

Optimización de la inversión económica en PCI mediante la metodología de diseño prestacional en el análisis de la propagación de incendios con FDS (*Fire Dynamics Simulator*) en áreas de fuego de centrales nucleares

J. Salellas

El análisis de los incendios mediante simulaciones *Computational Fluid Dynamics* (CFD) permite conocer la evolución y propagación del incendio en áreas de elevado interés para la seguridad de la central nuclear. Los análisis se realizan en las salas más significativas, como la sala de control, de cables, multicompartimentos.

IDOM ha desarrollado la metodología para realizar simulaciones de incendios teniendo en cuenta el control del humo, la propagación, los niveles de toxicidad, la ventilación, la extinción,... mediante el *software Fire Dynamic Simulations* (FDS). El resultado del análisis muestra la mejor solución para implementar los sistemas contra incendios en cada escenario.

Las herramientas CFD aplicadas a las simulaciones de incendios permiten una mayor resolución del comportamiento del incendio y de los daños a equipos.

Al mismo tiempo, este tipo de herramientas puede reducir el coste debido a un menor impacto en las modificaciones de diseño.

Fire simulation analysis allows knowing the evolution and spread fire in areas of interest within a NPP such as control room, cable room and multi zone compartment among others. Fires are a main concern regarding safety analysis of NPP.

IDOM has the capability to carry out fire simulations, taken in to account smoke control, fire spread, toxicity levels, ventilation and all physical phenomena. As a result, appropriate fire protection measures can be assessed in each scenario.

CFD tools applied to fire simulations can determine with higher resolution all damages caused during the fire. Furthermore, such tools can reduce costs due to a lower impact of design modifications.



JORDI SALELLAS SÁEZ

Responsable del Grupo Fire Engineering del Departamento de Servicios Nucleares y director de Proyectos en la oficina de Barcelona.

IDOM

Master en Fire & Safety Engineering (2015), Ingeniero Naval especializado en sistemas y propulsión del buque (2012) y Ingeniero Técnico Industrial especializado en Mecánica (2009). Cuenta con 6 años de experiencia profesional dentro del sector CFD, 5 años con experiencia de ventilación e incendios en túneles y 4 años en el sector nuclear. Especialista en incendios y ventilación mediante simulación computacional (CFD).

Coautores:

JAUME VALLS, IMANOL ZAMORA, MARCO FABBRI, CLARA COLOMER, BELÉN HERMOSA, RAFAEL CASTILLO, JORGE FRADERA (IDOM), ALBERTO MACHADO (ANAV).

INTRODUCCIÓN

La evaluación y la experiencia operativa ganada en diversos incidentes acontecidos en centrales nucleares han demostrado que los incendios y explosiones tienen un elevado potencial de afectación en la seguridad de las centrales nucleares. Un incendio puede ocurrir durante la construcción, la operación o el desmantelamiento, por lo que es importante la protección de incendios [1].

La ingeniería del fuego desarrolla los sistemas de protección contra incendios según cálculos probabilísticos, analíticos o prestacionales. Los estudios prestacionales pueden realizarse con herramientas de cálculo numérico CFD (*Computational Fluid Dynamics*) mediante simulación de incendios con el programa FDS (*Fire Dynamics Simulator*), que permite conocer la evolución y la propagación

del incendio con el fin de determinar las condiciones de habitabilidad del área de fuego a estudiar y el daño causado a los sistemas y los equipos con el fin de conocer la afectación de la seguridad en la central, con mayor precisión y resolución que usando otras metodologías de cálculo.

OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El objetivo del análisis de la propagación de incendios mediante simulación CFD con el programa FDS identificar los equipos afectados y determinar la habitabilidad en las áreas de fuego según los incendios postulados.

La simulación con FDS permite conocer la evolución y propagación de la llama y el comportamiento del humo en un instante de tiempo, determinando con exactitud el instante en que se produce daño por radiación o

temperatura a los equipos y la operatividad según el nivel de toxicidad y temperatura del área de fuego.

Los orígenes de incendio postulados se clasifican en incendios en cabinas eléctricas, en combustibles transitorios ubicados en el suelo, y en bandejas de cables.

Objetivos

- Instante en que se produce daño a equipos.
- Instante de pérdida de habitabilidad en la sala de control.
- Propagación del incendio a otros materiales combustibles.
- Optimización de la inversión económica.

Alcance:

- Evolución y propagación de la llama y humo.
- Evolución de la radiación y temperatura a equipos para determinar en qué instante se daña un equipo.
- Evolución de la densidad óptica (DO), CO y temperatura a 1.8 m de altura en la sala de control.
- Comparativa FDT con FDS.

MARCO NORMATIVO

La aplicación del diseño prestacional en el análisis de incendios en centrales nucleares nace de la necesidad de implementar la nueva normativa de aplicación (Instrucción IS-30), de la obsolescencia o deterioro de los sistemas y de la cultura de seguridad.

El marco normativo recoge aquellos documentos que se utilizan de guía, normativa aplicable, valores de partida, formas de validación, etc. Es importante definir la normativa que aplica en cada central. La normativa marco para desarrollar el estudio mediante herramientas CFD en la central nuclear la definimos en este caso como:

- NUREG 1934 *Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines* [2].
- NUREG 1824 *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications* [3].
- NUREG/CR-6850, EPRI 1011989, *Fire PARA Methodology for Nuclear Power Facilities, Final Report* [4].
- NFPA 805: *Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants* [5].
- NUREG 1805 *Fire Dynamics Tools (FDTs). Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program* [6].

METODOLOGÍA

Mediante la herramienta de modelización FDS se ha simulado la evolución del incendio, tanto de la llama como de la propagación del humo en cualquier ámbito de una central nuclear, incluyendo, entre otras la sala de control, sala de reparto de cables,... teniendo en cuenta la propagación dinámica del fuego dadas las composiciones de los materiales. El análisis CFD aporta la información necesaria para el análisis de riesgo en cuanto a localización, extensión y propagación del fuego así como la distribución de temperatura, radiación, humos y tóxicos en la atmósfera y en objetos. La simulación en FDS tiene en cuenta la mayor parte de fenómenos físicos asociados al fuego resolviendo la ecuación de Navier-Stokes para fluidos a bajas velocidades, como la turbulencia, el transporte de calor, la dispersión de humos y la flotación de gases provenientes del incendio permitiendo una gran ventaja desde el punto de vista de la predictividad. Los resultados de las simulaciones aportan datos cuantitativos y cualitativos de elevada resolución que permiten obtener resultados fiables siendo una gran herramienta en el campo de la seguridad en las centrales nucleares.

La metodología empleada para la simulación de propagación de incendios mediante FDS se basa en el método de multiescala debido al tamaño, complejidad y nivel de detalle de las simulaciones. El método permite la simulación en detalle de un modelo del incendio postulado y los alrededores a pequeña escala para evaluar y conocer la evolución del incendio y el comportamiento posterior. La simulación en detalle y con mayor resolución, se exporta a la simulación general para aportar mayor fiabilidad y precisión al resultado ya que aumenta el nivel de detalle de la simulación.

Realizada la simulación en detalle, se genera la simulación general para la propagación del incendio en el área de fuego. La simulación del caso general se inicia con el diseño del modelo 3D del área de fuego a partir de la información recopilada. Posteriormente, se procede a la aplicación de las condiciones de contorno, como las propiedades de los materiales, las reacciones de combustión y las condiciones del sistema de ventilación. Una vez creado el caso a simular para cada incendio postulado, se procede al cálculo de la evolución del incendio mediante FDS. La instalación del software ha sido validada siguiendo el procedimiento de validación de FDS. Tras realizar las simulaciones de los casos de incendio

con FDS, se han post procesado los resultados mediante el programa de visualización *Smokeview* con el fin de extraer los datos necesarios para determinar la afectación a los equipos y la habitabilidad en las áreas de fuego. Asimismo y en paralelo al desarrollo de las simulaciones de incendios, se ha desarrollado el análisis para determinar el rango de validez de las simulaciones mediante parámetros normalizados de los incendios según NUREG.

Modelo geométrico del área de fuego

La generación del modelo junto a las simplificaciones geométricas realizadas en el área de fuego tiene por objeto preservar el comportamiento del incendio, manteniendo al mismo tiempo un grado de detalle elevado y realista de las simulaciones operadas a través de FDS.

El área de fuego se ha modelado a partir de planos y visitas a planta para obtener las dimensiones de los elementos que puedan influir significativamente en los resultados y que son de interés para el objeto de la simulación. Los elementos significativos son aquellos con volumen notable, como paredes, puertas y estructuras, y aquellos que incluyen combustible, como cabinas eléctricas, cables y mobiliario. Además, se ha tenido especial detalle en los conductos de ventilación ya que la ventilación de la sala es un elemento importantísimo para la evolución del incendio. En definitiva, se ha puesto particular atención en preservar los detalles presentes en cotas más elevadas y cercanas a las plumas de los fuegos, así como los elementos de estudio, como bandejas de cables y cabinas eléctricas que se han modelado con elevada precisión.

Las simplificaciones de la geometría del área de fuego se han realizado en los elementos con superficies complejas o en aquellos sin influencia sobre la evolución del incendio reproduciendo con fidelidad la geometría real para mostrar los componentes relevantes u objeto de estudio.

A partir de la geometría del área de fuego, se ha realizado la malla de acuerdo a las guías especificadas en los manuales de FDS y NUREG manteniendo la resolución necesaria para asegurar la calidad de los resultados.

Condiciones de contorno del área de fuego

Los resultados de las simulaciones CFD dependen de las bases de partida e hipótesis que se utilizan para realizar un caso de simulación de incendio en el área de fuego a estudiar.

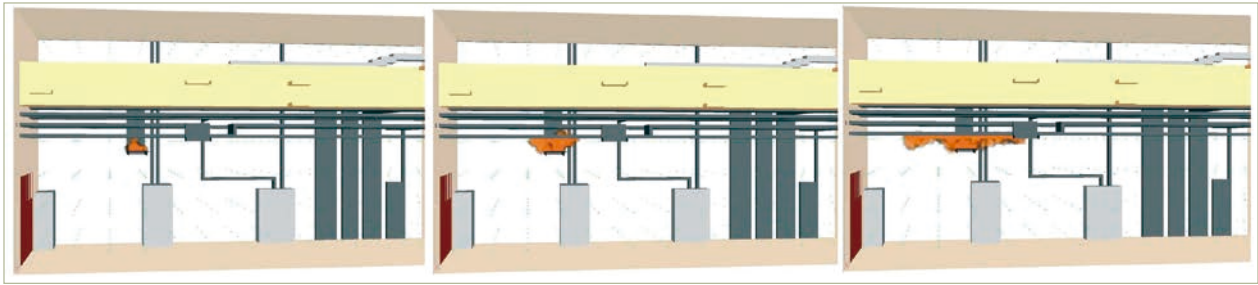


Figura 1. Evolución del incendio (tasa de liberación de calor) con propagación en bandejas de cables mediante FDS.

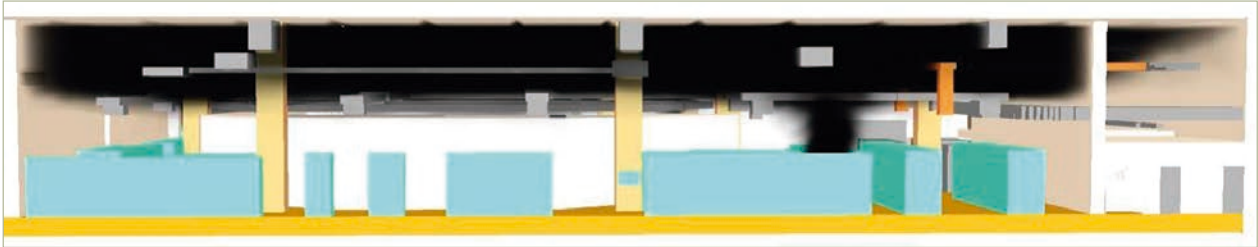


Figura 2. Evolución del humo del incendio mediante FDS.

Así, se introducen las condiciones de contorno con el objetivo de obtener unos resultados realistas. La recopilación de información a partir de planos, y documentos es insuficiente para obtener toda la información por lo que se realizan visitas a planta (*Walk-downs*). La parte más compleja ha sido determinar la tipología de los cables de las bandejas al igual que la posición de las mismas, de los *conduits* y de los conductos de ventilación.

Las condiciones de contorno introducidas en la simulación de incendios con FDS en áreas de fuego de centrales nucleares se clasifican en propiedades de los materiales, condiciones iniciales y transitorias.

La selección del material de los elementos del área de fuego se ha aplicado según el observado durante la visita a planta y siguiendo las indicaciones de la NUREG y las propiedades del mismo se han extraído de la base de datos de FDS. Por ejemplo, las paredes del área de fuego son de material "Concrete", las puertas, conductos y bandejas son de material "Steel", el mobiliario es "Wood" y el material informático "Thermoplastic". El material más difícil de clasificar ha sido el de los cables de las bandejas que, siendo muy variada la tipología, se ha considerado de forma conservadora como "XPE/FRXPE".

Además, el código FDS permite definir la reacción de combustión del incendio en fase gas, como por ejemplo la reacción de combustión de un compuesto mixto de plástico y papel o la reacción correspondiente a los cables.

Las condiciones iniciales y transitorias se especifican para los diferentes elementos del área de fuego

y la atmosfera de la misma. Las condiciones iniciales en el área de fuego y sus elementos se inicializan a una temperatura, humedad y presión determinada según las condiciones ambientales en cada área (por ejemplo una temperatura de 26.7 °C, una humedad del 40 % y una presión igual a la atmosférica). En el caso de simulaciones en áreas de fuego, como por ejemplo en la sala de control, se ha realizado el estudio considerando tres configuraciones de la ventilación ya que puede estar desactivada, en modo de operación normal (climatización) o en modo de emergencia manteniéndose constante durante el tiempo de simulación. Así, se analiza el efecto del movimiento del aire sobre la evolución del incendio en los diferentes modos de operación.

Las condiciones transitorias o de operación se especifican en función del tiempo para cada elemento del área de fuego. La mayoría de los orígenes de incendio postulados según la NUREG se definen de forma transitoria, como es el caso de los orígenes en combustibles transitorios y cabinas eléctricas, en cambio en los orígenes en cables por corte y soldadura conservadoramente se postula constante.

Análisis de los resultados del incendio

Los resultados de las simulaciones de la propagación de los incendios con la herramienta FDS en las áreas de fuego de centrales nucleares se analizan de forma detallada e individual para cada incendio postulado, para cada área de fuego y condición de contorno específica ya que los resultados son difíciles de extrapolar. El incendio se analiza utilizando los resultados propios de la llama (tasa de liberación de

calor) y la evolución del humo. Tras esto, se analizan los criterios de habitabilidad y daño a equipos utilizando los resultados de los parámetros de densidad óptica (DO), temperatura y radiación según se define en la NUREG. El criterio de habitabilidad se considera comprometido cuando la capa de humos desciende a menos de 1.83 m (6 ft) del suelo y su DO es menor de 0.3 m⁻¹ o el flujo de radiación térmica excede 1 kW/m² (equivalente a una temperatura de gases de 95°C). El criterio de daño por fallo eléctrico de equipos (cabinas eléctricas y bandejas de cables) se establece para una temperatura de 330°C o un flujo de potencia radiativa de 11 kW/m². Cabe destacar, que los cables ubicados en las bandejas que sobrepasen el criterio de daño por fallo eléctrico ($T > 330^{\circ}\text{C}$ y $q'' > 11 \text{ kW/m}^2$) producen ignición generando focos secundarios que propagan el incendio.

El incendio se origina en las coordenadas determinadas por el foco postulado y evoluciona siguiendo la rampa de potencia impuesta. En el caso de que existiera propagación, la curva de la tasa de liberación de calor del área de fuego presenta un aumento en la potencia respecto a la rampa impuesta. Hay que comentar que se han efectuado simulaciones con diferentes valores de ceniza, pero la variación de este parámetro no tiene ningún efecto sobre la tasa de liberación de calor.

A medida que avanza el incendio, la temperatura de los elementos colindantes empieza a aumentar y el incendio se puede propagar por las bandejas de cables o materiales combustibles (mobiliario). Por ejemplo,

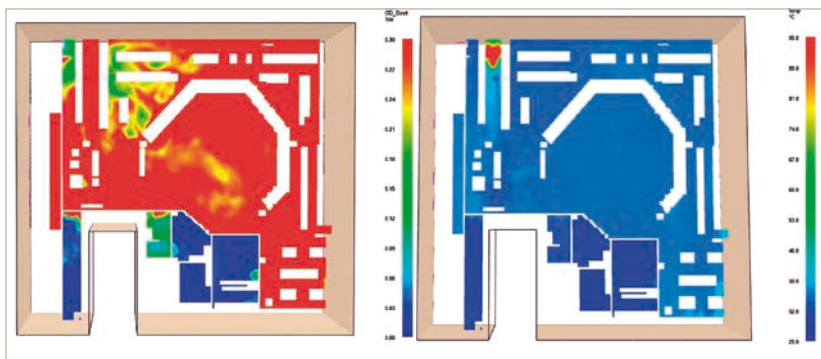


Figura 3. Análisis del criterio de habitabilidad (CO y temperatura) del área de fuego mediante FDS.

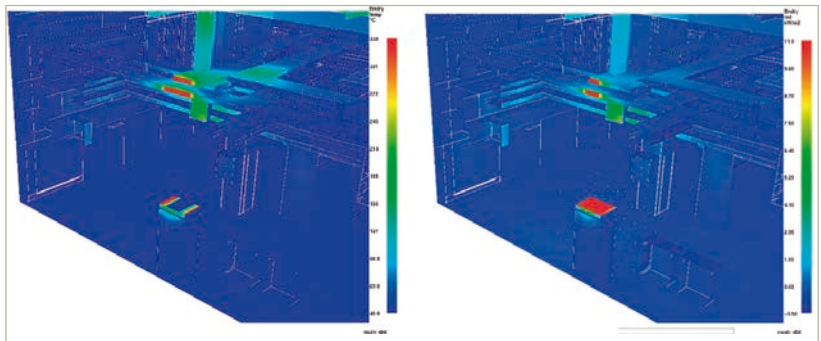


Figura 4. Análisis del criterio de daño (temperatura y radiación) del área de fuego mediante FDS.

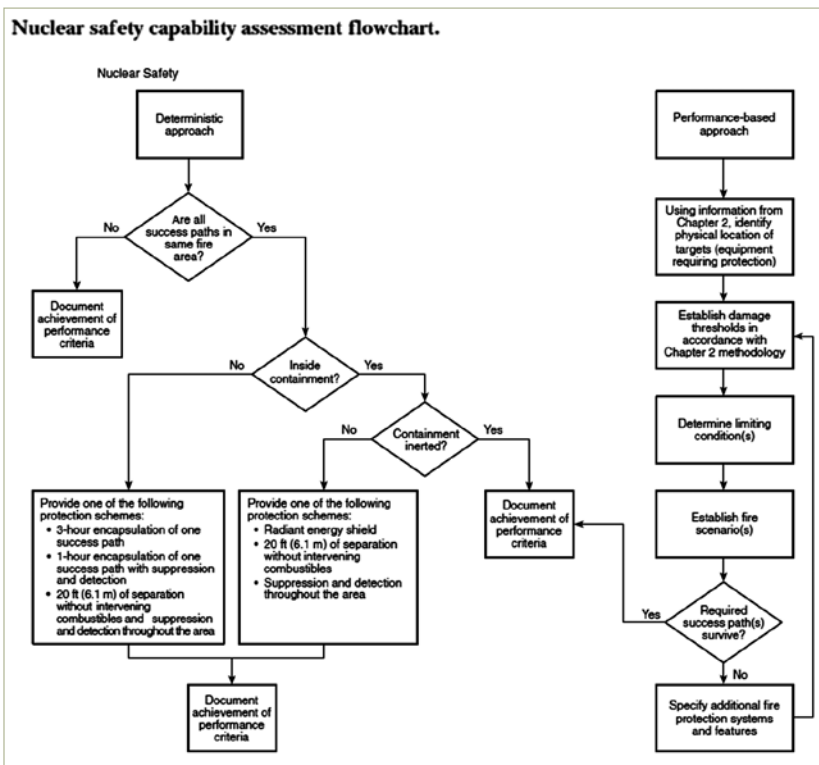


Figura 5. Metodología de evaluación de áreas de fuego según la NFPA 805.

en la Figura 1 se puede observar la propagación del incendio por las bandejas de cables.

El análisis de los humos producidos por el incendio muestra que se acumulan en el techo y la capa de humos va descendiendo a medida que se produce dicha acumulación

hasta llenar por completo el área de fuego. El humo se reparte de forma homogénea en la parte superior del área de fuego formando una capa de humo de la que se distingue el límite solo cuando la potencia del incendio frente al volumen de la sala es de baja intensidad.

En cambio, la capa de humos en incendios con elevada intensidad, donde se genera mayor cantidad de humo o cuando el sistema de ventilación está activado, es difícil de indicar el límite debido a las convecciones y turbulencias presentes en la sala (Figura 2).

La operatividad en las áreas de fuego de las centrales nucleares se basa en el criterio de habitabilidad donde se analizan los parámetros mediante la densidad óptica y la temperatura a una altura de 1,83 metros del nivel del suelo. Los parámetros a analizar están directamente relacionados con la evolución del humo por lo que los resultados de las simulaciones dependerán de los sistemas de ventilación, posición y potencia del incendio, y cantidad de humo generado.

En cambio, el criterio de temperatura con las potencias de los incendios postulados se encuentra muy lejos del límite, a excepción de la zona afectada directamente por las llamas (Figura 3).

La afectación de los equipos de las áreas de fuego de centrales nucleares se basa en el criterio de daño donde se analizan los resultados de la simulación de temperatura y flujo de calor por radiación en la superficie de los elementos a estudiar. Los resultados del parámetro de temperatura y radiación en las superficies de los equipos para identificar los equipos dañados varían en función de la potencia del incendio, la distancia en vertical y horizontal del foco y la geometría del área de fuego. Existe mayor afectación cuando los equipos se encuentran encima de la pluma del incendio, aunque estén a mayor distancia que un equipo situado horizontalmente a poca distancia. En el caso de existir focos secundarios, el incendio se propaga por el resto de materiales combustibles que normalmente, se inician en la zona superior al origen del incendio. La magnitud del incendio aumenta hasta la autoextinción debido a la falta de combustible o de oxígeno (Figura 4).

Análisis de validez

La aplicabilidad de los resultados se determina mediante los parámetros normalizados en el modelo de incendios que permiten comparar los resultados de escenarios a diferente escala mediante las características físicas de cada incendio. La validación de los resultados de las simulaciones con FDS sigue el protocolo de la validación de instalación según el procedimiento de validación del FDS.

El análisis de la consistencia para la validación de los resultados de las

simulaciones de incendios mediante FDS se ha realizado mediante la metodología propuesta en la NUREG 1934 implementando los modelos algebraicos, *Fire Dynamics Tools* (FDT) descritos en NUREG 1805 (Figura 5).

El enfoque general en el uso de los modelos algebraicos es determinar en sucesión:

1. La altura de la llama del fuego para determinar si la llama alcanza algún componente.
2. Las temperaturas del penacho del fuego para determinar si las superficies situadas directamente encima del fuego son propensas a sufrir daños.
3. La metodología es independiente de las condiciones de ventilación del área de fuego. Los resultados obtenidos para las temperaturas del penacho del fuego aplican tanto a los escenarios con HVAC como a los escenarios sin HVAC.
4. El espesor de la capa de humos para determinar si algunos componentes podrían ser dañados y si las condiciones de habitabilidad del área de estudio son respetadas. Se podrá comprobar solamente la casuística con ventilación natural y por tanto sin HVAC.
5. La temperatura media de la capa de humos para determinar si algún componente podría ser dañado. En línea con los parámetros determinados en el punto 3, se analizarán únicamente los casos sin HVAC. Debido al mayor grado de conservadurismo, el no fallo de un componente se podrá extrapolar a la casuística con ventilación forzada (con HVAC).
6. La radiación incidente para calcular el efecto de radiación sin HVAC. Se emplea la ecuación de modelo puntual de la radiación. Adicionalmente, se ha empleado el modelo *solid flame-wind free* para garantizar una incertidumbre limitada.
7. Adicionalmente, se comprueban las densidades ópticas obtenidas con FDS a 1.8 m de altura.

El análisis de consistencia de los resultados de las simulaciones FDS en un área de fuego de una central llevado a cabo con la metodología FDT permite afirmar que:

- En general, hay una óptima coherencia entre los resultados obtenidos con las dos metodologías.
- No se encuentran discrepancias en el análisis por fallo de temperatura entre FDT y FDS, en incendios donde no existe propagación.

- Se han encontrado discrepancias al comparar los resultados con HVAC y sin HVAC:
- Se encuentran algunas incongruencias en el fallo por radiación debidas a la falta de propagación y deformación del penacho del fuego en el análisis FDT.
- Se encuentran incongruencias en la evaluación de las condiciones de habitabilidad por temperatura determinadas a través de la temperatura del *hot gas layer* y su espesor. Con la metodología FDT, en todos los casos sin HVAC, no se cumple el criterio de habitabilidad, mientras que por el análisis FDS sí. Estas contradicciones son debidas a la enorme sencillez del modelo FDT que permite modelar únicamente una habitación vacía de sección regular y con una temperatura del *hot gas layer* constante. La ausencia de componentes, y así de posibles mecanismos de transmisión de calor, no permite la disminución de la temperatura de los humos dando como resultado valores muy elevados.

BENEFICIOS

Los beneficios de los resultados de las simulaciones de incendios aplicando la metodología de la NUREG en diferentes áreas de fuego con incendios postulados (incendio en cabina eléctrica, en cables por corte y soldadura, y en elemento transitorio (bote de disolvente y/o una papelera) se presentan a continuación.

Cabe destacar que las áreas seleccionadas son los casos más desfavorables según los resultados analíticos con el método FDT (*Fire Dynamic Tools*) según la NUREG 1805.

1. Se ha analizado mediante FDS una área de fuego con una superficie de 30 m², con bandejas de cables situadas horizontalmente cerca del techo (a 3 y 4 metros de altura), y bandejas de cables verticales en una de las paredes. Además, existen cabinas eléctricas distribuidas a lo largo del perímetro del área de fuego.

A diferencia de los resultados de los análisis FDT, los análisis de las simulaciones FDS concluyen que no es necesaria la realización de modificaciones de diseño (protección de cables y/o reubicación de equipos), pudiendo preservar las estructuras, los sistemas y componentes (SSC).

2. El análisis de la sala de control de la central nuclear, dentro del marco del Análisis Probabilista de Seguridad (APS), requiere de la

utilización de la metodología de simulaciones de incendios según la NUREG 6850.

Se han analizado los incendios en la sala de control de una central. Los resultados extraídos del análisis de las simulaciones FDS son más precisos en comparación con los análisis FDT, y permiten una evaluación más exacta de las posibles modificaciones de diseño a realizar.

Por otra parte, el análisis del incendio mediante la simulación FDS permite conocer con exactitud el comportamiento del fuego y el humo de forma dinámica y en consecuencia se obtienen los parámetros de temperatura, visibilidad, calidad del aire,... con el fin de evaluar el tiempo disponible de los operadores para la activación de controles y protocolos destinados a mantener la planta en una condición segura.

3. Finalmente, se ha analizado mediante la simulación de incendios con FDS un escenario de incendio en una sala con un elevado número de bandejas de cables de potencia, instrumentación y control.

En este caso, el beneficio obtenido ha sido la optimización de las modificaciones de diseño a realizar. La solución propuesta en este caso ha consistido en la instalación de una cortina resistente al fuego, sin tener que reemplazar o reubicar ningún equipo.

De forma general, en el caso que se identifique la necesidad de realizar una modificación de diseño, existen diferentes medidas contra incendio a considerar dentro del marco de la seguridad activa y pasiva, sin modificar los SSC existentes. Debido al gran número de soluciones aplicables se tendrá en cuenta la opción más viable técnica y económicamente.

CONCLUSIONES

Las conclusiones para un incendio ideal con potencia determinada y sin propagación tienen un rango máximo de afectación equivalente a un cilindro que tiene una altura dos o tres veces su anchura. Es difícil extrapolar los resultados de un incendio tipo a otras áreas de fuego ya que los resultados dependen, no solo de la potencia, sino de la distribución y condiciones de contorno del área de fuego. Los incendios con igniciones secundarias tienen una propagación muy significativa mientras tengan materiales combustibles próximos, como por ejemplo bandejas de cables

y mobiliario de madera. En cambio, los incendios sin propagación tienen un comportamiento similar al caso ideal siempre y cuando se encuentren a una distancia suficiente de cualquier elemento ya que el comportamiento de la pluma se puede ver afectada.

La habitabilidad en el área de fuego es independiente de la posición del foco pero con efectos convectivos diferentes para cada foco. Ello implica una variación en los daños originados aunque los equipos estén a la misma distancia.

La comparativa realizada con HVAC y sin HVAC determina qué configuración operativa del sistema HVAC es más desfavorable para cada área de fuego analizada. En general, se puede considerar que el caso más desfavorable es el que considera el sistema de HVAC parado.

Las comparaciones de los casos con diferente nivel de ceniza, muestran que el humo en los casos de menor ceniza se reparte por toda el área de forma más homogénea y en los casos mayores se reparte de forma más heterogénea. Este efecto no tiene consecuencias sobre la condición de habitabilidad por densidad óptica.

En definitiva, los resultados extraídos de la simulación muestran la evolución del incendio mostrando la propagación entre los materiales combustibles (p. ej.: bandejas de cables) y la evolución del humo para determinar la habitabilidad y la identificación de equipos dañados en el área

de fuego en cuestión. El conocimiento de la evolución y el daño que puede provocar el incendio permiten tomar decisiones tanto operativas como de diseño que ahorren tiempo y optimicen la inversión económica obteniendo soluciones PCI específicas que mejoren la seguridad en las centrales nucleares.

DESARROLLOS FUTUROS

Los desarrollos para la mejora e implementación de la simulación de incendios mediante FDS se dirigirán, en primera instancia, a la mejora del *software* FDS ya que existen limitaciones en la introducción de las condiciones de contorno, cálculo y postproceso. Paralelamente se desarrollan hojas de cálculo que facilitan y ahorran tiempo al analista para identificar los elementos de las áreas de fuego, generar redes de detectores en las áreas de fuego, la escritura de los casos a simular y una base de datos que facilite la preparación y análisis de las simulaciones de incendios.

REFERENCIAS

- [1] International Atomic energy Agency, «Experience gained from fires in nuclear power plants: Lessons learned,» IAEA, Austria, 2004.
- [2] U.S.NRC, EPRI. NUREG-1934 / EPRI 1023259, «Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP Fire MAG),» U.S.NRC, 2012.
- [3] U.S NRC, EPRI. NUREG-1824, «Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear

Power Plant Applications,» Fire Dynamics Simulator (FDS), 2007.

- [4] EPRI/NRC-RES. NUREG/CR-6850, EPRI 1011989, «Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Final Report,» EPRI/NRC-RES, 2005.
- [5] NFPA 805, «Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants,» NFPA, 2001 Edition.
- [6] U.S. NRC. NUREG-1805, «Fire Dynamics Tools (FDTs) – Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program,» NUREG, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

1. NIST - VTT. NIST Special Publication 1019-6 Fire Dynamics Simulator User's Guide. November de 2013. Vol. Sixth Edition. CD: 18447.07.02.
2. U.S.NRC, NISTIR. NUREG-6931, Vol.3 / NISTIR 7472 THERMALLY-INDUCED ELECTRICAL FAILURE (THIEF) MODEL. 2007. CD: 18447.07.02.
3. NIST. NIST Special Publication 1017-1 Smokeview (Version 6.1.5) A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide. November de August 2013. CD: 18447.07.02.05.
4. SPFE Handbook of Fire Protection Engineering. 4th Edition CD: 18447.07.02.01.01.01.
5. VTT. Design Fires for Safety Engineering. VTT WORKING PAPERS 139. 2010. CD: 18447.07.02.01.■