica y económica. Las medidas de protección de este tipo más realizables para una central nuclear son obstáculos que puedan dificultar o incluso evitar el acercamiento directo de una aeronave a la central nuclear [ILK 2002].

La construcción de edificios de protección alrededor del edificio del reactor se estaba considerando seriamente en Alemania. Sin embargo, su efectividad está en duda y su puesta en práctica crearía nuevos problemas de seguridad. La destrucción de dicha estructura por colisión de un avión conduciría a la formación de pesados bloques de hormigón que podrían crear daños en la central [HIRSCH 2005a].

### **Cubrir los edificios con una cortina de humo**

La idea de cubrir las centrales nucleares con cortinas de humo, especialmente para protegerlas ante la colisión deliberada de un avión, se está planificando e incluso poniendo en práctica en algunas centrales nucleares alemanas. La adaptación de un concepto militar constituye el elemento central de la idea de protección de los operadores de las centrales nucleares. Es problemático, porque las cortinas de humo militares se utilizan bajo circunstancias completamente diferentes. Por ejemplo, una cortina de humo militar puede proteger un buque de guerra contra el ataque de un misil automático inteligente. Tras la protección que ofrece una cortina de humo, el buque podría retirarse. Pero en el caso de una central nuclear, el blanco no es móvil. Además, probablemente será más difícil confundir a un piloto humano que a un sistema automatizado.

Un problema adicional es el tiempo de puesta en marcha de esta medida. Muchas centrales nucleares están situadas cerca de grandes aeropuertos y rutas de tráfico aéreo. Así pues, es posible que no se reconociera con suficiente antelación la intención de un ataque con un avión. Además, incluso si la cortina de humo se creara con éxito, sería bastante fácil encontrar el blanco. La localización exacta de una central nuclear es algo conocido y el piloto agresor puede entrenarse en un simulador para ese acercamiento hasta ser capaz de dar en el blanco a ciegas. Se planificó la instalación de transmisores para bloquear el GPS de los sistemas de navegación, pero se abandonó la idea porque los pilotos advirtieron que dicha medida podría reducir drásticamente la seguridad del tráfico aéreo. Hasta ahora, esta medida altamente controvertida ha sido solamente implementada en tres centrales nucleares [GP 2010].

## **Personal y equipamiento adicional en la central**

Con el objetivo de mitigar las consecuencias de cualquier tipo de ataque, se necesita que expertos en varios campos estén sobre el terreno. Se refiere a personal médico, bomberos y trabajadores de limpieza, especialistas en desactivación de explosivos, personal experto en temas de energía nuclear y especialistas en protección radiológica. Las posibilidades de mitigar las consecuencias mejorarían si este personal se aumentara en número y estuviera directamente en la central o en instalaciones cercanas. El equipamiento y los materiales correspondientes también deberían estar almacenados en la central. Una mejora de las brigadas de bomberos, a menudo implementada en algunas centrales en los últimos años, probablemente reduciría los efectos en los casos en los que el edificio del reactor no fuera gravemente dañado, pero en caso de daños graves al edificio del reactor, esta medida no tendría ningún efecto.

## **Medidas adicionales de gestión de accidentes**

Durante muchos años, las medidas de gestión de un accidente (como las medidas de control y mitigación de accidentes graves) fueron implementadas en la mayoría de las centrales nucleares del mundo para controlar un accidente severo o, al menos, para mitigar sus efectos. En relación a la protección contra el impacto de una aeronave, a partir del 11 de septiembre del 2001 han surgido nuevas consideraciones para mejorar aún más esta gestión de accidentes. Sin embargo, es cuestionable en qué medida podrían expandirse más las medidas ya implementadas.

## **Protección militar de las centrales**

Colocar unidades militares en las centrales nucleares con el objetivo de disponer de defensa aérea tiene que considerarse como algo extremadamente problemático. Además del peligro obvio de derribar un avión sin intención de atacar la central -por ejemplo, en caso de que se haya estropeado el sistema de radio y navegación de un avión-, el resultado es que se crearían más riesgos.

En Alemania, la Ley Federal de Seguridad Aérea de enero de 2005, que permitía a las Fuerzas Aéreas derribar aviones secuestrados, fue revocada en enero de 2006 por ser incompatible con la ley fundamental alemana [GP 2010].

## **Medidas policiales y administrativas**

En cuanto a la policía, servicios secretos y administración pública, las siguientes medidas son concebibles y ya han sido implementadas:

1. Medidas para el reconocimiento temprano de un avión secuestrado, por ejemplo mediante el control mejorado del tráfico aéreo y las zonas de exclusión.
2. Medidas para prevenir el secuestro de aviones, por ejemplo mediante el control de pasajeros y el refuerzo de las puertas de acceso a la cabina del piloto.
3. Intensificar las medidas de investigación y control del personal que trabaja en la central (incluyendo los subcontratistas), resultaría en una mayor protección contra personas infiltradas.

Las zonas de exclusión aérea pueden mitigar el riesgo de colisión accidental de una aeronave contra una central nuclear, pero no pueden proteger frente a impactos.

Las opciones para aumentar la seguridad y la protección frente a colisiones de grandes aviones de pasajeros mediante la modernización técnica son extremadamente limitadas. Por eso, algunos expertos, especialmente los operadores de las centrales nucleares, piden que se mejoren las medidas policiales y administrativas para reducir los riesgos. Ya se han mejorado el control de los pasajeros de los vuelos. Además, se han reforzado las puertas de la cabina de casi todas las aeronaves comerciales. Sin embargo, según un estudio recientemente publicado, las probabilidades de que terroristas secuestren con éxito un avión son altas. A pesar de los controles de seguridad, hay muchas maneras de introducir armas en un avión. Y un grupo terrorista puede acceder a la cabina del piloto utilizando dichas armas [GP 2010].

### **Medidas respecto a las piscinas de combustible nuclear gastado**

El mencionado informe estadounidense del Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias recomendaba dos medidas para reducir las consecuencias de un posible caso de pérdida de refrigerante en la piscina: reconfigurar el combustible gastado en las piscinas, de modo que los elementos de combustible con alta temperatura de decaimiento estén rodeados de ensamblajes con baja temperatura; y proveer de sistemas de rociado con agua que pudieran refrigerar el combustible incluso si la piscina se viera gravemente dañada. Parece plausible que estas medidas pudieran implementarse con coste, tiempo y exposición reducidos de los trabajadores a la radiación. El informe también pide un traslado temprano del combustible gastado desde las piscinas al almacenamiento en seco [NSA 2006].

La Unión de Científicos Preocupados (UCS, por sus siglas en inglés) afirmaba en un informe sobre Fukushima, lanzado en julio de 2011, que *"los propietarios de reactores podrían reducir los riesgos de protección y seguridad asociados con el combustible gastado transfiriéndolo de las piscinas a contenedores de almacenamiento en seco una vez que se haya enfriado lo suficiente. Por razones de coste, han elegido llenar las piscinas al máximo de su capacidad antes que utilizar contenedores de almacenamiento en seco"*. [NF 2011a].

Un número creciente de centrales nucleares en todo el mundo cuenta con instalaciones en la propia central para el almacenamiento en seco del combustible gastado en un edificio separado del edificio del reactor<sup>26</sup>. Por lo general, el combustible gastado depositado en contenedores en seco es menos vulnerable a ataques que el combustible gastado guardado en piscinas.

En España, ENRESA ha apostado por un Almacén Temporal Centralizado (ATC). El método de almacenamiento temporal que se practica hoy día no satisface los requisitos de una protección adecuada frente al impacto de una aeronave. El impacto de un gran avión de pasajeros contra instalaciones de almacenamiento temporal podría resultar en una desastrosa liberación de radiactividad bajo ciertas condiciones, especialmente si hay un incendio de alta temperatura y de larga duración en el combustible. Aún peor en un almacén centralizado ya que éste acumularía cantidades mucho mayores de combustible nuclear gastado que en uno

---

<sup>26</sup>En España ese tipo de instalación se conoce como Almacén Temporal Individualizado (ATI).

individualizado. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos métodos. Si se construyeran en las centrales nucleares, no serían necesarios los peligrosos envíos de combustible gastado a través de rutas de transporte público.

## 10.- Conclusiones

Tras el análisis de las consecuencias que supondría una colisión de un avión en las centrales nucleares, atendiendo a las reflexiones proporcionadas por la consultora científica independiente en seguridad nuclear, Greenpeace expone las siguientes conclusiones:

- La colisión de un avión en las centrales nucleares como ataque a estas instalaciones es posible. En general, las centrales nucleares más antiguas son las más vulnerables.
- Las medidas de protección de las centrales nucleares frente a una colisión de un avión son de uso muy limitado.
- La modernización o el refuerzo de las estructuras del edificio del reactor no es posible ni de utilidad por razones técnicas y económicas (debido a problemas de espacio y de cimentación).
- **En cualquiera de los reactores españoles, la colisión de un avión podría suponer emisiones radiactivas considerables. Las probabilidades de un accidente severo con las repercusiones más graves son muchísimo más altas en el caso de un choque contra una de las centrales antiguas (como en el caso de los reactores de Santa María de Garoña, Ascó 1 y 2 y Almaraz 1 y 2).**
- **La central nuclear de Santa María de Garoña es la más vulnerable de España.** La colisión deliberada de una aeronave contra este viejo reactor podría causar un accidente con fusión del núcleo de la más alta peligrosidad. También sería probable la emisión de una radioactividad adicional procedente de la piscina de combustible gastado. El resultado sería una emisión radioactiva equivalente a varias veces las emisiones de Chernóbil (1986) o de Fukushima (2011). Podría ser necesario evacuar y realojar a la población de grandes extensiones de territorio (hasta 100.000 km<sup>2</sup>). Sería posible que las muertes por radiación aguda se elevaran a varios miles de personas. El número de muertes por cáncer alcanzarían un millón, e incluso más.
- **Los edificios de los reactores en las unidades de Almaraz 1 y 2 y de Ascó 1 y 2 no podrían soportar la colisión de una aeronave.** Este tipo de ataque contra una de dichas unidades podría también conducir a un accidente de la máxima gravedad con las más altas emisiones radiactivas concebibles para cualquier secuencia de accidente en una central nuclear. No podría excluirse una liberación de radioactividad adicional procedente de la piscina de combustible.
- El choque de un avión de pasajeros contra la central nuclear de Cofrentes o Vandellós 2 probablemente no produciría un daño grave del edificio del reactor. Sin embargo, siempre es posible que se libere una gran cantidad de radioactividad, aunque sería considerablemente menor que si la colisión ocurriera en las centrales nucleares de Santa María de Garoña, Ascó o Almaraz. Si el avión que colisionara fuera un avión especialmente grande, como un Airbus A380, no pueden excluirse daños fundamentales en el edificio del reactor y, por consiguiente, que se produjera el accidente más grave: la fusión del núcleo. Para poder calcular el riesgo exacto, tienen que llevarse a

cabo investigaciones específicas para cada central.

- Trillo es probablemente la central nuclear menos vulnerable de España. No obstante, en el caso de colisión de un avión, no podría excluirse del todo una enorme liberación de radiactividad.

## 11.- Referencias bibliográficas

- ALVAREZ 2003 Alvarez, R. et al.: Reducing the Hazards from Stored Power-Reactor Fuel in the United States, Science & Global Security, Vol. 11, No. 1 (2003)
- BMU 2002 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. Septiembre 2001 – Ergebnisse der GRS-Untersuchungen aus dem Vorhaben „Gutachterliche Untersuchungen zu terroristischen Flugzeugabstürzen auf deutsche Kernkraftwerke“; Bonn, 27.11.2002
- BMU 2010 Ministerio Federal Alemán para el Medio Ambiente, la Conservación de Naturaleza y la Seguridad Nuclear (BMU): Convención de Seguridad Nuclear - Informe del Gobierno de la República Federal de Alemania para la V reunión de revisión en abril 2011, Bonn 2010 [http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201101264835/1/BfS\\_2010\\_Convention\\_Nuclear\\_Safety.pdf](http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201101264835/1/BfS_2010_Convention_Nuclear_Safety.pdf)
- CNS 1998 Convención de Seguridad Nuclear, España, Primer Informe Nacional, septiembre 1998, <http://www.csn.es/download/Primerinformeingles.pdf>
- DW 2011 DW-World.de: Bélgica aspira a eliminar gradualmente la energía nuclear para 2025, 31.10.2011, <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,15500989,00.html>
- ENRESA 2011 Enresa: Transporte y almacenamiento de Residuos de Alta Actividad, [http://www.enresa.es/activities\\_and\\_projects/high\\_wastes#bloque135](http://www.enresa.es/activities_and_projects/high_wastes#bloque135)
- ENSREG 2011 Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG), Declaración de ENSREG, Anexo 1, UE “Pruebas de Esfuerzo” especificaciones, Bruselas 31.05. 2011, <http://www.ensreg.eu/documents>
- ENSREG 2011a Grupo Europeo de Reguladores de Seguridad Nuclear (ENSREG): Declaración del Sr Andrej Stritar, Presidente de ENSREG, en la decimoquinta reunión del Grupo los días 12-13 de mayo de 2011, <http://www.ensreg.eu/node/284>
- FAIRLIE 2006 I. Fairlie, I.; D. Sumner: Torch (El otro informe sobre Chernóbil); informe de Rebecca Harms, Miembro del Parlamento europeo por Greens/EFA, abril 2006.
- FLEXRISK 2011 Flexible Tools for Assessment of Nuclear Risk in Europe (flexRISK), <http://flexrisk.boku.ac.at/>
- GONZALES 1978 A. Gonzales: "La central nuclear de Trillo: aplicación de la seguridad y la tecnología alemana en España", Nucl. Eng. Int.; (septiembre 1978).; Volumen 23 (276) págs. 31-43
- GP 2010 Greenpeace Alemania: Terrorangriffe aus der Luft auf (ältere) deutsche Atomkraftwerke, Bericht und Bewertung von Schwachstellen in der Luftsicherheit, septiembre 2010 [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/Bericht\\_und\\_Bewertung\\_von\\_Schwachstellen\\_in\\_der\\_Luftsicherheit\\_05092010.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/Bericht_und_Bewertung_von_Schwachstellen_in_der_Luftsicherheit_05092010.pdf)
- HAHN 1999 L. Hahn: Kernkraftwerke der Welt – Bestand, Funktionsweise,

Sicherheitsprobleme; in: Gefahren der Atomkraft; Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein, 2. aktualisierte Auflage, Kiel, mayo 1999

- HIRSCH 2001 H. Hirsch: Danger to German nuclear power plants from crashes by passenger aircraft, Greenpeace Germany, Hannover, noviembre 2001, <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/danger-to-german-nuclear-power/>
- HIRSCH 2005 H. Hirsch, O. Becker y otros: Nuclear Reactor Hazards, Ongoing Dangers of Operating Nuclear Technology in the 21th Century; Informe elaborado por Greenpeace Internacional; abril 2005
- HIRSCH 2005a H. Hirsch, O. Becker: Vulnerability of Nuclear Power Plants to Terror Attacks, An overview; Nuclear Energy and Security (NUSEC); Salzburgo (Austria 20 – 23 de julio 2005
- HOLT 2010 M. Holt, M.; A. Andrews.: Nuclear Power Plant Security and Vulnerabilities, CRS Informe para el Congreso, Elaborado por Miembros y Comités del Congreso de los EE. UU.; [www.crs.gov](http://www.crs.gov), 23 agosto 2010
- HSK 2003 Oficina Federal Suiza de Inspección de Seguridad Nuclear (HSK): Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz, HSK-AN-4626; Würenlingen, marzo 2003
- OIEA 2003 Organización Internacional de la Energía Atómica (IAEA): External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants; IAEA Safety Standard Series, Safety Guide, No. NS-G-1.5, 2003
- ILK 2002 Internationale Länderkommission Kerntechnik (ILK): Vermerk M zu Flugzeugabsturz, Untersuchungen zum gezielten Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges auf Kernkraftwerke, Ergebnisse aus den Gutachten, Wiesbaden, noviembre 2002
- NF 2011 Nucleonic Fuel: NRC board will review safety of Mark I reactors' spent fuel pools, Newsletter, McGraw-Hill, Volumen 36, número 17, 22 agosto 2011
- NF 2011a Nucleonics Fuel: NRC Fukushima task force recommends spent fuel pool upgrades, Volumen 36, número 15, 25 julio 2011
- NOH 2009 S. H. Noh: Analysis of an NPP Structure subjected to Vibrations Induced from Airplane Crashes, Proceedings of the KNS autumn meeting; Kyungju (República de Corea); 29-30 octubre 2009
- NSA 2006 Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias (NSA): Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage, Informe público, [www.nap.edu](http://www.nap.edu), 2006
- NW 2011 Nucleonics Week: Spanish high court upholds closure of Garona in 2013, Volumen 52, Número 29, 21 julio 2011
- NW 2011a Nucleonics Week: German government again plans to phase out nuclear power Volumen 52, número 22, 2 junio 2011
- NW 2011b Nucleonics Week: Germany's upper house approves phase-out, Volumen 52, Número 28, 14 julio 2011
- ÖKO 2007 Ökoinstitut: Analyse des Bedrohungspotenzials "gezielter Flugzeugabsturz" am Beispiel der Anlage Biblis-A, Darmstadt, 20.11.2007, <http://www.oeko.de/oekodoc/623/2007-163-de.pdf>

- PETRANGELI 2010G. Petrangeli: Large airplane crash on a nuclear plant: Design study against excessive shaking of components; Nuclear Engineering and Design 240 (2010), págs. 4037-4042
- PRIS 2011 Power Reactor Information System (PRIS), [www.iaea.org/programmes/a2/](http://www.iaea.org/programmes/a2/)
- RSK 2011 German reactor safety commission (RSK): Anforderungskatalog für anlagenbezogene Überprüfungen deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), RSK Stellungnahme 11.-14. mayo 2011, [http://www.rskonline.de/downloads/rsk\\_sn\\_sicherheitsueberpruefung\\_20110516\\_hp.pdf](http://www.rskonline.de/downloads/rsk_sn_sicherheitsueberpruefung_20110516_hp.pdf)
- STOHL 2001 A. Stohl, P. Seibert y otros: Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition; Atmos. Chem. Phys. Discuss., 11, 28319-28394, 2011, <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/11/28319/2011/acpd-11-28319-2011.html>
- THOMPSON 2005 G. Thompson: Potential Radioactive Releases from Commercial Reactors and Spent Fuel; Center for Risk and Security, The George Perkins Marsh Institute, Clark University, Worcester, MA, CRS DISCUSSION PAPER 2005-03, junio 2005
- USNRC 2001 Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos : Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants, NUREG-1738, febrero 2001