

Tercer ejercicio. Protección radiológica

Tema 26

Lecciones aprendidas en materia de protección radiológica resultantes de los accidentes nucleares. Implantación de medidas adicionales para hacer frente a emergencias radiológicas en centrales nucleares

RESUMEN EJECUTIVO

En este tema se van a describir las secuencias de hechos, consecuencias radiológicas y las lecciones aprendidas de cada uno de los principales accidentes ocurridos dentro del campo de la energía nuclear en instalaciones nucleares de operación (Windscale, Three Miles Island, Chernobyl, Tokaimura y Fukushima). En todos los accidentes nucleares ha estado presente la componente humana como una de las causas que lo motivaron.

Han existido otros accidentes nucleares en los inicios de la era nuclear pero debido a su componente militar y el secretismo existente en los mismos no permitieron conocer en profundidad el alcance de este tipo de accidentes en las instalaciones nucleares militares

Contenido

| | | |
|-------|----------------------------------------|----|
| 1 | CLASIFICACIÓN DE ACCIDENTES | 2 |
| 1.1 | LOS ACCIDENTES DE LA ESCALA INES | 2 |
| 2 | ACCIDENTES NUCLEARES OCURRIDOS | 3 |
| 2.1 | WINDSCALE | 3 |
| 2.1.1 | Descripción del suceso | 3 |
| 2.1.2 | Consecuencias radiológicas | 3 |
| 2.1.3 | Lecciones aprendidas | 4 |
| 2.2 | THREE MILES ISLAND | 4 |
| 2.2.1 | Descripción del suceso | 4 |
| 2.2.2 | Consecuencias radiológicas | 5 |
| 2.2.3 | Lecciones aprendidas | 6 |
| 2.3 | CHERNOBYL | 7 |
| 2.3.1 | Descripción del suceso | 7 |
| 2.3.2 | Consecuencias radiológicas | 8 |
| 2.3.3 | Lecciones aprendidas | 10 |
| 2.4 | TOKAIMURA | 11 |
| 2.4.1 | Descripción del suceso | 11 |
| 2.4.2 | Consecuencias radiológicas | 11 |
| 2.4.3 | Lecciones aprendidas | 12 |
| 2.5 | FUKUSHIMA DAIICHI | 13 |
| 2.5.1 | Descripción del suceso | 13 |

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 2.5.2 | Consecuencias radiológicas | 14 |
| 2.5.3 | Lecciones aprendidas | 17 |
| 3 | BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA | 20 |

1 CLASIFICACIÓN DE ACCIDENTES

Según el glosario de términos nucleares del OIEA, se define accidente como *“cualquier suceso no intencionado, en el que se incluyen errores de operación, fallos de equipos u otros percances, el cual las consecuencias reales o potenciales no son despreciables desde el punto de vista de la protección o seguridad”*. Si en el accidente están involucradas instalaciones que emitan materiales nucleares y que como consecuencia de esa emisión puede haber consecuencias radiológicas significativas en otro estado; entonces el suceso se denomina accidente nuclear.

1.1 LOS ACCIDENTES DE LA ESCALA INES

De acuerdo con la escala INES, se definen accidentes como los sucesos comprendidos entre el nivel 7 y nivel 4, aunque desde el punto de vista radiológico el nivel 3 también conlleva liberaciones de material radiactivo al exterior.

Las consecuencias radiológicas de este tipo de accidentes son las siguientes:

NIVEL 7 (Liberación grave). Desde el punto de vista de la emisión al exterior de radiación, este accidente se corresponde con la liberación equivalente a la atmósfera de varias decenas de miles de terabequerelios de I-131., de acuerdo con la sección II-1-3 del Manual de usuario de INES (2001).

Esta liberación se corresponde con la emisión de gran parte del inventario del núcleo de una instalación nuclear. Con este tipo de liberación existe la posibilidad de efectos deterministas a la salud en las personas, así como también efectos estocásticos. También son probables las consecuencias medioambientales a largo plazo.

NIVEL 6 (Liberación significativa). Desde el punto de vista de la emisión al exterior de radiación, este accidente se corresponde con la liberación equivalente a la atmósfera del orden de miles a decenas de miles de terabequerelios de I-131.

Con esta liberación es muy probable que haya que tomar medidas protectoras tales como el confinamiento o la evacuación con el fin de disminuir los efectos radiológicos a la salud de las personas en las zonas cubiertas por el plan de emergencia de la central.

NIVEL 5 (Liberación limitada). Supone la liberación al exterior de una cantidad radiológicamente equivalente entre centenas y millares de terabequerelios de I-131.

Como consecuencia de tal liberación habrá que tomar medidas de protección a la población para minimizar la probabilidad de efectos a la salud. Dichas medidas de protección serán confinamiento en edificios y/o evacuación de la población.

NIVEL 4 (Liberación menor). Supone la liberación al exterior de una cantidad de radiación al exterior que suponga una dosis al individuo crítico del orden de unos pocos milisievert

Con esta liberación es generalmente improbable la aplicación de medidas de protección fuera del emplazamiento, excepto los controles locales de alimentos

NIVEL 3 (Liberación muy pequeña). La liberación al exterior es tal que la dosis producida en el individuo crítico es de décimas de milisievert.

No son necesarias las medidas de protección fuera del emplazamiento. Este tipo de nivel no está considerado como accidente dentro de la escala INES.

2 ACCIDENTES NUCLEARES OCURRIDOS

2.1 WINDSCALE

2.1.1 Descripción del suceso

La instalación de Windscale en el Reino Unido es un Reactor productor de Plutonio utilizable para la investigación, y por qué no, para la obtención de este elemento y su posterior aplicación en los submarinos nucleares.

En 1957, el grafito que hace de moderador en esta planta (refrigerada por aire), se incendió y como consecuencia, una significativa cantidad de productos radioactivos, fueron emitidos al exterior.

Este reactor sirve además para la producción de Po-210 (Polonio) a partir del Bismuto, el cual también fue expulsado del núcleo activo. Este reactor esta explotado bajo la Autoridad del Gobierno Británico.

En octubre de 1957, después de una parada normal del Reactor, los operadores iniciaron el proceso de eliminación del calor residual (Energía por efecto Wigner). El procedimiento consistía en llevar el reactor a muy baja carga con los ventiladores fuera de servicio. El calentamiento del grafito hace que la energía del efecto Wigner, sea eliminada en condiciones controladas, pero en el caso que nos ocupa, los operadores comprobaron que la temperatura disminuía en lugar de elevarse.

La investigación posterior encontró que, en ciertas áreas del reactor, la temperatura sufrió incrementos, pero que en otras fue al contrario de modo que en determinadas áreas se eliminó energía y en otras no. Los operadores siguieron insistiendo, añadiendo más potencia para eliminar el efecto Wigner y ello originó la ignición del grafito.

Al 4º día, había indicaciones de radioactividad en la salida de gases de la planta hecho que se atribuyó a la rotura de alguna barra de combustible. Los operarios, provistos del equipo adecuado, abrieron el frontal del Reactor y encontraron que un área del combustible estaba al rojo. Eso fue la primera indicación seria de lo que estaba pasando ya durante los días anteriores. Finalmente, al 5º día, por inundación del núcleo, el fuego se apagó.

El reactor quedó evidentemente en ruinas. Gases radioactivos, (tales como lodo y gases nobles) fueron emitidos al medio ambiente.

2.1.2 Consecuencias radiológicas

La investigación posterior dio que alrededor de 10^{15} Bq de I-131 fueron emitidos, $1,4 \cdot 10^{16}$ Bq de Xe-133, y $5 \cdot 10^{13}$ Bq de partículas

Como resultado, durante 44 días se prohibió la distribución de leche en un radio de 3 millas. El "Medical Research Council Committee" concluyó en que el accidente no tuvo

consecuencias directas para la población y ninguna medida especial a parte de la citada, se debía tomar.

Sin embargo, el número actual de muerte debidas al accidente es todavía un contencioso importante. La media de muertes estimadas es de 300. Se ha realizado numerosos estudios epidemiológicos que demuestran un aumento de cáncer de tiroides y de leucemia entre los niños afectados por el accidente.

Las estimaciones medias de dosis en la tiroides debida a la emisión de I-131, para la población adulta estuvo comprendida entre 5 y 20 mSv, mientras que para los niños fue entre 10 y 60 mSv.

El efecto esperado sobre la salud sería un incremento en el riesgo de cáncer de tiroides (el riesgo de cáncer en la persona más expuesta se estimó en 1/300). Este riesgo se estimó para los pocos niños que recibieron dosis al tiroides del orden de 160 mSv. Para adultos con niveles de radiación más altos, el riesgo se estimó en 5 veces menor.

El fuego emitió también cantidades importantes de Po-210, cuya emisión a la atmósfera produjo unas dosis de 2 mSv en los adultos y de 3 mSv en los niños. El riesgo de cáncer de pulmón por la incorporación de este radionúclido se estimó en 1/200000.

Los riegos adicionales producidos por el incendio de Windscale fueron pequeños en comparación con el riesgo de cáncer debidos a otros factores (el riesgo de cáncer fatal en el Reino Unido es de 1/300 y por año).

2.1.3 Lecciones aprendidas

Las lecciones aprendidas desde el punto de vista de la protección radiológica

- Se mejoraron los estudios sobre la emisión accidental de radiyodos a la atmósfera.
- Se mejoraron los modelos de dispersión atmosférica a largas distancias. Se desarrollaron convenios internacionales en los que se trataba la compensación con países transfronterizos en caso de accidentes nucleares.

2.2 THREE MILES ISLAND

2.2.1 Descripción del suceso

En marzo de 1979, en la Unidad 2 de la Central Nuclear de Three Mile Island tuvo lugar el primer incidente serio de fusión del núcleo del reactor, incidente que en menor escala ya ocurrió en el reactor Fermi-1, cerca de Monroe (Michigan).

El reactor era tipo Babcox & Wilcox con los generadores de vapor verticales con tubos en U invertidos. El incidente se inició debido al cierre inadvertido de una válvula del sistema secundario.

El desarrollo del incidente fue el siguiente:

Una válvula del sistema secundario falló cerrada ocasionando un menor aporte de agua a los generadores, disparando las bombas de agua de alimentación principal y la Turbina.

El diseño es tal que los generadores en breves segundos se quedaron sin agua transformada toda ella en vapor. El sistema estaba diseñado para que, en este caso, las

bombas de agua de alimentación auxiliar arrancasen, tal como lo hicieron y suministraran agua a los Generadores de vapor, pero determinadas válvulas estaban cerradas.

El reactor durante breve tiempo continuó suministrando calor y calentando el agua del circuito primario pero dado que el sumidero de los generadores de vapor no "existía", el reactor se fue calentado más y más.

La presión creció en el circuito primario hasta que ocurrió el disparo del reactor. La válvula del tanque de alivio del presionador, abrió por la causa antes citada, elevación de la presión, pero falló de nuevo al cerrar y se siguió descargando líquido al tanque. La presión descendió bruscamente, pero los operadores no se dieron cuenta de cuál era el motivo de que ello ocurriera. El disco de ruptura del tanque de alivio del presionador no soportó la presión y se rompió. Cuando eso ocurrió, el vapor inundó el edificio de Contención.

A medida que la presión descendía en el circuito primario, el agua de este empezó a hervir.

Los operadores pararon las bombas de Inyección de emergencia pensando que había suficiente agua en el presionador.

Como consecuencia se originaron vacíos (huecos) en el circuito primario y a medida que el combustible se calentaba, las burbujas iban en aumento, empeorando la situación. El metal de las vainas de combustible se iba sobrecalentando. Es posible que por reacciones químicas, se obtuviera hidrógeno que fue emitido al edificio de Contención.

En este punto, la presión en la Contención era de 30 psig, pero empezó a disminuir por la combinación del oxígeno y el hidrógeno de su atmósfera.

La inyección de agua al final consiguió elevar el nivel del presionador hasta que el enfriamiento del primario se consiguió.

2.2.2 Consecuencias radiológicas

Los estudios efectuados indicaron que la máxima exposición alcanzó los 83 mrem (0.83 mSv). Posteriores estudios realizados por la Agencia Federal concluyeron que no se alcanzaron valores de dosis superiores a los predichos inicialmente.

Un individuo localizado hoy día en las cercanías de la zona del accidente estaría sometido a una exposición de 35 mrem (0.35 mSv).

Los estudios realizados sobre las dosis en el accidente de TMI indicaron que éstas fueron demasiado bajas para inducir cualquier efecto observable de cáncer.

Basándose en los estudios epidemiológicos de los supervivientes de las bombas atómicas, los análisis de riesgo indicaron que se podía predecir una muerte por cáncer debido a la emisión de radiación en el accidente durante toda la vida de la población existente dentro del radio de 50 millas.

Por tanto, no había razones científicas para estudiar los efectos sobre la salud de la radiación emitida en este accidente.

Se ha dicho que no hubo efecto sobre el público, principalmente por la estructura del edificio de contención. Estudios posteriores al accidente demostraron que casi todos los productos de fisión peligrosos se disolvieron en agua y se condensaron en el interior de las superficies de contención evitando la dispersión a la atmósfera.

Los daños materiales en la instalación fueron muy grandes, y la tensión psicológica a la que se vio sometida la población, especialmente en las personas que vivían cerca de la central nuclear llegaron a ser muy graves en algunos casos.

Las principales características de la emisión de los productos de fisión fueron:

Fusión parcial del núcleo del reactor

Emisión de 9% de gases nobles y 0,0001% de yodos

La principal vía de exposición en el cálculo de la dosis fue la externa por exposición a la nube.

Se ordenó una evacuación preventiva de mujeres embarazadas y de niños.

2.2.3 Lecciones aprendidas

A grandes rasgos se puede señalar que este accidente supuso un hito decisivo para renovar la metodología de evaluación de la seguridad de las CC.NN. relacionándola con la metodología probabilista, ya que en este accidente se dieron tres aspectos identificados en el documento WASH-1400: transitorio, LOCA pequeño y error del operador.

También se comprobó que los términos fuente utilizados hasta entonces estaban muy sobredimensionados, ya que las consecuencias radiológicas del accidente fueron menores que las predichas con estudios anteriores.

Las lecciones más importantes fueron las obtenidas por la Comisión Kemeny. Dicha comisión fue promovida por el presidente Carter y dio como resultado una serie de recomendaciones y mejoras realmente muy importantes y relacionadas con lo siguiente:

- Nuevo diseño de paneles de control, ya que los actuales hasta ese momento no prestaban la asistencia adecuada para determinar el estado de la planta.
- Implantación de equipos de medida para poder medir correctamente en condiciones de accidente.
- Necesidad de definir zonas de planificación de la emergencia; y aprobación y verificación de éstas antes de conceder la licencia de operación al reactor.
- Implantación de un programa de entrenamiento a los operadores en ejercicios de emergencia.
- La comunicación a la población debería realizarse a través de una sola fuente autorizada durante el accidente.
- Los accidentes nucleares estudiados deberían contemplar un amplio espectro de estos (Utilización del análisis probabilista de seguridad).

Las empresas eléctricas reconocen sus responsabilidades. Una industria auto asistida se formó a tal objeto: El Instituto de Operaciones Nucleares a Potencia (INPO). Esta Organización realiza varias funciones:

1. Evalúa eventos y métodos utilizados dentro de la Industria Nuclear y emite sus recomendaciones.

2. Realiza periódicamente auditorias en las Instalaciones americanas incluyendo operaciones, mantenimiento, ingeniería, entrenamiento, protección radiológica, química y soporte técnico.
3. Suministra un entrenamiento de elevada calidad para el personal de las instalaciones nucleares, incluyendo la dirección de estas.
4. Las empresas unitariamente adquieren los simuladores adecuados para el entrenamiento del personal.

La NRC tomo así mismo la decisión de imponer un determinado número de cambios significativos en determinados equipos. Los Documentos emitidos fueron los NUREG-0696 y NUREG-0737. En ellos se puso énfasis en la instalación de recombinadores de H así como estudios relacionados con pequeñas roturas en coincidencia con fugas del circuito primario.

La Agencia Federal de Emergencia, en conjunción con la NRC, desarrolló los criterios de calcificación de las emergencias, los Planes y los de Evacuación Parciales o/y Generales. Las acciones descritas en el documento NUREG-0737, desde el punto de vista radiológico son las siguientes:

- Establecimiento de un programa de entrenamiento a los operadores de las instalaciones nucleares en el que se incluyan la vigilancia radiológica de la instalación, tanto interna como externa, comportamiento de los detectores cuando se saturan, uso de los monitores para estimar el daño al núcleo del reactor en condiciones accidentales.
- Revisión del diseño de blindajes y calificación ambiental de equipos y sistemas que deben usarse en operaciones post-accidente.
- Sistema para recoger y analizar muestras en situaciones post-accidente (PASS):
- Instalación de instrumentación de monitores en situaciones de accidente adicionales a los existentes como: monitor de efluentes de gases nobles, muestreo continuo de las emisiones de yodos y partículas, y monitor de radiación en contención de rango alto. Estos monitores deben de ser capaces de muestrear tanto en condiciones normales como en accidentes. Instalación de monitores de yodos en zonas donde se espera que pueda haber personal durante el accidente.
- Las instalaciones deberán asegurar que los operadores de la sala de control están adecuadamente protegidos de los efectos de una emisión accidental ya sea radiológica o tóxica; de tal forma que la instalación se pueda operar o llevarla a condiciones de parada segura en condiciones de accidente base de diseño.

2.3 CHERNOBYL

2.3.1 Descripción del suceso

Durante una parada programa del reactor para mantenimiento, se decidió realizar una prueba para determinar, en caso de pérdida de energía eléctrica exterior, la capacidad que tenía la turbina de alimentar con energía a los equipos de emergencia hasta que los

generadores diesel de emergencia estuvieran operativos. El objetivo de esta prueba era determinar hasta cuando se podía asegurar la refrigeración el núcleo en caso de pérdida de energía eléctrica. Esta prueba fue realizada sin un buen intercambio de información y coordinación entre el equipo encargado de realizar la prueba y el equipo de operación y seguridad del reactor. Para la realización de la prueba, el reactor debería haber estado operando a una potencia de 1000 Mwt (~ 33%) antes de realizar la parada; pero debido a un error operacional, el reactor estaba a 30 Mwt (~ 1%. En esta región el coeficiente de reactividad de huecos es positivo para este tipo de centrales). Los operadores intentaron aumentar la potencia hasta 700 – 1000 Mwt desconectando los reguladores automáticos y liberando barras de control de forma manual. Aun cuando existían procedimientos de operación que indicaban que era necesario disponer de 30 barras de control para mantener el control del reactor, en la prueba solamente se usaron de 6 a 8 barras. Muchas barras de control fueron retiradas para compensar el quemado de Xe (actúa como absorbente de neutrones, y por tanto, como reductor de potencia). Se produjo un aumento del flujo de refrigerante, lo cual produjo, una disminución de la presión de vapor. El sistema de parada automática del reactor no funcionó cuando la presión de vapor era baja, ya que había sido desconectado anteriormente. Para mantener la potencia los operadores tuvieron que extraer todas las barras de control. El reactor llegó a convertirse en inestable, y los operadores tenían que realizar continuamente ajustes para tratar de mantener constante la potencia.

Los operadores redujeron el flujo de agua de alimentación para intentar mantener la presión de vapor. Esta reducción contribuyó a aumentar la inestabilidad del reactor aumentando la producción de vapor en los canales de refrigeración (coeficiente de reactividad de huecos positivo).

El aumento repentino en la producción de calor produjo una rotura de parte del combustible en pequeñas partículas de combustible caliente. Estas partículas en su reacción con el agua provocaron una explosión de vapor que destruyó el núcleo del reactor. Una segunda explosión tuvo lugar tres segundos más tarde; probablemente debido a la emisión de hidrógeno (esta emisión está provocada por la interacción del núcleo fundido con el refrigerante). La explosión de hidrógeno provocó el incendio y la salida de la mayor parte del material radiactivo contenido dentro de la vasija del reactor hacia la atmósfera.

2.3.2 Consecuencias radiológicas

Como consecuencia del accidente se liberaron cantidades muy importantes del inventario del núcleo del reactor: 100% de gases nobles, 50% de radioyodos, 20% de Cs y Te y en torno a 4% del resto de las partículas

Durante el período comprendido entre el 27 de abril de 1986 y mediados de agosto del mismo año, alrededor de 116.000 personas fueron evacuadas de sus hogares. En zonas de alta tasa de dosis se creó una zona de exclusión de acceso prohibido al público. Dicha zona tiene una extensión de 4300 km².

Las áreas de los territorios contaminados en Bielorrusia, Rusia y Ucrania cuya concentración de actividad de Cs-137 depositada en el suelo fue superior a 185 kBq/m² medida se estimó en 16500 km², 4600 km² y 8100 km² respectivamente.

La dosis media de los “liquidadores” fue de 100 mSv (dosis colectiva de 20000 Sv-persona). Alrededor del 10% de éstos recibieron dosis del orden 250 mSv, 5% recibieron dosis superiores a 500 mSv, y varias decenas de ellos que actuaron en los primeros momentos recibieron dosis potencialmente letales de varios miles de mSv.

De las 116.000 personas evacuadas de la zona de exclusión, en torno al 10% recibieron dosis superiores a 50 mSv y algo menos del 5% recibieron dosis superiores a 100 mSv.

Las dosis al tiroides fueron superiores. Se midió la dosis al tiroides entre 150.000 personas en Ucrania. Las medidas indicaron que la dosis equivalente al tiroides en estas personas era de varios Sv.

Las dosis comprometidas durante el período 1996-2056 para poblaciones que viven en áreas con contaminación superficial comprendida entre 185 – 555 kBq/m² estarán comprendidas entre 5 y 20 mSv. Si la contaminación está comprendida entre 555 – 1480 kBq/m² las dosis estarán entre 20 y 50 mSv. La vía de exposición crítica será la exposición externa debida a los radionúclidos depositados en el suelo.

Un total de 237 casos de individuos expuestos fueron hospitalizados. El síndrome de la radiación aguda fue diagnosticado en 134 casos. De estos 134 casos, 28 personas murieron en los tres meses siguientes. El daño al sistema gastrointestinal fue un serio problema. Hubo cambios letales en la función intestinal en 11 pacientes, que recibieron dosis superiores a los 10 Sv.

La muerte de 26 de los 28 pacientes esto asociada además con lesiones en la piel que afectaban a más del 50% de la superficie corporal. Durante la fase aguda 14 pacientes adicionales han muerto en los 10 años siguientes al accidente. Sin embargo, estas muertes están asociadas a la severidad del Síndrome de Radiación Aguda y por tanto no pueden ser directamente atribuidas a la exposición a la radiación.

Ha habido un aumento significativo de cáncer de tiroides entre las personas que vivían en áreas contaminadas y que en 1986 eran niños. Este aumento ha sido observado en Bielorrusia, y en menor grado en Ucrania y Rusia. El número de cáncer de tiroides confirmados a final de 1995 era de alrededor de 800 niños cuya edad era inferior a 15 años en el año de diagnóstico del cáncer. El mayor incremento se ha observado en niños que nacieron antes o durante los seis primeros meses después del accidente. Los niños nacidos no incluidos en este período tienen una probabilidad de incidencia de cáncer de tiroides comparable a las de poblaciones no afectadas.

En 1996, eran tres los niños que habían muerto por cáncer de tiroides. A pesar de su agresividad (carcinomas papilares con un inusual patrón de crecimiento), este tipo de cáncer responde a los procedimientos terapéuticos estándar (administración de L-tiroxina a los niños a los cuales se les ha practicado una tiroidectomía) si son administrados de forma apropiada. Hay que decir que los datos disponibles son a corto plazo; y que por tanto no se puede establecer todavía la terapia óptima para el cáncer de tiroides en niños. La extensión y futura incidencia del cáncer de tiroides como consecuencia del accidente es difícil de predecir; aunque es probable que persista durante varias décadas. Es probable que exista un aumento de cáncer en las siguientes décadas en adultos que recibieron dosis altas de radiación cuando eran niños.

Entre los efectos a la salud a largo plazo, el más extendido es la leucemia. El número total de casos de leucemia predichos por los modelos (basados en los supervivientes de las bombas atómicas lanzadas en Japón) es de 470 entre los 7.1 millones de personas residentes en las áreas contaminadas. Este número de casos es imposible de distinguir frente a los 25000 casos que se inducirán de manera espontánea. Entre los “liquidadores” se esperan unos 200 casos de leucemia; de los cuales 150 casos de muerte por leucemia se producirán en los primeros diez años después de la exposición. De estos 150 casos, 40 lo serán por incidencia espontánea.

Entre los 7.1 millones de personas afectadas, los modelos predicen la muerte de 6600 casos de cáncer en los próximos 85 años, frente a los 85000 casos de muerte por cáncer no inducido por las radiaciones.

Los efectos psicológicos fueron consecuencia de la falta de información al público, en particular, inmediatamente después del accidente. Otros efectos fueron el estrés, trauma por la relocalización, la ruptura de lazos sociales y el miedo a que la exposición a la radiación pudiera afectar a su salud y la de sus futuros hijos. Los principales efectos severos son el sentimiento de abandono por parte de las autoridades y la pérdida de confianza en el futuro.

Las perspectivas y pronósticos del accidente de Chernobyl son las siguientes:

- La completa rehabilitación de la zona de exclusión no es posible actualmente debido a:
 - Zonas de alta contaminación cercanas a áreas residenciales.
 - La posibilidad de contaminación en las aguas subterráneas.
 - Riesgos asociados con la posible ruptura del sarcófago.
 - Restricciones severas que se impondrían en la dieta alimenticia y estilo de vida.
- Las estimaciones sobre la incidencia de muertes y cáncer atribuibles al accidente deben ser todavía interpretada con mucha precaución debido a las incertidumbres asociadas a los modelos y las hipótesis en los cuales se basan. En el caso de la incidencia de cáncer de tiroides en niños existen discrepancias entre los casos observados y los casos predichos por los modelos.
- Teniendo en cuenta el conocimiento científico y médico de los efectos de la radiación, todavía existen importantes cuestiones sin respuesta. Por tanto, es necesario continuar con las investigaciones sobre dichos efectos.
- El impacto psicológico puede persistir durante un largo período de tiempo aunque se espera que la importancia de este efecto disminuya con el tiempo. Sin embargo, su percepción de los efectos inmediatos puede prolongar el tiempo de decaimiento. Las medidas para mitigar el impacto psicológico se deberán tener en cuenta en los modelos de consecuencias económicas.

2.3.3 Lecciones aprendidas

De manera general, se puede decir que se aprendieron numerosas lecciones de este accidente en las áreas de seguridad del reactor, gestión de accidentes severos, criterios de intervención, procedimientos de emergencia, comunicación, tratamiento médico de personas irradiadas, métodos de medida, procesos radio-ecológicos, tratamiento de alimentos y tierras contaminadas, información al público, etc.

Sin embargo, la lección más importante aprendida de este accidente fue la comprensión de que el mayor accidente nuclear tiene inevitables consecuencias transfronterizas y sus consecuencias pueden afectar de una manera directa o indirecta a países que se encuentran a grandes distancias del accidente. Esto conduce, inevitablemente, a realizar un esfuerzo en la cooperación internacional en caso de emergencia nuclear. Así cabe destacar que se desarrollaron la convención de pronta notificación y la convención sobre la asistencia en caso de accidente radiológico del OIEA, los ejercicios de emergencia nuclear internacional (INEX) de la NEA, la escala de sucesos nucleares (INES) del OIEA y NEA; y el acuerdo internacional sobre los niveles de contaminación en alimentos de la FAO y OMS.

Otras lecciones aprendidas de este accidente fueron:

- Cambio del diseño de reactores tipo RBMK.
- Incorporación de las brigadas de bomberos a las emergencias nucleares
- (equipos, procedimientos y gestión contra incendios).
- Esquemas de notificación de accidentes nucleares para otros países. Normas para la importación y exportación de productos alimenticios expuestos a radionúclidos
- Implantación de redes de vigilancia sobre los territorios nacionales.

2.4 TOKAIMURA

2.4.1 Descripción del suceso

El 30 de septiembre de 1999 la instalación de Tokaimura, dedicada a la producción de óxido de uranio a partir del hexafluoruro de uranio enriquecido, estaba procesando uranio enriquecido al 18.8% de U-235 en vez de un enriquecimiento de 3 o 5% de U-235, el cual es el típico en centrales nucleares de agua ligera. Este tipo de combustible se estaba produciendo para un reactor experimental japonés. El enriquecimiento del uranio se había realizado en unas instalaciones militares francesas. La cantidad total que se envió desde Francia a Japón fue de 420 kg de uranio enriquecido.

El suceso iniciador del accidente fue que un trabajador de la instalación llenó un tanque de precipitación con 16 kg de U-enriquecido, cuando se suponía que solamente debía haber 2.4 kg. Por tanto la criticidad se produjo en el fondo del tanque de precipitación. La causa principal del accidente fue que los trabajadores y los supervisores no sabían que estaban trabajando con U enriquecido al 18.8% y que una cantidad de 6 kg de este U-enriquecido es suficiente para provocar un accidente de criticidad. Adicionalmente, un ventilador, que por error estaba en funcionamiento, del sistema de extracción de partículas del edificio donde se localizó el accidente emitió a la atmósfera 20 Bq/m³ de I-131, cantidad que es dos veces el límite establecido.

El accidente duró 17,5 h. Esta estimación está basada en las medidas de tasa de dosis neutrónica en diferentes localizaciones.

2.4.2 Consecuencias radiológicas

La reacción en cadena provocada por la criticidad causó grandes emisiones de radiación gamma y neutrónica. Tres trabajadores estuvieron expuestos a dosis de 17 Sv provocándoles el síndrome de radiación aguda

Fuera de la instalación, la tasa de dosis gamma ambiental era de 0.84 mSv/h y la tasa de dosis neutrónica de 4.5 mSv/h. Hay que tener en cuenta que estos valores fueron mayores, ya que las medidas se realizaron varias horas después del comienzo de la reacción en cadena. Las estimaciones realizadas por la compañía indicaron que las personas que vivían dentro de un radio de 600-700 m desde la instalación estuvieron expuestos a dosis de radiación neutrónica mayores que los límites anuales establecidos.

La reacción en cadena del uranio produce productos de fisión gaseosos tales como el yodo, kriptón y xenón entre otros. Análisis realizados a hierbas locales recogidas por el público

dos días después del accidente mostraron valores comprendidos entre 23 y 54 Bq/kg de I-131.

Inicialmente se prohibieron las actividades relacionadas con la pesca costera durante un período de tiempo no especificado. Alrededor de 9 toneladas de productos cosechados (patatas, espinacas, puerros, etc) dentro del área de 10 km de radio se retuvieron en el Mercado Central de Tokio

2.4.3 Lecciones aprendidas

Basándose en un informe de la autoridad reguladora japonesa, las causas raíz del accidente fueron las siguientes:

Inadecuado descuido regulador.

Falta de una cultura de seguridad apropiada.

Inadecuado entrenamiento y cualificación del personal

Los errores humanos detectados durante el accidente fueron los siguientes:

- (1) Los encargados de la planta llamaron a los servicios de urgencia de Tokaimura para informar de que había tres operarios heridos. Sin embargo, no indicaron que el accidente se debía a una fuga radiactiva. Tanto bomberos como el hospital médico de urgencias de la localidad tienen vestimenta adecuada para afrontar casos de fugas; pero, al no ser alertados, no se personaron en el lugar del siniestro debidamente preparados y pusieron en peligro su propia salud al atender a los operarios heridos.
- (2) Las autoridades provinciales ordenaron la evacuación de la población que reside en un radio de 350 metros de la planta. Sin embargo, ofrecieron refugio en el centro comunitario situado a apenas un kilómetro del lugar del accidente.
- (3) La Agencia de Defensa envió a un grupo de las Fuerzas de Autodefensa especializado en guerra químico-bacteriológica que no contaba con el equipamiento necesario para accidentes nucleares.
- (4) En vez de evacuar a la población de la zona afectada durante la tarde del 30 de septiembre, cuando los niveles de radiación habían retornado, supuestamente, a la normalidad, el Gobierno ordena, a las 22 horas, momentos después de que los niveles vuelven a subir, que los habitantes permanezcan en sus viviendas.
- (5) Los operarios de la planta intentaron remediar la situación exponiéndose a altos niveles de radiación. La planta, al no ser un reactor sino un lugar donde se reprocessa combustible nuclear no estaba preparada para responder a las consecuencias de una reacción en cadena.

En la NRC se llevó a cabo un proceso de reevaluación de la seguridad de las instalaciones dedicadas a la fabricación de combustible nuclear. Como resultado de este proceso:

Se requirió a los titulares una evaluación del accidente de criticidad para el licenciamiento de las instalaciones. Se asumía que este accidente es posible.

Se requirió a las instalaciones un sistema de alarma para el accidente de criticidad.

Entrenamiento de los operadores ante este tipo de accidente.

Revisión de los Planes de Emergencia de estas instalaciones para tener en cuenta una posible evacuación, comunicación a la población, coordinación con las autoridades locales y nacionales.

La revisión de dichos planes deberá contemplar el criterio de seguridad a ultranza.

Este tipo de accidente no suele tener como suceso un fallo simple. No es debido principalmente a fallos de sistemas informáticos, y la componente humana domina sobre todas las causas.

2.5 FUKUSHIMA DAIICHI

2.5.1 Descripción del suceso

El 11 de marzo de 2011 se produjo un terremoto de magnitud 9.0 en la costa oriental de la isla de Honshu en Japón. Este hecho provocó el disparo automático de las tres unidades (unidades 1, 2 y 3) que estaban en operación en la central nuclear de Fukushima Daiichi. El resto de las unidades (4,5, y 6) no estaban operando debido a paradas de mantenimiento. El terremoto provocó una pérdida de corriente eléctrica externa. Por tanto, los equipos de emergencia comenzaron a funcionar con la energía suministrada por los generadores diesel.

Poco tiempo después del terremoto, se produjo un tsunami cuya altura de ola estimada fue de 14 -15 m, que llegó al emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi. La inundación inducida por este tsunami provocó el fallo de los generadores diesel, así como de otros equipos vitales para garantizar la refrigeración de los reactores en operación y de las piscinas de combustible gastado de las 6 unidades. En la unidad 6 se restableció rápidamente un generador diesel que suministró energía eléctrica a los sistemas de emergencia de las unidades 5 y 6. La refrigeración, en las unidades 2 y 3, se realizó mediante turbobombas. Sin embargo, a medida que el accidente progresaba en el tiempo, la cantidad de vapor disponible era menor, y por tanto, la capacidad para refrigerar los reactores de las unidades 2 y 3 se fue perdiendo. En la unidad 1, la refrigeración del reactor se mantenía a través del condensador de aislamiento. Sin embargo, cuando se produjo la pérdida total de energía eléctrica, no se pudo suministrar agua al condensador de aislamiento, y comenzó la ebullición del agua. Cuando esto empezó, se perdió la capacidad de refrigeración de la unidad 1.

Para proteger a la población, se decretó, ese mismo día, la evacuación de la población situada en el interior de un radio de 3 km alrededor de la central nuclear de Fukushima. Sin embargo, debido al empeoramiento de la situación, este radio se amplió a 20 km al día siguiente.

Con la pérdida de todo suministro de corriente alterna, la presión en los sistemas de refrigeración de los reactores de las unidades 1, 2 y 3 comenzó a aumentar, lo cual provocó que hubiera descargas de vapor a las piscinas de supresión a través de las válvulas de alivio, lo cual provocó un aumento de la presión en las contenciones de los reactores. Para proteger a las contenciones primarias, se realizaron venteos de la contención desde las chimeneas en los días 12, 15 y 13 de marzo respectivamente. Junto con los gases, también se produjo la descarga del hidrógeno producido en la oxidación del zirconio. Este hidrógeno se fue acumulando en la parte superior de la contención secundaria

en las unidades 1 y 3, mientras que en la unidad 2 se acumuló en edificio del reactor cerca de la piscina de supresión. Cuando la concentración de hidrógeno llegó a su límite

de explosión, ocurrieron las explosiones en los días 12 de marzo (unidad 1), 14 de marzo (unidad 3) y 15 de marzo (unidad 2). Estas explosiones provocaron grandes daños en los edificios de los reactores, destruyendo las estructuras de partes superiores y exponiendo a la atmósfera las piscinas de combustible gastado de las unidades 1 y 3. La explosión en el interior de la unidad 2 causó daños en la piscina de supresión y en la contención primaria (pozo seco).

Además de las explosiones en las unidades 1, 2 y 3, se produjo una explosión en la unidad 4 provocando grandes daños en la parte superior del edificio del reactor. Esta explosión fue debida a la producción de hidrógeno producida por el sobrecalentamiento del combustible situado en la piscina de combustible gastado y por una posible fuga de hidrógeno desde la unidad 3 ya que ambas unidades tenían un camino de liberación común durante las operaciones de mantenimiento que se estaban llevando a cabo en la unidad 4.

2.5.2 Consecuencias radiológicas

Se ha estimado que alrededor de 900 PBq se emitieron a la atmósfera en las emisiones producidas en las unidades 1, 2, 3 y 4 durante los primeros días, los principales isótopos emitidos fueron Xe-133, I-131, Cs-134 y Cs-137. La mayoría de estas emisiones se produjeron antes del día 19 de abril (primera semana). La cantidad emitida fue aproximadamente el 17 % de la emitida en el accidente de Chernobyl. Otros isótopos emitidos en menor cantidad fueron Sr-90 y Pu-239. La cantidad de actividad liberada al mar, según estimaciones de la compañía propietaria de la central nuclear (TEPCO), ha sido 4.7 TBq (I-131, Cs-134 y Cs-137 principalmente).

Los valores estimados recientemente de actividad de I-131 equivalente² en el accidente han sido de 900 TBq³, mientras que esta misma actividad en el caso del accidente en la central nuclear de Chernobyl fue de 5200 TBq

Los trabajadores de la instalación encargados de realizar labores para mitigar las consecuencias en la instalación fueron 2400 aproximadamente. De ellos solamente 8 recibieron dosis superiores a los 250 mSv (límite aprobado por las autoridades japonesas para las labores de recuperación de las instalaciones). Todos los trabajadores encargados de las labores de recuperación están sometidos a un programa de control radio-médico. Hasta marzo de 2013, TEPCO ha empleado a 25837 trabajadores en las labores de restauración del emplazamiento, de los cuales el 95% han recibido dosis menores de 50 mSv durante un período de 25 meses, 4% han recibido dosis comprendidas entre 50 mSv y 100 mSv, y el 1% ha recibido dosis superiores a los 100 mSv.

Las medidas de radiación más altas medidas fuera de la prefectura de Fukushima fueron medidas en la prefectura de Ibaraki y llegaron a 0.35 μ Sv/h (lo cual supone 50 veces el valor de fondo de radiación) el día 22 de marzo (De haber persistido este nivel de radiación durante todo un año, la dosis recibida por los habitantes de esta prefectura hubiera sido 2.25 mSv).

Los valores más altos de tasa de dosis medidos fueron en el noroeste de la prefectura de Fukushima desde la instalación hasta 40 o 50 km. En algunas regiones se alcanzó una tasa de dosis de 50 μ Sv/h. En el límite de la zona bajo control del explotador, las lecturas de tasa de dosis llegaron hasta 12 mSv/h, en el día 15 de marzo como consecuencia de las explosiones ocurridas en las unidades 2 y 4, y el fuego ocurrido en la unidad 4.

Los 195.345 residentes que viven en las proximidades de la planta que fueron sometidas a finales de mayo de 2011 a diversos controles médicos. En ninguno se observó que la radiación causara efectos nocivos en su salud. Todos los 1.080 niños que fueron medidos para evaluar la exposición de la radiación en la glándula tiroidea mostraron resultados

dentro de los límites de seguridad, de acuerdo con el informe presentado al OIEA en junio. En diciembre, los controles de salud realizados por el gobierno japonés a unos 1.700 residentes que fueron evacuados de tres municipios mostraron que dos tercios recibieron una dosis de radiación externa dentro del límite internacional normal de 1 mSv / año, 98% estaban por debajo de 5 mSv / año, y diez personas estuvieron expuestas a más de 10 mSv. Así pues parece ser que el principal riesgo en la salud fue el trauma psicológico tras decretar el gobierno japonés la evacuación de la población.

El 12 de marzo se decretó la evacuación de la población que vivía dentro del radio de 20 km desde la central nuclear de Fukushima. El número de habitantes involucrados en esta acción fue de 78000 personas. El día 15 de marzo se ordenó el confinamiento de las personas que vivían en entre 20 km y 30 km de radio de la C.N. Fukushima Daiichi. Dicha medida afectó a 62000 personas, aunque debido a la larga duración de la orden de confinamiento, muchos habitantes decidieron realizar una evacuación voluntaria. El día 21 de abril, el gobierno japonés decretó la evacuación entre 20 km y 30 km, en el sector Noroeste debido a que unos cálculos conservadores estimaban una dosis, en esta área, superiores a los 20 mSv en el primer año, el cual es límite inferior de las nuevas recomendaciones de la ICRP4.

EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN

A corto plazo, los factores más importantes que contribuyeron a la exposición de la población fueron: 1) la exposición externa causada por los radionucleidos presentes en el penacho y depositados en la tierra; y 2) la exposición interna de la glándula tiroides, debida a la incorporación de ^{131}I , y la exposición interna de otros órganos y tejidos causada principalmente por la incorporación de ^{134}Cs y ^{137}Cs . A largo plazo, el contribuyente más importante a la exposición de la población será la radiación externa emitida por el ^{137}Cs depositado.

Las primeras evaluaciones de las dosis de radiación se basaron en la monitorización del medio ambiente y en modelos de estimación de las dosis, y en parte dieron valores sobreestimados. En las estimaciones del presente informe se han incluido también los datos de monitorización individual facilitados por las autoridades locales para ofrecer una información más robusta sobre las dosis individuales reales que se recibieron y su distribución. Estas estimaciones indican que las dosis efectivas que recibieron los miembros de la población fueron bajas, comparables en general con el rango de dosis efectivas causadas por los niveles mundiales de radiación natural de fondo.

Después de un accidente nuclear en que hay emisiones de ^{131}I y este es incorporado por los niños, su absorción y las dosis que se acumulan en la glándula tiroides son motivos de particular preocupación. Tras el accidente de Fukushima Daiichi, las dosis equivalentes en la glándula tiroides de los niños sobre las que se informó fueron bajas, porque su incorporación de ^{131}I fue limitada, gracias en parte a las restricciones impuestas al consumo de agua potable y alimentos, incluidas las hortalizas de hoja y la leche fresca. Hay incertidumbres con respecto a las incorporaciones de yodo inmediatamente después del accidente, debido a la escasez de datos fiables de monitorización radiológica individual para ese período.

Al mes de diciembre de 2011, habían participado en operaciones de emergencia alrededor de 23 000 trabajadores de emergencias. Las dosis efectivas de radiación que había recibido la mayoría de ellos estaban por debajo de los límites de dosis ocupacionales vigentes en el Japón. De esas personas, 174 superaban el criterio inicial para los trabajadores de emergencias, y 6 superaban el criterio revisado temporalmente por la autoridad japonesa

para la dosis efectiva en una emergencia. Hubo algunas deficiencias en la aplicación de los requisitos de protección radiológica ocupacional, por ejemplo en la monitorización y el registro de las dosis de radiación recibidas por los trabajadores de emergencias en el primer período, en la disponibilidad y utilización de algunos equipos de protección y en la capacitación conexas.

EXPOSICIÓN OCUPACIONAL

Tras el accidente, los trabajadores de emergencias del emplazamiento se vieron sometidos de inmediato a condiciones de trabajo extremadamente duras y a niveles de radiación muy altos al tratar de estabilizar los reactores. En el período comprendido entre marzo de 2011 y marzo de 2012, 174 de los aproximadamente 23 000 trabajadores en el emplazamiento superaron el criterio inicial para la dosis efectiva en una emergencia de 100 mSv, y de ellos seis sobrepasaron el criterio para la dosis efectiva (revisado temporalmente) en una emergencia de 250 mSv. Ningún trabajador sobrepasó una dosis efectiva de 100 mSv en los años siguientes. Un trabajador sobrepasó el límite de dosis efectiva anual ocupacional de 50 mSv en el período de abril de 2012 a marzo de 2013.

EFFECTOS EN LA SALUD

No se observó ningún efecto temprano de la radiación en la salud de los trabajadores o de los miembros de la población que pudiera atribuirse al accidente. El tiempo de latencia de los efectos tardíos de la radiación en la salud puede ser de decenios, por lo que no es posible descartar, mediante observaciones hechas pocos años después de la exposición, que esos efectos se produzcan en algún momento en la población expuesta. Sin embargo, dados los bajos niveles de dosis notificados con respecto a la población, las conclusiones del presente informe concuerdan con las comunicadas por el UNSCEAR a la Asamblea General de las Naciones Unidas. El UNSCEAR determinó que “no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia” (señalada en el contexto de las repercusiones en la salud relacionadas con los “niveles y efectos de la exposición a la radiación debida al accidente nuclear tras el sismo y tsunami de gran magnitud ocurridos en la zona oriental del Japón en 2011”) . Con respecto al grupo de trabajadores que recibieron dosis efectivas de 100 mSv o superiores, el UNSCEAR concluyó que “cabría esperar un mayor riesgo de cáncer en el futuro. Sin embargo, no se prevé un aumento perceptible de la incidencia de cáncer en ese grupo a causa de la dificultad de confirmar una incidencia tan reducida en comparación con las fluctuaciones estadísticas normales de la incidencia de cáncer” .

Se realizó un estudio sobre la gestión sanitaria que tenía por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, y también prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida. El cáncer de tiroides en los niños es el efecto en la salud más probable tras un accidente con emisiones importantes de yodo radiactivo. Como las dosis en la tiroides atribuibles al accidente que se comunicaron fueron bajas en general, es poco probable que se produzca un aumento del cáncer de tiroides infantil atribuible al accidente. Sin embargo, persisten incertidumbres con respecto a las dosis equivalentes en la tiroides recibidas por los niños inmediatamente después del accidente.

No se han observado efectos prenatales de la radiación y no se prevé que se produzcan, dado que las dosis notificadas son muy inferiores a los umbrales a los que pueden generarse esos efectos. No se han notificado abortos no deseados atribuibles a la situación radiológica. En cuanto a la posibilidad de que la exposición de los padres tenga efectos hereditarios en

sus descendientes, el UNSCEAR concluyó que, en general, “si bien se ha demostrado un aumento de la incidencia de los efectos hereditarios en estudios hechos con animales, en los seres humanos por el momento esos efectos no pueden atribuirse a la exposición a radiaciones”.

Se informó de algunos trastornos psicológicos entre la población afectada por el accidente nuclear. Puesto que esas personas sufrieron los efectos combinados de un gran terremoto y un tsunami devastador, junto con el accidente, es difícil determinar en qué medida esos efectos podrían atribuirse al accidente nuclear por sí solo. El Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida, efectuado en el marco del Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima, revela la existencia de problemas psicológicos relacionados con lo ocurrido en algunos grupos vulnerables de la población afectada, por ejemplo aumentos de la ansiedad y trastornos de estrés postraumático. El UNSCEAR estimó que “e] efecto más desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante”.

CONSECUENCIAS PSICOLÓGICAS

Aunque no son directamente atribuibles a la exposición a la radiación, el UNSCEAR ha señalado que “ El efecto más importante desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante. Ya se ha informado de efectos como síntomas de depresión y estrés postraumático.”.

De los estudios realizados sobre trastornos psicológicos se deriva que la comunicación y difusión de información exacta a la población en una fase temprana y durante el desarrollo del accidente contribuyó a aliviar las reacciones psicológicas indeseadas.

Los resultados del Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida, que confirmaron que la población afectada experimentó un sufrimiento considerable y presentaba síntomas de trastorno de estrés postraumático. El estudio señaló que ‘los datos sociodemográficos indicaron que muchas familias evacuadas habían quedado separadas después del desastre y habían tenido que mudarse varias veces’, lo que causó problemas psicológicos.

2.5.3 Lecciones aprendidas

Este accidente, se pusieron de manifiesto diversas deficiencias que afectaban al diseño de las centrales nucleares para hacer frente a grandes catástrofes naturales.

Lecciones aprendidas en relación con los sucesos ocurridos

- El hecho de que los períodos de observación sean relativamente breves hace que la predicción de los peligros naturales esté sujeta a grandes incertidumbres.
- La seguridad de las centrales nucleares debe reevaluarse periódicamente para tener en cuenta el estado del arte y las medidas correctivas o compensatorias necesarias deben adoptarse rápidamente.

- En la evaluación de los peligros naturales se deben tener en cuenta las posibilidades de que estos ocurran de forma combinada, ya sea simultanea o secuencialmente, y sus efectos combinados en una central nuclear.
- Los sistemas de instrumentación y control que sean necesarios durante los accidentes que sobrepasen la base de diseño tienen que mantenerse en condiciones de funcionamiento.
- Deben establecerse sistemas de refrigeración robustos y fiables para la evacuación del calor residual, que puedan funcionar tanto en las condiciones previstas en la base de diseño como en las que sobrepasen esa base.
- Deben realizarse análisis de seguridad probabilistas y deterministas completos para confirmar la capacidad de una planta de soportar los accidentes fuera de la base de diseño.
- Las disposiciones para la gestión de accidentes deben prever accidentes que afecten a varias unidades de una central con múltiples reactores.
- La capacitación, los ejercicios y los simulacros deben incluir las condiciones postuladas para un accidente severo.
- El organismo regulador debe ser independiente y posea autoridad legal, competencia técnica y una sólida cultura de la seguridad.
- A fin de promover y reforzar la cultura de la seguridad, las personas y organizaciones deben cuestionar o reexaminar continuamente los supuestos reinantes con respecto a la seguridad nuclear, y las consecuencias de las decisiones y medidas que puedan repercutir en ella.
- En un enfoque sistémico de la seguridad deben tomarse en consideración las interacciones de los factores humanos, organizativos y técnicos durante la vida de la central.

Lecciones aprendidas en relación la preparación y respuesta ante accidentes

- Es necesario tener en cuenta las emergencias que puedan entrañar un daño severo del combustible nuclear del núcleo del reactor o del combustible gastado presente en el emplazamiento y que puedan producirse en coincidencia con desastres naturales.
- El sistema de gestión de emergencias para responder a una emergencia nuclear debe incluir una clara definición de las funciones y responsabilidades de la entidad explotadora y de las autoridades locales y nacionales.
- Los trabajadores de emergencias deben estar designados de antemano, con una clara especificación de sus funciones, independientemente de la organización para la que trabajen, y deben recibir una capacitación adecuada y la debida protección durante la emergencia.
- Deben existir disposiciones que permitan adoptar decisiones sobre la aplicación de las medidas protectoras urgentes previamente determinadas para salvaguardar a la población.
- Deben existir disposiciones que permitan ampliar o modificar las medidas protectoras urgentes en respuesta a la evolución de las condiciones en la central o a los resultados de la monitorización. También se precisan disposiciones que permitan adoptar medidas protectoras tempranas sobre la base de los resultados de la monitorización.
- Deben establecerse disposiciones para velar por que las medidas protectoras y otras medidas de respuesta adoptadas en una emergencia nuclear reporten más

beneficios que daños. Para lograr ese equilibrio se requiere un enfoque integral de la adopción de decisiones.

- Deben existir disposiciones para ayudar a los responsables de las decisiones, al público y a otras personas (por ejemplo, al personal médico) a comprender los peligros radiológicos para la salud que se dan en una emergencia nuclear, a fin de que adopten decisiones fundamentadas con respecto a las medidas protectoras. Asimismo, debe contarse con disposiciones para responder a las preocupaciones de la población a escala local, nacional e internacional.
- En la fase de preparación deben elaborarse disposiciones para la terminación de las medidas protectoras y de otras medidas de respuesta y para la transición a la fase de recuperación.
- Un análisis oportuno de las emergencias y de las medidas adoptadas en respuesta a ellas, en que se extraigan enseñanzas y se determinen las mejoras posibles, fortalece las disposiciones de emergencia.
- Debe reforzarse la aplicación de las disposiciones internacionales sobre la notificación y la asistencia.
- Deben mejorarse las consultas y el intercambio de información entre los Estados sobre las medidas protectoras y otras medidas de respuesta.

Lecciones aprendidas en relación las consecuencias radiológicas del accidente

- En caso de emisión accidental de sustancias radiactivas al medio ambiente, es preciso cuantificar y caracterizar sin demora la cantidad y composición de la emisión.
- Los órganos internacionales competentes deben elaborar explicaciones de los principios y criterios de la protección radiológica que sean comprensibles para los no especialistas, a fin de aclarar su aplicación a los responsables de la adopción de decisiones y a la población. Puesto que algunas medidas de protección que se prolongaron en el tiempo tuvieron un efecto perturbador en las personas afectadas, se necesita una mejor estrategia de comunicación para dar a conocer la justificación de esas medidas y acciones a todos los interesados, incluida la población.
- Las decisiones prudentes en relación con la actividad específica y las concentraciones de actividad en los productos de consumo y la actividad de la deposición dieron lugar a amplias restricciones, con las consiguientes dificultades.
- La monitorización radiológica individual de grupos representativos de la población proporciona información muy valiosa para obtener estimaciones fiables de las dosis de radiación, y debe utilizarse juntamente con mediciones ambientales y modelos adecuados de estimación de dosis para evaluar la dosis recibida por la población.
- El modo más importante de limitar las dosis recibidas por la tiroides, especialmente en el caso de los niños, es restringir el consumo de leche fresca de vacas en pastoreo.
- Se necesita un sistema robusto de monitorización y registro de las dosis de radiación ocupacionales, por todas las vías pertinentes, especialmente las ocasionadas por la exposición interna en que puedan haber incurrido los trabajadores durante las actividades de gestión de un accidente severo. Es esencial que se disponga de equipo de protección individual adecuado y suficiente para limitar la exposición de los trabajadores durante las actividades de respuesta a una emergencia, y que los trabajadores estén suficientemente capacitados en el uso de ese equipo.
- Los riesgos de la exposición a la radiación y la atribución a la radiación de los efectos observados en la salud tienen que explicarse claramente a las partes interesadas, señalando de manera inequívoca que los aumentos en la incidencia de efectos en la

salud en la población no son atribuibles a la exposición a la radiación, si los niveles de esta son similares a los niveles globales medios de fondo de la radiación.

- Se necesita orientación sobre la protección radiológica para hacer frente a las consecuencias psicológicas en los miembros de las poblaciones afectadas después de un accidente radiológico.
- Debe comunicarse información objetiva, comprensible y oportuna sobre los efectos de la radiación a las personas de las zonas afectadas, para aumentar su entendimiento de las estrategias de protección, aliviar sus preocupaciones y apoyar sus propias iniciativas de protección.
- Durante la fase de emergencia la atención debe centrarse en proteger a las personas. Las dosis recibidas por la biota no se pueden controlar, y podrían ser importantes a nivel individual. El conocimiento de las repercusiones de la exposición a la radiación en la biota no humana debe fortalecerse mejorando la metodología de evaluación y la comprensión de los efectos que la radiación provoca en las poblaciones de la biota y los ecosistemas.

Lecciones aprendidas en relación con la evaluación de actividades posteriores

- La planificación antes de un accidente para la recuperación después de este es necesaria para mejorar la toma de decisiones bajo presión en la situación inmediatamente posterior al accidente.
- Las estrategias de restauración deben tener en cuenta la eficacia y viabilidad de las distintas medidas y la cantidad de material contaminado que se generará en el proceso de restauración.
- Tras un accidente, es esencial para la recuperación en el emplazamiento disponer de un plan estratégico destinado a mantener las condiciones estables a largo plazo y a clausurar las instalaciones dañadas en el accidente.
- La recuperación del combustible dañado y la caracterización y retirada de los restos de combustible precisan soluciones específicas, y quizás sea necesario desarrollar métodos e instrumentos especiales.
- Es necesario reconocer las consecuencias socioeconómicas de cualquier accidente nuclear y de las medidas protectoras posteriores, y desarrollar proyectos de revitalización y reconstrucción que aborden cuestiones como la reconstrucción de la infraestructura, la revitalización de las comunidades y la indemnización.
- El apoyo de las partes interesadas es esencial en todos los aspectos de la recuperación después del accidente. En particular, en los procesos de adopción de decisiones se precisa la participación de la población afectada.

3 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- "La escala internacional de sucesos nucleares (INES). Manual de Usuario. Edición 2001". OIEA (2001).
- "Chernobyl. Ten years on radiological and health impact". NEA-OECD (1995).
- "Clarification of TMI Action Plan Requirements". NUREG-0737. USNRC (1980).
- "Proceedings of seminar on comparative assessment of environmental impact of radionuclides releases during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl". Radiation Protection 53. Commission of European Communities. (1990)
- "Training course on off-site emergency planning and response for nuclear accidents". SCK/CEN. (1991).
- "The human consequences of Chernobyl nuclear accident. A strategy for recovery". UNDP, UNICEF y UN-OCHA. (2001).

- "Objectivity and ethics in environmental health science". Steve Wing. Environmental Health Perspectives. Vol. 111. No 14. (2003).
- "The Russian radiation legacy: Its integrated impact and lessons". Marvin Goldman. Environmental Health Perspectives. Vol. 195. supplement 6. (1997).
- "Report on preparedness and response for a nuclear or radiological emergency in the light of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant". IAEA (2013).
- "The Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. OECD/NEA nuclear safety response and lessons learnt". OECD (2013).
- "Assessment of Atmospheric Dispersion for the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident". IRSN (2012).
- "The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General". OIEA (2015)