PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA ADAPTACIÓN DEL PROGRAMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN UNA CENTRAL NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN DE 1000 MWe SEGÚN LA NORMATIVA VIGENTE.

VOLUMEN 1

Director del PFC: Carlos Tapia Fernández

Autor del PFC: Antonio Gómez Lobo

Titulación: Ingeniería en Organización Industrial

Documento: Memoria

NOVEMBER 12, 2015

NERG-UPC

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un estudio de la adaptación a la normativa vigente de protección contra incendios en centrales nucleares españolas de aproximadamente 1000 MWe de capacidad.

El alcance del proyecto abarca, en primer lugar, el estudio de la normativa vigente, mediante un análisis de la evolución histórica de la misma. En segundo lugar se realiza un análisis de riesgo de incendios, de un hipotético recinto conflictivo, mediante simulación computacional de incendios en el marco de la última normativa aplicable en el ámbito de protección contra incendios, siendo ésta, la NFPA-805 (National Fire Protection Association). Finalmente, se realiza una valoración cualitativa en la que se comparan los resultados del análisis de riesgo mediante simulación computacional con la metodología anterior basada en correlaciones expresadas en formulas simples.

El proyecto se desarrolla en el marco del convenio de colaboración existente entre el departamento NERG de la UPC y un Licenciatario de Centrales Nucleares Españolas. Debido al carácter confidencial del convenio de colaboración, no se hace mención a ningún elemento de una central nuclear existente. Por lo tanto, la nomenclatura de cualquier Estructura, Sistema o Componente (ESC) expresada en los documentos que componen el presente proyecto, así como los resultados y conclusiones, son ficticios y no son vinculantes a ninguna Central Nuclear existente. Se hace, por tanto, referencia a una central nuclear genérica mediante los términos Central o Central Nuclear.

NOTA SOBRE LA HOJA DE REGISTRO

Aunque en la hoja de registro consta como parte del contenido del proyecto el apartado: "*propuesta de diseño del programa de protección contra incendios*", cabe remarcar que, después de realizar el análisis de la situación actual, se ha cambiado dicho apartado por el que sigue: "*propuesta de modificación del programa de protección contra incendios*". Esto es debido a que, como se comprobara más adelante, antes de aplicar modificaciones en los sistemas de protección contra incendios (PCI), es necesario redefinir y actualizar los análisis de riesgo. Una vez redefinido el riesgo mediante métodos realistas, se decide si es necesario modificar los sistemas de PCI.

Así mismo, en el cabecero de los documentos constituyentes, se sintetiza el título del proyecto con la expresión: "*Análisis de riesgo de incendios mediante simulación computacional en una central nuclear de 1000 MWe*" por motivos de optimización del espacio de lectura.

ÍNDICE

Resumen 1
Nota sobre la hoja de registro 1
Índice 2
Lista de figuras 4
Glosario de índices y acrónimos 5
Prefacio 6
1. Introducción 7
2. Estudio de la normativa vigente. Análisis histórico de sus antecedentes y su evolución 8
2.1 Normativa vigente sobre PCI en Centrales Nucleares Españolas 8
2.2 Evolución histórica de la normativa de PCI en centrales nucleares 8
3. Requisitos y criterios establecidos para el programa de protección contra incendios en una central nuclear de agua a presión. 9
3.1 Análisis de riesgos de incendio 9
3.2 NFPA-805 10
3.2.1 Enfoque determinista 11
3.2.2 Enfoque basado en prestaciones 11
3.2.3 Modelización del incendio 11
3.2.4 Análisis de ingeniería 12
3.2.5 Criterio de selección de metodología 12
3.2.1 Tipos de escenarios a modelizar según la NFPA-805 15
4. Propuesta de modificación del programa de protección contra incendios en una central PWR de 1000 kWe. 16
4.1 Centrales nucleares objeto de estudio 16
4.2 Aplicación de la NFPA-805 en la central objeto de estudio 16
4.3 Selección del área de incendio a analizar 16
4.4 Zona de análisis A-01 17
4.4.1 ESCs importantes para la seguridad en la zona de análisis A-01 17
4.4.2 Características geométricas de la zona de análisis A-01 18
4.4.3 Orígenes de incendio en la zona A-01 19
4.4.4 Sistemas de PCI en la zona A-01 20
4.4.5 Umbrales de daño en las ESCs 20
4.4.6 Condiciones limitantes 20
4.5 Modelización de incendios en la zona A-01 20
4.5.1 FDS & SMV (Fire Dynamics Simulator & Smoke View) 20
4.5.2 FDS: Utilidades 21

4.5.3 FDS: Limitaciones de uso 21
4.5.4 Proceso de simulación computacional de incendios con FDS 22
4.5.5 Proceso V&V: Verificación y Validación del modelo 23
4.6 Escenarios de incendio en la zona A-01 24
4.6.1 Casos de incendio 25
4.1. Cálculo de propagación y daño a componentes 25
4.1.1. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 1 25
4.1.2. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 2 27
4.1.3. Frecuencia de escenario en el que se produce daño relevante en un incendio con origen en panel PE-01 28
4.1.4. Cálculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 3 28
4.1.5. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 4 29
4.1.6. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 5 31
4.1.7. Frecuencia de escenario en el que se produce daño relevante en un incendio con origen en combustible transitorio. 31
4.2. Incendio máximo esperado 31
4.2.1. Incendio máximo esperado caso 1 31
4.2.2. Incendio máximo esperado caso 3 con origen en actividades de corte y soldadura. 33
4.2.3. Incendio máximo esperado en el caso 4 con origen en combustible transitorio. . 34
4.2.4. Incendio máximo esperado en el caso de origen en actividades de corte y soldadura sobre combustible transitorio 34
4.3. Incendio limitante 35
4.3.1. Incendio limitante en el caso con origen eléctrico en el panel PE-01 35
4.3.2. Incendio limitante en el caso con origen en actividades de corte y soldadura sobre cableado. 36
4.3.3. Incendio limitante en el caso con origen en combustible transitorio 36
4.3.4. Incendio limitante con origen en combustible transitorio por corte y soldadura. 36
4.3.5. Frecuencia anual de incendio limitante en la zona A-01 y margen de seguridad . 37
5. Comparativa entre “FDS” y el metódo previo “FIVE” 37
6. Conclusiones 39
6.1 Sugerencias en la interpretación del analisis de riesgo 39
6.2 Margen de mejora en una futura aplicación de simulacion computacinal para realizar el Analisis de riesgo de incendios 40
7. Bibliografía 41
8. Referencias 41

LISTA DE FIGURAS

F I.Figura 3.1. Diagrama de metodología de aplicación de la normativa NFPA-805. Fuente NFPA-805, ref. [3] 10
F II Figura 3.2 diagrama de selección de metodología de análisis en la aplicación de la NFPA-805. Fuente: NFPA, ref. [5.] 14
F III Figura 4.1. Características geométricas, ESCs y orígenes de incendio de la zona A-01 19
F IV Figura 4.2. Diagrama de la metodología para realizar la simulación computacional con FDS. Fuente: realización propia. 22
F V Figura 4.2. Mallado del escenario del caso 1 y bandejas cercanas al incendio. 26
F VI Figura 4.3. Localización de canalizaciones expuestas al incendio en el caso 1. Fuente: Imagen generada con SmokeView. 27
F VII Figura 4.4. Flujo de calor en el inicio del incendio en el caso 4. La marca negra corresponde al valor de 20 kW/m² 28
F VIII Figura 4.5. Evolución del incendio en el caso 4. Origen combustible transitorio P98. Fuente: anexo C 30
F IX Figura 4.3. Temperatura y evolución del fuego en instantes previos a la activación de los rociadores. La escala de temperaturas tiene valor máximo T = 115 °C. 32
F X Figura 4.4. Temperatura y efecto del agua de extinción instantes después de la activación de los rociadores. La escala de temperaturas es la misma que en la figura anterior 4.3. 32
F XI Figura 4.5. Evolución del incendio máximo esperado en el caso 1. 33
F XII Figura 4.6. Evolución del incendio máximo esperado en el caso 3. 33
F XIII Figura 4.7. Evolución de la tasa de liberación de calor y temperaturas en bandejas horizontales expuestas en el incendio máximo esperado del caso 4 con origen en combustible transitorio. 34

GLOSARIO DE ÍNDICES Y ACRÓNIMOS

- **AEC** Atomic Energy Commission
- **APS** Análisis probabilístico de seguridad
- **BTP** Branch Technical Position
- **CDF** Core damage frequency
- **CFD** Computational Fluid Dynamics
- **CFR** Code of Federal Regulations
- **CMEB** Chemical Engineering Branch
- **CSN** Consejo de Seguridad Nuclear en España
- **EGM** Enforcement Guidance Memorandum
- **EPRI** Electric Power Research Institute
- **ESCs** Estructuras, Componentes y Sistemas. Es el término general que abarca todos los elementos de una instalación.
- **FDN** Frecuencia de daño al núcleo
- **FDS** Fire dynamics simulator
- **GDC** General Design Criteria
- **GL** Generic letter
- **HRR** Heat Release Rate (ratio de liberación de calor)
- **LES** Large eddy simulation
- **LOCA** Loss of Coolant Accident. (Accidente por pérdida del refrigerante)
- **NASA** National Aeronautics and Space Administration
- **NEI** Nuclear Energy Institute
- **NFPA** National Fire Protection Association
- **NII** Nuclear Installations Inspectorate
- **NIST** National Institute of Standarts and Technology
- **NRC** Nuclear Regulatory Comission
- **NUREG** Nuclear Regulatory
- **NUSS** Nuclear Safety Standards
- **PCI** Protección Contra Incendios
- **PRA** Probabilistic Risk Assessment
- **SBO** Station black out
- **SEP** Systematic Evaluation Program
- **SISC** Sistema Integral de Supervisión de Centrales
- **SRP** Standard Review Plan
- **UKAEA** United Kingdom Atomic Energy Authority
- **UNACEC** United Nations Atomic Energy Commission
- **VTT** Technical Research Centre of Finland

PREFACIO

El contenido del proyecto se distribuye en los siguientes documentos:

- Memoria
- Anexos
- Impacto ambiental
- Presupuesto
- Figuras

Las partes del contenido del proyecto se dividen principalmente en un análisis de la evolución histórica de la normativa de PCI (Protección Contra Incendios), y en un análisis de riesgo de incendios mediante simulación computacional. Debido a la extensión y complejidad de las partes constituyentes, el completo desarrollo de las mismas se documenta en los anexos.

El encuadernado se distribuye en los siguientes volúmenes:

- Volumen 1 - Memoria
- Volumen 2 - Anexos A-D
- Volumen 3 - Anexos E-F, Impacto ambiental, Presupuesto y Figuras

Los anexos A-D contienen el desarrollo de los cálculos realizados para obtener los resultados del análisis de riesgo. Éstos suponen un soporte imprescindible para el seguimiento de la metodología expuesta en la memoria.

En el anexos E se expone la definición de conceptos, cuya utilidad es la familiarización con la tecnología de la energía nuclear, sus riesgos inherentes y los asociados a un posible incendio.

En el anexo F se desarrolla el análisis de la evolución histórica de la normativa de PCI en centrales nucleares. Debido a su extensión, se documenta a parte de la memoria, y supone un soporte fundamental en la toma de decisiones de la metodología a aplicar.

Los documentos Impacto ambiental, Presupuesto y Figuras se han encuadernado junto con Anexos E-F y separados de los Anexos A-D, por cuestiones de facilitación del seguimiento.

1. INTRODUCCIÓN

La actividad desarrollada en una central nuclear consta de riesgos inherentes que la diferencian de otras actividades industriales, como se detalla en el Anexo D, ref. [1]. Debido a la necesidad de mantener la refrigeración del reactor ante cualquier situación transitoria derivada de un accidente o cambio de modo de operación, los sucesos que afecten a las ESCs (Estructuras, Sistemas y Componentes) relacionadas con la seguridad del reactor, deben ser analizados en profundidad para garantizar los requisitos de seguridad.

El análisis de riesgo de incendios estudia el comportamiento de las ESCs importantes para la seguridad del reactor en caso de verse sometidas a un incendio, y en qué medida los sistemas de protección contra incendios garantizan el cumplimiento de los requisitos de seguridad.

En la actualidad, la protección contra incendios en las centrales nucleares se encuentra en una situación de cambio en cuanto a los métodos de análisis de riesgo. Esto es debido a que las normativas han pasado a permitir el uso de métodos computacionales de simulación para cuantificar dicho riesgo de incendios. Como consecuencia, ciertas centrales de segunda generación tienen a la alcance una solución alternativa a las exigencias de los cuerpos reguladores.

Con el presente trabajo se pretende abordar la adaptación a la normativa actual mediante el desarrollo de un caso de estudio práctico, que servirá para ejemplificar tanto el proceso de cuantificación de riesgo, como el proceso de implementación del análisis en el programa de protección contra incendios.

Así mismo la comparación con los métodos existentes servirá para evaluar la viabilidad de la aplicación de la metodología aplicada.

2. ESTUDIO DE LA NORMATIVA VIGENTE. ANÁLISIS HISTÓRICO DE SUS ANTECEDENTES Y SU EVOLUCIÓN.

Para poder evaluar la situación actual de la normativa de protección contra incendios es necesario realizar un análisis histórico, puesto que la evolución de los distintos programas de protección contra incendios se ha visto influida por la fecha de construcción de cada central, y por su configuración. De esta manera se facilita la valoración de la mejor solución. Debido a la extensión del análisis histórico, éste se desarrolla por completo en el **Anexo F**, ref. [2].

2.1 NORMATIVA VIGENTE SOBRE PCI EN CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS

Los titulares de las centrales nucleares en España con autorización de explotación deben contar con un programa de protección contra incendios que, además de la legislación general vigente, cumpla con los criterios definidos y requeridos por el Consejo de Seguridad Nuclear. Éstos se han definido mediante la elaboración de la **instrucción IS-30** por parte del CSN y aprobada por el mismo el 19 de enero del 2011, publicada en el (BOE nº 40 de 16 de febrero de 2011) y revisada el21 de febrero del 2013.

La base de la elaboración de esta instrucción son los requisitos de las centrales estadounidenses, dado que, por condiciones de licencia, se había estado adoptando la normativa reguladora del país de origen del suministrador principal. Sin embargo, el CSN también ha tenido en cuenta el trabajo realizado por la "Western European Nuclear Regulators Association" (WENRA), con el que se pretende armonizar las reglamentaciones de los diferentes países de la Comunidad Europea contemplados en la WENRA.

2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA NORMATIVA DE PCI EN CENTRALES NUCLEARES

Las centrales de primera y segunda generación, previas a la década de los 80, se diseñaron teniendo en cuenta el concepto de defensa en profundidad únicamente en los aspectos de operación, mientras que el análisis de riesgo de incendio no difería del realizado en una central térmica. El resultado es que el diseño de las ESCs no contemplaba los efectos que la propagación de un incendio tendría sobre la redundancia de los caminos que permiten la parada segura.

En 1975 tuvo lugar el incendio de **Browns Ferry,** Central Nuclear en Alabama, que se generó en el material aislante del cableado que accedía desde una zona de penetraciones al edificio del reactor, y que duró 7 horas. El incendio se extendió sobre gran parte de sistemas de seguridad impidiendo la parada segura del reactor.

Este suceso provocó un cambio de filosofía en el diseño de los programas de protección contra incendios por parte de los organismos reguladores. A partir de entonces se integrarían los análisis de riesgos de incendios en las evaluaciones de la defensa en profundidad exigidas en las bases de diseño. La metodología que se aplicaba en el análisis de riesgo era determinista, lo que significa que no se tenía en cuenta la actuación de los sistemas activos de PCI, y que presuponía el peor de los escenarios en caso de incendio.

Este cambio en la regulación tuvo consecuencias importantes, sobre todo para las centrales que se habían construido o habían obtenido la licencia antes de la modificación, que fue publicada

en 1979. Dado que el enfoque determinista obliga a establecer una separación mínima entre elementos redundantes de seguridad, las centrales diseñadas previamente a la modificación requerían modificaciones en algunos casos inviables.

La solución a este problema se ha venido pautando entre el organismo regulador y el licenciatario mediante exenciones y prorrogas en el cumplimiento de la normativa, en un largo proceso, en el que se ha multiplicado el esfuerzo de ambas partes y no ha resuelto el problema de raíz.

En la década de los 90 se comienza a aplicar el análisis probabilístico de seguridad en las centrales nucleares, y en 1998 la NRC estableció un convenio de colaboración con la NFPA para desarrollar un consenso estándar en la protección contra incendios basado en las prestaciones e informado por el riesgo.

En enero de 2001 la NFPA publicó la norma **NFPA 805** y, en junio de 2004, la NRC publicó el apartado 10 CFR 50.48 (c), incluyendo la NFPA 805 en la regulación de PCI.

La nueva normativa permite realizar análisis de riesgo de incendios realistas, aplicando un enfoque basado en prestaciones, en el que se tiene en cuenta la actuación de los sistemas activos de PCI. Así mismo, permite a las centrales previas a 1979, mediante la adopción de la NFPA-805, cumplir con el código de regulación 10 CFR 50.48 y así eliminar la necesidad de solicitar exenciones y prorrogas.

3. REQUISITOS Y CRITERIOS ESTABLECIDOS PARA EL PROGRAMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN UNA CENTRAL NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN.

En la instrucción IS-30 se establecen como objetivos de la protección contra incendios la adopción del principio de defensa en profundidad, implantando prevención, detección, control y extinción, evitando de esa manera la propagación a otras áreas. Otro objetivo es garantizar la parada segura mediante, al menos, uno de los trenes redundantes.

3.1 ANÁLISIS DE RIESGOS DE INCENDIO

La IS-30, ref. [3] establece que el Análisis de Riesgo de incendios se debe realizar mediante método determinista. Además se requiere completar el estudio con un análisis probabilístico de seguridad de incendios de nivel 1 a potencia.

Sin embargo, la presente instrucción deja abierta la posibilidad de aplicar el metodología «**informada por el riesgo** y **basada en prestaciones**» que hace referencia a la regulación estadounidense 10 CFR 50.48 apartado (c), ref.[4], y que es apreciada positivamente por el CSN. Esto implica la aplicación de la normativa NFPA-805, la cual está incluida en dicho apartado del código de regulación federal estadounidense.

3.2 NFPA-805

La NFPA-805, ref. [5], establece los estándares para aplicar un enfoque basado en prestaciones en la protección contra incendios de centrales nucleares de agua ligera. Estos estándares especifican los requisitos mínimos que deben cumplir los programas de PCI durante todas las fases de operación de la central, incluyendo parada, condiciones de degradación del núcleo y desmantelamiento.

Establece así mismo una metodología para cumplir con los requisitos establecidos en la misma. Esta metodología se muestra en el siguiente diagrama.

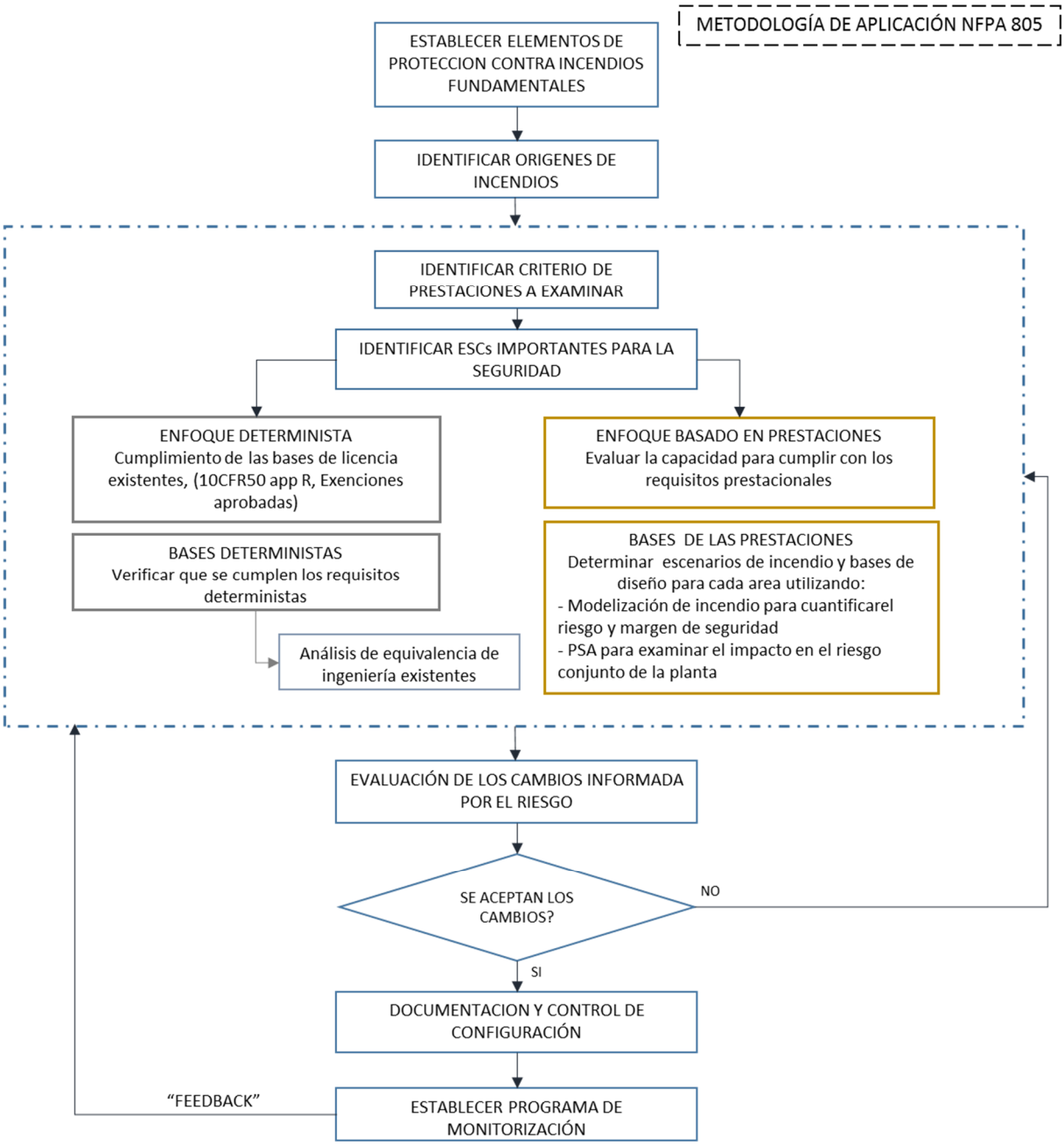


Figura 3.1. Diagrama de metodología de aplicación de la normativa NFPA-805. Fuente NFPA-805, ref. [3]

Como se puede observar en la figura 3.1, se permite la utilización, tanto de un enfoque determinista, como de un enfoque basado en prestaciones en los análisis de ingeniería. Sin embargo también está contemplada la posibilidad de combinar ambos enfoques. La elección permitirá establecer los sistemas de protección contra incendios requeridos.

La acción de identificar los criterios de prestaciones a examinar implica garantizar los siguientes criterios de seguridad:

- Criterio de prestaciones de seguridad nuclear.
- Criterio de liberación radioactiva.
- Criterio de riesgo de los trabajadores en planta.
- Criterio de daño a la planta / interrupción de la actividad

En cuanto a identificar las ESCs (Estructuras, Sistemas y componentes) importantes para la seguridad, es necesario para poder aplicar los criterios de defensa en profundidad y parada segura. Pues será la redundancia de dichas ESCs la que garantizará su cumplimiento.

3.2.1 Enfoque determinista

El enfoque determinista debe cumplir con los criterios de prestaciones y requerirá un análisis de equivalencia de ingeniería, demostrando que posee un nivel de protección contra incendios análogo al requerido.

3.2.2 Enfoque basado en prestaciones

Se evaluará la capacidad del comportamiento de la planta atendiendo a las siguientes asunciones:

- No tendrán lugar antes, durante o a continuación de un incendio, los fallos independientes, (que no son consecuencia del incendio), se sistemas, equipos, instrumentación, controles o fuentes de energía de cuyo funcionamiento dependa el cumplimiento de los requisitos de seguridad nuclear.
- No se requiere, por tanto, la postulación de fallo único concurrente con el incendio.
- Ningún transitorio anormal, o accidente base de diseño en los sistemas precederá al conato de incendio. Así mismo, ninguno de estos transitorios, que no sea provocado por el incendio, tendrá lugar durante o a continuación del incendio.

3.2.3 Modelización del incendio

La modelización de los incendios puede ser usada como una herramienta en el análisis de ingeniaría para asistir en el desarrollo del diseño basado en prestaciones. Los modelos no proporcionan por si solos la solución, pero son muy útiles como soporte en la decisión a la hora de diseñar o modificar un sistema de PCI. La selección del modelo más adecuado es una parte importante del proceso y requiere un conocimiento específico de los fenómenos físicos de un incendio por parte del ingeniero.

Los modelos de incendio se dividen en cuatro categorías:

- Modelos de ecuaciones simples: no suponen coste computacional, aunque no devuelven resultados precisos. Pueden utilizarse como resultado directo, o como input para un modelo más complejo.
- Modelos de zona: suponen un coste computacional mínimo, y son adecuados para predecir el comportamiento de la capa de gases calientes. Pero no son precisos para predecir el flujo de calor incidente en un componente objeto de estudio.
- Modelos de campo: son útiles en la predicción de una amplia variedad de fenómenos en un incendio, incluyendo conducción, convección, radiación, turbulencia y combustión. Sin embargo, el coste computacional es elevado, y requieren procesos de verificación y validación exhaustivos.
- Modelos de análisis de elementos finitos. Predicen con fidelidad la transferencia de calor por conducción en elementos sólidos.

El proceso de modelización del incendio permitirá examinar el impacto de los diferentes escenarios de incendio sobre los criterios de prestaciones considerados.

Se utilizarán modelos reconocidos por la autoridad competente. En este caso se trata de la asociación NFPA (National Fire Protection Association).

Se incluirán en el estudio las limitaciones de uso de cada modelo. Así mismo se realizará, tanto la verificación como la validación del mismo.

3.2.4 Análisis de ingeniería

Se realizará un análisis cualitativo, otro cuantitativo y, por último, un análisis probabilístico de seguridad para evaluar la capacidad de satisfacer el nivel de prestaciones requerido.

Los pasos para realizar el análisis de ingeniería son los siguientes:

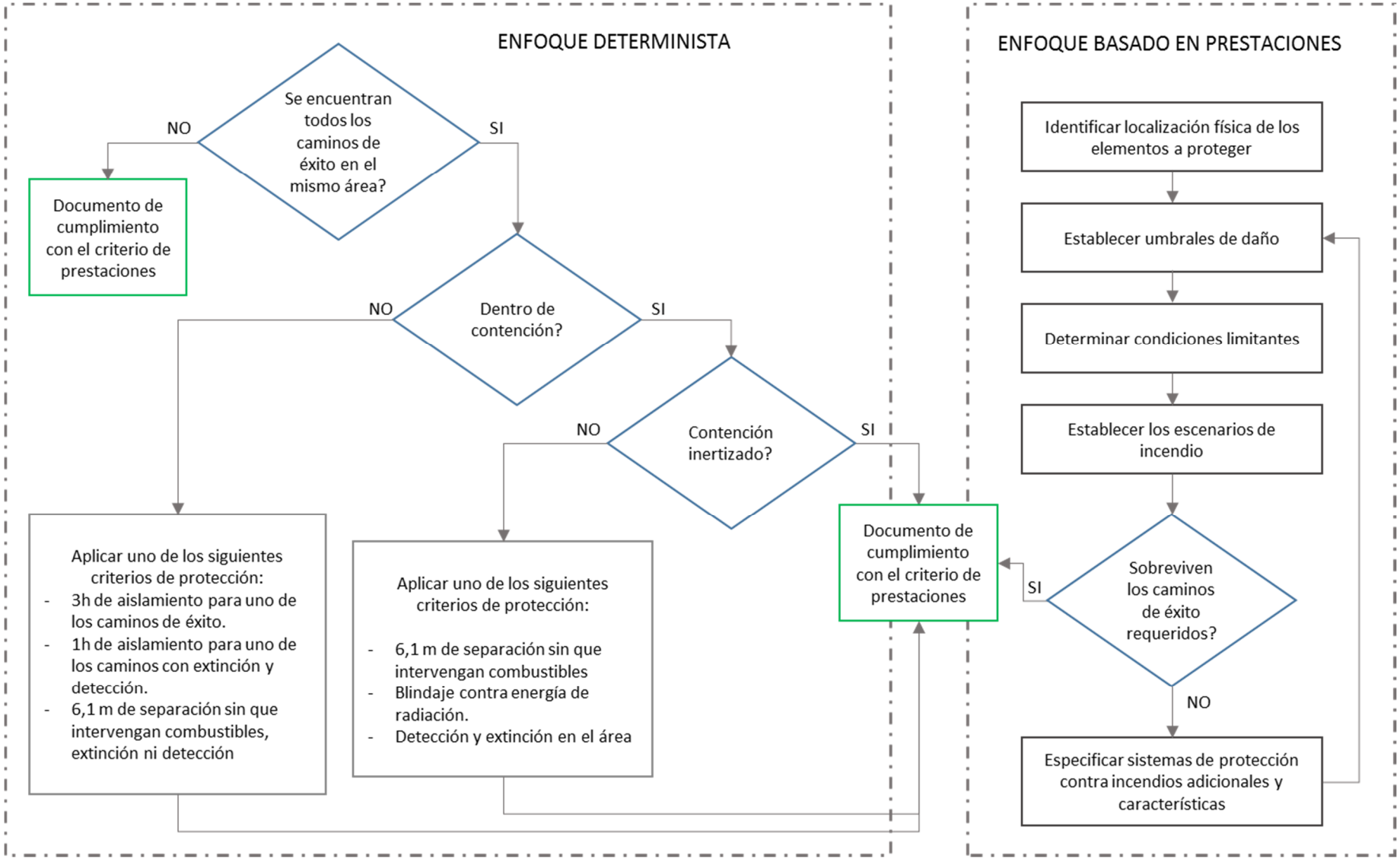
i. En primer lugar, evaluar la exposición a un incendio. Con ello se tienen en cuenta las ESCs importantes para la seguridad, los combustibles tipo que se pueden encontrar en el área de incendio, las fuentes de ignición y la configuración geométrica del escenario.
ii. En segundo lugar, se evaluarán los sistemas de protección contra incendios existentes.
iii. Por último, si los sistemas de PCI no pueden garantizar las prestaciones requeridas para el escenario propuesto, se deberá optar por una de las siguientes alternativas.
    - Considerar cambiar el equipamiento o su uso para reducir combustible o fuentes de ignición. Lo que lleva al primer paso (i).
    - Considerar sistemas adicionales o alternativos de protección contra incendios. Lo que conduce al segundo paso (ii).
    - Considerar enfoque determinista.

3.2.5 Criterio de selección de metodología

Para cada área de incendio, se determinará, bien mediante enfoque determinista o bien mediante enfoque basado en prestaciones, el sistema de protección contra incendios que cumplirá con los requisitos de seguridad establecidos.

En la aplicación del enfoque basado en prestaciones se permitirá el uso de métodos deterministas para simplificar asunciones en el área de incendio. Así mismo se considera el funcionamiento de los sistemas de PCI activos en la valoración del cumplimiento de las prestaciones, a diferencia del enfoque determinista, que analiza el riesgo de incendios sin contar con el funcionamiento los sistemas de detección ni de los de extinción.

En el diagrama de la figura 3.2, en la página siguiente, se muestra la metodología a seguir según el enfoque seleccionado. Como se puede apreciar, al adoptar el enfoque determinista, deberán cumplirse las medidas asignadas sin tener en cuenta el comportamiento del fuego ni el de los sistemas de PCI. De modo que, de existir un recinto en el que se encuentren todos los caminos de éxito para cumplir con los objetivos de parada segura, en el enfoque determinista se deberán cumplir las exigencias de diseño establecidas, o contar con un camino de parada alternativa contemplado en el apéndice R del 10 CFR 50.48, Ref. [4]



F II Figura 3.2 diagrama de selección de metodología de análisis en la aplicación de la NFPA-805. Fuente: NFPA, ref. [5.]

3.2.1 Tipos de escenarios a modelizar según la NFPA-805

En el caso de aplicar enfoque basado en prestaciones, se valorará la evolución del incendio en función del tiempo, y la respuesta de los sistemas de protección. Mediante la metodología indicada en el análisis de ingeniería del apartado 4.2.4 y el diagrama de la figura 3.2, se determinará si se cumplen los requisitos prestacionales. A demás, se calculará el escenario en el que no se cumplirían los requisitos, y se establecerá el margen de seguridad.

Para conseguir el margen se deberán modelizar dos tipos de escenarios: por un lado el incendio máximo esperado, que es aquel que entra dentro de las expectativas teniendo en cuenta las condiciones de contorno y las iniciales especificadas. Por otro lado se calculará el incendio limitante, que supondrá el no cumplimiento con los requisitos, y que se alcanzará modificando el input con datos de entrada posibles, aunque sean poco probables.

Por último, se deberán simular incendios sin la respuesta de los sistemas de detección y extinción. El objetivo es calcular la propagación con el fin de conseguir frecuencias de daño en todas las situaciones posibles para aplicarlos en el análisis probabilístico de seguridad.

4. PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DEL PROGRAMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN UNA CENTRAL PWR DE 1000 KWE.

En el presente estudio, la propuesta de modificación del programa de PCI de una central nuclear consistirá en un trabajo de hipótesis, y no se hará referencia a ninguna central existente. Sin embargo se utilizarán a modo de ejemplo, un determinado grupo de centrales que cumplan con el perfil adecuado.

4.1 CENTRALES NUCLEARES OBJETO DE ESTUDIO

Una vez analizada la normativa vigente, y teniendo en cuenta la trayectoria de las centrales españolas, se elige para el presente estudio una central nuclear de agua a presión de segunda generación, a la que le sea de aplicación el apéndice R del 10 CFR 50.48, ref.[4], y que haya gozado de exenciones en la revisión de la misma por parte del cuerpo regulador.

El motivo de esta elección es que, como se verá más adelante, las centrales con este perfil encuentran en la aplicación de la nueva normativa, una forma más eficiente, y no menos segura, de gestionar el programa de protección contra incendios. A lo anterior se le añade que la adaptación a la NFPA-805 permite regularizar la situación de las centrales incluidas en dicho apéndice R del 10 CFR 50.48, y liberarse así de la necesidad de solicitar exenciones.

La central objeto de estudio cuenta con un análisis determinista de riesgo de incendios, y con un análisis probabilístico de seguridad en incendios. La propuesta de modificación comparará los estudios existentes con la metodología del enfoque basado en prestaciones. De este modo se podrá evaluar la viabilidad de la solución propuesta.

4.2 APLICACIÓN DE LA NFPA-805 EN LA CENTRAL OBJETO DE ESTUDIO

Como se ha comentado en el capítulo anterior, la aplicación de la nueva normativa permite justificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad mediante un análisis basado en prestaciones. Por lo tanto, dichos análisis únicamente serán necesarios en aquellas áreas de incendio que entren en conflicto con los criterios establecidos en el apartado (c) del código 10 CFR 50.48.

De manera que el primer paso para la modificación es la elección del área de incendio que será objeto de análisis. Una vez elegida el área a estudiar, se seguirán los pasos establecidos en el apartado 4.2. El detalle del procedimiento se explica directamente con su aplicación en el caso práctico desarrollado en los apartados que siguen.

4.3 SELECCIÓN DEL ÁREA DE INCENDIO A ANALIZAR

La instrucción IS-30 define *área o compartimento de incendio* como:

> *"Aquella sección de un edificio, o incluso un edificio completo, separado de otras áreas por barreras resistentes al fuego que garantizan la imposibilidad de propagación del fuego de esta área a otra, o viceversa, durante el tiempo de resistencia al fuego especificado".*
>
> Referencia [3]

Dado que el presente trabajo tiene fines docentes, y como se deduce de la definición anterior, un área de fuego puede suponer una superficie considerablemente extensa, se analizará una zona de fuego en su lugar, cuya definición en la IS-30 queda como sigue:

> *"Zonas de fuego: toda subdivisión realizada dentro de un área o compartimento de fuego y que se emplea como unidad de estudio para la instalación de los sistemas específicos de protección activa (detección, control y extinción). Los criterios para el establecimiento de las zonas de fuego se basan en el tipo de material combustible existente, la valoración del riesgo de incendio y la severidad del incendio esperada."*
>
> Referencia [3]

Igualmente, puede justificarse un análisis mediante enfoque basado en prestaciones, y por lo tanto, aplicar la modificación únicamente en una zona de fuego, debido a que las características de una zona (material combustible, riesgo de incendio y sistemas PCI) la diferencian de las zonas adyacentes en cuanto al comportamiento ante un incendio y sus consecuencias.

Sin embargo, en el caso de aplicar la modificación únicamente a una zona de fuego, deberá tenerse en cuenta la propagación desde y hacia zonas adyacentes. Esta última consideración no entra en el alcance del presente estudio.

4.4 ZONA DE ANÁLISIS A-01

La zona de análisis A-01 se encuentra en el edificio auxiliar de una central nuclear de agua a presión de tres lazos. Es una zona de paso de cables en la que se registra una frecuencia de daño al núcleo elevada a causa del riesgo de incendio en la misma. Dicha frecuencia ha sido, previamente a este estudio, calculada mediante un modelo de ecuación simple, Apdo. 5.5, y un posterior análisis probabilístico de seguridad.

Con el presente estudio se pretende obtener una frecuencia de daño al núcleo diferente utilizando un modelo de simulación computacional, y así poder realizar la comparación de las dos metodologías. Así mismo se pretende comprobar el cumplimiento de las prestaciones de seguridad requeridas.

El análisis de la zona se realiza siguiendo las pautas establecidas en el apartado 4.2.4 de análisis de ingeniería. Y se desarrolla en los siguientes capítulos.

4.4.1 ESCs importantes para la seguridad en la zona de análisis A-01

Como se indica en el apartado anterior, la zona A-01 es una zona de paso de cables. Por ella pasan los cables del tren A y B de las bombas de refrigeración de salvaguardias, de modo que un incendio generalizado provocaría la perdida de dicha función.

A demás, un incendio en la zona puede provocar los siguientes sucesos iniciadores[1]:

- S3: LOCA muy pequeño

[1] Suceso iniciador se define en los análisis probabilísticos de seguridad, como todo suceso que conduce a daño al núcleo. En los APS de incendios el daño se contabiliza a partir de las ESCs dañadas por el fuego, y considerando la pérdida de las mismas como un suceso iniciador.

Un incendio en esta zona afecta a los cables de potencia de bombas de carga P01/P02/P03, de las válvulas VC-1/2 entre otros fallos y además puede ocasionar el cierre de las válvulas V01, V02, V03 y V04 por lo que se vería afectada la refrigeración a la barrera térmica.

- T11: Perdida del tren B del sistema de agua de Refrigeración de Salvaguardias.
  El incendio afecta a los cables de potencia de las bombas P07B y P07D, por lo que se produciría el suceso iniciador.

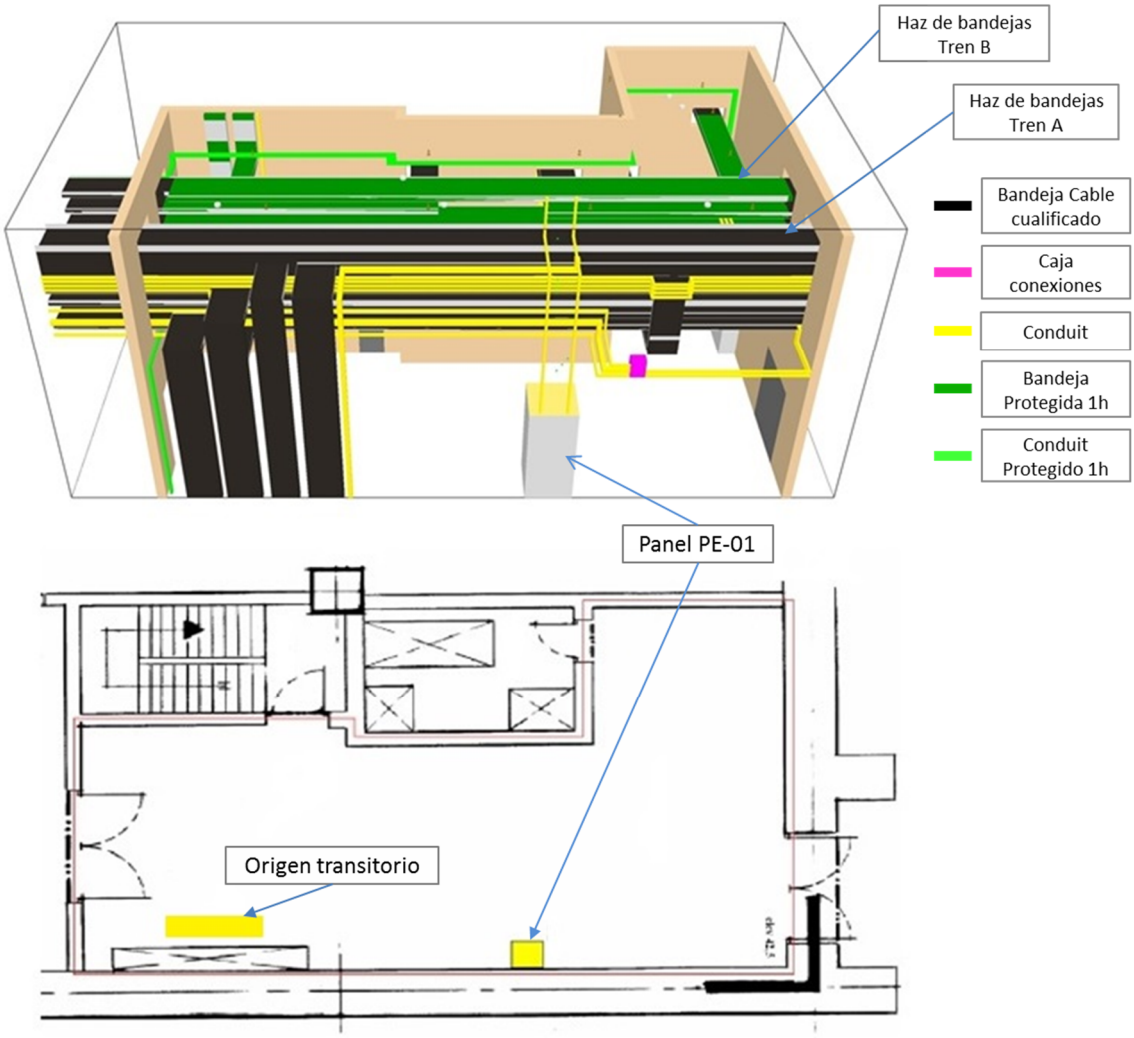
Se tendrá en cuenta en el análisis de riesgo, que bandejas de cables se ven afectadas y se evaluará el cumplimiento con los requisitos prestacionales con un análisis cualitativo, en el que se valoran los sistemas de protección contra incendios activos y pasivos.

Posteriormente se realizará un análisis cuantitativo con el que se extraerá la frecuencia con la que los diferentes posibles incendios en la zona conducirían a los sucesos iniciadores, los cuales supondrían daño al núcleo.

4.4.2 Características geométricas de la zona de análisis A-01

La zona de análisis A-01 tiene forma de “L” invertida. Las dimensiones de la misma son 5 x 9 m más 7,7 x 3,5 m. El área aproximada es por lo tanto de 72 m². La altura de la zona es de 6,5 m.

Esta zona no tiene aberturas, y se considera, de forma conservadora, que no tiene ventilación. La temperatura inicial considerada es de 20º C.



F III Figura 4.1. Características geométricas, ESCs y orígenes de incendio de la zona A-01

4.4.3 Orígenes de incendio en la zona A-01

Los orígenes de incendio en esta zona se han postulado a partir de los documentos de frecuencias de incendio de la base de datos de la central objeto de estudio. Éstos se ponderan con las frecuencias calculadas en la base de datos genérica, contenida en el documento guía NUREG/CR-6850 Capitulo 6, Ref.[6]. Los orígenes son los siguientes:

- Origen perteneciente a **cabinas eléctricas**, el origen se asigna al **panel PE-01** o panel lógica auxiliar contra incendios del edificio auxiliar, situado en la pared sur de la zona, tal y como se muestra en la figura 3.1.
- Combustible **transitorio**, con localización con forma de rectángulo amarillo en la figura 5.1.
- Incendios en cables originados por actividades de **corte y soldadura**, en la misma localización que los combustibles transitorios, es decir, en las bandejas verticales.

La frecuencia de dichos incendios se indicará en el apartado de análisis probabilístico de seguridad.

4.4.4 Sistemas de PCI en la zona A-01

La zona de análisis está dotada de los siguientes medios de detección y extinción de incendios:

- Sistemas de detección: sistema de detección iónica simple y doble en todo el recinto.
- Sistemas de extinción: La zona consta de rociadores de agua de activación manual, cubriendo toda la superficie del recinto. No dispone de sistemas de actuación automática.

Para comprobar que los sistemas de PCI satisfacen los requisitos prestacionales, es necesario realizar un análisis de riesgo. Se realizará por tanto una modelización del escenario con la que se calculará, para cada caso posible de incendio, el daño a los sistemas y componentes y el comportamiento de los sistemas de PCI. Dicho análisis se desarrolla en los capítulos que siguen.

4.4.5 Umbrales de daño en las ESCs

Los criterios de daño aplicados en el presente estudio son los documentados en la guía NUREG/CR-6850 Apéndice H, Ref. [6]. Los parámetros que se utilizarán para evaluar el daño de los cables serán temperatura y flujo de calor incidente, ambos en función del tiempo. Las tablas que muestran dichos valores se exponen en el Anexo A.

Se considerará el daño que sufren los conduits y cajas de empalmes en la cuantificación del riesgo, pero no se considera que éstos aporten liberación de calor adicional al incendio.

4.4.6 Condiciones limitantes

Las condiciones limitantes serán aquellas que, debido al daño provocado por el incendio, no permitan cumplir con las prestaciones requeridas para cumplir con los criterios de seguridad. En la zona de estudio se considerara condición limitante el hecho de que se vean dañados ambos trenes redundantes a consecuencia del incendio, es decir, que exista propagación y daño en los dos haces de bandejas principales. Dicho escenario conduciría a los sucesos iniciadores enumerados en el apartado 4.4.1.

4.5 MODELIZACIÓN DE INCENDIOS EN LA ZONA A-01

El método utilizado para analizar la zona A-01 es un modelo de campo, en concreto el código FDS (Fire Dynamics Simulator). Es un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics), desarrollado por el NIST (National Institute of Standard and Technology) y cumple con los requisitos establecidos en la NFPA-805. A continuación se detallan todos los aspectos del modelo.

4.5.1 FDS & SMV (Fire Dynamics Simulator & Smoke View)

FDS, es un modelo CFD de incendio conducido por flujo. El modelo resuelve numéricamente una forma de las ecuaciones de Navier-Stokes apropiada para flujo de baja velocidad conducido por temperatura, con énfasis en el transporte de humo y calor. Las derivadas parciales de las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía son aproximadas a pequeñas diferencias, y la solución se actualiza en divisiones temporales en una malla tridimensional

rectilínea. Para simular el movimiento del humo, la descarga de los rociadores y de los aspersores de combustibles se utiliza el método de partículas Lagrangianas.

Adicionalmente se ha desarrollado el Smokeview (SMV), un software soporte que produce imágenes y animaciones con los resultados del FDS. Lo que ayuda a valorar la visibilidad en un incendio confinado.

4.5.2 FDS: Utilidades

FDS computa la temperatura, densidad, presión, velocidad y composición química de cada celda de la malla en cada división discreta de tiempo. Los datos producidos por FDS para la fase gas incluyen:

- Temperatura del gas.
- Velocidad del gas.
- Concentración de especies en el gas (vapor de agua, CO_2, CO, N_2).
- Concentración de humo y estimaciones de visibilidad.
- Presión.
- Tasa de liberación de temperatura por unidad de volumen.
- Fracción de mezcla (o ratio aire/combustible)
- Densidad del gas
- Masa de partículas o gotas de agua por unidad de volumen.

En superficies sólidas, FDS predice cantidades adicionales asociadas con el balance de energía entre la fase gas y la fase sólida, e incluye:

- Temperatura en la superficie y en el interior.
- Flujo de calor, tanto de radiación como de convección.
- Tasa de combustión.
- Masa de partículas de agua por unidad de superficie.

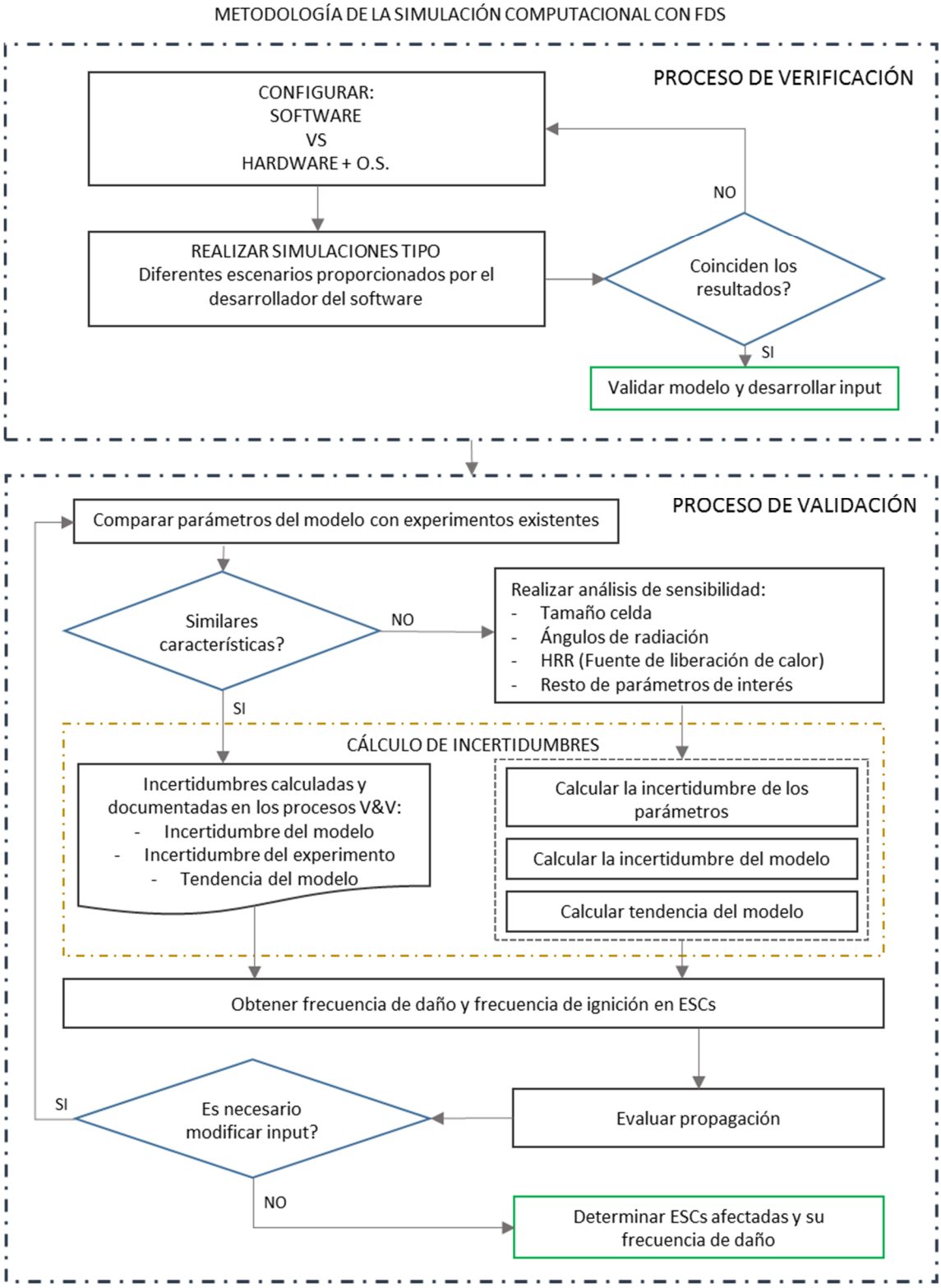
4.5.3 FDS: Limitaciones de uso

Las limitaciones de uso del modelo FDS se enumeran a continuación:

- Velocidad de flujo: no se simulan fenómenos que superen la velocidad del sonido.
- Geometría rectilínea: puede limitar la configuración de los obstáculos en el escenario
- HRR prescrito: aunque FDS predice la tasa de combustión en los sólidos y la pirolisis en la superficie de los mismos, no predice la propagación con precisión debido a que ésta depende en gran medida del material expuesto y de la geometría de su superficie. Por lo tanto, se deberán especificar las fuentes de liberación de energía para obtener simulaciones fiables.
- Falta de ventilación: En los ambientes mal ventilados, FDS pierde precisión al aplicar las ecuaciones de fracción de mezcla. Sin embargo, la perdida de precisión se mantiene en valores conservadores, es decir, que reproduce la peor de las situaciones posibles. Por lo que el resultado es apto para el estudio.

4.5.4 Proceso de simulación computacional de incendios con FDS

Una vez definido el escenario, los elementos a proteger, los umbrales de daño, las condiciones limitantes, y el modelo computacional, se procede a realizar las simulaciones. El proceso de simulación se muestra en el siguiente diagrama.



F IV Figura 4.2. Diagrama de la metodología para realizar la simulación computacional con FDS. Fuente: realización propia.

Dentro del mismo se describe el proceso de verificación, el cual se realizará una sola vez antes de desarrollar los escenarios. A demás se muestra el proceso de validación que, a diferencia del anterior, se aplicará a cada hipótesis o caso de estudio.

4.5.5 Proceso V&V: Verificación y Validación del modelo

Los términos verificación y validación son confundidos con frecuencia y utilizados con el significado de comprobación de la precisión de un modelo numérico. Sin embargo, mediante consenso se han diferenciado ambos conceptos y se han establecido sus respectivas definiciones, [ASTM E 1355, *"Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models"*], explicadas a continuación:

- **Verificación**: Proceso en el que se determina que la implementación del método de cálculo y la solución aportada por el mismo, representan con fidelidad la descripción conceptual que el desarrollador tiene del método de cálculo.
- **Validación**: Proceso en el que se determina el grado con el que el método de cálculo es una fiel representación del mundo real desde el punto de vista del enfoque del diseño del modelo.

La oficina de investigación RES (Nuclear Regulatory Research) de la NRC junto con el instituto EPRI y el NIST llevaron a cabo en 2007 un proyecto conjunto de verificación y validación (V&V) de cinco modelos de incendio previamente seleccionados, entre los cuales se encuentra el FDS. Los resultados se documentaron en siete volúmenes de la guía NUREG-1824 (EPRI 1011999). El volumen 1 del NUREG-1824, Ref. [7], lista los rangos de valores de diferentes características físicas y de parámetros normalizados basados en los experimentos considerados en el estudio de validación.

El modelo FDS ha sido, por tanto, verificado mediante cálculos de sub-modelos comparados con soluciones analíticas [FDS Volumen 2, ref.[8]. Así mismo estas actividades de verificación cuentan con la aceptación del estándar NFPA-805. Los cálculos de verificación se detallan en el Anexo B.

En dicho programa se realizaron análisis de sensibilidad de los parámetros importantes que caracterizan el incendio, para diferentes baterías de experimentos. Esto permitió establecer incertidumbres del modelo FDS para cada parámetro, dentro de un rango de aplicabilidad determinado por los diferentes experimentos y simulaciones realizadas.

El hecho de poder encajar el escenario a estudiar con un experimento de similares características permite utilizar las incertidumbres documentadas en el proceso V&V, tanto en la guía NUREG-1824 (EPRI 1011999) Ref. [7], como en la guía de validación "FDS-Volume 3", Ref.[9]. De esta manera se agiliza el proceso de validación, necesario para calcular las frecuencias de daño correspondientes.

Sin embargo, es importante recordar que los valores aportados por los estudios no son siempre aplicables, y que cada escenario debe ser evaluado para comprobar que se cumplen las similitudes con los experimentos disponibles. En caso de no cumplir con las características adecuadas, será necesario realizar análisis de sensibilidad y comparar, o bien con experimentos

de manera aislada para cada parámetro, o bien con fórmulas simples obtenidas de correlaciones establecidas en bibliografía contrastada.

Debido a la complejidad y volumen de documentación que conllevan los procesos de verificación y, especialmente el de validación, estos se desarrollan por completo en los Anexos B y C

4.5.5.1 Calculo de incertidumbres

El método utilizado para estimar la incertidumbre de los modelos simulados con FDS es la comparación con medidas experimentales cuya incertidumbre ha sido cuantificada. De modo que la incertidumbre del modelo será expresada en forma de distribución normal cuya media y desviación estándar serán estimadas a partir de la diferencia relativa entre los valores predichos y los valores medidos.

Este método solo proporciona la incertidumbre del modelo. La incertidumbre de los parámetros del input no se tiene en cuenta. En el presente caso de estudio el parámetro que más influye en los resultados es el HRR o tasa de liberación de calor, cuyo valor viene prescrito y por lo tanto no afecta negativamente a la validación del modelo.

En el caso de que los parámetros del incendio a simular queden fuera del rango establecido en las tablas documentadas en el proceso V&V se deberán realizar análisis de sensibilidad para comprobar cómo los cambios en el input afectan al desarrollo de los resultados, proporcionando la incertidumbre de los parámetros y del modelo. Dado el caso en el que no sea posible validar el modelo simulado, se aplicarán métodos más conservadores, como por ejemplo el de fórmulas simples que representan correlaciones con experimentos contrastados, como es el caso del método (FIVE)[2].

En los casos de estudio que se simulan en el presente proyecto no ha sido necesario utilizar este procedimiento y se han aplicado las incertidumbres documentadas, no obstante, se han realizado análisis de sensibilidad al tamaño de celda y al número de ángulos de radiación para la correcta configuración de los escenarios que, como se verá más adelante, están diseñados con diferentes tamaños de celda para minimizar el esfuerzo computacional.

4.6 ESCENARIOS DE INCENDIO EN LA ZONA A-01

Con los datos recogidos en el apartado 5.4, en el que se describen las condiciones de contorno y las condiciones iniciales, tales como, temperatura ambiente, ventilación, características geométricas y orígenes de incendio, se configuran los diferentes escenarios de incendio que serán simulados mediante el modelo seleccionado.

Para establecer los valores que definirán los diferentes escenarios descritos en el apartado 4.2.6, será necesario localizar las ESCs importantes para la seguridad, así como definir la tasa de liberación de los orígenes de incendio.

[2] FIVE. Fire-Induced Vulnerability Evaluation. NUREG-1824 – Vol. 4, ref. [10]. Este modelo consiste en la recopilación de un conjunto de correlaciones de diferentes escenarios de incendio que permite calcular, mediante aplicación de fórmulas sencillas, la evolución de un incendio en una central nuclear. Dicho modelo fue desarrollado por EPRI en agosto de 2002, y ha sido utilizado en los análisis previos que son objeto de estudio enel presente proyecto.

4.6.1 Casos de incendio

Para cada tipo de escenario a modelizar se realizarán simulaciones con diferentes configuraciones teniendo en cuenta los diferentes orígenes de incendio contemplados en el capítulo 5.4.3. También se generarán diferentes casos de estudio según el factor de severidad determinado para cada origen de incendio. Los factores de severidad se extraen del mismo documento que los orígenes de incendio, NUREG/CR-6850 Capitulo 6, Ref.[6]. De modo que los casos de estudio para cada escenario de incendio son los que siguen:

	Orígenes de incendio	HRR	F. Severidad
Caso 1	Incendio con origen en panel PE-01,	702 kW	98%
Caso 2	Incendio con origen en panel PE-01,	211 kW	75%
Caso 3	Incendios en cables originados por corte y soldadura	438 kW	98%
Caso 4	Incendio originado en combustible transitorio	317 kW	98%
Caso 5	Incendio originado en combustible transitorio	125 kW	75%

Tabla 5.1.

Como se puede apreciar, la fuente de liberación de calor está definida estadísticamente y, por lo tanto, se mantiene la fiabilidad de los resultados de las simulaciones con FDS.

Con el objetivo de seguir un orden lógico en el desarrollo de las simulaciones, se presentarán en primer lugar los resultados de los cálculos de propagación en los cuales se ejecutan los casos 1 al caso 5 sin la actuación de los sistemas PCI. De este modo se obtiene la evolución del incendio sin extinción y permite valorar el daño de las ESCs que servirá de input para el APS. A continuación se simularán los casos de incendio máximo esperado y los casos de incendio limitante.

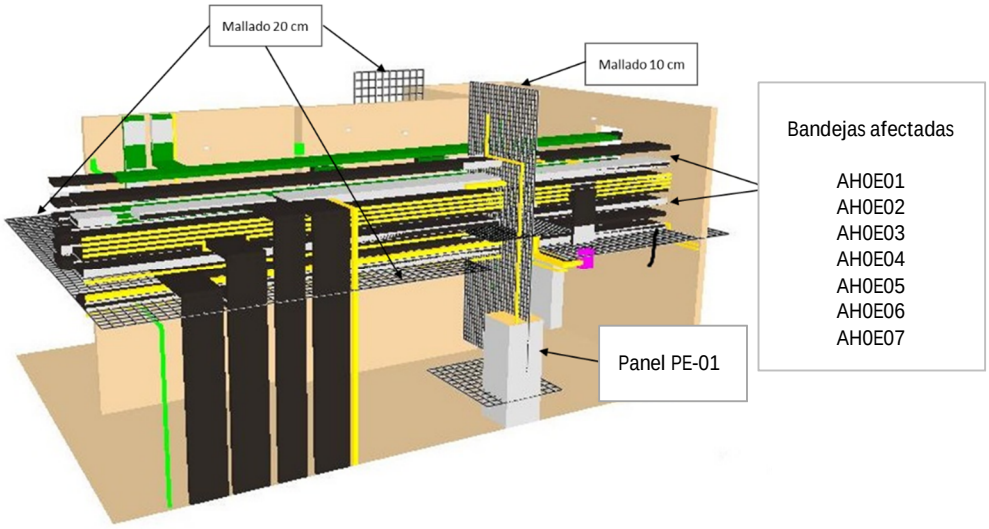
4.1. CÁLCULO DE PROPAGACIÓN Y DAÑO A COMPONENTES

El cálculo de propagación y daño a componentes tiene por objetivo obtener la severidad de cada origen de incendio sin la actuación de los sistemas de PCI para poder cuantificar el daño en función del tiempo y así poder configurar el input para el análisis APS. Los casos a simular serán los expuestos en la tabla 4.1. A demás de los valores de liberación de calor expuestos, cabe la posibilidad de simular otras intensidades de incendio para ajustar el factor de severidad a cada escenario. Esto último se explica con más detalle en el Anexo D de cálculo de frecuencias.

4.1.1. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 1

El Caso 1 consiste en la simulación de un incendio con origen en panel PE-01 con un factor de severidad del P98 en el cual se estima una tasa de liberación de calor de 702 kW.

El tamaño de celda es de 10 cm en la sección crítica, incluyendo fuego y ESCs cercanas, y de 20 cm en el resto del recinto. El número de ángulos de radiación es de 100. Se han realizado análisis de sensibilidad para ambos parámetros de entrada, por lo que queda comprobada su fiabilidad en los resultados.



F V Figura 4.2. Mallado del escenario del caso 1 y bandejas cercanas al incendio.

En el apartado C.3 del anexo C se detalla la validación y el cálculo de incertidumbres de la simulación del caso 1. El incendio tiene lugar en el panel PE-01 y evoluciona mediante una rampa de ascensión de tasa de liberación de calor de 12 minutos, a partir de la cual se mantiene un valor máximo de liberación de calor de 702 kW que se prolonga 8 minutos pudiendo existir propagación a través del haz de bandejas cercano al panel hacia el minuto 18 desde el inicio del incendio. A partir del minuto 20 la tasa de liberación de calor en el recinto empieza a disminuir en forma de rampa que acabaría 40 minutos después del inicio, dado que no se da crédito a una propagación que suponga incendio generalizado en el recinto ni que afecte al haz de bandejas del tren A.

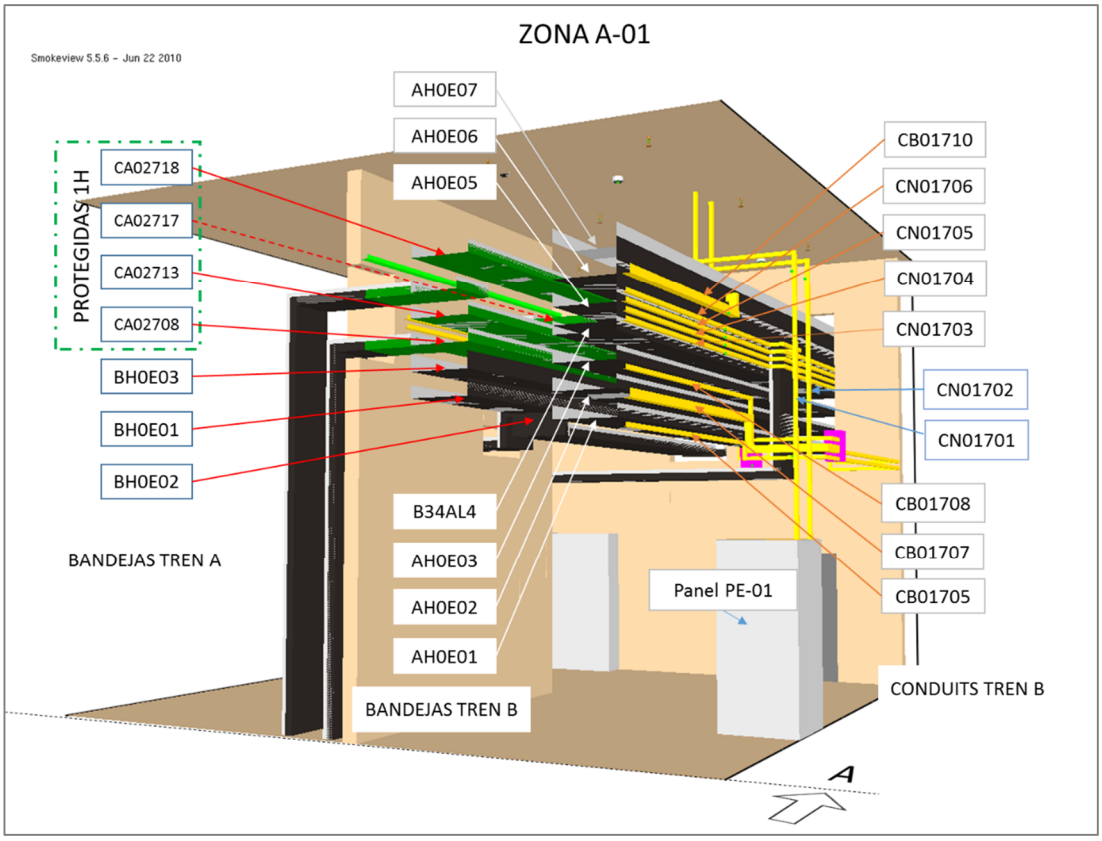
Tras el cálculo de propagaciones, se obtienen las bandejas afectadas en el caso 1 de incendio. Éstas se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Probabilidades de fallo eléctrico con factor de severidad del P98

Bandeja	Probabilidad fallo	t (min)
AH0E01	3.6E-01	20.3
AH0E02	2.2E-01	21.7
BH0E01	5.1E-06	23.3
Conduits		
CB01705	**8.45E-01**	**18.6**
CB01707	4.74E-01	20.0
CB01708	1.09E-01	21.1

Como se detalla en el Anexo D de frecuencias de daño, el resto de bandejas tienen valores de probabilidad despreciables a la hora de introducir cantidades en el análisis de APS. Las bandejas afectadas no pertenecen a conducciones de tren A ni de tren B. Por lo que los cables afectados en las mismas no son relevantes para el análisis.

Los **conduits** afectados pertenecen a cableado del tren B y, por tanto, tienen **relevancia** en el estudio de APS. El tiempo necesario para evitar el daño mediante extinción se asigna al tiempo mínimo de los conduits afectados, que en este caso es 18,6 min.



F VI Figura 4.3. Localización de canalizaciones expuestas al incendio en el caso 1. Fuente: Imagen generada con SmokeView.

4.1.2. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 2

El caso 2 consiste en un incendio originado en el panel PE-01 con un HRR de 211 kW que corresponde al percentil P75. Como se puede apreciar en el apartado C.4 del anexo C de validaciones, la simulación del caso 2 **no conduce a daño** en ninguna canalización relevante para el APS. Se ha realizado un análisis de sensibilidad para determinar el factor de severidad del incendio con origen en el panel PE-01.

4.1.2.1. Factor de severidad en incendio con origen en el panel PE-01

El análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo con los valores de HRR correspondientes a los percentiles P60, P75, P80 y P90. Los valores de HRR para cada percentil son de 127,8 kW, 211 kW, 252 kW y 382,5 kW respectivamente.

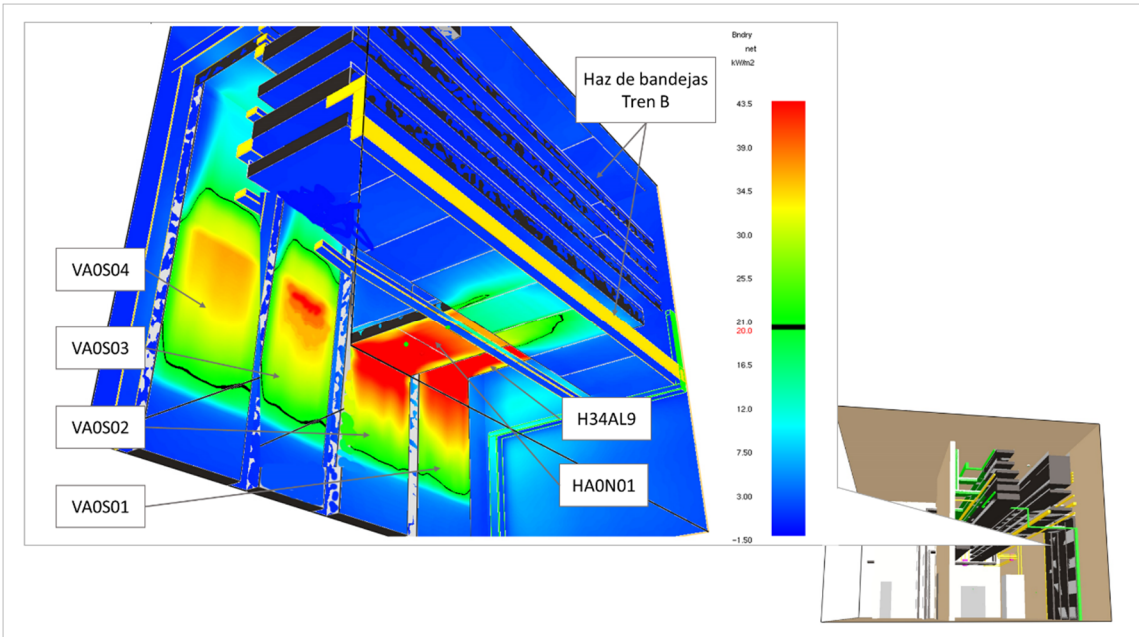
Como se puede apreciar en el apartado C.4.2 del anexo C de validaciones, el **factor de severidad** es el correspondiente al percentil **P90** con un HRR de 382,5 kW. La única canalización afectada es el conduit CB01705 y la probabilidad de fallo eléctrico es de 1,33E-02. Se descarta propagación a través del haz de bandejas del tren B.

4.1.3. Frecuencia de escenario en el que se produce daño relevante en un incendio con origen en panel PE-01

Los cálculos de **frecuencia** de escenario se detallan en el apartado D.3 del Anexo D. La probabilidad de no extinción se puede calcular junto con el factor de severidad obteniendo un valor de 4,84E-03 que, multiplicado con la frecuencia anual con la que se origina el tipo de incendio devuelve una frecuencia anual de **1,10E-07**.

4.1.4. Cálculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 3

El caso 3 consiste en un incendio originado en las bandejas verticales por actividades de corte y soldadura. La ubicación del origen de incendio se localiza en la zona más desfavorable, que es en las bandejas verticales VA0S04, VA0S03, VA0S02 y VA0S01. El incendio se origina a una altura de 3 metros, a poca distancia de los tramos horizontales HA0N01, HA0N02 y HA0N03, de manera que se maximiza la posibilidad de propagación hacia el haz de bandejas del tren B.



F VII Figura 4.4. Flujo de calor en el inicio del incendio en el caso 4. La marca negra corresponde al valor de 20 kW/m²

La tasa de liberación de calor por unidad de superficie inicial se considera que tiene un valor de 215 kW/m^2. La evolución del incendio se detalla en el apartado C.7 del anexo C. Se produce propagación a través de los tramos H34AL9, HA0N02 y HA0N01 hacia el haz de bandejas del tren B. Pasados 40 minutos se alcanzan condiciones de combustión generalizada, lo que acaba por afectar a todas las canalizaciones del recinto.

En este escenario la práctica totalidad del recinto se encuentra a temperaturas muy superiores a las críticas. A demás, esta situación se prolonga más allá del tiempo de protección de las mantas térmicas de las canalizaciones del tren A. Las canalizaciones afectadas en función del tiempo se enumeran a continuación.

Tabla D.4.1. Canalizaciones dañadas en incendio por corte y soldadura

Tren B	T (min)	Conduits	T (min)	Tren A	T (min)	Tren A	T (min)	
AH0E01	14.7	CB01705	13.2	CA02705	40.5	BH1E06	100	PROT 1h
AH0E02	16.5	CB01706	14.9	CA02706	43.0	CA02714	100	PROT 1h
AH0E03	18.3	CB01707	16.5	CN01700	42.3	CA02715	100	PROT 1h
AH0E04	26.0	CB01708	23.4	CN02330	41.0	CA02716	100	PROT 1h
AH0E05	23.3	CB01709	32.4	BH1E04	41.0	CA02717	100	PROT 1h
AH0E06	28.3	CN01700	33.4	CN02332	41.0	CA02718	100	PROT 1h
AH0E07	27.7	CN01701	29.7	BH1E05	46.3	CA02719	100	PROT 1h
VA0S01	0	CN01702	29.8	CA02708	34.2			
VA0S02	0	CN01703	2.4	CA02709	44.1			
VA0S03	0	CN01704	22.6	CA02710	40.2			
VA0S04	0	CN01705	36.1	CA02711	43.0			
HA0N01	3.5	CN01706	33.3	CA02712	42.5	Conduits		
HA0N02	3.3	CB01710	36.6	CN01702	36.8	CP1H034	100	PROT 1h
HA0N03	4.2	CN01701	37.3			CP1H032	100	PROT 1h

Cabe destacar que las bandejas verticales VA0S04, VA0S03 y VA0S02 se ven afectadas instantáneamente debido a la intensidad de flujo de calor incidente provocado por las chispas de la soldadura. Estas bandejas contienen cableado relevante para el APS, por lo que la probabilidad de éxito en la extinción se verá anulada debido al tiempo de daño.

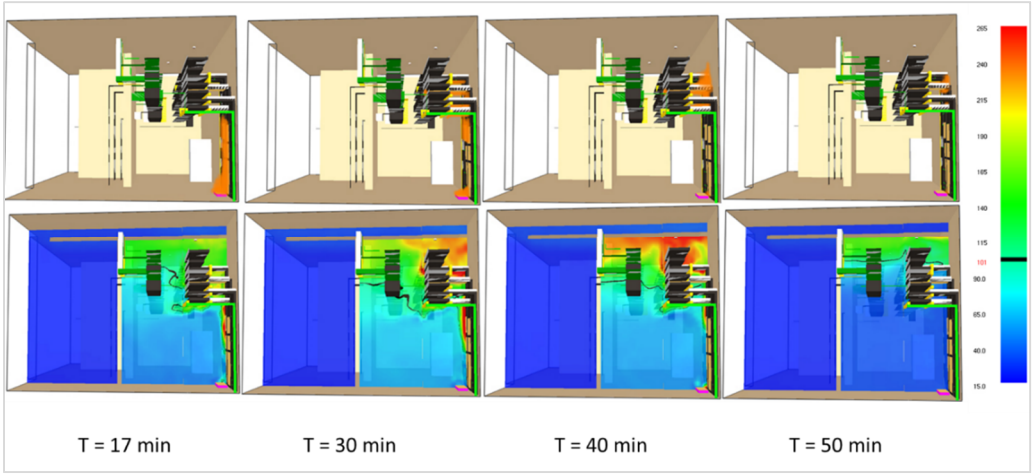
El factor de severidad es 1, la probabilidad de no extinción antes de que se produzca daño significativo es 1, y por último, la **frecuencia** de escenario será la misma que la frecuencia de incendio por tipo y zona. En este caso es de **5,92E-06**. Los cálculos se detallan en el apartado D.4 del Anexo D.

4.1.5. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 4

El caso 4 consiste en un incendio originado por combustible **transitorio** con una liberación de calor (HRR) de 317 kW (factor de severidad P98) siguiendo una distribución gamma con parámetro de forma α = 1,8 y parámetro de escala β = 57,4. La evolución del incendio se asume como la más desfavorable de los posibles orígenes de incendios documentados en la guía NUREG/CR-6850 Apéndice G tabla G-7, Ref. [6].

El combustible se ubica en la localización más desfavorable del recinto, que es junto a las **bandejas verticales**. La evolución del incendio se detalla en el apartado C.5 del anexo C.

El incendio se propaga a través de las bandejas verticales VA0S03 y VA0S02 principalmente, alcanzando, en 20 minutos, los tramos horizontales HA0N01, HA0N02 y HA0N03 que unen las bandejas verticales con el haz de bandejas del tren B.



F VIII Figura 4.5. Evolución del incendio en el caso 4. Origen combustible transitorio P98. Fuente: anexo C

El incendio continua propagando a través de los tramos horizontales produciendo un aumento de temperatura cercana a valores críticos alrededor del haz de bandejas del tren B. Esto sucede entre el instante T = 30 min. y T = 40 min, tiempo en el que ya se ha consumido el combustible inicial transitorio y parte del combustible secundario de las bandejas verticales.

A pesar del incremento de la temperatura alrededor del haz de bandejas del tren B, no se da crédito al fenómeno de flashover (combustión generalizada de todos los combustibles secundarios de la zona) y el incendio se consume hacia el minuto 50 sin afectar al haz de bandejas del tren A, como se puede apreciar en la figura 4.5.

El daño a las canalizaciones en función del tiempo se detalla en la siguiente tabla.

Tabla D.5.1. Canalizaciones dañadas origen transitorio P98

Bandejas	P (daño)	T daño (min)	Conduits	T daño (min)
AH0E01	1.00	31.8	CB01705	28.7
AH0E02	1.00	33.8	CB01706	32.2
AH0E03	0.96	44.2	CB01707	30.5
AH0E04	0.41	44.2	CB01708	39.8
AH0E05	1.00	43.3	CN01703	39.8
AH0E06	0.00		CN01704	39.0
AH0E07	0.53	46.8	CN01705	44.6
VA0S01	0.28	34.8	CN01706	41.3
VA0S02	**1.00**	**2.1**		
VA0S03	1.00	8.7		
VA0S04	0.00		Tren A	P(daño)
HA0N01	1.00	5.4	BH0E01	0.00
HA0N02	1.00	3.0	BH0E02	0.00
HA0N03	1.00	2.3	BH0E03	0.00

La primera canalización relevante para el APS en dañarse en la bandeja vertical B35V05 en el instante T = 2,1 min. El haz de bandejas del tren A no se ve afectado.

4.1.6. Calculo de propagación y daño a las canalizaciones en el caso 5

El caso 5 consiste en un incendio originado por combustible **transitorio**, como en el caso anterior, con una liberación de calor (HRR) de 125 kW que corresponde a un factor de severidad P75.

La evolución del incendio se detalla en el apartado C.6 del anexo C. En una primera simulación, FDS no estima propagación en las bandejas verticales cercanas al fuego. Al aplicar los criterios de propagación detallados en el anexo, se estima propagación vertical a través de las bandejas VA0S03 y VA0S02 en los instantes T = 5,3 min. y T = 8,3 min. respectivamente.

A continuación, se realizan nuevas simulaciones introduciendo las tasas deliberación de calor correspondientes a la propagación estimada. Los resultados indican que no se produce propagación hacia las bandejas verticales, quedando el efecto de la misma por debajo de una altura de 3 metros.

La afectación a las bandejas VA0S02 y VA0S03 se produce en los instantes T = 5,3 min. y T = 8,3 min. respectivamente.

4.1.7. Frecuencia de escenario en el que se produce daño relevante en un incendio con origen en combustible transitorio.

La tasa de extinción de la brigada en fuegos de origen transitorio es de λ=0,126. se calcula el producto del factor de severidad por la probabilidad de no supresión, según la ecuación (5.1) del Anexo D, dando como resultado $SF_4 \cdot P_{ns4} = 7{,}74E - 02$. Finalmente la frecuencia anual de escenario resulta $\lambda_4 = \mathbf{1.03E - 07}$.

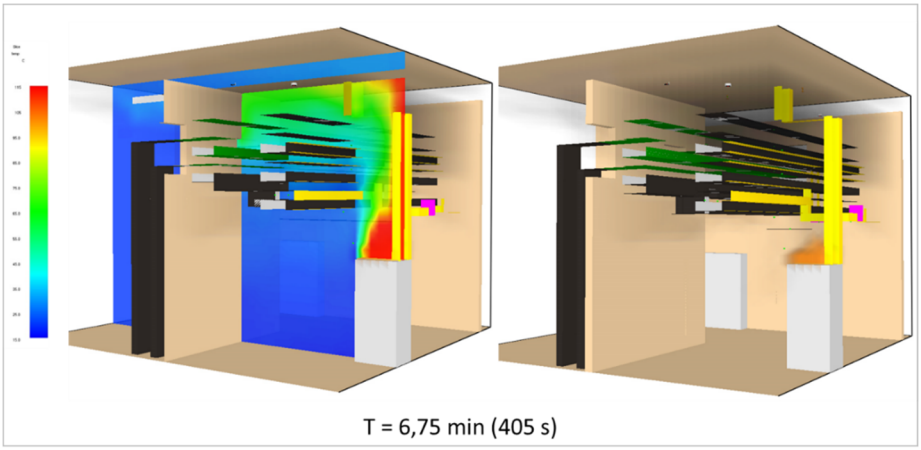
4.2. INCENDIO MÁXIMO ESPERADO

El incendio máximo esperado partirá de las condiciones de contorno establecidas y de los casos de incendio con factor de severidad del P98 (tabla 5.1). Las simulaciones de realizarán contando con la actuación de los sistemas de detección y extinción, y se valorará el cumplimiento con los requisitos prestacionales.

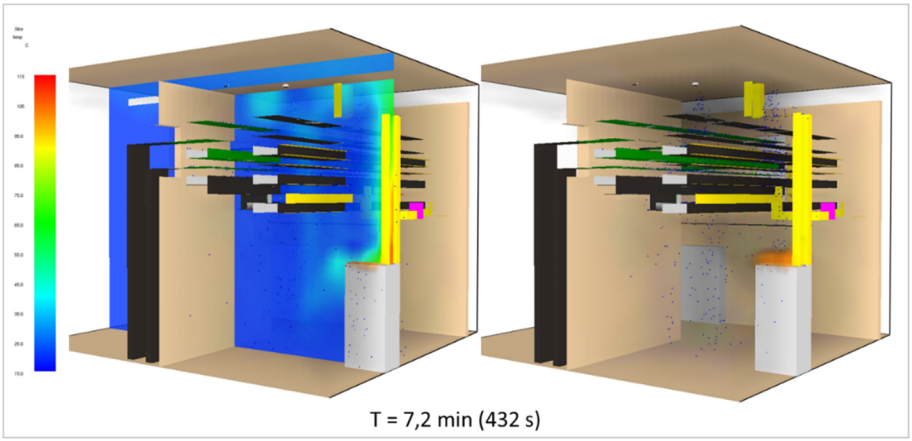
4.2.1. Incendio máximo esperado caso 1

Las condiciones iniciales son la tasa de liberación de calor especificada en la tabla 4.1, y los medios de detección y extinción operativos.

La simulación se realiza teniendo en cuenta la incertidumbre en los tiempos de detección. Los cálculos de incertidumbre se detallan en el anexo C y los tiempos de detección de los 6 detectores oscila entre 266 s y 335 s. La evolución del incendio teniendo en cuenta la activación manual de los rociadores, es la representada en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

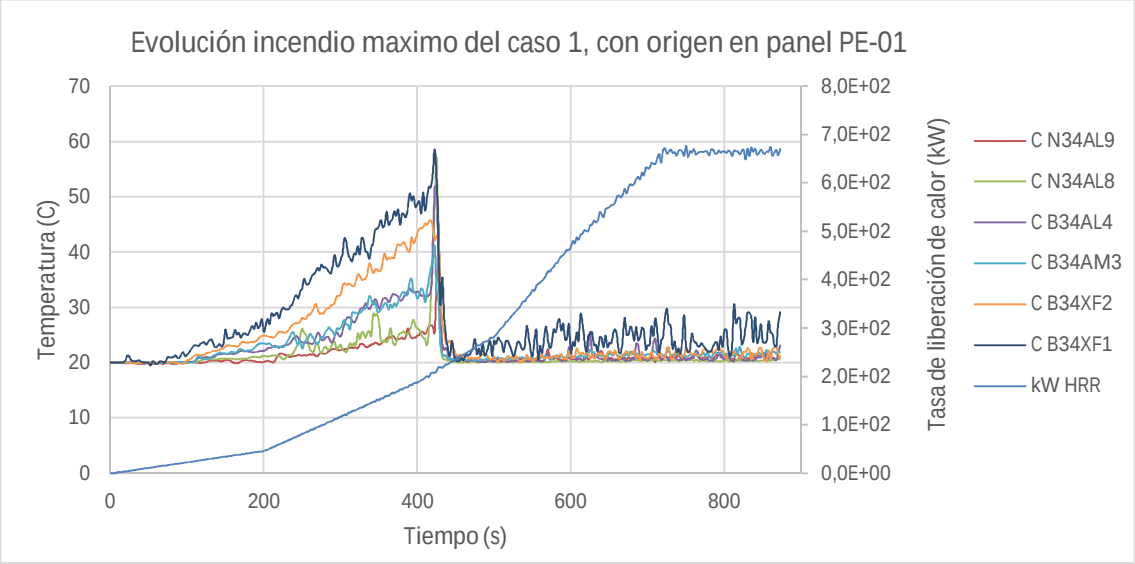


F IX Figura 4.3. Temperatura y evolución del fuego en instantes previos a la activación de los rociadores. La escala de temperaturas tiene valor máximo T = 115 °C.



F X Figura 4.4. Temperatura y efecto del agua de extinción instantes después de la activación de los rociadores. La escala de temperaturas es la misma que en la figura anterior 4.3.

Se puede observar que las bandejas del haz sur correspondiente al tren B, no alcanzan temperaturas críticas. Así mismo, como se comprueba en los cálculos de propagación, el tiempo para que exista fallo eléctrico y/o propagación, ya sea por temperatura o por flujo de calor incidente, es de más de 1200 s.



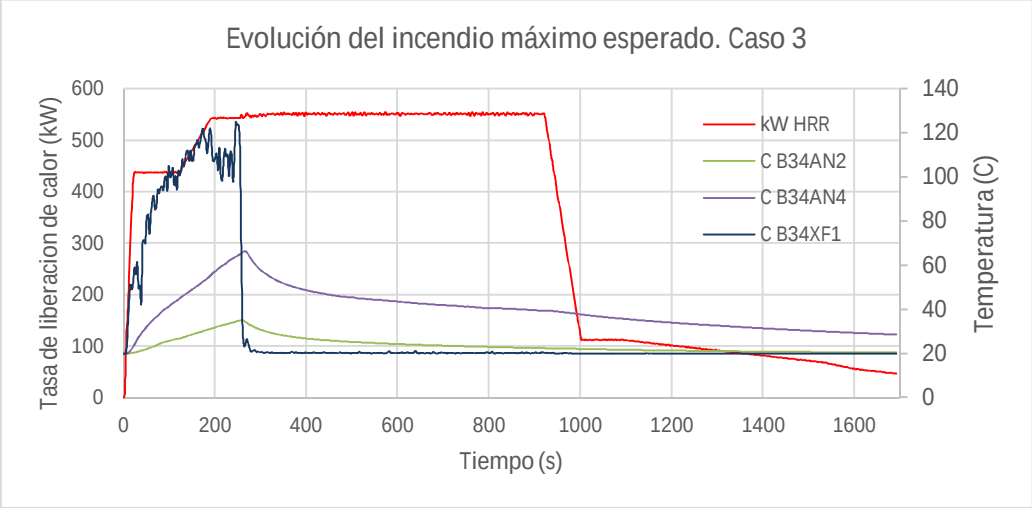
F XI Figura 4.5. Evolución del incendio máximo esperado en el caso 1.

La validación del modelo se detalla en el anexo C, y los resultados indican que la configuración de los sistemas de PCI **cumple** con los **requisitos prestacionales** al no existir propagación alguna a través del haz de bandejas cercano al fuego, y por lo tanto no conduce a ningún suceso iniciador.

4.2.2. Incendio máximo esperado caso 3 con origen en actividades de corte y soldadura.

En el caso de incendio provocado por actividades de corte y soldadura, la generación de hollín es más rápida. Los tiempos de activación de los detectores de humo oscilan entre 21 s y 69 s teniendo en cuenta los cálculos de incertidumbre detallados en el anexo C de validaciones.

Teniendo en cuenta el tiempo de reacción y activación manual de los rociadores se desarrolla la evolución del incendio que se representa en el siguiente gráfico.

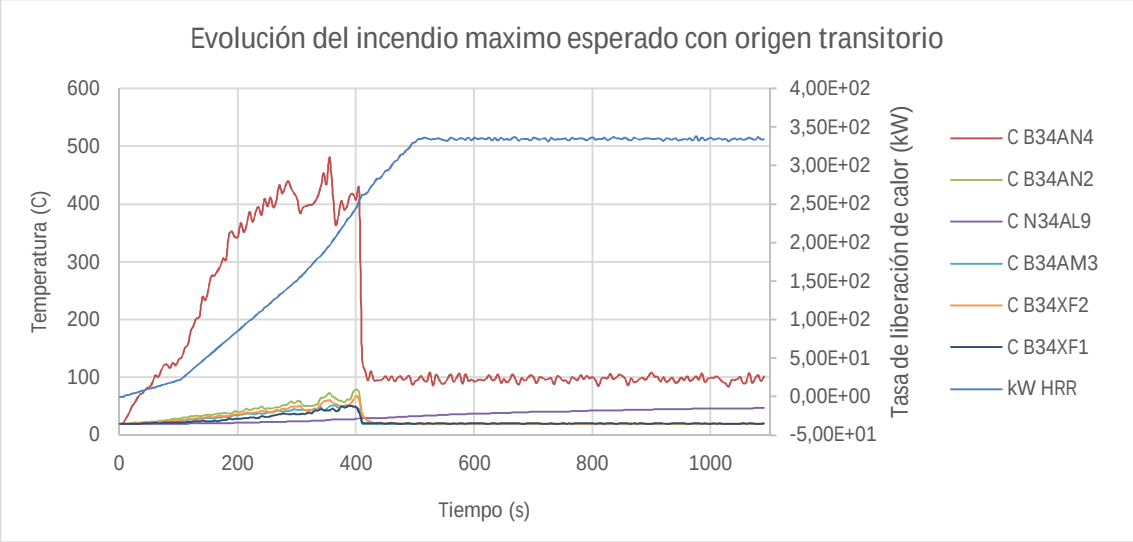


F XII Figura 4.6. Evolución del incendio máximo esperado en el caso 3.

Se puede observar que no se alcanzan temperaturas críticas en las bandejas horizontales que conectan las bandejas verticales con el haz de bandejas del tren B. De modo que no se da crédito a la propagación. La evaluación del daño únicamente involucra a las bandejas verticales. Por lo tanto, se cumplen los requisitos prestacionales.

4.2.3. Incendio máximo esperado en el caso 4 con origen en combustible transitorio.

El caso 4 tiene su origen en combustible transitorio con severidad P98 y cuenta con una tasa de liberación de calor de 317 kW. La evolución del incendio se representa en la siguiente figura.



F XIII Figura 4.7. Evolución de la tasa de liberación de calor y temperaturas en bandejas horizontales expuestas en el incendio máximo esperado del caso 4 con origen en combustible transitorio.

Se puede observar que la bandeja horizontal HA0N01[3] alcanza valores críticos de temperatura antes de que se activen los rociadores. Sin embargo, el tiempo de exposición es inferior al necesario para que se de crédito a la propagación hacia el haz de bandejas del tren B. La evolución del incendio sin actuación de los rociadores se encuentra detallada en el anexo C de validación de resultados y cálculos de propagación.

Se cumplen, por lo tanto, los criterios prestacionales de seguridad.

4.2.4. Incendio máximo esperado en el caso de origen en actividades de corte y soldadura sobre combustible transitorio

La evolución del incendio es la misma que para el caso 4 de combustibles transitorios, de modo que se aplican los mismos resultados. Únicamente se tendrá en cuenta este escenario para el cálculo de frecuencias y el cálculo del margen de seguridad.

[3] La bandeja horizontal HA0N01[3] une la bandeja vertical VA0S02 con la bandeja horizontal AH0E01, que es la de menor altura del haz de bandejas por donde se canalizan cables correspondientes al tren B.

4.3. INCENDIO LIMITANTE

El incendio limitante se calcula para cada caso de incendio mediante la modificación de los parámetros del input hasta conseguir el no cumplimiento con los requisitos prestacionales de seguridad, dentro de valores factibles, aunque sean poco probables.

El criterio para el no cumplimiento de los requisitos prestacionales es que se dañen conducciones del tren A y del tren B provocando un de los posibles sucesos iniciadores asociados a la zona de estudio A-01.

4.3.1. Incendio limitante en el caso con origen eléctrico en el panel PE-01

En el caso de origen en el panel PE-01, la condición necesaria para el no cumplimiento de los requisitos prestacionales es que el incendio se propague hasta el haz de bandejas del tren A, cuyas conducciones (bandejas y conduits) están protegidos con una manta térmica que garantiza el funcionamiento durante 1 hora bajo condiciones de exposición a un incendio.

Los detalles de la modelización de este escenario se desarrollan en el anexo C de validaciones, la cuantificación del daño necesario para que se produzca un incendio limitante se encuentra detallada en el Anexo D. Las conclusiones de dicho estudio indican que para que se alcancen condiciones limitantes es necesario que se den los siguientes sucesos:

- Se produce un incendio en el panel PE-01 con un HRR mayor que 1000 kW.
- No se produce la extinción antes del tiempo estimado de 43 minutos (2600 s).

El tiempo estimado se atribuye al inicio del fenómeno flashover, que consiste en una combustión generalizada conduciendo a la exposición de todo el combustible secundario a temperaturas muy superiores a la crítica. Aunque las canalizaciones del tren A están protegidas 1 hora con manta térmica, esta protección únicamente las recubre dentro de la zona de estudio.

En el apartado C.9 del anexo C se puede apreciar como el incendio se propaga a través de las penetraciones una vez se alcanza el fenómeno flashover. Se debe evaluar, por lo tanto, la posibilidad de afectación a las canalizaciones del tren A antes de lo previsto mediante la protección térmica. A demás, debe tenerse en cuenta la propagación a los recintos adyacentes. Por estos motivos, el tiempo estimado para que el escenario se considere limitante, es el del inicio del fenómeno de combustión generalizada.

La probabilidad de que tenga lugar un escenario limitante se cuantifica como sigue:

$$P_{LF1} = P_i \cdot P_{NS} = 0{,}005 \cdot 0{,}051 = 2{,}53E - 04 \qquad (4.1)$$

Donde P_i , es la probabilidad de que un incendio en el panel queme con un HRR mayor que 1000 kW, y P_{NS} es la probabilidad de que no se extinga antes del instante T = 43 min. El detalle de los cálculos se encuentra en el apartado D.7 del Anexo D.

4.3.2. Incendio limitante en el caso con origen en actividades de corte y soldadura sobre cableado.

Las condiciones para que tenga lugar un incendio limitante con origen en actividades de corte y soldadura se limitan al fallo en la extinción antes del tiempo que se considera crítico. Como se puede apreciar en el apartado C.7 del anexo C, el escenario de incendio generalizado se inicia en el instante T = 42 min. (2500 s) aproximadamente.

El cálculo de la probabilidad de no extinción se detalla en el apartado E.7 del Anexo D. la probabilidad de que se dé un incendio limitante se muestra a continuación:

$$P_{LF3} = P_{NS3} = e^{-0.188 \cdot 42} \cdot 0.05 \cdot e^{-0.102 \cdot 42} = 2{,}57E - 07 \qquad (4.2)$$

4.3.3. Incendio limitante en el caso con origen en combustible transitorio

Las condiciones para que tenga lugar un incendio limitante con origen en combustible transitorio son las siguientes:

- Que se acumule suficiente combustible transitorio como para disponer al menos de una superficie de liberación de calor de 1,02 m² y un HRR de 860 kW, (ver apartado C.9.2 del anexo C).
- Que no se logre la extinción antes del tiempo estimado crítico para que se alcance un escenario limitante. Este tiempo es de 42 minutos según los cálculos del anexo C.

La probabilidad del escenario limitante se obtiene mediante los cálculos realizados en el apartado E.7 del Anexo D, y su valor se puede apreciar en la siguiente expresión:

$$P_{LF4} = P_4 \cdot P_{NS4} = 1E - 05 \cdot 0{,}0502 = 5{,}02E - 07 \qquad (4.3)$$

4.3.4. Incendio limitante con origen en combustible transitorio por corte y soldadura

Las condiciones necesarias para que tenga lugar un escenario limitante en un incendio originado en combustible transitorio por actividades de corte y soldadura son las mismas que en el caso anterior de combustible transitorio.

La probabilidad de fallo en la extinción es diferente y su cálculo se detalla en el apartado E.7.4 del Anexo D.

La probabilidad de que se dé un incendio limitante con origen en combustible transitorio por actividades de corte y soldadura es:

$$P_{LF6} = P_6 \cdot P_{NS6} = 10^{-5} \cdot 2{,}57 \cdot 10^{-7} = 2{,}57E - 12 \qquad (4.4)$$

4.3.5. Frecuencia anual de incendio limitante en la zona A-01 y margen de seguridad

La frecuencia anual se calcula multiplicando la frecuencia con la que se origina un incendio según tipo y zona por la probabilidad de que se dé incendio limitante según el tipo de origen. Como queda indicado en el apartado E.7.5 del Anexo D, los resultados son los que siguen:

Tabla E.2.1. Frecuencias de incendio limitante en la zona A-01.

Zona A-01	frecuencia de incendio por origen y zona	Probabilidad de incendio limitante	Frecuencia anual de incendio limitante
Cabinas eléctricas	2.30E-05	2.53E-04	5.82E-09
En cable por c & s	5.92E-06	2.57E-07	1.52E-12
Transitorio por c & s	2.28E-05	2.57E-12	5.86E-17
Combustible transitorio	1.33E-05	5.02E-07	6.68E-12

La frecuencia anual de un incendio en la zona A-01 es de 6,5E-05, y la frecuencia anual con la que se produce un incendio limitante en la zona A-01 es de 5,83E-09. En cuanto al **margen de seguridad**, se puede decir que, 1 de cada 11160 veces que tenga lugar un incendio en la zona A-01, éste se desarrollará hasta provocar el no cumplimiento con los requisitos prestacionales.

5. COMPARATIVA ENTRE “FDS” Y EL METÓDO PREVIO “FIVE”

Una de las principales conclusiones que se extraen del presente estudio, es que mediante la simulación computacional se reduce la severidad de los escenarios de incendio postulados. Aunque no se muestran los detalles del análisis de riesgo previo perteneciente a la Central, se puede realizar una comparación cualitativa.

El modelo de propagación FIVE, NUREG 1824, ref. [10] utiliza formulas simples para definir los parámetros de incendio. Éstas consisten en correlaciones, que, aunque están contrastadas, provienen de experimentos generales que no se ajustan a cada tipo de incendio. La consecuencia es que el analista se ve obligado a adoptar criterios de daño y propagación más conservadores para garantizar el cumplimiento de los requisitos prestacionales.

Otro parámetro importante en la comparación de los métodos es la tasa de liberación de calor generada en el combustible secundario, en este caso las bandejas de cables. En los análisis previos de la Central, se aplican los criterios publicados en el documento NUREG/CR-6850, ref.[6], en el cual se aconseja aplicar una tasa de liberación de calor (HRR) de 450 kW/m² en bandejas de cables expuestas a condiciones de propagación.

Sin embargo, experimentos recientes llevados a cabo por el departamento de investigación de la NRC y por el NIST, demuestran que, para cables cualificados, que tienen recubrimiento termoestable, la tasa de liberación de calor es mucho menor, de unos 150 kW/m², aún considerando el máximo llenado de cables permitido. Esto se debe al comportamiento ignifugo

de los plásticos termoestables, que soportan mayores temperaturas, y mayor tiempo de exposición, antes de que se rompan las cadenas de polímeros produciendo la pirólisis.

Por otro lado, el modelo FDS permite ajustar el factor de severidad[4] con más agilidad, mediante análisis de sensibilidad, puesto que cambiar la HRR del modelo no requiere tiempo de programación, a diferencia del modelo FIVE, que para cada intensidad de incendio se debe calcular la evolución del incendio de nuevo.

El modelo FDS también se diferencia de modelos simples en la valoración de los escenarios limitantes, puesto que permite descartar condiciones de incendio generalizado mediante una precisa predicción de la temperatura de la capa de gases calientes.

Como conclusión, cabe destacar que, aunque el método FIVE se puede aplicar en un enfoque basado en prestaciones, puesto que desarrolla la evolución del incendio en función del tiempo, devuelve resultados muy conservadores, que afectan al resultado del APS, y por tanto a la gestión del riesgo. Por otro lado, el modelo FDS permite validar la actuación de los sistemas de detección y extinción, además de obtener valores más realistas en el APS.

[4] Factor de Severidad. Se considera el percentil de intensidad de incendio probable (P0-P98) a partir del cual se produce daño significativo para el análisis probabilístico de seguridad.

6. CONCLUSIONES

La utilización de simulación computacional de incendios para realizar el análisis de riesgo de incendios, en el marco de la normativa NFPA-805, facilita la **mejora** en la evaluación y **gestión** del **riesgo** en las centrales nucleares.

Por un lado, permite ajustar la FDN a la hora de calcular el APS, mediante la optimización del factor de severidad y mediante el cálculo realista de la propagación y el daño a ESCs. Por otro lado, permite aplicar un enfoque basado en prestaciones mediante el cálculo y la validación de la actuación de los sistemas de PCI activos.

Las simulaciones realizadas en escenarios de incendio máximo esperado e incendio limitante confirman el cumplimiento de los requisitos prestacionales de seguridad establecidos en la norma NFPA-805, que complementa al código regulatorio 10 CFR 50.48. Esto significa que los sistemas de PCI pasivos y activos presentes en la zona de estudio protegen las ESCs presentes dentro de los márgenes de seguridad requeridos en caso de incendio.

Por tanto, no es necesario realizar modificaciones en los sistemas de PCI existentes en la zona de estudio.

6.1 SUGERENCIAS EN LA INTERPRETACIÓN DEL ANALISIS DE RIESGO

Aunque el objetivo del presente estudio es realizar un análisis realísticamente conservador, debido a la incertidumbre de algunas condiciones de contorno, y a las limitaciones del propio código, se han adoptado criterios más conservadores que los que permiten aplicar los modelos de FDS. Existe, por lo tanto, margen de mejora respecto al análisis del presente estudio.

La condición de **contorno** que influye en gran medida en los resultados es la ventilación. En el documento de Cálculo de Propagaciones provisto por la Central, la ventilación se considera nula para la zona de estudio A-01. Dicha hipótesis tiene consecuencias determinantes en la evolución de los incendios simulados, pues provocaría el ahogamiento temprano del fuego antes de que pueda desarrollarse, y por tanto, reduciría el daño significativo en la mayoría de los casos.

Dada la falta de información al respecto, se ha reconsiderado la hipótesis de la ventilación, y se ha aplicado una **ventilación natural** mínima a través de las penetraciones de las bandejas de cables. Mediante análisis de sensibilidad, se han obtenido las áreas de ventilación natural que conducen a los resultados más **desfavorables**. Por lo tanto, cualquier modificación que ajuste la ventilación natural a la que existe en realidad en la zona A-01, conducirá a una reducción de la severidad en el riesgo de incendio, lo que supone una reducción de la FDN en la zona.

En cuanto a la **cuantificación** del daño, el criterio utilizado para determinar el **fallo eléctrico** de los cables expuestos a temperatura y flujo de calor es el mismo que el utilizado en el documento de Cálculo de Propagaciones de la Central, como se detalla en el anexo A. Dado que se trata de un criterio más conservador que el que FDS provee mediante el modelo THIEF, ref. [11], cabe la posibilidad de ajustar la severidad aplicando el modelo THIEF siempre que se especifique con más detalle el tipo de cable expuesto.

Otro fenómeno que se ha calculado de manera conservadora es la **propagación**, como se detalla en el anexo c. El motivo se debe a que la geometría simplificada de los cables en el input reduce la superficie de pirolisis disponible en el combustible secundario, es decir, el cableado.

Finalmente, la FDN queda pendiente de calcular, a falta de la documentación relativa al ruteado de los cables. En su lugar, se ha calculado la frecuencia anual en la que se produce un escenario con daño relevante a ESCs para cada origen de incendio. Este resultado tiene carácter orientativo y no es vinculante con el input en el APS.

6.2 MARGEN DE MEJORA EN UNA FUTURA APLICACIÓN DE SIMULACION COMPUTACINAL PARA REALIZAR EL ANALISIS DE RIESGO DE INCENDIOS

La versión de FDS utilizada en el presente estudio es la versión 5.5.1, como se detalla en el anexo B de verificación. En la versión 6, que es la última facilitada por el desarrollador, se han realizado diversas **mejoras** en cuanto a la precisión de los resultados. Esto supone un sacrificio en la carga computacional de hasta un 50% de incremento en el tiempo de procesado. Una de las razones, para este incremento en el tiempo de procesado, es el tratamiento de las propiedades de las **especies de gas**. La nueva versión asume que el calor específico de las especies de gases varía con la temperatura, y, además, permite personalizar la composición de las especies de gas de los combustibles secundarios.

Las mejoras comentadas permiten realizar una simulación más **realista** del fenómeno de pirólisis, y por lo tanto, permiten simular la **propagación** del incendio de una manera no tan conservadora. No hay que olvidar, sin embargo, que incluso con estas mejoras existe la limitación de la geometría que afecta a la superficie de pirólisis, por lo que en cualquier caso es conveniente validar la propagación con las correlaciones obtenidas en experimentos de propagación de cables, con el fin de garantizar el carácter conservador en los resultados.

Otro aspecto a tener en cuenta, en futuras aplicaciones, es la introducción de casos diferentes en el APS para un mismo origen de incendio. Esto permite ajustar la FDN a unos valores más precisos. El ejemplo más claro es el caso de incendio con origen en combustibles transitorios, el cual causa daño relevante para el APS con bajas intensidades de fuego, pero solo propaga hacia bandejas horizontales con factores de severidad elevados.

Finalmente, otro aspecto a valorar es la caracterización del cableado presente en el recinto. Puesto que aunque todos los cables se consideran cualificados, las propiedades ignifugas de los plásticos termoestables disminuyen con el tiempo, como se demuestra en los programas experimentales CHRISTIFIRE, ref. [12]. Esto podría influir en la tasa de liberación de calor durante el fenómeno de propagación del incendio, provocando aumento en la severidad del mismo.

7. BIBLIOGRAFÍA

DIES, J.; TAPIA, C; PUIG, F.; VILLAR, D; Centrales Nucleares. Programa de formación práctica en el área de ingeniería nuclear mediante el simulador conceptual de central nuclear SIREP 1300 (DFEN-ETSEIB-UPC).

DIES, J.; PUIG, F.; PEREIRA, C.; "Nuclear Reactor Physics Multimedia ", (language: English) v. 4.2, pag. 418, Barcelona, 2010

KEVIN Mc. GRATTAN, RICHARD PEACOCK, and KRISTOPHER OVERHOLT. Fire Research Division, NIST. Fire Model Validation – Eight Lessons Learned.

DOUGAL DRYSDALE. An introduction to fire dynamics. University of Edinburgh, second edition 1999.

YUJI HASEMI, TAZO TOKUNAGA. *Some experimental aspects of turbulent diffusion flames and buoyant plumes from fire sources against a wall and in a corner of walls*. Combustion science and technology, 1984.

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Philip J. DiNenno, Dougal Drysdale, Craig L. Beyler, W. Douglas Walton, Richard L. P. Custer, John R. Hall, Jr, John M. Watts, Jr. NFPA 2002.

8. REFERENCIAS

[1] PFC **Vol.3. Anexo F**-Definición de conceptos de la tecnología nuclear. NERG-UPC, Noviembre 2015.

[2] PFC **Vol.3. Anexo D**- Análisis de la evolución histórica de la normativa de protección contra incendios en centrales nucleares. NERG-UPC, Noviembre 2015.

[3] CSN. Instrucción **IS-30**, revisión 1, de 21 de febrero de 2013, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre requisitos del programa de protección contra incendios en centrales nucleares. Publicada en el BOE nº 63 de 14 de marzo de 2013.

[4]] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Code of Federal Regulations. **10 CFR, Part 50** (Domestic licensing of production and utilization facilities). [http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0048.html].

[5] National Fire Protection Association (www.nfpa.org). Standard **NFPA-805**. Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants.

[6] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Electric Power Research Institute. **NUREG/CR-6850**, **EPRI 1011989**. EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities. September 2005.

[7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, **NUREG-1824**, Vol. 1 (**Main Report**). EPRI 1011999 Final Report. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. May 2007.

[8] National Institute of Standards and Technology. **FDS-Volume 2**. Verification Guide. NIST Special Publication 1018 Sixth Edition. November 26, 2013.

[9] National Institute of Standards and Technology. **FDS-Volume 3**. Validation Guide. NIST Special Publication 1018 Sixth Edition. November 26, 2013.

[10] U.S. Nuclear Regulatory Commission, **NUREG-1824**, Vol. 4. Fire-Induced Vulnerability Evaluation (**FIVE**-Rev1).Final Report. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. May 2007.

[11] KEVIN Mc. GRATTAN. NIST. **NUREG/CR-6931**, Vol. 3 NISTIR 7472. Cable Response to Live Fire (CAROLFIRE) Volume 3: Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) Model. December 2007.

[12] U.S. Nuclear Regulatory Commission, **NUREG/CR-7010**, CHRISTIFIRE, (Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations during Fire).