

O ACCIDENTE DE FUKUSHIMA: O IMPOSIBLE VOLVEU ACONTECER.

Xabier Cid Vidal

FACULDADE DE FÍSICA . USC

Ramón Cid Manzano

IES DE SAR - SANTIAGO

INTRODUCCIÓN

Estamos no ano 2011, vintecinco anos despois do accidente da central nuclear de Chernobyl. Faltan unhas poucas semanas para chegar ao día 26 de abril cando todo comezou. De súpeto os detectores de radiación en Chernobyl indican unha subida da concentración no aire do isótopo 131 do Iodo. Pero o accidente ocorreu hai moito tempo e ese isótopo do iodo ten unha vida moi curta. Acaban de chegar os primeiros núcleos radiactivos do accidente de Fukushima no Xapón. Parece o guiión dunha película pero é absolutamente certo. Chernobyl vai deixar de ser o único nome asociado a desastre nuclear en tempo de paz. Chernobyl foi un escenario distinto de Hiroshima e Nagasaki, pero eran ata o de agora os grandes nomes propios na historia negra da radiactividad (hai outra, que salva vidas a diario), pero agora todo o mundo (todo o mundo, literalmente) ven de aprender unha nova palabra relacionada con desastre nuclear: Fukushima. Ogallá dentro de pouco tempo desapareza da nosa memoria por non ter as consecuencias que si tivo a central ucraína.

Preténdese ao traves destas páxinas dar algúns datos que permita ao lector ou lectora coñecer mellor o que pasou nesa área de Xapón ligada para sempre á unha nova traxedia da tecnoloxía.

A CENTRAL DE FUKUSHIMA

A central nuclear Fukushima Dai-ichi (ou Fukushima I) é un conxunto de seis reactores nucleares situado no nordeste da illa principal de Xapón e a uns 230 km ao nordeste de Tokio. Ten unha potencia eléctrica total de 4,7 GW (4700 MW), facendo de Fukushima I unha das maiores centrales nucleares do mundo.

Para ter un punto de comparación, a central térmica de carbón de Pontes de García Rodríguez ten unha potencia eléctrica total instalada de 1,44 GW, utilizando catro grupos xeradores eléctricos.

A central de Fukushima foi deseñada pola compañía estadounidense General Electric e o seu primeiro reactor, Fukushima I-1, foi conectado á rede eléctrica no ano 1971. A propietaria da central é a compañía Tepco (Tokyo Electric Power Company).

Estaba planeada a construción de dous novos reactores para que entraran en servizo en 2016 e 2017, co que esta central ía ter unha potencia nuclear instalada case igual a todos os reactores nucleares españois xuntos (e todo isto nun área equivalente a un polígono industrial de tamaño pequeno). Menos dun mes despois do accidente o goberno ven de cancelar o permiso de construción deses dous reactores.



A só 11 km atópase a central nuclear Fukushima Dai-ni (Fukushima II) con catro reactores. En total, o Xapón ten 54 reactores nucleares con 47 GW eléctricos instalados, sendo a terceira potencia mundial neste tipo de enerxía detrás de EEUU, con 104 reactores e 101 GW, e de Francia, con 58 reactores e 53 GW.

Os seis reactores, suministrados por General Electric, son dos que permiten que a auga ferva na propia vasilla do reactor e por iso chámanse BWR (Boiling Water Reactor). Os reactores 1 ao 5 teñen un edificio de contención coñecido como tipo Mark I, e o reactor 6 do tipo Mark II. As diferencias non son importantes aos efectos que se pretenden aquí e falaremos do esquema xeral Mark I para explicar o seu funcionamento.

Actualmente hai no mundo 94 reactores do tipo BWR distribuídos por Estados Unidos, Xapón, Finlandia, India, México, Suíza, Suecia, Taiwan e España.

Non obstante, os reactores nucleares máis numerosos no mundo son do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), nos que non se deixa ferver a auga dentro da vasilla manténdoa a alta presión. En España hai oito reactores en funcionamento, dos BWR e seis PWR.

Un reactor moi semellante aos de Fukushima I (concretamente ao reactor nº 1) é o da central nuclear de Santa María de Garoña en Burgos. Esta central, a máis antiga actualmente en España (entrou en funcionamento en 1971 como a nº 1 de Fukushima), estivo rodeada de polémica no ano 2009 porque, próxima a cumprir os 40 anos para o que foi deseñada, os informes técnicos dábanlle a posibilidade de prórroga por dez anos, mentres que politicamente había opinións moi contrapostas en relación a súa continuidade. Finalmente concedeuse a prórroga ata 2013, e despois dos acontecementos de Xapón vai ser difícil que se amplíe ese prazo. En Cofrentes (Valencia) está o outro BWR español, que ten un deseño de reactor e de contención máis avanzados (foi conectado en 1984) que os de que operan en Fukushima I.

Hai inmediatamente que dicir que todas as centrais térmicas precisan dun suministro de auga importante para a súa normal operación, e por iso en Xapón, con 54 reactores agrupados para formar unha dúcia de centrais, non ten practicamente outra opción que situalos á beira do mar. Aparece aquí a resposta a unha cuestión frecuente destes días, por que colocar as centrais preto do mar. Outra cousa é que a central de Fukushima foi deseñada nos anos 60 e considerouse que unha cota de 5,7 metros para maremotos era axeitado, o que resultó insuficiente o día 11 de marzo de 2011.

COMO FUNCIONA O REACTOR NUCLEAR

Un reactor BWR ten un funcionamento semellante a calquera outro tipo de reactor nuclear. As barras de combustible constitúen o núcleo do reactor e consisten nunhas varillas de aleación de zirconio dentro das cales vai óxido de uranio enriquecido no isótopo U-235, que é o que vai sufrir fisión por acción dos chamados neutróns térmicos. A proporción en uranio ven sendo dun 3% de U-235 e o resto U-238. Este último non é fisible nesas condicións, pero si pode absorber

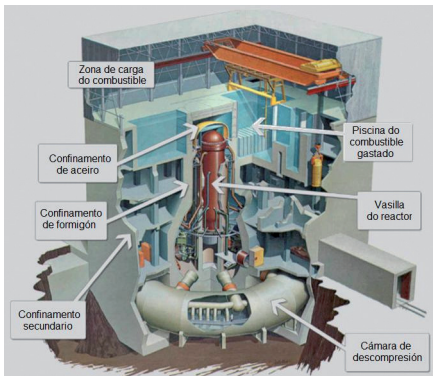
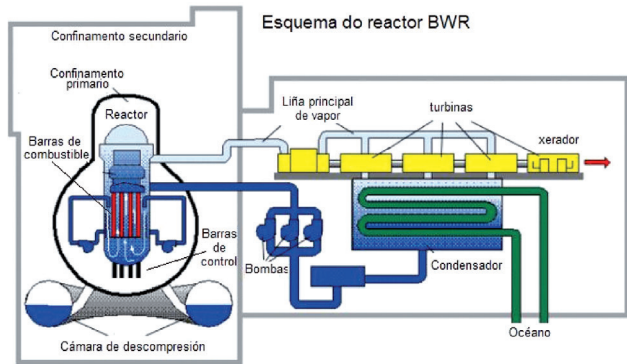
un neutrón para converterse despois por desintegración beta (emitindo un electrón) en Neptunio (Np-239), e este, nun proceso semellante, convértese en Plutonio (Pu-239).

O Pu-239 é tamén fisible como o U-235 e cando se reprocesa o combustible gastado pode separarse xunto co uranio para formar un óxido mixto de Uranio e Plutonio, coñecido como MOX. Precisamente, a unidade 3 de Fukushima presenta barras de combustible nun 6% con este tipo de óxido. De aquí ven a preocupación sobre a presenza do Plutonio nos efluentes contaminados.

Outro elemento de interese para comprender o accidente é o zirconio. Utilízase como formante das varriñas dadas as propiedades mecánicas e térmicas da aleación na que participa, pero sobre todo por ser un mal absorbente de neutróns, o que como é obvio é algo importante a considerar.

Outro elemento imprescindible é o sistema de control. Trátase dun conxunto de barras feitas dun composto borado (carburo de boro, aceiro borado, etc), que permite, segundo o grao de introdución das mesmas entre os elemento de combustible, controlar a presenza de neutróns térmicos no interior do reactor. Isto débese ao alto poder absorbente de neutróns que presenta o boro. Mesmo se pode engadir sales borados á auga do reactor para que tamén modifica a densidade neutrónica.

O terceiro compoñente fundamental é a auga. Esta actúa dunha parte como moderador de neutróns e doutra como refrixerante. No primeiro caso, os neutróns baton contra os núcleos de hidróxeno da auga e van diminuíndo a velocidade coa que saíron do proceso de fisión previo, e xa moderados poden ser absorbidos eficazmente por outros núcleos de U-235. Un destes núcleos recibe o neutrón e convértese nun inestable U-236 que finalmente fisiona para dar dous núcleos máis pequenos e 2 ou 3 neutróns velozes que deberán ser moderados para continuar a cadea da reacción. A fisión xera a saída de dous novos núcleos que arrastran candansúa proporción de electróns dando lugar a dous novos átomos. De aí veñen os moi nomeados estes días: Iodo.131, Cesio-137 ou Sr.90. En realidade a nómina de derivados da fisión é moi grande e constitúen os residuos radioactivos que e en condicións normais de operación deben quedar dentro das varriñas, a excepción dalgúns gases como os isótopos do Xenón. O interesante é que esos restos nada máis producirse móvense velozmente, pero ao seu carón hai sobre todo átomos de U-238 contra os que colisionan. O resultado é unha enorme axitación dentro das varriñas que podemos traducir en termos dunha importante elevación da temperatura. As propias paredes das varriñas acaban por ser partícipes desa axitación e aumento de temperatura, e finalmente a auga circulante recibe esas enerxía vibratoria. Este é en resumo o mecanismo que permite trasladar a enerxía de fisión nuclear a auga, que se comporta entón, ademais de moderador, tamén como refrixerante.



É absolutamente imprescindible que haxa auga circulando dentro do reactor para que a súa temperatura estea por debaixo dos límites de comportamento de deseño dos materiais que forman o reactor.

Un aspecto a destacar é que se falta auga temos naturalmente o problema do sobrequecemento e unha posible fundición total o parcial do núcleo do reactor; pero tamén é importante indicar que se diminúe a auga no circuito baixa o número de neutróns moderados e daquela decrece o número de fisións. Non obstante, o temperatura interna nas varías é moi alta, e a falta de auga fai que a enerxía que continuamente os isótopos radioactivos xeran nos seus propios procesos de desintegración se sume a que xa teñen derivada dos procesos de fisión. Por tanto, a falta de refrixerante que extraía esa enerxía térmica provoca un progresivo aumento da temperatura das varías. Como veremos despois, isto foi o que desencadenou os accidentes nos diferentes reactores implicados.

A auga en condicións normais de operación aumenta a súa temperatura converténdose en vapor a alta presión que finalmente é conducido ata as turbinas que moveran o xerador eléctrico producindo a electricidade. A unidade 1 de Fukushima, que é a mais antiga e modesta, ten unha potencia de 460 MW eléctricos, o que significa que xera uns 1500 MW térmicos. É dicir, cada segundo xera 1500 millóns de Joules ou uns 370 millóns de calorías. Por tanto, en cada segundo sería quen de, por exemplo, facer que unhas 3,7 toneladas de auga pasen de 0 a 100 °C cada segundo. É fácil, pois, darse conta do poder que este tipo de enerxía produce. Ademais, hoxe en día hai reactores que triplican a potencia do nº1 de Fukushima.

Despois de pasar polas turbinas, a auga pasa por un sistema de enfriamento -o condensador- para voltar ao reactor a unha temperatura suficientemente baixa para repetir o ciclo de forma axeitada.

O condensador toma auga do mar devolvéndoa a unha temperatura maior. Como xa foi comentado, e polos números que acabamos de indicar, precísanse inxentes cantidades de auga no proceso e por iso no Xapón as centrales nucleares constrúense en moitos casos na mesma costa oceánica.

Unha última consideración técnica está relacionada coa cámara de descompresión (o supresión) que se atopa no fondo do reactor. Trátase dunha especie de recipiente con forma de toroide con auga líquida que permite que o exceso de vapor xerado se condense. A presenza de auga líquida nesta cámara é tamén fundamental. Naturalmente, os reactores máis numerosos, PWR, non teñen este dispositivo porque o vapor prodúcese fóra do reactor nos xeradores de vapor.

Finalmente, como se ve no esquema, ademais do propia contención que en si mesmo implica a vasilla do reactor, hai unha primeira contención hermética de formigón de moi anchas paredes no que se mantén unha presión menor que a do exterior, para que se se produce unha fisura no edificio, o aire entre sempre desde o exterior e non ao revés. Este primer confinamento está dentro dun segundo edificio que é o que vemos desde fóra en forma de caixa de cor claro. Nese segundo edificio están instalados diversos equipos e instalacións entre a que destacamos a piscina do combustible gastado.

COMO SE DESENCADENARON OS ACCIDENTES

Na central de Fukushima I, como en toda planta nuclear, había dúas cuestións de seguridade prioritarias. Por un lado manter en funcionamento os circuitos de refrixeración para evitar el sobrequecemento/calentamiento de este. Para iso, a central contaba cun suministro eléctrico da rede exterior (ademais da súa propia produción eléctrica) e, por se este fallaba, un suministro auxiliar mediante motores de gasoil. Mesmo están dispoñibles un grupo de baterías eléctricas como última opción.

A segunda prioridade era evitar fugas de substancias radiactivas. Xa falamos na sección anterior dos diferentes confinamentos habilitados a tal fin.

A central contaba obviamente con mecanismos antisísmicos e no momento de se producir o terremoto os tres reactores en funcionamento (1, 2 e 3) entraron en parada segura introducíndose as barras de control, interrompíndose a produción eléctrica propia. O primeiro problema foi que o suministro eléctrico da rede exterior tamén se interrompiu inesperadamente como consecuencia do seísmo. Neses momentos, os xeradores diésel comezaron a funcionar segundo o previsto. Pero aos cincuenta minutos tras o terremoto, chegou o maremoto, inundou toda a zona e produciu a parada dos xeradores de combustible da central. Entraron en funcionamento as baterías, pero as oito horas agotáronse e os reactores quedaron sen fonte de enerxía algunha.

Aínda que se inicie o proceso de apagado dun reactor nuclear, as varñas de combustible seguen producindo calor durante un tempo considerable. Ao deixar de funcionar o circuito de arrefriamente, os reactores 1, 2 e 3 comezaron a aumentar a temperatura sen control. Para empeorar as cousas, apenas se dispoía de información na central dado que a maior parte de sistemas no funcionaban, pola falta de fluído eléctrico.

Co aumento da temperatura comezan varios procesos simultáneos. Por unha parte, obviamente comezan os danos estruturais nos elementos combustibles que poden implicar a liberación de parte do material que conteñen. Aqueles produtos máis volátiles serán obviamente os de máis fácil liberación, como é o caso do iodo e o cesios. Un tercer efecto é a xeración de máis vapor e o aumento de temperatura do mesmo. Finalmente hai dous procesos que xeran gas hidróxeno. Por riba dos 1500 °C a auga comeza a se dissociar en H₂ e O₂, e doutra parte a auga comeza a reacción co zirconio que forma parte das varñas de combustible, oxidándose a Zr (IV):



Estos aumentos de presión debido á presenza de vapor e gases obriga nas primeiras horas a venteos máis ou menos controlados ao exterior. En condicións normais de operación estas liberacións gaseosas son realizadas de forma controlada e o uso do sistemas de filtraxe evita que determinadas partículas radiactivas podan saír ao exterior. Pero cos sistemas eléctricos inutilizados todos estes procesos controlados non eran posibles. En todo caso esas liberacións produciron acumulación de hidróxeno no edificio secundario que acaba provocando sucesivamente as explosións do sábado 12 de marzo no reactor 1, a do día 14 de marzo no reactor 3 e ao do día seguinte no nº 2. Os edificios exteriores resultaron seriamente dañados, e nalgunhas das explosións puido terse danado tamén algún dos sistemas de contención primario, pois de feito houbo unha brecha no reactor nº 2 que tivo que ser selada non sen problemas..

Non se tratou, pois de explosións da vasilla do reactor o que tería lanzado material radiactivo ao exterior, provocando unha contaminación descontrolada da zona.

É importante sinalar que dada a concentración de U-235 existente no combustible non é posible que se produza unha explosión nuclear, sendo de natureza química as que destruíron os edificios máis exteriores de cada planta.

Hai controversia en relación a se Tepco tardou demasiado en tomar a decisión de comezar co arrefriamento de todas plantas. Ese arrefriamento usando directamente auga de mar como única posibilidade implicaba inevitablemente a perda definitiva dos reactores. Pode que os propietarios pensasen que non había danos serios inicialmente e que unha rápida recuperación da electricidade permitiría volver a situación a un estado estable. Unha vez que as ex-



plosións se desencadenaron e houbo un incremento preocupante das concentracións de certos isótopos raidactivos xa non houbo máis opción que tentar arrefriar os sistemas con todos os medios posibles: A día de hoxe non se sabe cal é o estado certo no interior dos tres reactores que estaban en funcionamento o día do terremoto. É dicir, non se coñecen os danos definitivos no núcleo dos reactores danados.

Outro problema non menos importante é a situación das piscinas onde se atopa o combustible gastado. Isto foi de especial preocupación no reactor 4 que non estaba en operación no momento do terremoto. Unha vez que son retirados do reactor, os elementos combustible gastado son colocados nunha piscina blindada por un tempo duns cinco anos. Trátase dun material muy peligroso que require refrixeración do mesmo xeito que o reactor. A falta de electricidade provocou a falta de arrefriamento nas piscinas o que elevou a temperatura a valores excesivos nas barras de combustible. Isto provoca liberación de vapores radiactivos que se suma aos producidos nos reactores propiamente ditos.

A CONTAMINACIÓN RADIATIVA

As liberacións continuas de vapor e as explosiones de hidróxeno danando os edificios favoreceron a emisión de importantes cantidades de isótopos radiactivos. Así o domingo 13 de marzo detectábanse xa cantidades preocupantes de Iodo-131 e Cesio-137. O martes 15 houbo niveis de 400 miliSievert por hora (mSv/h). Sin entra en detalles técnicos, basta para valorar ese dato que estamos sometidos a unha media de 2,4 mSv por ano (ano $\bar{}$) e un traballador dunha central nuclear ten un límite de dose de 100 mSv cada 5 anos.

O mércores 16 acadáronse 1000 mSv/h nas proximidades da central, e por tanto se estivésemos unha hora nese lugar estaríamos expostos a unha radiactividade equivalente á dez veces a máxima permitida por un técnico da central en cinco anos.

As alteracións do ADN son un mecanismo natural no organismo humano, xerándose entre unha e dous alteracións cada 2000 células. Tras recibir unha dose de 100 mSv, o organismo multiplica ese ritmo por cinco, producindo entre cinco e dez alteracións cada 2000 células. Isto pode implicar a posibilidade de que se produza un proceso canceríxeno. Nestes casos, a enfermidade adoita tardar entre cinco e dez anos en concretarse.

Na cidade de Namie, a 20 km de Fukushima téñense detectado niveis de radiactividade 1600 veces superiores ao normal. Este incremento foi posiblemente causado polo desprazamento da nube radiactiva. Este tipo de valores serán perigosos en función do tempo que se manteñan. Un área de alomenos vinte quilómetros arredor da central vai quedar seriamente contaminada por mor das deposicións debido as emisións aéreas desde a central. Xa se verá canto tempo deberá trascorrer para que esas zonas volvan á normalidade.

A radiactividade tamén se ten incorporado á cadea alimentaria. O sábado 19 de marzo detectouse Iodo-131 no leite en nas espinacas producidas en rexións cercanas á central, pero tamén no agua potable de Tokio. En todo caso, de momento parece que as cantidades aínda que superiores ao normal non son preocupantes para a saúde.

Un caso aínda non totalmente entendido é a presenza de plutonio en determinadas



zonas da área da central. Podería terse debido á emisións desde o reactor 3 que presenta nun 6% combustible MOX, pero a aparición ademais de isótopos de Pu non compatibles cos que hai no reactor fai pensar que poda que haxa contribución de produtos radioactivos acumulados no fondo do mar debido a deposicións desde explosión nucleares de carácter bélico. O maremoto tería levado esos residuos a esas zonas.

Outra fonte sería de contaminación radioactiva débese aos verquidos de auga contaminada ao océano. Trátase do verquido voluntario dunhas 11500 toneladas de auga radioactiva e do verquido accidental de auga altamente radioactiva que durou máis de 48 horas, a razón duns 7000 litros por hora, e que procede do reactor número 2. O verquido voluntario procede do arrefriamento dos reactores e está contaminado sobre todo por radionucleidos lixeiros como iodo, que emitirá radiactividade durante uns 160 días, e de cesio, que será radiotóxico durante uns 120 anos. O verquido destas 11500 toneladas produciuse para habilitar espazo destinado a almacenar líquidos aínda máis radioactivos como a auga que estivo fugándose do reactor número 2. Neste reactor, como se indicou máis arriba detectouse unha fenda que finalmente foi selada con silicato de sodio. A contaminación radioactiva desta auga é enorme e probablemente débese a ter estado en contacto co núcleo ou co combustible gastado. Este verquido debería ter sido evitado pois esa auga tan radioactiva tería que ser tratada como resíduo radioactivo. Haberá que ver se foi inevitable ou é unha negligencia dos responsables da central.

A extensión desta contaminación dependerá da distribución das correntes na zona e vai afectar a grandes extensións do fondo mariño. Ademais o desprazamento dos peixes extenderá a radiactividade máis aló da zona do verquido o que unido a facilidade de mutación que teñen agravará o problema. Aquí hai algo propio deste accidente e que non apareceu en Chernobyl, as consecuencias no medio mariño, coa dobre dimensión: a ecolóxica e a económica debido a importancia da pesca na economía xaponesa.

De momento un enorme guindastre foi enviado desde EEUU para levantar un muro de contención que evite novos verquidos ao mar.

Xa veremos se outros muros acabarán por ter que ser construídos para cubrir os reactores danados, pois probablemente os danos nos seus núcleos requirirán moitos anos de traballos para deixar as zonas libres de radiactividade perigosa. Falar disto lembra inevitablemente o “sarcófago” de Chernobyl.

REFLEXIÓNS FINAIS

Os números ás veces parecen que teñen vida. 25 é un número redondo para celebrar algo. E digo ben celebrar, porque despois de 25 anos sen problemas de importancia para a poboación, nos 436 reactores nucleares que hai no mundo, parecía que estabamos a salvo dunha nova catástrofe. A enerxía nuclear podía seguir sendo unha aliada na loita contra emisións de gases de efecto invernadoiro, e ademais era, nesta segunda década do século XXI, unha clara opción para a xeración de enerxía eléctrica. De feito hai neste momento 53 reactores en construción e 142 planificados. Pero outro número, o 9 na escala de Richter, vén de nos devolver a hai vinte e cinco anos.

É certo que a día de hoxe os únicos mortos na central xaponesa son dous desafortunados traballadores que morreron o primeiro día do terremoto debido a traumatismos causados probablemente polo maremoto posterior. Quizais uns poucos centos de traballadores da central teñan recibido doses importantes de radiación e no futuro precisen de atención especializada, pero é certo que todo isto palidece a carón dos trinta mil mortos e a enorme destrución causada. Non obstante, non parece sensato que cando xornalísticamente Fukushima xa non interese cheguemos á conclusión de que non hai importantes leccións a aprender.

O accidente nuclear de Three Miles Island (Harrisburg, EEUU) de 1979 está relacionado cunha certa soberbia nos inicios do uso da enerxía nuclear, que agora xa estaría superada. Chernobyl foi o resultado da falta de control externo e a decadencia dun réxime político, e as leccións estarían ben aprendidas. Pero o Xapón no S.XXI non cadra en ningunha desas dúas situacións. Ninguén contaba con este terceiro episodio. Ademais o accidente de 1979 en Harrisburg demostraba que o edificio de contención tiña funcionado para o fin para o que foi deseñado. Podía, xa que logo, acontecer un novo accidente, pero as múltiples medidas de seguridade entrarían en acción, e no peor dos casos o accidente implicaría consecuencias soamente na propia instalación.

Pódese argumentar que esa área de Xapón foi sacudida por un terremoto de intensidade enorme e que o maremoto superou as previsións máis pesimistas. Pero isto lembra de novo as argumentos lidos e escoitados co gallo de Harrisburg e Chernobyl: ten que darse unha cadea demasiado improbable de acontecementos para que se volva repetir. Pois ben, estamos outra vez nesa situación.

Agora estudárase o accidente con todo detemento, aparecerán todas as carencias e as decisións erróneas das primeiras horas, realizarase un conxunto de propostas para mellorar a resposta da instalación e do persoal perante o peor escenario posible, iremos esquecendo o accidente e entraremos nunha especie de autoconvencimiento de que todo está de novo controlado. Porén, a posibilidade dun cuarto accidente moi grave queda aberta para sempre, e iso ten que pesar de agora en adiante, e de forma inequívoca, en calquera decisión en planificación enerxética.

REFERENCIAS

Os datos relativos coa historia dos acontecementos teñen sido obtidos das novas publicadas durante o seguimento do accidente. En particular son de moito interese os recursos online de:

OIEA: <http://www.iaea.org/>

CNN: <http://www.cnn.com/>

New York Times: <http://www.nytimes.com/>

Le Monde: <http://www.lemonde.fr/>

Outro tipo de datos xerais téñense obtido de

FAE - Forum Atómico Español: <http://www.foronuclear.org>

AREVA - Francia: <http://www.areva.com/>

NRC – Nuclear Regulatory Commission USA: <http://www.nrc.gov/>

Outras fontes consultadas son:

Máximo Plo. “Fukushima 2011” :Conferencia impartida na Facultade de Física da USC o 04/04/2011.

Francisco Castejón. “Fukushima: continúa la pesadilla”. El Correo 08/04/2011 pax 32.

Rafael Herranz. “La salud en los tiempos de la radiación”. Diario Médico 08/04/2011 pax 12-13.

Ignacio Durán. “O enigma do plutonio en Fukushima.” La Voz de Galicia 05/04/2011 pax 30.