

# **Tercer Ejercicio. Seguridad Nuclear**

## **Tema 3.A.14**

**Sistemas de refrigeración de componentes y de servicios esenciales en centrales nucleares. Sumidero final de calor. Funciones. Tipos. Análisis de seguridad.**

### ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO Y RELACIÓN CON OTROS TEMAS
2. FUNCIONES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE COMPONENTES Y DEL SISTEMA DE SERVICIOS ESENCIALES EN CENTRALES NUCLEARES
3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS
  - 3.1. Descripción general
  - 3.2. Modos de operación
  - 3.3. Componentes principales de ambos sistemas
4. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS ESW Y CC
5. FUNCIONES DEL SUMIDERO FINAL DE CALOR. TIPOS DE SUMIDERO
6. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL SUMIDERO FINAL DE CALOR Y DE LOS SISTEMAS ASOCIADOS
7. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DEL UHS
8. DISEÑO DE LOS SISTEMAS EN LAS CENTRALES ESPAÑOLAS
9. BIBLIOGRAFÍA

## **1. RESUMEN EJECUTIVO Y RELACIÓN CON OTROS TEMAS**

La configuración de los sistemas de refrigeración que constituyen la cadena de evacuación de calor residual [sistema de extracción del calor residual (RHR) - sistema de refrigeración de componentes (CC) - sistema de servicios esenciales (ESW) - sumidero final de calor (SFC)] puede variar considerablemente de una central a otra. El tema se desarrolla sobre una configuración típica para, finalmente, mencionar otras posibles alternativas existentes en algunas centrales españolas.

El objetivo común de estos sistemas es la disipación del calor generado en aquellos componentes que procesan fluidos radiactivos o que, sin contenerlos, son esenciales para la parada segura de la central (incluyendo las condiciones posteriores al accidente base de diseño). En realidad, estos sistemas constituyen un circuito de refrigeración de doble lazo en el que el sistema de agua de refrigeración de componentes es el circuito intermedio entre el foco caliente (los componentes nucleares y RHR) y un sumidero final de calor (mar, embalse, río, estanque, lago, etc.), de manera que el sistema de refrigeración de componentes disipa y transporta el calor generado en los componentes que procesan fluidos radiactivos o que son esenciales para la parada segura, al agua de servicios esenciales que funciona con agua del sumidero final de calor.

El agua utilizada en el circuito de refrigeración de componentes es agua desmineralizada con aditivos inhibidores del proceso de corrosión.

Este esquema de refrigeración con barreras sucesivas aporta dos ventajas desde el punto de vista de seguridad de la central:

- Ofrece una mayor garantía respecto a un hipotético vertido de fluido contaminante al sumidero final de calor, al exigir la coincidencia de una fuga en alguno de los cambiadores refrigerados por componentes y de una rotura de tubos del propio cambiador de calor de componentes.
- La no utilización directa de agua del sumidero de calor (de menor calidad química que la del sistema CC) que ocasionaría problemas de corrosión u obstrucción en la refrigeración de componentes y en procesos muy delicados para un funcionamiento correcto y seguro de la central.

Este tema se relaciona con los siguientes:

### **TERCER EJERCICIO**

Grupo A. Tema 6: Sistemas de refrigeración de emergencia en centrales nucleares de agua ligera.

## **2. FUNCIONES DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE COMPONENTES Y DEL SISTEMA DE SERVICIOS ESENCIALES EN CENTRALES NUCLEARES**

El **sistema de refrigeración de componentes** se diseña para cumplir las siguientes funciones:

- (1) Evacuar el calor residual del núcleo y el calor sensible del refrigerante del reactor, a través del RHR durante el arranque o la parada de la unidad.
- (2) Enfriar el caudal de descarga al sistema de control químico y de volumen durante la operación a potencia, arranque y parada de la unidad.
- (3) Evacuar el calor de los diferentes componentes de la unidad que lo requieran, a fin de garantizar que no se sobrepasen las temperaturas de diseño de los equipos (bombas, salas de bombas, bombas del refrigerante del reactor, etc.)
- (4) Proporcionar refrigeración de emergencia durante las condiciones posteriores a un accidente.
- (5) Actuar como barrera intermedia entre el sistema de agua de servicios esenciales y el sistema de refrigerante del reactor.
- (6) Evacuar el calor de desintegración del combustible gastado situado en la piscina de almacenamiento.

El **sistema de agua de servicios esenciales** se diseña para cumplir las siguientes funciones:

- (1) Suministrar agua en la cantidad y temperatura suficientes para disipar el calor del agua de refrigeración de componentes y ajustar su temperatura a los valores adecuados para que éste pueda cumplir su función de forma continuada tanto en operación normal como en accidente.
- (2) Suministrar agua en cantidad suficiente y temperatura adecuada para disipar el calor generado por el funcionamiento de los generadores diésel al 100 % de su potencia nominal.
- (3) Refrigerar los enfriadores del sistema de ventilación de las salas de los generadores diésel.

## **3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS**

### **3.1. Descripción general**

El **sistema de refrigeración de componentes** realiza una función considerada como salvaguardia tecnológica, por lo que está diseñado con

arreglo a los requisitos de seguridad clase 3 y provisto de componentes redundantes, de tal manera que el fallo de uno de ellos no perjudicará el funcionamiento o la fiabilidad del sistema en el que se encuentra. Este sistema establece también una barrera entre los diferentes sistemas que contienen agua de refrigeración del reactor y del sistema de agua de servicios esenciales. Esto reduce considerablemente la probabilidad de fugas de agua contaminada desde el sistema de alta presión al medio exterior.

Un sistema de refrigeración de componentes típico consta de dos o tres lazos de refrigeración, cada uno de los cuales proporciona agua de refrigeración a un grupo de bombas y enfriadores de los sistemas de salvaguardias tecnológicas. Cada lazo está dotado de dos bombas de agua de refrigeración en paralelo, un cambiador de calor principal, un depósito de compensación y las correspondientes válvulas, tuberías e instrumentación. Las bombas hacen circular agua a través de los cambiadores de calor de componentes donde se enfría con el agua de servicios esenciales y se distribuye entre los distintos componentes para ser devuelta a la aspiración de las bombas.

Los lazos del sistema CC que enfrían a los sistemas de salvaguardias tecnológicas no tienen ninguna interconexión entre sí, de forma que un potencial vaciado de uno de ellos por rotura de una de las tuberías no afectaría a los otros. Sí que existen conexiones desde cada lazo de CC a cada uno de los dos grupos de componentes que no constituyen sistemas de salvaguardias tecnológicas.

Típicamente se suministra agua de refrigeración a los siguientes componentes en caso de accidente:

- Intercambiador de calor residual
- Bomba de evacuación de calor residual
- Enfriador del motor de la bomba de evacuación de calor residual
- Enfriador del motor de la bomba de agua de refrigeración de componentes
- Bomba de inyección de seguridad de baja presión
- Bomba de inyección de seguridad de alta presión
- Enfriador del ventilador del compartimento de la bomba de inyección de seguridad
- Bomba de emergencia de inyección de boro
- Bomba de rociado del recinto de contención
- Enfriadores de los ventiladores del recinto de contención
- Enfriadores de los motores de los ventiladores del recinto de contención
- Intercambiadores de calor de la piscina de combustible gastado

Los componentes refrigerados por el sistema y que no tienen función de salvaguardia tecnológica son, entre otros:

- Evaporador de ácido bórico
- Intercambiador de calor de la descarga

- Compresor de residuos gaseosos
- Recombinadores de hidrógeno
- Bombas de carga
- Enfriador del motor de la bomba de carga
- Enfriador del sistema de muestras del primario y secundario
- Bombas de refrigeración del reactor (enfriadores de aceite y suministro de agua a la barrera térmica)
- Intercambiador de la descarga auxiliar

El tanque de compensación acomoda la expansión, contracción y fugas de agua, y proporciona una fuente de agua de utilización inmediata hasta que se localizan las pequeñas fugas. Al mismo tiempo proporciona una cierta altura estática a los colectores de las bombas, suficiente para dar la presión de succión requerida por las mismas. Se suministra también un indicador detector de radiación por cada lazo, debido a que el tanque se encuentra normalmente abierto a la atmósfera. Este detector activa una alarma al mismo tiempo que cierra la válvula de venteo del tanque de expansión cuando el nivel de radiación alcanza un cierto valor preestablecido. Se suministra agua de reposición al tanque de compensación de cada lazo del sistema de componentes desde dos fuentes independientes: el sistema de agua desmineralizada y el sistema de agua de aporte al refrigerante del reactor.

Se suministra la siguiente instrumentación para controlar la operación del sistema:

- Medidores de temperatura a la entrada y salida de los intercambiadores de calor de agua de refrigeración de componentes.
- Medidores de temperatura en las salidas de todos los componentes servidos por el sistema.
- Medidores de caudal en las salidas de los intercambiadores de calor de agua de refrigeración de componentes.
- Medidores de caudal en las salidas de todos los componentes servidos por el sistema, para establecer un balance de caudales.
- Indicadores de radiación para la medición del nivel de radiactividad en cada lazo de salvaguardia tecnológica y para aislar la tubería de venteo del tanque de compensación.
- Indicadores de nivel y alarmas en cada tanque de compensación para proporcionar información sobre posibles fugas.
- Medidores de presión en los colectores de descarga de las bombas de refrigeración de componentes que proporcionan el arranque automático de una de las bombas de reserva si la que está en operación normal falla.

Por el lado tubos de los cambiadores del sistema de refrigeración de componentes circula el agua del **sistema de servicios esenciales**.

Este sistema está formado por dos trenes redundantes e independientes en su funcionamiento. Cada tren es accionado por una bomba centrífuga vertical que aspira agua de la estructura de toma del sumidero final de calor, la impulsa a través de los cambiadores y la devuelve a la estructura de descarga del sumidero (circuito abierto). En algunos diseños, existe una tercera bomba de reserva que puede alinearse a cualquiera de los dos trenes.

Además de los cambiadores de calor del sistema de refrigeración de componentes, el sistema ESW refrigera a otros equipos que son necesarios para la parada segura de planta como son: intercambiadores de enfriamiento del aire comprimido esencial, enfriadores de los generadores diésel de emergencia y de la ventilación de las salas donde se encuentran éstos. Por esta razón, el sistema ESW es imprescindible para garantizar una parada segura de la central y para la adecuada refrigeración de los componentes utilizados en los sistemas de salvaguardias tecnológicas en el caso de un accidente base de diseño. Además de estos componentes, desde el sistema ESW se puede suministrar agua de refrigeración de emergencia a la piscina de combustible gastado y a los generadores de vapor a través del sistema de agua de alimentación auxiliar (en el caso de un PWR).

Debido a las características del agua utilizada por el sistema ESW (procedente del mar, embalse, río, etc.), se ha de proveer un sistema de filtrado que consta de rejillas fijas y móviles encargadas de eliminar la materia en suspensión en el agua antes de que ésta llegue a las bombas.

La instrumentación del sistema se diseña para que en caso que se detecte un fallo en un tren, entre en funcionamiento el otro.

El accionamiento de los equipos relacionados con la seguridad se puede hacer desde el panel principal de sala de control o, en el caso de que la sala de control sea inaccesible, desde los paneles de parada remota.

Las bombas de servicios esenciales se pueden poner en marcha manual y automáticamente. La puesta en marcha manual se puede realizar tanto desde el panel principal como desde los de parada remota.

En funcionamiento normal está en marcha una bomba de cada unidad. La otra se pone en marcha automáticamente por:

- a) Baja presión en el tren en funcionamiento
- b) Señal de inyección de seguridad
- c) Baja presión de descarga en la bomba del sistema de refrigeración de componentes en funcionamiento
- d) Pérdida de alimentación eléctrica exterior

La bomba de reserva puede sustituir a cualquiera de las otras dos. Para la sustitución es necesario equipar la cabina de la bomba de reserva con el interruptor de la bomba a sustituir. A partir de este momento la instrumentación de la bomba de reserva es la de la bomba a la cual sustituye.

Las bombas disponen de termopares en los cojinetes superior e inferior y de termoresistencias en los devanados del motor, que proporcionan registro y alarma de alta temperatura en sala de control.

Existen medidores de caudal aguas abajo de los cambiadores de calor, ubicados en las galerías por donde circula el sistema ESW, fuera de la sala de las bombas de refrigeración de componentes, y en la descarga de las bombas del sistema ESW. Dichos medidores permiten detectar altas diferencias de caudal en esos tramos de tuberías de esenciales y, por lo tanto, posibles roturas de las líneas.

Las salas de bombas de refrigeración de componentes disponen de transmisores de nivel, que por señal de muy alto nivel, junto con alta diferencia de caudal en el tren de agua de esenciales en operación, disparan la bomba de esenciales en servicio.

En cada tren de ESW hay un transmisor de presión, a la entrada de cada cambiador de refrigeración de componentes que proporciona indicación y alarma de baja presión en el panel principal de sala de control; si la presión es muy baja pone en marcha la bomba de servicios esenciales correspondiente al otro tren.

En las tuberías de descarga de la refrigeración de los generadores diésel, se han instalado válvulas normalmente cerradas que se abren automáticamente al ponerse en funcionamiento los diésel. El sistema de refrigeración de cada generador diésel se mantiene lleno de agua, reponiendo las posibles fugas, a través de una tubería de agua de servicios no esenciales con una válvula neumática normalmente abierta, que cierra al ponerse en funcionamiento el generador diésel.

### **3.2. Modos de operación**

Durante la operación normal de la central sólo se necesita un lazo (o dos de tres) del sistema CC para abastecer las necesidades de agua de refrigeración de los componentes sin funciones de salvaguardias tecnológicas. El otro lazo permanece en reserva pudiendo entrar en operación por fallo del primero o si la operación lo aconseja. Para el funcionamiento de cada lazo en condiciones normales de operación, solamente se requiere una de las bombas; si ésta falla, la segunda se pone automáticamente en funcionamiento por la acción de una señal de baja presión desde el colector común de la descarga de ambas bombas.

En el caso de un accidente de pérdida de refrigerante, se cierran las válvulas automáticas que conectan los componentes considerados como salvaguardias tecnológicas con aquellos otros que no lo son, aislando la refrigeración de estos últimos de los primeros por ser su función menos crítica. Al mismo tiempo, todas las bombas de agua de refrigeración de componentes se ponen en funcionamiento. Esta acción permite que los dos (o tres) lazos independientes de refrigeración funcionen para suministrar a agua únicamente a los sistemas de salvaguardias tecnológicas. Cada bomba de cada lazo se conecta a un sistema eléctrico independiente alimentado por un generador diésel de emergencia.

El funcionamiento del sistema de agua de servicios esenciales es básicamente esclavo del funcionamiento del sistema de agua de refrigeración de componentes. Así, en operación normal funciona sólo el tren del sistema ESW correspondiente al tren en funcionamiento del sistema CC. El otro tren se pone en funcionamiento manualmente o automáticamente en las mismas situaciones en que arranca el segundo tren del sistema CC. La tercera bomba se alinea manualmente a un tren para sustituir a la bomba de dicho tren. Asimismo, la bomba en funcionamiento suministra agua al sistema de lavado de rejillas de la estructura de toma.

En caso de accidente se ponen en funcionamiento automáticamente por medio de una señal de salvaguardia, las bombas de los dos trenes, si bien sólo uno de ellos es suficiente para satisfacer las funciones de seguridad del sistema.

### **3.3. Componentes principales de ambos sistemas**

**CAMBIADORES DE CALOR DE AGUA DE REFRIGERACION DE COMPONENTES:** El cambiador de calor es del tipo carcasa horizontal y tubos rectos. El agua del sistema de agua de servicios esenciales circula por el lado tubos y el agua de refrigeración de componentes procedente de la descarga de las bombas, circula por el lado carcasa. El diseño del cambiador tiene en cuenta la máxima carga térmica que tiene que refrigerar en las condiciones posteriores a un accidente base de diseño.

**BOMBAS DE AGUA DE REFRIGERACION DE COMPONENTES.-** Cada una de las cuatro bombas de agua de refrigeración, tiene una capacidad del 100% del caudal requerido durante el funcionamiento normal. Este caudal excede al requerido en condiciones de accidente. Las bombas son centrífugas horizontales de carcasa partida, y se han dimensionado con un margen mínimo del 5% en altura para el caudal de diseño, para absorber la degradación normal de las características debido al desgaste del impulsor.

**TANQUES DE EQUILIBRIO.-** Cada uno de los dos trenes relacionados con la seguridad tiene su respectivo tanque de equilibrio que absorbe los cambios volumétricos del sistema debido a dilataciones térmicas y repone las fugas del sistema. Se incluyen medios para el aporte automático e intermitente de agua de reposición de fugas procedente del sistema de almacenamiento y transferencia de agua desmineralizada; se utiliza como fuente alternativa, relacionada con la seguridad, agua procedente del sistema de



almacenamiento y transferencia de condensado.

**INTERCAMBIADORES DE CALOR DIVERSOS.-** En general, el agua de refrigeración de componentes pasa por el lado carcasa y los fluidos potencialmente radiactivos pasan por el lado tubos.

**TUBERÍAS Y VÁLVULAS.-** La tubería del sistema es de acero al carbono. Las válvulas de aislamiento de la rama no esencial y no relacionada con la seguridad se diseñan para cerrar al fallo. Estas válvulas cierran automáticamente por señal de inyección de seguridad o alto caudal diferencial entre la entrada y salida de la rama (indicativo de rotura en esa porción del sistema). Asimismo, por señal de bajo nivel en un tanque de equilibrio, cierran las válvulas asociadas al mismo tren que el tanque. Las líneas del lazo esencial y no relacionado con la seguridad que penetran en contención, están provistas de válvulas motorizadas de aislamiento dentro y fuera de la contención que cierran por señal de alta presión en contención. El retorno de la refrigeración de la barrera térmica de las bombas del refrigerante del reactor discurre por un colector separado que se utiliza, en caso de rotura de la barrera térmica, para aislar las fugas del primario al sistema de agua de refrigeración de componentes.

Las válvulas de interconexión del lazo compartido a cualquier lazo esencial y relacionado con la seguridad cierran por señal de alta presión en contención aislando la refrigeración a los componentes no relacionados con la seguridad. El bajo nivel en el tanque de equilibrio correspondiente cierra las válvulas de interconexión asociadas a su tren.

Durante el funcionamiento normal, las cuatro unidades de enfriamiento de la contención permanecen operativas y alimentadas por un solo tren de agua de refrigeración de componentes. Normalmente funcionan tres ventiladores. Cada una de las líneas de interconexión de las unidades tiene dos válvulas de aislamiento de trenes que cierran automáticamente por señal de inyección de seguridad (SIS) o pérdida de energía exterior (PSE). Las líneas de los lazos esenciales y relacionados con la seguridad que penetran en contención para refrigerar las unidades de enfriamiento de la contención sólo tienen válvulas motorizadas de aislamiento fuera de contención y abren por señal SIS y PSE quedando desde este momento los lazos relacionados con la seguridad completamente independizados y redundantes.

Las válvulas de entrada a los cambiadores RHR por la parte de agua de refrigeración de componentes, son motorizadas y fallan en posición. Estas válvulas abren por señal SIS.

**BOMBAS DE AGUA DE SERVICIOS ESENCIALES.** El sistema dispone de dos o tres bombas de tipo vertical, cada una de ellas con una capacidad del 100%. Los cojinetes y sellado del eje pueden estar lubricados por agua pretratada o por agua bruta, procedente de la descarga de la bomba, filtrada previamente. Cuando las bombas están paradas, se mantiene la lubricación de los cojinetes del eje mediante una línea de interconexión entre el drenaje de la impulsión y la línea de inyección.

TUBERÍAS Y VÁLVULAS. Las tuberías del sistema son de acero al carbono. Los dos circuitos redundantes e independientes se diseñarán de acuerdo con ASME III, clase 3 y categoría sísmica 1.

En el sistema se utilizan válvulas manuales con enclavamiento o indicación automática de su estado para garantizar el conocimiento del estado de inoperabilidad del sistema.

#### **4. ANÁLISIS DE SEGURIDAD**

Tanto el sistema de refrigeración de componentes como el de refrigeración de servicios esenciales cumplen funciones durante la operación normal y los accidentes postulados de la planta. Por lo tanto, podemos distinguir una serie de requisitos funcionales distintos de aquellos otros que satisfacen el análisis de seguridad de ambos sistemas.

Estos requisitos funcionales son:

- (1) Ambos sistemas han de funcionar en todos los modos de operación de la central ya que siempre están en funcionamiento algunos de los componentes refrigerados. Como veremos después, algunas plantas incorporan en sus diseños sistemas que están en espera y que sólo funcionarán en caso de accidente; mientras, se cuenta con sistemas que cumplen estas mismas funciones en operación normal y a los que se les imponen muchos menos requisitos que a los de seguridad.
- (2) Se debe permitir el mantenimiento de las bombas sin interrumpir la función de refrigeración del lazo correspondiente.
- (3) El sistema de agua de refrigeración de componentes está diseñado para disipar la carga térmica y sensible del sistema de refrigeración del reactor a través del sistema de evacuación de calor residual durante el arranque y parada de la planta; y del sistema de control químico y volumétrico durante la operación normal, el arranque, la primera fase de la parada y la situación de disponible caliente de la planta.
- (4) El conjunto de ambos sistemas está diseñado para conseguir en operación normal del mismo una temperatura de 60 °C en el refrigerante del reactor a las 20 horas de iniciada la parada de la planta.

Los requisitos de seguridad exigibles a los sistemas CC y ESW se encuentran respectivamente en los capítulos 9.2.1 Station Service Water System y 9.2.2 Reactor Auxiliary Cooling Water Systems del NUREG-0800 STANDARD REVIEW PLAN.

- (1) El sistema de agua de refrigeración de componentes está protegido contra los efectos de fenómenos naturales tales como terremotos, vientos, inundaciones y proyectiles externos (GDC-2). Así, los lazos

relacionados con la seguridad de los sistemas discurren por los edificios de contención, auxiliar, de combustible y de componentes. Estos edificios están diseñados para resistir los efectos de terremotos, inundaciones, proyectiles externos y otros fenómenos naturales aplicables al emplazamiento.

El sistema de agua de servicios esenciales discurre por la estructura de toma, edificio auxiliar y edificio de los generadores diésel. Todos ellos son de categoría sísmica I y diseñados para resistir los fenómenos citados. La tubería enterrada, si la hubiera, por la que se produce el suministro de agua a estos edificios es también de clase sísmica I. La estructura de descarga puede no ser de clase sísmica, pero su fallo no debe comprometer la funcionalidad del sistema.

- (2) Ambos sistemas se diseñan para permanecer funcionales durante y después de los terremotos postulables, y protegerlos de posibles incendios, proyectiles externos o rotura de tuberías (GDC-3 y 4). Los equipos de estos sistemas, así como sus soportes, son de categoría sísmica I.
- (3) Los sistemas se diseñan para realizar sus funciones de seguridad suponiendo un fallo simple de un componente activo, coincidente con la pérdida de energía exterior (GDC-44). Los lazos relacionados con la seguridad son completamente redundantes, de manera que ningún fallo simple compromete las funciones de seguridad del sistema. Las barras de suministro de energía eléctrica pueden ser alimentadas de energía exterior o interior de emergencia.
- (4) Los componentes activos son susceptibles de probarse durante la operación normal de la planta. Se dispone de los medios necesarios para permitir la inspección en servicio de los componentes en los tiempos adecuados descritos en el código ASME (GDC-45 y 46)
- (5) Los sistemas se diseñan y fabrican de acuerdo con códigos concordantes con la clasificación de grupo de calidad asignado por la RG 1.26 y la categoría sísmica asignada por la RG 1.29. el suministro eléctrico y las funciones de control son de clase 1E y están de acuerdo con la RG 1.32.
- (6) Los sistemas se diseñan para disponer de capacidad de aislamiento de componentes de forma que no se comprometa su función de seguridad. Ello implica el aislamiento de componentes con fugas o mal funcionamiento, y partes del sistema no relacionadas con la seguridad (GDC-44).
- (7) Las válvulas de aislamiento de la contención se seleccionan, prueban y localizan de acuerdo con los requisitos de los GDC-54, 56 y 57, y el 10CFR50 apéndice J.
- (8) El sistema de refrigeración de componentes se diseña para extraer el calor procedente de los equipos principales que deben mitigar las

consecuencias de un LOCA o MSLB transfiriendo el calor al sistema de agua de servicios esenciales (GDC-44). El diseño se efectúa suponiendo una temperatura máxima del agua de refrigeración de componentes de 50 °C (valor típico) y con los caudales de diseño para los consumidores de seguridad.

El diseño de los sistemas garantiza la disponibilidad de una capacidad de disipación de calor completa después del accidente en caso de un fallo simple.

- (9) El sistema de refrigeración de componentes funcionando en unión con los sistemas de evacuación de calor residual, de control químico y de volumen y otros sistemas de inyección y refrigeración del agua, dispone de medios para enfriar el núcleo del reactor y así lograr y mantener la parada segura. El sistema de agua de servicios esenciales se diseña asimismo para suministrar el agua de refrigeración a 35 °C (valor típico) necesaria que permita la operación continua de los generadores diésel de emergencia al 100 % de su carga nominal.
- (10) El sistema de refrigeración de componentes se diseña para garantizar una indicación automática del estado de inoperabilidad de aquellas partes redundantes del sistema que realicen funciones de seguridad (RG 1.47). Todos los componentes con accionamiento neumático o eléctrico poseen elementos de mando en sala de control.
- (11) Los sistemas se diseñan para garantizar la vigilancia continua del funcionamiento de sus componentes después de un accidente base de diseño (RG 1.97). Están provistos de la instrumentación y controles necesarios para garantizar su arranque y alineamiento automáticos en caso de accidente.
- (12) El sistema de agua de servicios esenciales está protegido de ensuciamiento orgánico y de corrosión a largo plazo. Para ello se adiciona hipoclorito al agua y se protegen los cambiadores mediante el pintado de las cajas de agua y la instalación de ánodos de sacrificio.
- (13) El sistema de agua de servicios esenciales suministra los caudales mínimos necesarios al sistema de lavado de rejillas cuando es requerido mediante la operación de una sola bomba.

A pesar de los requisitos impuestos a los sistemas de refrigeración indicados en los párrafos anteriores, la Generic Letter 89-13 puso de manifiesto una serie de problemas detectados tras la puesta en servicio de las CCNN. Asimismo, esta G.L. da una serie de pautas a seguir sobre el mantenimiento e inspección de los sistemas de agua de servicios esenciales que, actualmente, forma parte de las bases de licencia de las CCNN españolas. Esta GL está relacionada con los CGD 44, 45 y 46 del Apéndice A del 10CFR50 de la USNRC (criterios que tienen una redacción igual a los de la IS-27) y en ella se requiere a los titulares lo siguiente:

- (a) Para los sistemas de agua de servicio en circuito abierto se debe

implementar y mantener un programa de vigilancia y control para reducir la incidencia de los bloqueos de flujo por crecimiento de microorganismos.

- (b) Llevar a cabo un programa de pruebas para verificar la capacidad y transferencia de calor de los intercambiadores de calor relacionados con la seguridad, enfriados por agua de servicios. Debe incluir un programa inicial de pruebas y uno periódico.
- (c) Asegurar mediante un programa de inspecciones y mantenimiento de rutina que para las tuberías y componentes de sistemas de circuito abierto de agua de servicios, la corrosión, erosión, fallo de recubrimientos protectores, cienos y crecimiento de microorganismos no degrade el rendimiento de sistemas relacionados con la seguridad que se alimentan de agua de servicios.
- (d) Confirmar que el sistema realizará sus funciones previstas de acuerdo con las bases de diseño de la planta.
- (e) Confirmar que las prácticas de mantenimiento y los procedimientos de operación normal y de emergencia así como el entrenamiento, son adecuados para asegurar que los sistemas refrigerados por el sistema de agua de servicios esenciales cumplirán sus funciones previstas y que los operadores actuarán correctamente.

## **5. FUNCIONES DEL SUMIDERO FINAL DE CALOR. TIPOS DE SUMIDERO**

En las centrales nucleares de potencia aproximadamente de un 65 a un 70 % de la energía producida en el reactor es transferida al exterior aprovechándose el resto como energía eléctrica.

Esta energía es transportada desde los diversos focos calientes de la central a uno o varios focos fríos (sumideros de calor), por los diferentes sistemas de refrigeración de la planta. La mayor parte de la energía disipada lo es por medio del sistema de circulación encargado de refrigerar el condensador principal.

No obstante, tal como se ha visto en los apartados anteriores, la misión del sistema de servicios esenciales (ESW) es evacuar el calor residual generado por el reactor tras su parada, tanto en el caso de una parada en la explotación normal de la instalación como en el caso de la ocurrencia de un accidente. Asimismo este sistema debe asegurar la correcta refrigeración de los sistemas y componentes de seguridad, y de otros sistemas de no seguridad cuyo fallo podría conducir a un accidente. El sistema ESW toma el calor de los diferentes focos calientes y lo transporta a un foco frío denominado Sumidero Final de Calor, cuyas siglas en inglés son UHS (Ultimate Heat Sink).

Las funciones de seguridad descritas en la RG 1.27 para el UHS son:

- a) Disipar el calor residual después de la parada del reactor
- b) Disipar el calor residual después de un accidente

Se incluye en este calor residual el decaimiento del material radiactivo y las cargas térmicas de los sistemas esenciales de refrigeración que son: el calor

sensible de los materiales, el calor producido por el funcionamiento de las bombas, el calor procedente de los sistemas auxiliares (generadores diesel, aire acondicionado, piscina de combustible...) y el calor de la reacción metal-agua.

Según la Guía de Seguridad de la OIEA 50-SG-D6 Ultimate Heat Sink and Directly Associated Heat Transport Systems for NPP's, la función del UHS es la de transferir y absorber el calor residual a una tasa adecuada y con un grado de fiabilidad muy elevado, de tal forma que las emisiones de radiactividad no puedan sobrepasar los límites prescritos durante todas las situaciones operacionales, ni los límites aceptables durante las condiciones de accidente y después de los mismos.

Para cumplir estas funciones básicas, el UHS y los sistemas de refrigeración asociados al mismo deberán diseñarse de acuerdo a los criterios básicos de diseño contenidos en el Apéndice A del 10CFR50 (GDC-44, 45 y 46). Asimismo, todo este conjunto de sistemas han de satisfacer las condiciones siguientes:

- (1) Muy elevada fiabilidad.
- (2) Capacidad de funcionamiento en el grado requerido en caso de sucesos iniciadores postulados.
- (3) Disponibilidad a largo plazo.
- (4) Cuando sea factible, simplicidad en el diseño.

El UHS presenta normalmente dos formas principales que pueden usarse simultáneamente: una masa de agua o la atmósfera.

La masa de agua puede ser el mar, un río, un lago, un embalse, una capa de agua subterránea, un estanque helado u otras acumulaciones de agua, o una combinación de tales soluciones.

Si bien normalmente sólo existen estos dos tipos del UHS, los sistemas de evacuación del calor asociados al UHS presentan mucha variedad. Estos sistemas se basan generalmente en uno de los dos fenómenos físicos siguientes: evaporación del agua o elevación de la temperatura de una fracción del UHS. En ciertos casos el calor se evacua mediante algún fenómeno físico diferente como la radiación térmica.

Algunos posibles métodos son:

- Circulación de agua del mar o de agua dulce en paso único por intercambiadores de calor
- Recirculación de agua a través de un estanque con sistema de rociado
- Recirculación de agua de un lago, de un embalse o un gran estanque
- Torres secas de enfriamiento
- Torres húmedas de enfriamiento con sistemas de reposición de pérdidas

siendo todas las estructuras artificiales anteriores de categoría sísmica I.

Los fluidos utilizados para transferir el calor desde su origen al UHS no son

necesariamente los mismos a lo largo de toda la vía de evacuación de calor. Puede haber, por ejemplo, una etapa en que se utilice gas comprimido, otra etapa en que se use vapor y una o más etapas en que se recurra a agua de diferente pureza química. Algunos de los fluidos utilizados en la última etapa de la transferencia de calor pueden consumirse parcial o completamente en el proceso. En tales casos deberán preverse medios de reposición del fluido de transferencia de calor. Para tal fin se puede recurrir a varias fuentes de abastecimiento, por ejemplo, depósitos en el emplazamiento, depósitos de agua en condiciones apropiadas para su utilización inmediata, depósitos de agua no tratada, agua de la red de suministro conducida por tuberías hasta el emplazamiento, el propio UHS y aguas residuales tratadas.

Aunque, como hemos visto, la normativa permite distintos métodos de disipación de calor aceptables, la inmensa mayoría de las centrales nucleares utilizan agua como sumidero final del calor.

La disipación de calor utilizando agua se puede realizar a través de ríos, lagos y mares cuya capacidad de sumidero es obvia, o a través de estructuras artificiales. Entre éstas, las más usadas son los sistemas evaporativos de enfriamiento de los cuales hay varios tipos:

- **Balsas o estanques de enfriamiento:** consisten en depósitos de gran superficie y poca profundidad en los que la evaporación superficial y la transmisión por las paredes laterales y el fondo de la balsa consiguen el enfriamiento del agua contenida en ella.
- **Balsas con sistema de rociado:** su fundamento es el mismo que las del tipo anterior, pero el rendimiento se aumenta al pulverizar el agua en el camino del aire, lo que permite un contacto más estrecho entre ambos fluidos.
- **Torres de refrigeración:** son dispositivos semicerrados, con aperturas al aire ambiente en sus partes inferior y superior, diseñadas para aumentar la superficie de contacto aire- agua y, con ello, mejorar el proceso de transferencia al hacer caer en cascada el agua sobre el sistema de relleno. Este sistema consiste en una serie de placas o rejillas que provocan una fina pulverización de las gotas de agua (relleno de salpicadura) o producen una delgada capa de agua muy extendida (relleno de película). Además, los rellenos aumentan el tiempo de caída del agua dentro de la torre, lo que también aumenta la eficacia del fenómeno de transferencia de calor. Por su parte, el aire circula en el interior de la torre en sentido opuesto o normal al flujo de agua.

Atendiendo al sistema que se utiliza para hacer pasar el aire a través del relleno, se distinguen tres tipos diferentes de torres:

- a) **De tiro natural**, en las que el aire se mueve por la circulación natural que se establece debido a la diferencia de presiones atmosféricas entre la base y parte superior de la chimenea, la diferencia de velocidades del viento y, fundamentalmente, la formación de una corriente de

convección causada por las diferencias térmicas que dan lugar a su vez a variaciones de la densidad del aire a la entrada y salida de la torre. Aunque estas torres pueden ser de diferentes formas, en la actualidad se construyen casi exclusivamente las de perfil hiperbólico y se utilizan básicamente en el ciclo de enfriamiento del agua de circulación.

b) **De tiro mecánico**, en las que la impulsión de aire se realiza mediante ventiladores. Estas torres, a su vez, se dividen en dos tipos:

- De tiro inducido, donde el equipo mecánico actúa como elemento aspirante, ocasionando una depresión a la salida del relleno que facilita el paso de aire ambiente, para lo cual los ventiladores se sitúan en la parte superior de la torre. Son las utilizadas en la CCNN españolas.
- De tiro forzado, en las que los ventiladores introducen el caudal de aire requerido en el interior de la torre, para lo cual se sitúan en las toberas de entrada en la parte baja de las torres, descargando a la atmósfera por la parte superior el aire saturado.

c) **De tiro asistido**, son una solución intermedia mediante la cual la torre opera normalmente en tiro natural, pero dispone de equipos de impulsión de aire auxiliares que se operan cuando las condiciones de servicio son extremas.

## **6. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL UHS Y DE LOS SISTEMAS ASOCIADOS**

El sumidero final de calor deberá ser capaz de absorber el calor residual de los reactores a los que sirva, permaneciendo él mismo dentro de los límites de temperatura que sean considerados aceptables. Estos límites pueden estar determinados por los fenómenos físicos en los que se base el mecanismo de transferencia de calor utilizado, o ser establecidos por las autoridades en función de consideraciones ambientales.

La **selección** del UHS y de los sistemas de transferencia de calor directamente relacionados con él, deberá basarse en las características específicas del emplazamiento teniendo en cuenta los siguientes aspectos: medio de transferencia de calor (agua o aire) y fuentes de las que se dispone, sucesos iniciadores postulados para el emplazamiento concreto y reglamentos aplicables relativos a la protección del medioambiente.

Al seleccionar el UHS deberán tenerse en cuenta las siguientes cuestiones:

- Los fenómenos naturales que pueden afectar al emplazamiento (terremotos, inundaciones, vientos,...)
- Los sucesos exteriores imputables al hombre (caída de aviones, explosiones, rotura de presas,...)
- Los sucesos de origen interno (incendios, rotura de tuberías,...)
-



En cualquier caso, deberán tenerse en cuenta sólo aquellos sucesos internos y externos que hayan sido considerados como sucesos iniciadores para el emplazamiento y el tipo de reactor que se trate. El resultado de este proceso puede ser un diseño de sumideros finales de calor combinados, con diversas fuentes de reposición y sistemas de transferencia de calor.

En general, es preferible el acceso a reservas naturales e inagotables de agua, tales como los mares o grandes lagos y ríos, en lugar de fuentes artificiales de capacidad limitada. Otros factores que deberán tenerse en cuenta en la selección del UHS y el diseño de los sistemas de transferencia de calor son la calidad del medio disponible y las variaciones de temperaturas extremas previstas.

Cuando no se tenga acceso a una reserva inagotable de agua, la selección del UHS puede depender en gran medida de los factores locales que influyen en la capacidad de obtener agua de reposición para todos los sucesos iniciadores postulados, además de la fiabilidad para obtenerla.

Cuando se disponga de un UHS de capacidad limitada, la elección de los sistemas de transferencia de calor directamente relacionados con él puede venir impuesta por la necesidad de conservar las reservas del medio utilizado y, por tanto, de aumentar el tiempo requerido para conseguir fuentes de reposición. En este caso, puede ser preferible optar por sistemas mixtos en los que la transferencia de calor se efectúa por medio de agua y de aire (torres mixtas de refrigeración húmedas).

En el **dimensionado** del UHS y de sus sistemas asociados habrá que tener en cuenta los siguientes factores:

- (1) **Cargas térmicas:** para cumplir los objetivos del diseño habrán de tenerse en cuenta las siguientes,
  - Calor de desintegración en el núcleo del reactor (calor de desintegración radiactiva y de fisión tras la parada)
  - Calor de desintegración del combustible gastado que se encuentra en la piscina
  - Calor acumulado en las estructuras y el propio combustible
  - Calor emitido por los elementos importantes para la seguridad (bombas, cambiadores, generadores diésel de emergencia,...)
  - Otras fuentes de calor relacionadas con los accidentes (por ejemplo, reacciones químicas)

Cada una de estas cargas varía en función del tiempo y algunas de ellas según la situación particular considerada. Por cada suceso iniciador postulado en el que el UHS deba desempeñar su función de seguridad, inclusive para la parada segura y las situaciones tras las condiciones de accidente, las diversas fuentes de calor deberán calcularse en función del tiempo. Deberán determinarse la tasa de evacuación de calor de los sistemas de transferencia asociados y el calor total evacuado al UHS.

- (2) **Capacidad del UHS:** deberá garantizarse la posibilidad de evacuación al

UHS del calor de desintegración radiactiva y otras cargas térmicas, después la pérdida de energía exterior o de la pérdida de efectividad de los sistemas normales de evacuación de calor.

En el caso de los UHS con acceso inmediato a fuentes naturales inagotables de agua o a la atmósfera, la capacidad de evacuación a lo largo del tiempo está asegurada. Para los emplazamientos que carezcan de tal posibilidad, deberá demostrarse que los recursos inmediatamente disponibles tienen capacidad suficiente para recibir la carga térmica hasta el momento en que puedan ser renovados. Este período de tiempo es de 30 días según la RG 1.27. En esta demostración se deberá tener en cuenta la evaporación y los factores que puedan tener por efecto una demora en el proceso de renovación, tales como fenómenos naturales adversos, sucesos imputables al hombre, condiciones de accidente en la central, disponibilidad de interconexiones y complejidad de los procedimientos de renovación.

(3) **Capacidad de los sistemas de transferencia de calor directamente relacionados con el UHS:** en lo que respecta a la seguridad, hay que tener en cuenta los siguientes factores para el dimensionado de estos sistemas,

- Tasa máxima de evacuación de calor para las cargas térmicas a eliminar por el UHS: para fijarla, se deberá determinar la combinación más grave de cargas térmicas para todos los sucesos iniciadores postulados durante los cuales el UHS haya de desempeñar su función de seguridad. Puede preverse la acumulación temporal de calor en los sumideros internos de la central, tales como las estructuras situadas en el núcleo, los circuitos primario y secundario, la estructura de contención, las piscinas de supresión, las piscinas de almacenamiento de combustible gastado y los medios de transferencia de calor.
- Parámetros ambientales de diseño: comprenden la temperatura del agua del UHS para los sistemas de enfriamiento por agua, la temperatura de bulbo seco del aire para las torres secas de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo para torres húmedas. Cuando sea necesario, deberán también considerarse otros parámetros tales como la calidad del agua (contenido en fango e impurezas químicas), la velocidad del viento y la insolación. Cuando sea posible, la selección de estos parámetros conviene que esté basada en registros durante largos períodos de tiempo de los datos relativos a las condiciones del emplazamiento o de la región, con un margen apropiado para los casos de incertidumbre. Tales registros se pueden complementar con mediciones en el propio emplazamiento antes y durante la construcción de la central.

Es recomendable que los parámetros ambientales considerados sean los adecuados al diseño en cuestión y que se seleccionen en función de los parámetros determinantes y de los períodos críticos en los que se suponen condiciones ambientales extremas. (ejemplo, torre seca de enfriamiento → período crítico corto  $\approx 3$  horas).

Otros tipos de UHS como los estanques de enfriamiento, son menos sensibles a las variaciones transitorias de los parámetros ambientales durante periodos cortos de tiempo y pueden exigir el establecimiento de parámetros ambientales basados en periodos más largos (varios días).

- (4) **Abastecimiento de fluidos:** en todos los casos en que sea preciso el abastecimiento de fluidos para la transferencia de calor, la lubricación u otras necesidades del UHS y de los sistemas de transferencia de calor asociados, deberá comprobarse, para cada emplazamiento, que dicho abastecimiento puede asegurarse en la cantidad, con la calidad, en los plazos y con la fiabilidad requeridos.

Un caso particular de todo lo anterior aparece en los **emplazamientos compartidos** por varios reactores. Por lo general, los componentes activos de los sistemas de transferencia de calor directamente asociados con el UHS no conviene que sean compartidos por dos o más reactores de potencia. Si tales componentes activos se comparten, deberá demostrarse que se cumplen todos los requisitos de seguridad, en particular la capacidad de hacer frente a condiciones de accidente de un reactor, garantizando al mismo tiempo la parada de los restantes en condiciones de seguridad (GDC-5 del apéndice A del 10CFR50).

Deberán considerarse todos los sucesos iniciadores postulados, incluso los accidentes que puedan ocurrir dentro de la central, aunque no es razonable suponer que se produzcan simultáneamente, en más de una unidad, accidentes internos relacionados entre sí.

Es admisible que los sistemas de transferencia de calor sean compartidos por varios reactores, siempre que estos sistemas cumplan todos los requisitos de diseño, en particular el de redundancia, y se ajusten a las recomendaciones sobre diversidad de componentes.

Este uso compartido de los sistemas no deberá disminuir la fiabilidad global. Así pues, conviene evitar aquellas características del diseño innecesariamente complejas tales como los enclavamientos múltiples y la conmutación automática del equipo a varias unidades.

Estos factores, es decir, la necesidad de un diseño simple y una mayor fiabilidad y disponibilidad de los sistemas, pueden exigir que los sistemas compartidos posean en grado de redundancia y diversidad mayor que el mínimo requerido.

También es posible que se compartan los sistemas de reposición para el UHS. Por ejemplo, si existen torres húmedas de enfriamiento independientes y redundantes que sirven a varias unidades, se podría contar con un único sistema de abastecimiento de agua de reposición para todas ellas, al que se le debería exigir la fiabilidad apropiada.

Es admisible, en general, que se compartan las obras de ingeniería civil

relacionadas con el UHS siempre que se hayan tenido en cuenta en el diseño todos los sucesos iniciadores postulados y se prevea una separación física adecuada entre componentes redundantes.

## **7. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DEL UHS**

La RG 1.27 establece cuatro requisitos relacionados con la seguridad a los sumideros finales de calor:

- (1) El sumidero final de calor debe ser capaz de asegurar la refrigeración suficiente durante al menos 30 días para :
  - Permitir simultáneamente la parada segura y el enfriamiento de todas las unidades de las centrales nucleares a las que sirva y mantenerlas en condición de parada segura, y
  - En el caso de un accidente en una unidad, teniendo en cuenta que es altamente improbable la simultaneidad de situaciones accidentales en varias unidades, limitar los efectos de ese accidente, permitir la parada simultánea y segura del resto de las unidades y mantenerlas en la condición de parada segura.

El período de 30 días se elige por considerarse suficiente para, tras un accidente, evaluar la situación y tomar las medidas correctivas oportunas. No obstante, la guía establece que se debería disponer de procedimientos para asegurar la continuación de la capacidad del sumidero después de 30 días. Se debe contar además con el suficiente conservadurismo como para asegurar durante esos 30 días:

- La disponibilidad del suministro de agua para la refrigeración sin aportación exterior, y
- Una temperatura del agua tal que no se excedan las temperaturas base de diseño de los equipos relacionados con la seguridad.

Para los sumideros en los que el suministro de agua pueda estar limitado y/o la temperatura de la toma de agua de la planta desde el sumidero pueda eventualmente llegar a ser crítica (por ejemplo, en balsas, lagos, torres de refrigeración u otros sumideros donde pueda haber recirculación entre la toma y la descarga del agua de refrigeración de la planta) se deberían realizar análisis conservadores de transitorios de suministros y/o temperaturas.

En esos análisis, las condiciones meteorológicas que se deberían considerar son:

- La peor combinación durante 30 días de los parámetros críticos (punto de rocío, presión, velocidad del viento y radiación solar) que provoquen las máximas evaporación y pérdidas por arrastre → cálculo del volumen de agua necesario
- La peor combinación de parámetros críticos, incluyendo las variaciones diurnas cuando sea apropiado, que produzca la mínima refrigeración del

agua del sumidero durante uno o varios períodos de tiempo críticos, específicos de cada tipo de sumidero → Cálculo de la temperatura máxima del agua del sumidero.

Para seleccionar esas condiciones meteorológicas existen varios métodos aceptables según la RG 1.27:

- a) Basándose en la información climatológica regional, seleccionar la observación más severa durante los períodos de tiempo críticos para cada parámetro controlante o combinación de parámetros, justificando el conservadurismo de esos datos para el emplazamiento. En este método, las condiciones individuales se pueden combinar sin tener en cuenta si esa combinación se produjo realmente en el pasado.
- b) Basándose en las medidas regionales climatológicas que se haya demostrado que son representativas del emplazamiento, seleccionar la combinación más severa de parámetros controlantes. Si se dispone de datos representativos de menos de 30 años, se deberían examinar otros datos regionales históricos para determinar las condiciones meteorológicas controlantes para los períodos de tiempo críticos.
- c) Cuando se pueda demostrar que son aceptables las consecuencias de exceder algunas condiciones base de diseño durante períodos de tiempo cortos, se podrán asumir condiciones meteorológicas menos severas. En este caso, se debería presentar información sobre la magnitud, persistencia y frecuencia de ocurrencia de los parámetros meteorológicos controlantes que excedan las condiciones base de diseño.

Los análisis mencionados anteriormente, relativos al suministro de agua para enfriamiento durante 30 días y al exceso de temperaturas, deberían incluir suficiente información para justificar las hipótesis y métodos analíticos empleados. Esta información debería incluir la justificación de que los valores de evaporación, pérdidas por arrastre y transferencia de calor usados son conservadores.

No obstante lo dicho en los párrafos precedentes, puede ser aceptable una capacidad de enfriamiento de menos de 30 días si se puede demostrar que es posible reponer agua en el sumidero o usar un suministro alternativo de agua para asegurar la capacidad continuada del sumidero para realizar sus funciones de seguridad, teniendo en cuenta la disponibilidad del equipo de reposición y las limitaciones que se puedan disponer a la libertad de movimientos tras un accidente o la ocurrencia de fenómenos naturales severos.

- (2) El sumidero final de calor, esté compuesto por una o más fuentes de agua, deberá ser capaz de soportar, sin perder sus funciones de seguridad especificadas en el punto 1, los siguientes sucesos:

- a) El fenómeno natural más severo esperado en el emplazamiento, con las apropiadas condiciones ambientales, pero sin ningún otro fenómeno natural severo ocurriendo simultáneamente, puesto que esa situación se considera altamente improbable.
- b) Los incidentes relacionados con el emplazamiento que han ocurrido en el pasado o podrían ocurrir durante la vida de la central (accidentes de transporte, desviación del río, etc.).
- c) Combinaciones razonablemente probables de fenómenos naturales menos severos y/o sucesos relacionados con el emplazamiento.
- d) Un fallo único en las estructuras artificiales.

Los sumideros finales de calor que se hayan construido específicamente para centrales nucleares y que no tengan el requisito de diseñarse para soportar el terremoto de parada segura (SSE) o la máxima inundación probable, deberían, al menos, ser diseñados y construidos para soportar los efectos del terremoto base de operación (OBE), tal como se define en el apéndice A del 10CFR100, y una inundación, basándose en los sucesos históricos de la región.

- (3) El sumidero final de calor debería constar de, al menos, dos fuentes de agua, incluyendo sus estructuras de retención, cada una de las cuales debería tener la capacidad de realizar por sí sola las funciones de seguridad especificadas en el punto 1, a menos que se pudiera demostrar que hay una probabilidad extremadamente baja de perder la capacidad de una fuente única.

Para los sistemas de refrigeración de circuito cerrado, debería haber al menos dos conductos que conectarán la fuente o fuentes con las estructuras de toma de agua de las centrales nucleares, y al menos dos conductos de retorno del agua de refrigeración, a menos que se demuestre que existe una probabilidad extremadamente baja de que un único conducto pueda fallar como resultado de un fenómeno natural o relacionado con el emplazamiento.

Para los sistemas de refrigeración en circuito abierto, debería haber al menos dos conductos que conectarán la fuente o fuentes con las estructuras de toma de agua de la central y al menos dos conductos que descargarán el agua de refrigeración suficientemente lejos de la central para asegurar que no existe el riesgo de que la planta se refrigere con el agua de refrigeración descargada, a menos que exista una probabilidad extremadamente baja de que un único conducto pueda fallar como resultado de un fenómeno natural o relacionado con el emplazamiento.

Todas las fuentes de agua y sus conductos deben ser altamente fiables y estar separados y protegidos de forma que el fallo de uno cualquiera de ellos no induzca el fallo de ninguno de los otros.

- (4) Las especificaciones técnicas de funcionamiento (ETF) deben incluir las

acciones a tomar en el caso de pérdida total o parcial de la capacidad del sumidero final de calor o que la planta no cumpla temporalmente los puntos 1, 2 ó 3 anteriores. Así por ejemplo, las ETF requieren:

- Vigilar la temperatura máxima y el nivel del sumidero final de calor (no incluido en la R.G. 1.27)
- Si la capacidad del sumidero no se pudiera restaurar en un plazo de tiempo razonable, todas las unidades a que sirve ese sumidero deberían pararse y permanecer en estado de parada hasta que se recupere esa capacidad.

Para cumplir con todas las funciones de seguridad asignadas al sumidero final de calor, el diseño del mismo tiene las siguientes características:

#### **a) Redundancia**

Los requisitos mínimos en materia de redundancia según un enfoque determinista son:

- El UHS y los sistemas de transferencia de calor directamente relacionados con él son capaces de realizar su función incluso en caso de que se produzca un suceso iniciador postulado a causa de un fallo, ya sea de un componente activo o pasivo. Esta regla se aplica también aunque dicho fallo no provoque o no exija una parada forzosa del reactor.
- Después de un suceso iniciador postulado, estos sistemas son capaces de cumplir sus funciones con un fallo único adicional de un componente activo.

Es indiferente que la redundancia requerida se consiga gracias al empleo de múltiples componentes idénticos, o al empleo de componentes diversos, o a una combinación de ambos métodos.

#### **b) Causas comunes de fallos y diversidad de componentes**

Es de esperar que la mayor parte de las causas potenciales de fallos debidos a causas comunes serán detectadas, ya sea en la etapa de diseño o ya durante los ensayos de puesta en servicio y, en consecuencia, eliminadas en dichas fases.

Un medio de reducir la posibilidad de fallos debidos a causa comunes es aplicar el principio de la diversidad de los componentes. Se define ésta como la existencia de componentes o sistemas redundantes para ejecutar una función determinada, cuando tales componentes o sistemas tienen, considerados en conjunto, una o más características diferentes. Puede consistir, por ejemplo, en: principios diferentes de funcionamiento, condiciones diferentes de funcionamiento o equipos que utilizan diferentes métodos físicos, que tiene diferentes dimensiones o que pertenecen a diferentes fabricantes.

Existe la posibilidad de que se produzcan fallos múltiples a causa de sucesos iniciadores postulados tales como terremotos, caídas de aviones o

inundaciones internas. En dichos casos se combina la redundancia con la protección y la separación físicas.

#### **c) Acciones de los operadores**

No se supone en el diseño que se puede contar con acciones de los operadores si éstas han de ejecutarse inmediatamente después de sobrevenir un suceso iniciador postulado. El período en el cual no se cuenta en el diseño con acción alguna de los operadores se determina en función de cada suceso iniciador y de las condiciones particulares de la central, y varía entre 10 y 30 minutos.

#### **d) Separación física y control de accesos**

Se determinan primero los sucesos iniciadores postulados a los que corresponden zonas de influencia o de daños. A continuación se comprueba que los componentes que quedan intactos tras un suceso iniciador podrán seguir realizando la función requerida, en el supuesto adicional de que se produzca un fallo único y una pérdida de alimentación eléctrica exterior. En el caso de no ser así, se proveen los medios necesarios para separar los componentes/trenes redundantes de forma que siempre se cuente con el mínimo necesario para cumplir las funciones de seguridad.

En cuanto al control de accesos, se estudia ya en las primeras etapas del diseño, medidas para impedir el acceso de personas no autorizadas a las estructuras y componentes relacionados con el UHS, que normalmente se encuentran en zonas alejadas de los edificios principales de la central.

#### **e) Disposiciones sobre vigilancia, ensayos e inspección**

Se prevé la instrumentación suficiente a fin de que los operadores de la central puedan verificar la capacidad del UHS para ejecutar su función de seguridad. Esto requiere la vigilancia del nivel del agua en las tomas, tanques o depósitos, o de la temperatura del agua o del aire. También se prevé la instrumentación necesaria para los sistemas de transferencia de calor directamente relacionados con el UHS, a fin de verificar su comportamiento o detectar fallos y anomalías durante su funcionamiento. Esto puede requerir la vigilancia del caudal, de las temperaturas y de la radiactividad de los sistemas, así como el estado de sus componentes.

### **8. DISEÑO DE LOS SISTEMAS EN LAS CENTRALES ESPAÑOLAS**

En **C.N. Vandellós II** el UHS era el mar Mediterráneo junto con la atmósfera en su diseño original. En el año 2007 se instalaron en la central los sistemas GJ y KJ que refrigeran las salas de equipos de seguridad (incluida la sala de control) y los generadores diésel de emergencia respectivamente. Estos sistemas a su vez se refrigeran mediante aerorrefrigeradores situados en la terraza del Edificio Diésel de Emergencia. Con esto se consiguió eliminar la



utilización del agua de mar y de la tubería Bonna asociada que ha sufrido problemas de corrosión a lo largo del tiempo.

Asimismo en el año 2009 se construyó el nuevo sistema EJ (sistema de agua de servicios de salvaguardias tecnológicas) que refrigera al cambiador de componentes (sistema EG) mediante agua pretratada. El sistema dispone de una balsa compartimentada de donde aspiran cuatro bombas del 100 %. También cuenta con dos torres húmedas de refrigeración que enfrían el agua a la salida de los cambiadores antes de devolverla a la balsa.

El agua de refrigeración de componentes (EG) es impulsada por las bombas de este sistema a través de los cambiadores de calor circulando por el lado de carcasa. Las cargas térmicas a refrigerar se agrupan en tres lazos de refrigeración: lazos críticos o esenciales 1 y 2, y lazo no crítico.

En **C.N. Cofrentes** el UHS es un estanque de enfriamiento por aspersión disipándose el calor tanto por convección natural (estanque) como por convección forzada (aspersores). El estanque consiste en una artesa completamente excavada en el terreno, convenientemente impermeabilizada, con forma de prisma invertido y construido de acuerdo a los requisitos exigidos para las estructuras de categoría sísmica I.

Se dispone de tres sistemas de aspersión independientes por los que se descarga al estanque el agua del sistema de servicios esenciales. Este sistema, asimismo, toma agua del estanque por medio de tres bombas verticales, cada una de las cuales suministra agua para la refrigeración de los componentes asignados a cada división del sistema.

Durante la operación normal de la planta, los equipos de salvaguardia que lo precisan están refrigerados por el sistema de agua de servicios no esenciales. En caso de emergencia es el sistema de agua de servicios esenciales el que se ocupa de las cargas a refrigerar y se aísla del sistema no esencial. No existe un circuito de refrigeración intermedio de seguridad tal como el agua de refrigeración de componentes en los PWR.

En **C.N. Almaraz** el diseño original contemplaba el embalse de agua de servicios esenciales como UHS para ambas unidades. La refrigeración se realizaba por convección natural haciendo circular el agua desde la descarga de las bombas hasta la toma, a lo largo de unas pantallas de separación térmica. A partir del año 2004, el sistema cuenta con un sistema de aspersores de forma que se aumenta notablemente la eficacia de la transmisión de calor y se hace frente a las altas temperaturas registradas en este emplazamiento.

El sistema CCW dispone de tres bombas, una para cada tren y otra de reserva que se puede alinear con cualquier tren de cualquiera de las dos unidades.

El sistema ESW cuenta también con tres bombas (cinco bombas para las dos unidades) que aspiran de la estructura de toma situada en el embalse. Este sistema sirve además como suministro de emergencia al sistema de agua de alimentación auxiliar.

En **C.N. Ascó** el concepto de sistemas de refrigeración es totalmente distinto. El sistema de agua de refrigeración de salvaguardias es el equivalente al CCW y el sistema de agua de servicios de salvaguardias equivale al ESW.

El sistema de refrigeración de salvaguardias es de dos lazos con dos bombas por lazo y refrigera sólo a las barreras térmicas de las BRR y equipos de salvaguardia, por lo que sólo se aíslan en caso de rotura de alguno de los lazos. Un tren está en funcionamiento en operación normal y el otro arranca ante señal de emergencia.

El sistema de agua de servicios de salvaguardias refrigera al CCW y a los generadores diesel y se compone de dos trenes, cada uno con dos bombas redundantes del 100 %. Cada tren opera en circuito semicerrado al refrigerarse mediante una torre de refrigeración de tiro forzado mediante ventiladores. El agua evaporada en las torres se repone mediante el sistema de agua tratada, y en caso de indisponibilidad de éste con agua de la balsa de reposición (sumidero final de calor) que es el único elemento común a las dos unidades

En **C.N. Santa María de Garoña** el UHS es el río Ebro de donde aspiran las dos bombas del LPCI/SW que refrigeran a los equipos necesarios en caso de accidente. Al igual que en C.N. Cofrentes, no existe un sistema de seguridad semejante al CCW.

Los Generadores Diesel de emergencia están refrigerados por un sistema de agua independiente del resto de sistemas de agua de refrigeración que a su vez se refrigera mediante aerorrefrigeradores.

En **C.N. Trillo** el UHS está compuesto por dos piscinas de almacenamiento de agua interconectadas por un canal. El agua que llega del sistema de servicios esenciales se refrigera en unas torres de tiro forzado de las cuales existen cuatro con tres ventiladores cada una. El agua se refrigera mediante la corriente ascendente de aire forzado, cayendo el agua desde la parte alta de la torre. Cada grupo de dos torres está asociado a una piscina de almacenamiento.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

- NUREG 0800. Standard Review Plan. Marzo 2007. Capítulos 9.2.1, 9.2.2 y 9.2.5.
- Generic Letter 89-13 SERVICE WATER SYSTEM PROBLEMS AFFECTING SAFETY-RELATED EQUIPMENT.
- Regulatory Guide 1.27. ULTIMATE HEAT SINK FOR NUCLEAR POWER PLANTS. ENERO 1976
- Estudio Final de Seguridad de cada una de las centrales nucleares españolas. Capítulos 9.2.1, 9.2.2 y 9.2.5.