

Tercer Ejercicio. Seguridad Nuclear

Tema 3.A.15

**Sistemas eléctricos relacionados con la seguridad de las centrales nucleares.
Sistemas de distribución de corriente alterna en los distintos niveles de tensión.
Sistemas de corriente continua. Alimentación eléctrica exterior e interior y
sistemas de suministro eléctrico de emergencia.**

INDICE

1. **INTRODUCCIÓN**
2. **DEFINICIONES**
3. **SISTEMAS ELÉCTRICOS RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES**
4. **SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA EN LOS DISTINTOS NIVELES DE TENSIÓN**
5. **SISTEMAS DE CORRIENTE CONTÍNUA**
6. **ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA EXTERIOR E INTERIOR Y SISTEMAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO DE EMERGENCIA**
 - 6.1 **Alimentación eléctrica exterior**
 - 6.2 **Alimentación eléctrica interior. Sistemas de suministro eléctrico de emergencia**
 - 6.2.1 **Generadores Diesel de Emergencia**
 - 6.2.2 **Baterías**
7. **OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNA CENTRAL NUCLEAR**
8. **NORMATIVA BÁSICA APLICABLE A LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS**

Resumen Ejecutivo

Los sistemas eléctricos de una central nuclear presentan una doble funcionalidad, por un lado, transportan la potencia generada por el alternador a la red nacional y, por otro lado, proporcionan la alimentación de energía eléctrica necesaria a los servicios auxiliares de la planta, tanto en condiciones de operación normal como incidentes operacionales y accidentes. Las exigencias de seguridad de una central nuclear obligan a proveer subsistemas de servicios auxiliares independientes y redundantes que permitan llevar a la planta a condiciones seguras y mantenerla en tales condiciones el tiempo necesario ante los diferentes transitorios y accidentes postulados, para lo cual la central dispone de sistemas independientes y redundantes de suministro y distribución de energía eléctrica.

En el presente tema se desarrollan los diferentes subsistemas eléctricos incorporados a la planta de cara a cubrir esta doble funcionalidad, y que incluyen: el sistema de generación y de transmisión a la red nacional, el sistema de suministro eléctrico exterior, los sistemas de distribución (tanto normal como de seguridad), y los sistemas de suministro eléctrico internos de emergencia, reflejando para los mismos una descripción genérica de sus principales características, las principales exigencias de diseño, así como los criterios normativos específicos más relevantes de aplicación cuando se trata de sistemas relacionados con la seguridad.

Temas relacionados

El presente tema tiene relación con el tema *“Accidentes fuera de la base de diseño: transitorios previstos sin parada del reactor. Pérdida total de corriente alterna”*, en lo que concierne a este último capítulo del mismo.

TEMA 3.A.14. SISTEMAS ELÉCTRICOS RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA EN LOS DISTINTOS NIVELES DE TENSIÓN. SISTEMAS DE CORRIENTE CONTÍNUA. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA EXTERIOR E INTERIOR Y SISTEMAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO DE EMERGENCIA.

1. INTRODUCCIÓN

La instalación de una central nuclear tiene como misión principal la contribución al sistema eléctrico nacional mediante la generación de energía eléctrica. Por su parte, el sistema eléctrico nacional contribuye, junto con los sistemas de suministro eléctrico internos de la planta, al funcionamiento de la central aportando la energía necesaria para la alimentación de los sistemas auxiliares de la misma requeridos para su operación en condiciones normales o para hacer frente a situaciones de accidente.

Los sistemas eléctricos de una central nuclear comprenden todos los equipos y componentes encargados de la generación de potencia eléctrica y de su suministro a la red nacional de transporte, y aquellos equipos y componentes encargados de cubrir las necesidades de alimentación eléctrica a equipos de la planta, tanto para su operación normal como para hacer frente a transitorios operacionales o accidentes postulados. Aquellas porciones del sistema eléctrico nacional próximas a una central nuclear, encargadas de proporcionar la conexión con la misma para permitir las dos funciones anteriormente reflejadas, constituyen lo que se denomina el “sistema eléctrico exterior” asociado a la central nuclear. Por su parte, aquellos equipos y componentes de la propia central encargados de la generación de energía eléctrica, la distribución de alimentación eléctrica a los servicios auxiliares, y los equipos internos de la planta que proporcionan un suministro eléctrico alternativo ante una pérdida del suministro eléctrico exterior constituyen lo que se denomina el “sistema eléctrico interior” de la central.

2. DEFINICIONES

De cara a facilitar la posterior exposición, se exponen a continuación las siguientes definiciones contempladas en la norma IEEE Std 308:

Clase 1E: “es la clasificación de seguridad de equipos y sistemas eléctricos que son esenciales para la parada segura del reactor, el aislamiento de la contención, la refrigeración del núcleo del reactor, la extracción de calor del reactor y de la contención, o que son esenciales para prevenir una liberación significativa de material radiactivo al medio ambiente”.

Función de Seguridad: “uno de los procesos o condiciones (por ejemplo, inserción de reactividad negativa de emergencia, extracción de calor post-accidente, refrigeración de emergencia del núcleo, extracción de radiactividad post-accidente, y aislamiento de la

contención) esenciales para mantener los parámetros de la planta dentro de los límites aceptables establecidos para un suceso base de diseño”.

Sistema de Seguridad: “aquellos sistemas (sistema de disparo del reactor, y los sistemas de salvaguardias tecnológicas, o ambos, incluyendo todos los sistemas auxiliares soporte) que proporcionan una función de seguridad. Un sistema de seguridad está compuesto de más de un grupo de seguridad, de los cuales cualquier grupo de seguridad es capaz de proporcionar la función de seguridad”.

División: “la designación aplicada a un sistema o conjunto de componentes especificado que permite el establecimiento y mantenimiento de independencia física, eléctrica y funcional con respecto a otros conjuntos de componentes redundantes”.

Equipo redundante: “una parte de un equipo o sistema que duplica la función esencial de otra parte de un equipo o sistema de manera que cualquiera de estas partes puede llevar a cabo la función requerida independientemente del estado de operación o fallo de la otra”.

3. SISTEMAS ELÉCTRICOS RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES

El sistema eléctrico interior de una central nuclear está formado por el sistema de suministro eléctrico interior y por el sistema de distribución interior, esto es, por aquellos equipos encargados de la generación de energía eléctrica interior y por aquellos equipos y subsistemas encargados de distribuir y adecuar el suministro de potencia, procedente de la red exterior o de las fuentes de generación internas de la central, para proporcionar la alimentación eléctrica con las adecuadas características (corriente alterna o corriente continua, potencia, nivel de tensión de alimentación, fiabilidad del suministro, etc...), requerida para el adecuado funcionamiento de los equipos y sistemas de la central necesarios para la correcta operación de la misma bajo cualquier modo de operación de la planta.

Las cargas a alimentar comprenden tanto cargas asociadas al funcionamiento normal de la planta como cargas de sistemas encargados de llevar a cabo funciones de seguridad. En este sentido el sistema eléctrico interior de una central nuclear se divide en lo que constituye el sistema eléctrico relacionado con la seguridad, con componentes Clase 1E, encargado del suministro eléctrico a los sistemas auxiliares con funciones de seguridad, bajo las condiciones establecidas en las bases de diseño de la instalación, y el sistema eléctrico de no seguridad, con componentes No Clase 1E, encargado del suministro a servicios auxiliares no relacionados con funciones de seguridad de la central.

Los elementos que componen el sistema eléctrico de una central nuclear son: fuentes de potencia (generadores diesel, baterías), componentes y equipo de distribución (transformadores, cabinas, cables, bandejas de cableado, cargadores de baterías, inversores), equipos actuadores (interruptores de circuito, controladores, relés de control, interruptores de control, válvulas piloto), equipo actuado (motores, solenoides), y la instrumentación y controles asociados con el suministro y distribución de corriente eléctrica (indicadores de vigilancia, interruptores, equipo de protección).

Los componentes y el diseño del sistema eléctrico interior No Clase 1E no están sometidos a requisitos normativos relacionados con la seguridad, y el fin último es que el diseño sea el más adecuado para la correcta operación en funcionamiento normal de la central. Bajo este prisma, no se va a profundizar más sobre este sistema, reflejando únicamente que está compuesto por un sistema de suministro y distribución de corriente alterna de media y baja tensión, y un sistema de suministro y distribución de corriente continua de baja tensión, para dar respuesta a las diversas demandas de suministro eléctrico de los diferentes equipos.

En cuanto al sistema eléctrico de seguridad, en la norma IEEE Std 308 se recogen los criterios de diseño aplicables. Como criterio general para los sistemas eléctricos interiores Clase 1E, esta norma establece que deberán ser diseñados de manera que se asegure que ningún suceso base de diseño causará: (1) la pérdida de potencia eléctrica a un número tal de salvaguardias tecnológicas, equipos de monitorización y vigilancia, o equipos del sistema de protección, que una función de seguridad requerida no pueda ser ejecutada, ni (2) la pérdida de potencia eléctrica a equipos que podrían resultar en un transitorio de potencia del reactor capaz de causar daño significativo a las vainas del combustible o a la barrera de presión de refrigerante del reactor.

Asimismo, la aplicación del criterio de fallo simple a sistemas de seguridad conduce a que el diseño contemple la redundancia de los equipos encargados de proporcionar las funciones de seguridad de estos sistemas. El sistema eléctrico interior de seguridad, encargado del suministro eléctrico a estos equipos, está sometido al mismo criterio y, por lo tanto, el diseño contempla divisiones redundantes e independientes del sistema de distribución eléctrica y de las fuentes de potencia internas. Existen posibilidades diversas de diseño del sistema eléctrico Clase 1E capaces de dar adecuada respuesta a este requisito. La configuración más común en las centrales nucleares españolas consiste en 2 divisiones redundantes, cada una con una capacidad del 100% para llevar a cabo las funciones de seguridad previstas. Otras configuraciones diferentes a ésta son las contempladas en el diseño de C.N. Trillo (tecnología Siemens-KWU), en la que se dispone de 4 divisiones redundantes con capacidad del 50% (lógica de actuación 2 de 4), y en el diseño de C.N. Cofrentes (tecnología BWR), en el cual se contemplan 3 divisiones, siendo una de ellas dedicada a la actuación del Sistema de Aspersión del Núcleo a Alta Presión (HPCS), y en la cual se requiere la lógica 2 de 3 para cubrir todas las funciones de seguridad previstas.

4. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA EN LOS DISTINTOS NIVELES DE TENSIÓN

Por ser el caso más común, y de cara a facilitar la descripción, nos centraremos en el diseño de un sistema eléctrico interior consistente en dos divisiones redundantes Clase 1E, cada una con una capacidad del 100%. En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de una configuración de este tipo. La interfase entre el sistema Clase 1E de distribución interna y el suministro de alimentación eléctrica exterior, esto es, desde la red nacional de transporte, también presenta configuraciones diversas en las centrales nucleares españolas. En algunos casos el suministro exterior a las barras de

media tensión (MT) de Clase 1E (frecuentemente llamadas Barras de Emergencia o de Salvaguardia) se realiza a través de las barras de MT No Clase 1E (frecuentemente denominadas Barras Normales), realizándose la conexión mediante dos interruptores en serie. En otros casos ésta alimentación se realiza directamente a las Barras de Emergencia, y en otros casos existe una alimentación directa desde la red exterior preferente y otra desde la Barra Normal hasta la Barra de Emergencia. En cualquiera de los casos, la interfase debe cubrir los criterios de independencia y separación entre el suministro de potencia eléctrica exterior (que es No Clase 1E) y el sistema de distribución Clase 1E contemplados en la norma IEEE Std 308 (y en la norma IEEE Std 765), en las que se requiere que esta conexión debe ser realizada en los terminales de entrada de un interruptor Clase 1E, localizado en una estructura de clase de seguridad.

El sistema de distribución eléctrica Clase 1E abarca desde los interruptores de entrada de suministro a las barras de MT Clase 1E hasta las cargas. En este sistema se pueden distinguir los siguientes subsistemas: el subsistema de potencia de corriente alterna, el subsistema de potencia de corriente continua, que se trata en el siguiente apartado, y el subsistema de instrumentación y control vital.

El subsistema de corriente alterna (c.a.), en cada división Clase 1E comprende:

Barra de Salvaguardia de Media Tensión (generalmente del orden de 6 kV de tensión nominal, 10 kV en CN Trillo). Desde esta barra se alimentan directamente, a través de su correspondiente interruptor, motores de MT Clase 1E de c.a. de potencia elevada (superiores a 250 CV), como por ejemplo: bombas de carga, bombas de evacuación de calor residual, bomba de agua de refrigeración de componentes, bombas de agua de alimentación auxiliar, bombas de rociado de la contención, bombas de agua de servicios esenciales, etc. Asimismo, desde esta barra se proporciona alimentación a barras y centros de distribución de baja tensión de la misma división, a la que están conectadas a través del transformador para cambio de tensión y los correspondientes interruptores de separación de barras.

Barras de Salvaguardia de Baja Tensión (normalmente de 400 V de tensión nominal), las cuales comprenden centros de fuerza (también denominados centros de distribución) y centros de control de motores (CCM). De los centros de fuerza se alimentan directamente motores de 400 V y de una potencia comprendida entre 75 y 250 CV (tales como por ejemplo, para una central BWR, compresores de aire de instrumentos, ventiladores Booster, bombas auxiliares de Clean-UP, bombas de vacío del condensador, ..), y se alimentan los CCM que cuelgan de cada uno de ellos y otros paneles de distribución, tanto a 400 V como a otros niveles de tensión (como por ejemplo 120 Vc.a. o 220 Vc.a.), dependiendo del diseño y requisitos de alimentación de las cargas de la central. Desde los CCMs se alimentan motores cuya potencia es inferior a 75 CV.

Las barras de c.a. Clase 1E disponen de indicación de tensión en Sala de Control, y están dotadas de instrumentación para detección de fallos y generación de la alarma correspondiente en la Sala de Control. Las protecciones eléctricas de las barras, cuya actuación produce el disparo del interruptor de alimentación al circuito donde se detecta la falta, son selectivas con otros dispositivos de protección del subsistema de

MT y otros subsistemas de baja tensión. Los circuitos de control de actuación de interruptores son actuados por corriente continua de 125 V procedente del subsistema de corriente continua Clase 1E de la propia subdivisión, pudiendo asimismo procederse a la apertura manual del interruptor.

El subsistema de suministro para instrumentación y control vital, cuya tensión nominal es generalmente 120 Vc.a. (118 V en algunos casos), es proporcionar alimentación eléctrica de c.a. a instrumentación vital Clase 1E del sistema de disparo del reactor, del sistema de protección del reactor, de los sistemas de control de salvaguardias tecnológicas, y de otros servicios esenciales de la Planta.

En la norma IEEE Std 308, al respecto del diseño de este sistema, se expone que, dadas las diversas configuraciones, especiales requerimientos y complejidad de los sistemas a alimentar por el mismo, resulta muy difícil alcanzar una detallada definición de los requisitos de suministro eléctrico a cubrir. Las configuraciones posibles para este subsistema Clase 1E son muy diversas, respondiendo al diseño específico aplicado en cada planta. En cualquier caso, el suministro de potencia deberá ser tal que se preserve la fiabilidad, independencia y redundancia de estos sistemas.

5. SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA

El subsistema de corriente continua (c.c.) se diseña para proporcionar el suministro de energía eléctrica de c.c. a cargas de la central tales como válvulas, bombas, interruptores, circuitos de control, protecciones, alumbrado, instrumentación nuclear y otros, cuyo funcionamiento se precisa con independencia de que se disponga o no de potencia en c.a.

El subsistema de c.c. Clase 1E en cada división comprende uno o varios centros de distribución a 125 V, alimentados por una batería y uno o más cargadores, y los elementos de las conexiones hacia las cargas de c.c. a ser alimentadas. El cargador se alimenta a su vez de un centro de distribución de 400 V de la misma división, y proporciona la alimentación de c.c. requerida para la alimentación de las cargas en servicio y para el mantenimiento de la batería en flotación. El diseño del cargador requiere que su capacidad sea tal que cubra la mayor demanda combinada de las cargas asociadas al mismo, en servicio en condiciones estables de la Planta, más la capacidad requerida para restablecer la batería desde el estado de mínima carga de diseño hasta carga completa dentro del tiempo establecido en las bases de diseño, independientemente del estado de la planta durante el cual la demanda ocurre. Los criterios de diseño para las baterías serán tratados posteriormente en el capítulo de fuentes de suministro de reserva. Las situaciones anormales del subsistema de c.c. son señalizadas en Sala de Control para permitir la toma de las acciones oportunas.

Dependiendo del diseño específico de la Planta pueden existir asimismo otros subsistemas de c.c. a otros niveles de tensión, tal y como el subsistema de 48/24 V en centrales BWR encargado de proporcionar el suministro eléctrico para la instrumentación nuclear. La configuración de este subsistema es similar a la del subsistema de 125 V.

6. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA EXTERIOR E INTERIOR Y SISTEMAS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO DE EMERGENCIA

El sistema de generación de energía eléctrica de la central nuclear no está relacionado con la seguridad, y por tanto no es Clase 1E, ni le son de aplicación los criterios de la normativa al respecto. No obstante, es importante que su diseño (como por ejemplo adecuado dimensionamiento) y su mantenimiento sea el adecuado para evitar, en la medida de lo posible, problemas en estos equipos que puedan conducir a transitorios de disparo de la Central, o degradación y envejecimiento prematuro de equipos.

Tal y como se ha reflejado en el apartado de Introducción, el sistema eléctrico exterior asociado a una central nuclear presenta una doble funcionalidad: (1) proporciona la conexión entre la central nuclear y el sistema eléctrico nacional para permitir la transmisión de la potencia generada por el turbogenerador de la planta a la red de transporte, y adecuar los parámetros de la energía eléctrica producida a los de la red de transporte, y (2) proporciona la conexión entre la red de transporte y el sistema eléctrico de distribución de la central nuclear para permitir la alimentación eléctrica de equipos y sistemas auxiliares de la central.

A los equipos y componentes que contribuyen a la primera de las funciones se le puede denominar “sistema de transmisión”, y no están sometidos a requisitos específicos relacionados con la seguridad. A los equipos y componentes que se encargan de proporcionar la segunda de las funciones se le denomina “sistema de suministro preferente” (SSP en adelante). Dependiendo del diseño específico de la Central estos sistemas, transmisión y de suministro preferente, pueden ser independientes o compartir elementos comunes que participan en ambas funciones.

6.1 Alimentación eléctrica exterior

De acuerdo con la norma IEEE Std 765, se define el SSP como “la alimentación de potencia eléctrica desde la red de transporte exterior al sistema de distribución Clase 1E de la central que es preferente para proporcionar potencia eléctrica bajo condiciones de accidente y post-accidente”. El mismo documento refleja que la función del SSP es “proporcionar potencia eléctrica, como sea requerida, para la parada segura de la planta y para la operación de los sistemas de seguridad. Los circuitos del SSP pueden ser usados durante todos los modos de operación para proporcionar potencia a los subsistemas Clase 1E y No Clase 1E de la planta”.

Si bien el diseño del sistema eléctrico exterior es característico de cada central nuclear, puesto que son diversas las posibilidades para proporcionar la funcionalidad requerida al mismo y, asimismo, está influenciado por la configuración de la red eléctrica nacional en la zona de ubicación de la planta, se podría representar un esquema típico simplificado como el contemplado en la Figura 1, en la cual se pueden identificar como componentes principales de un sistema eléctrico exterior los siguientes:

- **Subestaciones (o parques) eléctricas de alta tensión.** Generalmente la central se conecta con el sistema eléctrico nacional a través de dos (en algunos casos 3) subestaciones eléctricas, una de las cuales, generalmente correspondiente a la red de 400 kV (red de 220 kV en alguna central) tiene como misión principal proporcionar el camino para la evacuación de la energía generada por la unidad, y la otra, perteneciente a la red de 132 kV (110 kV en algunas zonas) o de 220 kV en algunas centrales, proporcionan la conexión para el suministro de energía eléctrica exterior a la central, esto es, el Sistema de Suministro Preferente.
- **Interruptores de conexión de la unidad a los parques.** Permiten las maniobras de conexión/desconexión a las barras del parque y asimismo, mediante su apertura, permiten la separación de la unidad de la red de transporte.
- **Transformador principal (TP);** constituido por tres transformadores monofásicos, es el encargado de elevar la tensión de generación (cuyo valor típico en la mayoría de los casos es en torno a 20 kV) a la tensión de la red de transporte.
- **Transformador auxiliar de grupo o de unidad (TAG);** se encarga de acomodar la tensión de generación a la tensión nominal de las barras de servicios auxiliares de la central, en su posibilidad de alimentación desde generación o desde el parque de 400 kV.
- **Transformadores auxiliares de arranque o reserva (TAA);** se encargan de acomodar la tensión del parque de SSP (138 kV) a la tensión nominal de las barras de servicios auxiliares de la central.
- **Interruptor de generación (IG);** disponible en algunas centrales, permite la apertura de la salida del generador y, por lo tanto, en condiciones de disparo del reactor se pueden alimentar los sistemas auxiliares desde la subestación de 400 kV, permitiendo que el sistema de 400 kV pueda ser tratado como parte del SSP.

El sistema eléctrico exterior no es considerado de Clase 1E, y por lo tanto no le son de aplicación los criterios normativos para sistemas de seguridad. No obstante, y dada su relevancia en la función de suministro de potencia a los sistemas de la central, se especifican requisitos normativos para el SSP. Los principios básicos normativos aplicables al diseño de los sistemas eléctricos de una central nuclear son contemplados en los Criterios Generales de Diseño (GDC) 17 y 18 del Apéndice A del 10CFR50. En lo que se afecta al SSP, el GDC 17 refleja:

“Un sistema de potencia eléctrica interior y un sistema de potencia eléctrica exterior deberán ser proporcionados para permitir el funcionamiento de estructuras, sistemas, y componentes importantes para la seguridad. La función de seguridad deberá ser proporcionar la suficiente capacidad para asegurar que (1) los límites aceptables especificados para el diseño del combustible y las condiciones de diseño de la barrera de presión del refrigerante del reactor no son excedidas como consecuencia de transitorios operacionales anticipados, y (2) el núcleo es refrigerado y la integridad de la contención y otras funciones vitales son mantenidas en el caso de accidentes postulados”.

“La potencia eléctrica desde la red de transmisión hasta el sistema de distribución eléctrico interior deberá ser suministrada por dos circuitos físicamente independientes (aunque no necesariamente con caminos de paso separados) diseñados y localizados de manera que se minimice, en la medida de lo posible desde un punto de vista práctico, la posibilidad de fallo

simultaneo de ambos circuitos en operación y accidentes y bajo las condiciones ambientales postuladas. Un parque común a ambos circuitos es aceptable”.

“Cada uno de estos circuitos deberá ser diseñado para estar disponible en el tiempo suficiente siguiente a una pérdida de todas las fuentes interiores de suministro de potencia eléctrica de corriente alterna y del otro circuito de potencia eléctrica exterior, para asegurar que los límites especificados de diseño del combustible y las condiciones de diseño de la barrera de presión del refrigerante del reactor no son excedidos”.

“Uno de estos circuitos deberá estar diseñado para estar disponible dentro de un plazo de pocos segundos siguiendo un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) para asegurar que la refrigeración del núcleo, la integridad de la contención, y otras funciones de seguridad vitales son mantenidas”.

Deberán incluirse provisiones para minimizar la probabilidad de la pérdida de potencia eléctrica desde cualquiera de las fuentes restantes como resultado de, o en coincidencia con, la pérdida de la potencia generada por la unidad de potencia nuclear, la pérdida de potencia desde la red de transmisión, o la pérdida de potencia desde las fuentes de suministro eléctrico interiores”.

En su interpretación de este último criterio, la United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) especifica que el licenciatario deberá realizar los análisis oportunos de cara a verificar que la red de transporte permanece estable ante las pérdidas de: la unidad nuclear, la máxima unidad generadora de la red, o la línea de transmisión más crítica.

En el licenciamiento de las centrales nucleares españolas se contemplaban análisis de estabilidad para dar respuesta al requisito anterior. Teniendo en cuenta, por un lado, la simplicidad de estos estudios iniciales y la notable evolución de la red desde la fecha de realización de los mismos y, por otra parte, que la interacción central nuclear – red de transporte es un aspecto de vital importancia en cuanto a que las centrales nucleares, formando parte de la misma como importantes fuentes de generación, han de contribuir a mejorar la estabilidad de la red nacional, y a su vez esta estabilidad contribuye a mejorar la fiabilidad del suministro eléctrico exterior a las propias centrales; se desarrolló entre 1992 y 1996 un proyecto de investigación (Proyecto ESCENRED) en el cual participaron el CSN, Red Eléctrica de España (propietaria de la red de transporte nacional), y todas las centrales nucleares, que permitió actualizar y ampliar notablemente los estudios originales de comportamiento dinámico central nuclear – red de transporte, permitiendo asimismo la identificación de aspectos, tanto de la red como de las centrales, cuya modificación ha contribuido a la mejora de la estabilidad del sistema eléctrico nacional. Estos estudios han sido objeto de actualizaciones en los años posteriores.

6.2 Alimentación eléctrica interior y sistemas de suministro eléctrico de emergencia

Los servicios auxiliares de una central nuclear incluyen estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad que precisan alimentación eléctrica para llevar a cabo su función de seguridad incluso cuando se pierde la posibilidad de alimentación desde la red exterior o desde el propio generador nuclear. Cuando esto

ocurre, el sistema de suministro de energía eléctrica de emergencia interno de la central ha de ser capaz de garantizar la alimentación de aquellas cargas necesarias para la actuación de las salvaguardias tecnológicas y para llevar al reactor a una parada segura. Este suministro de emergencia consta tanto del suministro en corriente alterna, proporcionado por unidades generadoras diésel de emergencia (GDE), como del suministro en corriente continua, proporcionado por baterías de emergencia, instaladas en la Central.

La aplicación del GDC 17 a este suministro de emergencia interno, supone que ha de ser diseñado con la suficiente independencia, capacidad (cualitativa y cuantitativa), redundancia y capacidad de ser probado, para asegurar su función. A su vez, el GDC 18 requiere que ha de estar diseñado para permitir la adecuada inspección y prueba periódica para asegurar la continuidad del sistema y la condición de sus componentes.

6.2.1 Generadores Diesel de Emergencia

Una unidad generadora diesel consiste de un motor, o motores, de combustión interna con combustible diesel directamente acoplado a un generador eléctrico, los sistemas auxiliares eléctricos y mecánicos asociados, y los sistemas de monitorización, control y protección de la unidad.

La aplicación al sistema eléctrico interior de los criterios de capacidad, independencia y redundancia establecidos en la IEEE Std 308 supone que para cada una de las divisiones redundantes se incorpore el suministro eléctrico de emergencia, con la capacidad suficiente para alimentar los servicios de emergencia de esa división (por ejemplo, en el caso tratado de dos divisiones del 100% cada división dispondrá de un GDE y de baterías de emergencia dimensionados con capacidad del 100%).

Cada GDE está asignado a la barra de emergencia de MT de su división, de manera que cuando se pierde el suministro de alimentación desde el exterior a la misma se produce el acoplamiento del GDE a la barra y éste se encarga de la alimentación de las cargas de la división.

El criterio de diseño en cuanto a la capacidad de los GDE establece que deberá tener capacidad para: (1) arrancar y acelerar el número requerido de grandes motores en rápida sucesión manteniendo la tensión y frecuencia dentro de los límites aceptables, (2) proporcionar potencia de manera rápida a los sistemas de salvaguardias tecnológicas si una pérdida de potencia exterior y un accidente tienen lugar al mismo tiempo, y (3) proporcionar potencia de manera continuada al equipo necesario para mantener la planta en una condición segura si ocurre una pérdida de potencia exterior. De cara a cumplir tales requisitos, los GDE presentan las siguientes características de diseño:

Los GDE son trifásicos y síncronos. La potencia nominal de un GDE en servicio continuo es superior a la demanda de carga máxima que puede energizarse en condiciones de accidente coincidente con pérdida de suministro exterior, más un porcentaje de reserva. Los GDE están diseñados para dar un valor de sobrepotencia del 10% sobre su potencia nominal durante dos horas de cada 24 horas de

funcionamiento. El GDE está diseñado para arrancar, acelerar, y mantener en servicio las cargas conectadas a su barra de salvaguardias en los diversos modos operativos.

Cada GDE debe ser capaz de arrancar y acelerar a su velocidad nominal, en la secuencia establecida, todas las cargas requeridas de salvaguardias tecnológicas y parada de emergencia. Cada GDE se arranca automáticamente al menos por: señal de falta de tensión en su barra de salvaguardia, o por señal de iniciación de las salvaguardias o señal de accidente (Inyección de Seguridad (IS), señal de LOCA). Asimismo, se ha previsto el arranque y parada manual desde la Sala de Control, así como desde el panel de control local.

El GDE se diseña para que una vez recibida una señal de arranque alcance la velocidad síncrona, con los adecuados valores de tensión y frecuencia en sus bornes (presencia de señal "Ready to Load") en un tiempo especificado (entre 10 y 13 segundos). Asimismo, se establecen criterios de máximas caídas de tensión y frecuencia, así como de plazo para la recuperación de sus valores normales, dentro de cada etapa de la secuencia de toma de cargas.

El GDC debe recuperarse adecuadamente ante situaciones de pérdida de carga (durante la recuperación del transitorio provocado por la desconexión de la mayor carga simple la velocidad del GDE no deberá exceder el valor de la velocidad nominal más el 75% de la diferencia entre la velocidad nominal y el tarado del disparo de sobrevelocidad, o el 115% de la velocidad nominal, el más bajo de los dos; asimismo, el transitorio provocado por el rechazo total de la carga del generador no deberá provocar que se alcance el punto de disparo por sobrevelocidad).

Los sistemas asociados a cada GDE incluyen el sistema de arranque, el sistema de lubricación, el sistema de combustible, el sistema de refrigeración, el sistema de aire de combustión, el sistema de extracción de humos, el generador, el sistema de excitación y el sistema de regulación de tensión. Estos sistemas deben tener suficiente instrumentación para la vigilancia de las variables requeridas para la operación satisfactoria, y para generar las oportunas señales de situación anormal, predisparo o disparo requeridas.

El tanque principal de almacenamiento de combustible de los GDE tiene capacidad suficiente para el funcionamiento de los mismos durante 7 días, ante un suceso base de diseño con pérdida de energía exterior. Asimismo, cada motogenerador dispone de una bomba de transferencia de gasoil, alimentada de su misma división eléctrica, y sus propias tuberías y tanques de almacenamiento intermedio para suministro de combustible al motor (tanque día, tanque base de almacenamiento).

La energía auxiliar para control y para la excitación del arranque del GDE es de 125 Vc.c., procedente de las baterías Clase 1E de su misma división. Una vez arrancado el generador, la alimentación a la excitación se conmuta pasando a tomarse de la propia salida del generador.

En cuanto a dispositivos de protección, el GDE debe disparar automáticamente ante la actuación de la protección de sobrevelocidad o la protección diferencial del generador. Todos los demás disparos por actuación de las protecciones del generador diesel se anulan automáticamente en condiciones de emergencia, o estarán diseñados de manera que se evite que un fallo en las mismas pueda provocar el disparo del generador.

Cada uno de los GDE de divisiones redundantes debe estar situado en estructuras de seguridad separadas, y con aire de alimentación independiente. Los elementos auxiliares del generador estarán en la misma estructura de seguridad.

El sistema de suministro eléctrico exterior debe ser independiente de los GDE. La pérdida del generador principal no debe causar la pérdida de las fuentes de alimentación de emergencia.

El sistema de distribución se diseña para que la tensión en cada uno de los centros de distribución y para cada uno de los escalones de la secuencia, sea la adecuada para arrancar y acelerar las cargas correspondientes. Los cables de alimentación a las cargas se dimensionan de manera que supongan caídas de tensión aceptables.

Se han previsto indicaciones y alarmas para cada GDE en Sala de Control y en los paneles locales, que suelen incluir: Indicadores (amperímetro, voltímetro, vatímetro, factor de potencia, velocidad motor diesel, frecuencia de la tensión de salida, etc), Alarmas: fallo de arranque, alarma del interruptor de conexión, alarma general en panel local, sobrepotencia, disparo diferencial, interruptor de campo abierto, baja velocidad, baja presión aire de arranque, bajo nivel tanque gasoil, bajo nivel tanque día, bajo nivel tanque expansión refrigeración, selector de arranque no en AUTO, avería ventilador radiador, etc.

Los GDE son Clase 1E y categoría sísmica I. Asimismo, son Clase 1E aquellos sistemas auxiliares del generador diesel necesarios para el correcto funcionamiento del mismo y garantizar su función de seguridad.

Los GDE y todos sus componentes clase de seguridad han de estar sísmicamente cualificados de acuerdo al contenido de norma IEEE Std 344-1987. La documentación de la cualificación de los GDE debe ser acorde a lo establecido en la IEEE Std 323.

La guía reguladora RG 1.9, la cual endorasa la norma IEEE Std 387, proporciona una guía aceptable por la USNRC para la selección, diseño, cualificación y pruebas de generadores diesel usados como fuentes Clase 1E en centrales nucleares.

La cualificación de unidades generadoras de emergencia se lleva a cabo mediante pruebas tipo o análisis, o por una combinación de ambos, y por pruebas funcionales. Entre las pruebas de cualificación de los GDE se podrían destacar: pruebas de capacidad de carga, pruebas de arranque y toma de carga, pruebas de márgenes (para demostrar la capacidad del generador diesel para arrancar y tomar cargas que son superiores al mayor escalón de carga previsto en el perfil de cargas del diseño de la planta), y pruebas de envejecimiento.

Las pruebas en el emplazamiento de los GDE consisten en las pruebas de aceptación en el emplazamiento, pruebas preoperacionales, y pruebas periódicas. Las pruebas de aceptación en el emplazamiento contemplan: pruebas de arranque, pruebas de aceptación de carga, pruebas de carga nominal, pruebas de rechazo de carga, pruebas

eléctricas, y pruebas de los sistemas de control, protección y vigilancia. El programa de pruebas preoperacionales prácticamente se corresponde con el programa de pruebas periódicas, que se tratan a continuación.

Un programa de pruebas, inspección y mantenimiento preventivo debe ser establecido para la unidad diesel generadora y todos los sistemas soporte, basado en las recomendaciones del fabricante.

Una vez puesto en servicio, el GDE debe ser probado periódicamente para demostrar que mantiene la capacidad y disponibilidad para llevar a cabo la función prevista. El alcance de las pruebas periódicas, que constituyen requisitos de vigilancia de las ETFs para los GDEs, comprende lo siguiente:

- Pruebas de disponibilidad- cada mes se ha de realizar una prueba de arranque y toma de carga (con una carga del 90 al 100 % de su potencia nominal), y funcionamiento durante al menos 1 hora. Cada seis meses se ha de realizar esta prueba con arranque rápido (10 a 13 segundos).
- Pruebas de operación del sistema - a realizar con periodicidad cada recarga de combustible de la central:
 - Prueba funcional del GDE ante señal PSE (pérdida de suministro exterior).
 - Prueba funcional del GDE ante señal de IS.
 - Prueba funcional del GDE ante señal de PSE+IS; Prueba de rechazo de la mayor carga simple.
 - Prueba de rechazo total de carga.
 - Prueba de funcionamiento continuo durante 24 horas
 - Prueba de re arranque en caliente.
 - Prueba de sincronización a la red exterior.
 - Prueba de anulación del modo de prueba ante una señal de IS.
 - Comprobación de la anulación de los disparos por protección, excepto sobrevelocidad y protección diferencial.
- Prueba de independencia: cada 10 años, o tras una modificación que pudiese afectar la independencia, se deberá demostrar la independencia de los trenes de suministro eléctrico de emergencia arrancando simultáneamente los GDE redundantes, para permitir la identificación de un posible fallo en modo común que no pudiese ser detectado en las pruebas individuales de cada GDE.

Los GDEs están sometidos a un programa de verificación de la fiabilidad. La guía reguladora R.G. 1.155 establece los objetivos de fiabilidad mínimos para las fuentes de emergencia interiores de c.a. En esta guía se recomienda que la operación fiable de estas fuentes esté asegurada por un programa de fiabilidad diseñado para mantener y monitorizar el nivel de fiabilidad de cada fuente en el tiempo. Asimismo, en la R.G. 1.9 se establecen las directrices para el análisis y contabilización de arranques y fallos de los GDEs, de cara a su uso en la valoración de la fiabilidad.

6.2.2 Baterías

Las baterías Clase 1E de una central nuclear tienen un papel primordial como fuentes de alimentación de c.c. de la instrumentación y control requerida para la parada segura de la central, de equipos de tensión segura, para el arranque de GDEs, y por ser la única fuente de energía disponible en escenarios de Station Blackout. Según los estudios de APS, el fallo de estos equipos es uno de los que más influyen en el riesgo de las centrales nucleares.

Las baterías son elementos capaces de proporcionar energía eléctrica desde energía almacenada en forma de energía química. En función de los componentes encargados de llevar a cabo esa función se pueden distinguir baterías de Plomo-acido (Oxido de plomo en placas, H_2SO_4 como electrolito) o baterías Alcalinas (de KOH, Fe-Ni, o Ni-Cd). Asimismo, en función de su forma constructiva se pueden distinguir baterías herméticas (también denominadas estancas o cerradas) o abiertas.

Las baterías están constituidas por una agrupación de elementos denominados vasos o celdas. El conjunto conseguido al unir estos elementos, tanto en serie como en paralelo, permite obtener los valores deseados de tensión y capacidad. Los componentes principales de las celdas de las baterías son: las placas positivas y negativas (donde está la materia activa), los separadores (entre placas), el electrolito (que es el medio que baña a las placas y permite el movimiento de iones para la transformación de energía), los terminales de conexión (que recogen la electricidad generada sobre las placas y la conducen al exterior), y el recipiente (formado por la tapa y la cuba).

Para el dimensionamiento de las baterías hay que tener en cuenta los criterios de diseño generales del sistema de c.c. en el que se van a utilizar, que fundamentalmente pueden concretarse en los siguientes factores:

- Demanda de energía, en función del tiempo, a la que se va a ver sometida (que se suele representar en un diagrama llamado “ciclo de diseño”). Para determinar este ciclo se han de estudiar las demandas de c.c. en el más desfavorable de los posibles sucesos que considere la central. La duración del ciclo de diseño se determina en función de los criterios generales de diseño de la Central y de los específicos de los consumidores del sistema de c.c. (valores típicos son ciclos de diseño de 2 horas o de 4 horas).
- La tensión nominal del sistema en el que se va a utilizar la batería (las baterías Clase 1E en centrales suelen ser de 125 Vc.c.).
- La tensión de flotación prevista (este parámetro puede establecer el número de elementos de una batería, un valor usual es de 2,23 V por elemento).
- Requisitos a cumplir impuestos por los consumidores (estos son los valores de tensión máxima y mínima que, junto con las caídas de tensión prefijadas en el sistema de distribución, han de determinar la tensión límite de uso permitida en bornes de la batería).
- Condiciones ambientales a las que va a estar sometida la batería.

- Reserva de capacidad para posteriores incrementos de cargas (margen de diseño, que suele estar en un 10 a 15%).
- Límite de degradación de la batería por envejecimiento (se ha de prever un incremento de capacidad para garantizar que la batería, que va perdiendo capacidad por envejecimiento, en el límite de envejecimiento previsto pueda atender las demandas establecidas).

Las principales características nominales de las baterías comprenden: tensión nominal en bornes a circuito abierto, capacidad nominal, densidad nominal del electrolito, tensión de flotación, y tensión final de descarga.

El funcionamiento normal de una batería es acoplada a su correspondiente barra de emergencia del sistema de distribución de c.c. La batería se encuentra en flotación, y en paralelo con el cargador, el cual se encarga de la alimentación de las cargas normales de la barra y de recargar la batería cuando sea necesario. Ante una pérdida del suministro eléctrico de c.a. el cargador ya no podrá realizar la alimentación de las cargas y será la batería la que proporcione la energía necesaria, durante el tiempo establecido, para alimentar las cargas de c.c. previstas para la misma. Asimismo, la batería es la que hace frente a aquellas demandas rápidas de c.c. que no pueden ser seguidas por el cargador.

Las baterías se ubican en salas específicas adecuadamente ventiladas para el mantenimiento de las adecuadas condiciones ambientales para su funcionamiento y para evitar la disminución de la vida de la misma.

La norma IEEE Std 450 define los criterios para el mantenimiento, pruebas y sustitución de baterías de Acido-Plomo. Asimismo, en la norma IEEE Std 1106 se establecen los criterios para la instalación, mantenimiento y sustitución de baterías Niquel-Cadmio. El mantenimiento y pruebas periódicas a realizar son recogidos como requisitos de vigilancia de las ETFs de cada central para las Baterías Clase 1E, y en líneas generales contemplan lo siguiente:

- Inspección periódica de la batería, al menos 1 vez al mes, consistente en un chequeo de diversos parámetros, tales como: tensión de flotación en bornes de la batería; apariencia general y limpieza de la batería, su rack y la sala de la batería; la tensión e intensidad de salida del cargador; niveles de electrolito; presencia de roturas o pérdidas de electrolito; evidencias de corrosión en terminales, conectores, racks o cabinas; temperatura ambiente y ventilación; tensión, densidad, y temperatura del electrolito en celdas piloto.
- Al menos una vez cada 3 meses la inspección anterior deberá ser ampliada con los siguientes chequeos: densidad en el 10% de las celdas; tensión en cada celda y en terminales de la batería; temperatura del electrolito en el 10% de las celdas.
- Al menos una vez al año la inspección anterior deberá ser aumentada con los siguientes chequeos: densidad de cada celda; condición de cada celda; medida de la resistencia celda a celda y en terminales; integridad estructural del rack de la batería y de la cabina.

- **Prueba de Servicio;** donde se comprueba que la batería, desde su condición “tal y como se encuentra”, es capaz de hacer frente a su ciclo de diseño; esta prueba se realiza en cada recarga.
- **Prueba de Capacidad;** en la cual se calcula la capacidad de la batería cuando ésta se somete a una descarga controlada a intensidad constante y tiempo de duración de la descarga dependiente de un valor definido de tensión (tensión final de la descarga). La frecuencia de la prueba será como mínimo una vez cada 60 meses. Se aumentará la frecuencia de la prueba a una vez al año en el caso de que la capacidad obtenida sea menor del 90%, el descenso de la capacidad con respecto a la de la prueba de capacidad anterior es 10% o mayor, o si el tiempo de utilización de la batería ha superado el 85% de su vida estimada.
- **Prueba modificada de capacidad;** cuyo objeto es conocer la capacidad remanente de la batería y comprobar la disposición de esta para conseguir dar la intensidad máxima del ciclo de diseño durante el tiempo en que es demandada. Esta es una prueba optativa, que puede sustituir a las de Capacidad y de Servicio, cuando estas coinciden y siempre y cuando la descarga en el primer minuto no represente un valor apreciable en el total de la capacidad de la batería.

7. OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La evolución del comportamiento del sistema eléctrico de una central nuclear ante transitorios operacionales diversos dependerá del diseño del mismo específico para cada central. Para la presente descripción vamos a considerar como ejemplo la configuración de la Figura 1, y suponiendo que, inicialmente, en operación normal, ambas barras normales de MT se encuentran alimentadas desde el turbogruppo a través del TAG, y que éstas a su vez alimentan cada una de ellas a la barra de salvaguardia correspondiente. Durante el arranque y parada de la Central, en la cual no se dispone del turbogruppo, las barras normales estarán alimentadas desde el parque de arranque (o de reserva), o bien desde el parque de 400 kV, en el caso de que se disponga de interruptor de generación.

Estando en operación normal, cuando se produce la pérdida del suministro de alimentación normal a alguna de las barras normales de MT se realizará una transferencia automática rápida, mediante el disparo del interruptor que alimentaba a la barra y el cierre del interruptor de la alimentación desde el sistema de 138 kV. Esta transferencia se realiza con interrupción momentánea de la alimentación a las barras, pero sin interrupción de servicio.

Ante situaciones en las que el sistema de vigilancia de mínima tensión en las barras normales detecta una mínima tensión, bien por el fallo de la tensión de suministro o bien por fallo en la transferencia rápida, la actuación de los sensores de baja tensión en la barra da orden de disparo a la alimentación existente a esa barra y a los interruptores de alimentación a bombas de MT de esa barra. Cuando han abierto estos interruptores se da una segunda orden de cierre del interruptor de alimentación desde el sistema de 138 kV (transferencia lenta). Como alternativa a las transferencias automáticas anteriores los interruptores de alimentación desde las líneas exteriores

pueden ser actuados manualmente desde Sala de Control. La operabilidad de cada uno de los circuitos independientes entre la red exterior y el sistema interior y de las transferencias es probada periódicamente de acuerdo al contenido de las ETFs.

Ante una situación de pérdida de energía exterior (PPE o PSE) detectada por la actuación de los relés sensores de baja tensión de barras de salvaguardia, se produce el disparo de los interruptores de enlace con la barra normal, el disparo de las cargas conectadas a la barra de salvaguardia y se genera una orden de arranque automático al GDE asociado. Cuando la tensión en bornes del GDE y su velocidad alcanzan valores próximos a su valor nominal se produce el acoplamiento automático del mismo a la barra de salvaguardia, y se inicia la secuencia de toma de cargas. La secuencia de cargas será la secuencia de pérdida de suministro exterior en el caso de que no esté presente una señal de IS. En el caso de que la conexión del GDE coincida con una situación de IS la secuencia de cargas será la de IS.

La aparición de una señal de IS en la Central sin PSE provoca el arranque automático de los GDEs, si bien estos permanecen en operación en estado de espera, de manera que ante una posible situación de PSE el acoplamiento de los mismos sea inmediato.

Una degradación de tensión en la red durante un tiempo prolongado puede ocasionar daños en los motores importantes para la seguridad, si están en servicio. El diseño de las barras de emergencia incluye, además de protecciones que detectan la pérdida de tensión, sensores que vigilan situaciones de tensión degradada. La actuación de la vigilancia de tensión degradada durante un tiempo prefijado, da lugar al aislamiento de la barra de salvaguardia correspondiente, mediante la apertura del interruptor de alimentación a la misma, provocando con ello la mínima tensión en la barra y las actuaciones posteriores a la misma, previamente comentadas.

Si ante una pérdida total del suministro exterior se produjese asimismo la pérdida del suministro de emergencia interno de c.a. se alcanzaría una situación conocida como "Station Blackout" (SBO), la cual se define como: "pérdida total de potencia eléctrica de c.a. hacia las barras esenciales y no esenciales de una central nuclear, y por lo tanto envuelve la pérdida de potencia exterior coincidente con el disparo de la turbina y el fallo del sistema interno de c.a. de emergencia". Los estudios de APS han puesto de manifiesto que el SBO podría ser un contribuidor significativo al riesgo para algunas plantas. El análisis de SBO envuelve la probabilidad de una pérdida de suministro exterior y su duración, la redundancia y fiabilidad de los sistemas de potencia de c.a. interiores de emergencia, y el potencial para secuencias de accidentes severos tras una pérdida total de c.a. De cara a reducir este riesgo y resolver las preocupaciones al respecto de los sucesos de SBO, la USNRC promulgó el 10CFR50.63 "Loss of Alternating Current Power", y emitió la guía soporte R.G. 1.155 "Station Blackout", la cual endorsa el NUMARC-8700 y describe un método aceptable para el cumplimiento de los requisitos del 10CFR50.63. Las centrales españolas han realizado el análisis del cumplimiento con la normativa de SBO, y con las directrices recogidas en el documento CSN 89-00, el cual se ha basado en demostrar mediante análisis la capacidad del diseño existente en la planta para hacer frente al suceso de SBO con la duración especificada, y en otros casos se ha procedido a incorporar una fuente alternativa de corriente alterna (AAC o Generador Diesel de SBO), tal y como se define en 10CFR50.2 y descrita en mayor detalle en 10CFR50.63.

8. NORMATIVA BÁSICA APLICABLE A LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La normativa aplicable a los sistemas eléctricos de una central nuclear es muy extensa, por lo cual procederemos a reseñar aquí solo algunas de las normas, guías reguladoras (R.G.) de la USNRC y documentos de la industria más importantes, centrándonos fundamentalmente en la normativa americana por ser la de más frecuente aplicación a las centrales nucleares españolas, en su mayoría de tecnología procedente de este país.

- GDC 17 del Apéndice A del 10CFR50 (Code of Federal Regulations, Parte 50, Título 10) – contempla las directrices generales para el diseño de los sistemas eléctricos.
- GDC 18 del Ap. A del 10CFR50 – contempla los requisitos de diseño para permitir la inspección y prueba de los sistemas eléctricos.
- Criterio III, “Control del Diseño” y Criterio XI “Control de Prueba”, del Apéndice B del 10CFR50 “Criterios de Garantía de Calidad para Centrales Nucleares y Plantas de Reprocesamiento de Combustible” - en los que se requieren adecuadas medidas de verificación y chequeo del diseño, y la elaboración de un adecuado programa de pruebas.
- Sección 50.63 “Pérdida Total de Potencia de Corriente Alterna” del 10CFR50 - en la que se requiere que cada central nuclear de agua ligera sea capaz de soportar y recuperarse de una situación de Station Blackout.
- IEEE Std 308 - es la norma básica en la que se establecen los criterios de diseño, condiciones de operación y requisitos de vigilancia aplicables a los sistemas eléctricos Clase 1E en centrales nucleares. Los criterios principales tratados contemplan: capacidad de respuesta ante sucesos básicos de diseño, relación entre los Sistemas de Seguridad y los Sistemas Eléctricos Clase 1E, efectos de Sucesos Base de Diseño, calidad de la alimentación eléctrica, Bases de Diseño del sistema eléctrico Clase 1E, localización de indicación y control, identificación, independencia, y cualificación del equipo, criterio de Fallo Simple, conexión de circuitos No Clase 1E, etc.
- R.G. 1.6 - trata la independencia entre las fuentes redundantes de suministro de reserva internas y sus sistemas de distribución.
- R.G. 1.9 - trata la selección, diseño, cualificación y prueba de los GDE Clase 1E para su uso en centrales nucleares. Endorsa la IEEE Std 387.
- R.G. 1.32 - trata los criterios básicos para los sistemas eléctricos relacionados con la seguridad en centrales nucleares. Endorsa la IEEE Std 308.
- R.G. 1.53 - trata la aplicación del Criterio de Fallo Simple a los sistemas de protección de centrales nucleares. Endorsa la IEEE Std 379.
- R.G. 1.63 - trata las penetraciones eléctricas, hace referencia a la IEEE Std 242, en la que se trata la protección y coordinación en sistemas de potencia, a la IEEE Std 317, relativa a las penetraciones eléctricas en centrales nucleares, y la IEEE Std 741, en la que se exponen criterios de protección de equipos Clase 1E.

- **R.G. 1.75 - trata la independencia física de sistemas eléctricos. Endorsa la IEEE Std 384, de criterios para la separación de equipos y circuitos Clase 1E.**
- **R.G. 1.118 - trata las pruebas periódicas de sistemas eléctricos y de protección. Endorsa la IEEE Std 338.**
- **R.G. 1.128 - trata el diseño e instalación de Baterías de plomo para su uso en centrales nucleares. Endorsa la IEEE Std 484.**
- **R.G. 1.129 - trata el mantenimiento, prueba y sustitución de baterías de plomo utilizadas en centrales nucleares. Endorsa la IEEE Std 450.**
- **R.G. 1.153 - trata los criterios básicos de suministro eléctrico, instrumentación y control de sistemas de seguridad. Endorsa la IEEE Std 603, relativa a los criterios de sistemas de seguridad de centrales nucleares.**
- **R.G. 1.155 - trata el tema de Station Blackout. Hace referencia al NUMARC-8700.**
- **IEEE Std 323 - trata la cualificación de equipos Clase 1E.**
- **IEEE Std 344 - trata la cualificación sísmica de equipos Clase 1E.**
- **R.G. 1.160 – trata la monitorización de la efectividad del mantenimiento en centrales nucleares. Hace referencia al NUMARC 93-01.**

BIBLIOGRAFÍA

- Estudio Final de Seguridad de C.N. Almaraz; Capítulo 8 “Sistemas Eléctricos”.
- Estudio Final de Seguridad de C.N. Ascó II; Capítulo 8 “Sistema Eléctrico”.
- Estudio de Seguridad de C.N. Santa María de Garona; Capítulo 8 “Sistemas Eléctricos”.
- Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de varias centrales.
- CSN 89-00 “The Station Blackout Rule”. 1989. Consejo de Seguridad Nuclear.
- Documentación del Proyecto Escenred “Análisis dinámico centrales nucleares – Red de Transporte”. CSN-REE-Empresas Eléctricas.
- “Baterías de Plomo-Acido Estacionarias – Guía de Recomendaciones y Buenas Prácticas”. Rev. 0 2000. UNESA.
- NUREG 0800 “Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants”; Capítulo 8 “Electric Power”. United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC).
- Título 10 de la Parte 50 del Code of Federal Regulations; Apéndice A “General Design Criteria for Nuclear Power Plants”, Apéndice B “Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants”, Sección 50.63 “Pérdida Total de Potencia de Corriente Alterna”. USA National Archives and Records Administration.
- R.G. 1.6 “Independence Between Redundant Standby (Onsite) Power Sources and Between Their Distribution Systems”. USNRC.
- R.G. 1.9 “Selection, Design, Qualification and Testing of Emergency Diesel Generator Units Used as Class 1E Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants”. USNRC.
- R.G. 1.32 “Criteria for Safety-Related Electric Power Systems for Nuclear Power Plant Safety Systems”. USNRC.
- R.G. 1.53 “Application of the Single-Failure Criterion to Nuclear Power Plant Protection Systems”. USNRC.
- R.G. 1.63 “Electric Penetration Assemblies in Containment Structures for Nuclear Power Plants”. USNRC.
- R.G. 1.75 “Physical Independence of Electric Systems”. USNRC.
- R.G. 1.118 “Periodic Testing of Electric Power and Protection Systems”. USNRC.
- R.G. 1.128 “Installation Design and Installation of Large Lead Storage Batteries for Nuclear Power Plants”. USNRC.
- R.G. 1.129 “Maintenance, Testing, and Replacement of Large Lead Storage Batteries for Nuclear Power Plants”. USNRC.
- R.G. 1.153 “Criteria for Power, Instrumentation, and Control Portions of Safety Systems”. USNRC.
- R.G. 1.155 “Station Blackout”. USNRC.
- R.G. 1.160 “Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants”. USNRC.

- **IEEE Std 308 “IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations”.**
- **IEEE Std 603 “Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations”.**
- **IEEE Std 387 “IEEE Standard Criteria for Diesel- Generator Units Applied as Standby Power Supplies for Nuclear Power Generating Stations”.**
- **IEEE Std 379 “IEEE Trial-Use Guide for the Application of the Single-Failure Criterion to Nuclear Power Generating Station Protection Systems”.**
- **IEEE Std 242 “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination in Industrial and Commercial Power Systems”.**
- **IEEE Std 741, Section 5.4, “Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations”.**
- **IEEE Std 384 “IEEE Trial-Use Standard Criteria for Separation of Class 1E Equipment and Circuits”.**
- **IEEE Std 338 “Criteria for the Periodic Surveillance Testing of Nuclear Power Generating Station Safety Systems”.**
- **IEEE Std 484 “IEEE Recommended Practice for Installation Design and Installation of Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations”.**
- **IEEE Std 450 “IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations”.**
- **NUMARC-8700 “Guidelines and Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactors”.**
- **IEEE Std 765 “IEEE Standard for Preferred Power Supply (PPS) for Nuclear Power Generating Stations”.**
- **IEEE Std 1106 “IEEE Recommended Practice for Installation, Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications”.**