

PISCINAS DE SUPRESIÓN: PARADIGMA DEL EFECTO DE LA TERMOHIDRÁULICA DURANTE ACCIDENTES SEVEROS

Los fenómenos de naturaleza termohidráulica tienen una importancia indiscutible en la evolución de los accidentes severos. El presente artículo argumenta esta afirmación basándose en dos aspectos fundamentales: la preservación de la integridad del recinto de contención y el transporte de los productos de fisión liberados desde el combustible. Para ilustrar ambos, los autores se centran en resultados de estudios propios sobre el papel de las piscinas de supresión durante el accidente de Fukushima. El comportamiento del gas en el punto de inyección y su posterior evolución, la potencial estratificación axial y/o circunferencial del volumen acuoso o el estado de saturación del agua, son algunos de los procesos descritos en detalle cuyo efecto en la actuación de las piscinas como sumideros de masa y energía se discute.

INTRODUCCIÓN

La termohidráulica es inherente a la tecnología nuclear sea cual sea el modo de operación del reactor, desde condiciones nominales hasta accidentales. Durante la operación normal, la evacuación del calor del combustible y su transporte hasta dispositivos de transformación termomecánica de la energía, en caso de reactores comerciales, suponen fenómenos tales como: la refrigeración del combustible en régimen mono o bifásico; el cambio de fase del fluido caloportador (habitualmente agua ligera); la cesión de la entalpía absorbida a su paso por el núcleo; y su retorno a la fase original para ser de nuevo impulsado hacia el núcleo de la central. En caso de accidente, incluso cuando la reacción de fisión en cadena se ha detenido, el refrigerante es incapaz de disipar la energía generada por el decaimiento de los productos de fisión y se produce un desequilibrio térmico que desencadena procesos termofluidodinámicos distintos a los característicos del régimen estacionario. Esta diversidad fenomenológica se enriquece con la entrada de sistemas de seguridad asociados a la refrigeración del reactor en tales circunstancias. Entre ambas condiciones, operación normal y accidente, existe un amplio espectro

de situaciones transitorias donde la termohidráulica juega igualmente un papel decisivo.

Lejos de aminorar su importancia, los aspectos termohidráulicos adquieren un protagonismo sobresaliente en caso de accidente severo. Dos son los motivos fundamentales: en primer lugar, su estrecha vinculación con la potencial pérdida de integridad de la última barrera entre radiactividad y medioambiente (contención); en segundo, su influencia directa sobre el transporte y comportamiento de productos de fisión, desde su liberación en el reactor hasta su escape al entorno, si éste llegara a producirse.

El interés por la termohidráulica, no obstante, no reside únicamente en su relevancia tecnológica. El desarrollo de medidas capaces de prevenir y/o atenuar las consecuencias de los accidentes severos ha exigido la comprensión de fenómenos complejos, muchos de ellos de naturaleza termohidráulica, en condiciones extremas. Baste pensar que, a diferencia de cualquier otro escenario, en éstos la fuente de calor se deslocaliza y se diversifica. La deslocalización es consecuencia de la liberación y transporte de radionúclidos desde el combustible, así como de la licuefacción de materiales en el núcleo y su movimiento dentro y fuera de la



LUIS ENRIQUE HERRANZ

Director de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear.

CIEMAT

Doctor por la UPM y licenciado en Química Cuántica por la UAM; diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios de la Energía



CLAUDIA LÓPEZ DEL PRÁ

Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear

CIEMAT

Doctora por la UPV y licenciada en Matemáticas por la UAM.

SUPPRESSION POOLS: PARADIGM OF THE THERMAL-HYDRAULIC EFFECT ON SEVERE ACCIDENTS

Influence of thermal-hydraulic phenomena on severe accident unfolding is beyond question. The present paper supports this statement on two key aspects of a severe accident: preservation of containment integrity and transport of fission products once released from fuel. To illustrate them, the attention is focused on suppression pools performance and, particularly, on some recent findings stemming from author's research of Fukushima scenarios. Gas behavior at the injection point and its later evolution, potential axial and/or azimuthal stratification of the aqueous body or water saturation state, are some of the processes that more strongly affect the role of pools as a mass and energy sink. They are described and discussed in detail.



vasija. La diversificación está causada por la aparición de procesos químicos exotérmicos capaces de liberar cantidades enormes de energía, a veces en reducidos lapsos temporales; ejemplos son la oxidación masiva del circonio de la vaina y otros materiales metálicos o la propia combustión del hidrógeno (H_2) de ellos resultante. Pero, además, durante un accidente severo acontecen fenómenos de naturaleza polifásica. Tal es el caso, de la descarga en las piscinas de supresión de partículas y vapores radiactivos acarreados por una mezcla gaseosa o de la refrigeración del corium en la cavidad del reactor, donde la convección natural del material fundido coexiste con el transporte de burbujas a su través y la probable presencia de interfases sólidas en las superficies de refrigeración.

Muchos fueron los procesos relacionados con la termohidráulica que determinaron tanto la evolución como el estado final de las unidades accidentadas en Fukushima Daiichi. Un análisis pormenorizado de los mismos se halla fuera del alcance de este artículo. No obstante, Pellegrini et al. (2015) ofreció una visión global de los procesos termohidráulicos clave en el desarrollo de los accidentes y de la capacidad predictiva actual de las herramientas analíticas; Herranz et al. (2015a) complementaron el estudio a través de un análisis del efecto de los sistemas de seguridad en los escenarios, explorando tanto condiciones de actuación factibles (i.e., tasas, composición y estado de los fluidos, etc.), como otras que, si bien habrían sido posibles, fracasan al describir el comportamiento observado en las Unidades.

Este artículo contextualiza, subraya e ilustra el papel protagonista de la termohidráulica durante accidentes severos. Para ello, discute brevemente su efecto en la evolución del accidente y, finalmente, profundiza en los procesos termohidráulicos que tienen lugar en la piscina de supresión de las contenciones Mark I, con referencias explícitas a las condiciones que probablemente concurren en la Unidad I de la central de Fukushima Daiichi.

EL PAPEL DE LA TERMOHIDRÁULICA

La importancia de la termohidráulica durante los accidentes severos es indiscutible. No obstante, su interés

parece difuminarse por el hecho de que en tales circunstancias la atención se dirija al potencial Término Fuente (i.e., material radiactivo susceptible de escapar al medio ambiente). Existen argumentos poderosos que subrayan la relevancia de la termohidráulica, como el hecho de que no exista mejor estrategia de mitigación del Término Fuente que la preservación de la integridad de la contención, cuya pérdida podría estar ligada a fenómenos tales como detonaciones de H_2 , descomposición térmica de la losa de contención o sobrepresión causada por la emisión de gases durante la interacción corium-hormigón, entre otros. Pero, además, el propio comportamiento del material radiactivo, incluida su liberación del combustible, es fuertemente dependiente de las condiciones termohidráulicas vigentes. Ambos aspectos se analizan a continuación.

Integridad de contención

La integridad de la contención se caracteriza habitualmente en términos de presión a través de dos límites: diseño y fallo. En el caso de un reactor de agua a presión (PWR) la evolución en la contención puede representarse conceptualmente tal cual se muestra en la Figura 1. Inicialmente, la presión asciende por la entrada de vapor desde el circuito de refrigeración; en este periodo es improbable alcanzar la presión de diseño. La presencia de superficies a temperatura inferior a la de saturación conduce a la con-

densación de una fracción considerable del vapor de agua y, como consecuencia, a una relajación de la presión. Nótese que esta fase temprana de crecimiento y disminución no tiene lugar en contenciones de relajación de presión tipo Mark I (BWR), como las existentes en Fukushima-Daiichi. Transcurrido un cierto tiempo que depende del tipo de secuencia, de la respuesta de los sistemas, de las acciones del operador, etc., se llega a un periodo donde podrían ocurrir fenómenos con intensa liberación de energía en contención tales como: deflagraciones y/o detonaciones de H_2 , producido durante la degradación del núcleo del reactor (i.e., oxidación de circonio y otros metales); calentamiento directo, en caso de existir una diferencia de presión entre vasija de reactor y contención superior a unos 15 bar; explosiones de vapor, si una vez producido el fallo del fondo de la vasija la interacción instantánea del material fundido y el agua en la cavidad, diera lugar a la generación masiva de vapor; la propia entrada del corium que supone una fuente de calor en contención y la posible oxidación de los metales aún no oxidados; y, en el caso de las contenciones de tipo Mark I (como las Unidades que sufrieron el accidente en Fukushima), la fusión del liner el pozo seco (dry-well), siempre que no exista agua en el fondo del compartimento en el momento de rotura de la vasija.

Todos los fenómenos que precisan la presencia del corium en conten-

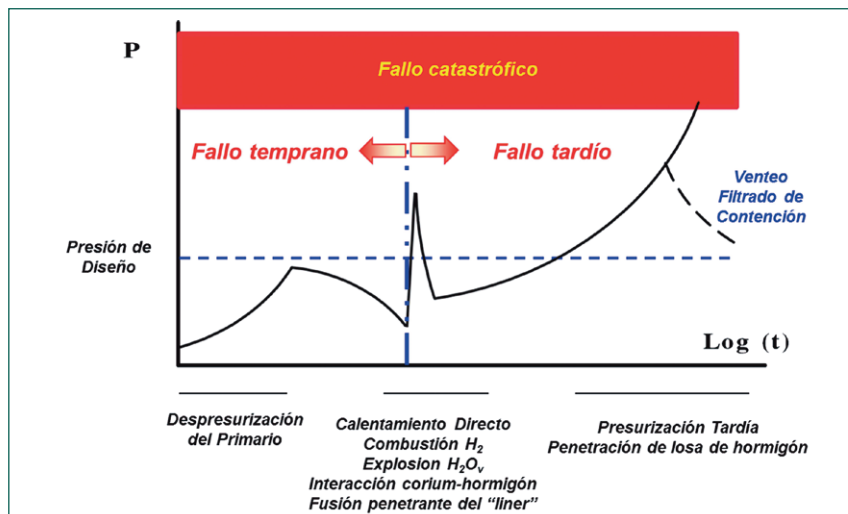


Figura 1. Evolución conceptual de la presión de contención durante un accidente severo (PWR).

ción para ocurrir, no tendrían lugar si la vasija del reactor mantuviera su integridad, tal cual sucedió en TMI-2. En caso contrario, no es extraño rebasar la presión de diseño y acercarse e incluso alcanzar la presión de fallo. Una vez disipada esta descarga rápida de energía mediante transferencia hacia superficies y otros sumideros de calor, comienza propiamente la fase externa (i.e., fuera de vasija) del accidente, donde la descomposición térmica del hormigón debido a las altas temperaturas del *corium* resulta en la generación de gases (i.e., H_2O , CO_2 , H_2 y CO) que presurizan progresivamente la contención; por otro lado, la penetración de la losa de hormigón también podría dar lugar al fallo de la contención.

En resumen, la integridad de la última barrera entre radiactividad y medioambiente depende fuertemente de los procesos termohidráulicos que ocurren en su interior y que son, en buena medida, consecuencia de aquéllos que han determinado el deterioro del combustible en el seno del reactor (i.e., convección natural, descubrimiento de núcleo, pulsos/explosiones de vapor, etc.).

Término fuente

La estrecha relación entre termohidráulica y término fuente queda plasmada en la Figura 2, donde se muestra un diagrama de las realimentaciones entre distintos tipos de fenómenos que ocurren durante un accidente severo; además, se citan algunos ejemplos de las mismas. De modo riguroso, es la propia definición matemática del término fuente, la que establece dicha influencia:

$$J_i(t) = \int_0^t e(t) \cdot I \cdot F \cdot F_1 \cdot \left[\int_0^t s(t_1) \cdot \exp \left[- \int_{t_1}^t e(t_2) \cdot dt_2 \right] \cdot dt_1 \right] \cdot dt$$

Donde J_i es la integral de Término Fuente del radionucleido "i". La integral del término exponencial (dominio t_2) representa la probabilidad del radionucleido de escapar a diversos procesos de deposición a los que está sometido durante el transporte; la segunda integral (dominio t_1), se refiere a la liberación del radionucleido desde el combustible y está estrechamente vinculada a la temperatura y, por ende, a la termohidráulica. Finalmente, la última integral (dominio t) describe el comportamiento de la contención en cuanto a su integridad (i.e., la tasa de fugas).

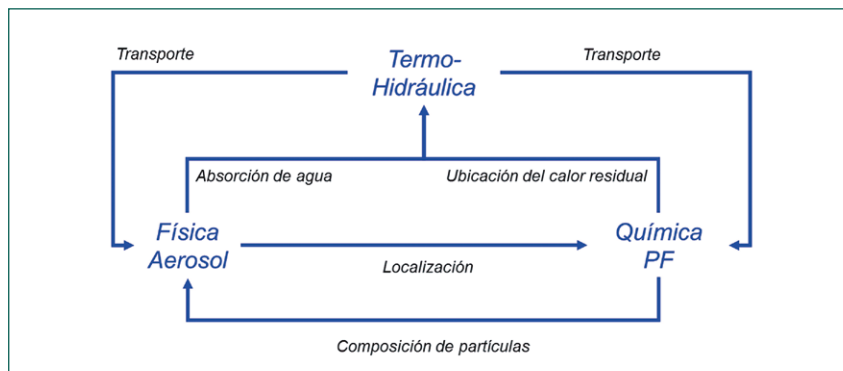


Figura 2. Diagrama de realimentaciones entre fenómenos de transporte, químicos y termohidráulica.

La implicación de la termohidráulica es evidente en mecanismos de retención de productos de fisión como la condensación de vapores, la termoforesis (i.e., arrastre de partículas por gradientes de temperatura entre gas y superficies) o la difusiofesis (i.e., arrastre de partículas en gradientes de vapor de agua entre gas y superficies). Sin embargo, resulta menos evidente en otros de singular relieve. Tal es el caso de la resuspensión de partículas: la caída de material fundido al pleno inferior de la vasija podría generar un pico de vapor que alteraría el régimen de flujo del gas sobre las partículas (i.e., turbulento), logrando que los depósitos de partículas sobre superficies del circuito se movilizaran hacia la contención; como consecuencia, podría producirse una liberación al medio ambiente si en ese instante la contención hubiera perdido la integridad.

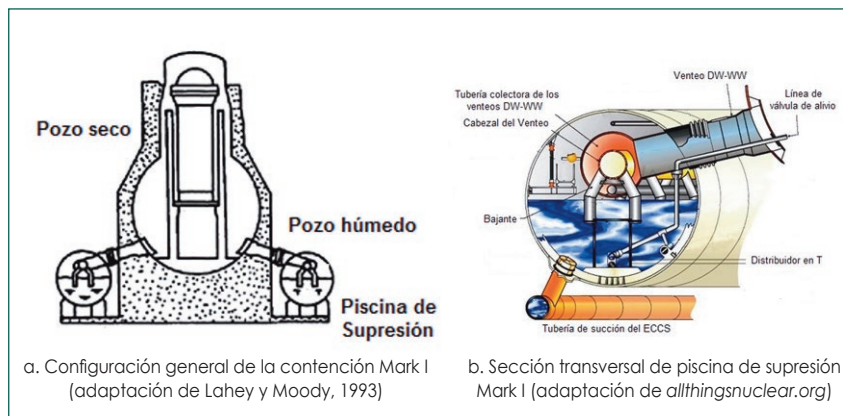
Por tanto, es evidente que una descripción exhaustiva del comportamiento de productos de fisión exige

conocer la termohidráulica, bien como condiciones de contorno de procesos que éstos sufren o, incluso, como mecanismos responsables de fenómenos específicos que determinan la ubicación final del material radiactivo. Esta información es de máxima importancia en caso de desmantelamiento de una central accidentada, como Fukushima Daiichi; prueba de ello es el proyecto OECD BSAF2 (OECD-NEA, 2015).

PISCINAS DE SUPRESIÓN

Muchos de los fenómenos citados en las secciones precedentes ilustran el papel clave de la termohidráulica en la evolución de los accidentes severos. Sin embargo, pocos sistemas conjugan los aspectos discutidos anteriormente de un modo tan paradigmático como lo hacen las piscinas de las contenciones tipo Mark. Éstas son capaces de eliminar cargas mecánicas y térmicas sobre el recinto de contención mediante la absorción de masa y energía procedente

Figura 3. Diagramas simplificados de contención y piscina de supresión Mark I.





del circuito de refrigeración y, además, absorber una fracción sustancial de la radiactividad liberada durante la degradación del combustible en el núcleo. A buen seguro, las piscinas de supresión tuvieron un papel determinante en la evolución de los accidentes en la central de Fukushima Daiichi. Por todo ello, en las siguientes secciones se centra la atención en contenciones tipo Mark I, aunque gran parte de las descripciones y discusiones son extensibles a otros tipos de contenciones con piscinas de relajación de presión. La Figura 3 muestra una visión en planta de la contención Mark I y una sección transversal de sus piscinas de supresión.

Fenomenología

En el transcurso de una secuencia accidental la piscina de supresión recibe vapor de agua y gases incondensables que, una vez degradado el núcleo, transportan vapores y partículas radiactivos. La evolución de dichos gases en el volumen acuoso puede estructurarse en: región de inyección; zona de ascenso de burbujas; e interfase piscina-atmósfera.

Según la velocidad de la mezcla gaseosa, los regímenes de inyección comprenden desde la formación de grandes glóbulos de gas (baja velocidad) hasta la generación de *jets* sumergidos (alta velocidad). Tradicionalmente, la transición entre estos regímenes se asume cuando el número adimensional de Weber ($We = \rho v^2 \cdot \ell \cdot \sigma^{-1}$) supera 10^5 (Paul et al., 1985). A baja velocidad el gas entrante forma una burbuja inicial que crece unida al punto de inyección mientras el gas circula en su interior hasta que su tamaño la dota de una fuerza ascensional capaz de romper su nexo y comenzar su movimiento hacia la superficie. Por el contrario, a alta velocidad, el gas avanza inicialmente en la dirección de la inyección hasta que el momento inicial prácticamente desaparece (en buena me-

rida por fricción con la fase acuosa que le limita) y las fuerzas de flotación flexionan su trayectoria en sentido vertical hacia arriba. Los procesos de transferencia de energía y masa entre fases difieren drásticamente en estos dos regímenes.

La interacción mecánica entre el gas a elevada velocidad y el agua inicialmente en reposo es de tal magnitud que, por encima de determinados valores umbrales del número de Reynolds asociado a la película de líquido en contacto con el gas (Re) y de la propia velocidad del gas ($u_{g,0}$), se produce el arrancamiento de gotas de la interfase y su arrastre al interior del jet. Nada semejante ocurre en el

régimen de glóbulo. La Figura 4 muestra una representación gráfica conceptual de los dominios de los regímenes descritos basado en una reciente adaptación de los estudios realizados en flujo anular a jets sumergidos (Berna et al., 2014).

La transferencia térmica dominante en las proximidades del punto de inyección resulta del cambio de fase del vapor entrante, que supone la absorción del calor latente por el agua de la piscina, y su consecuente calentamiento, y el incremento del inventario de la propia piscina. Este proceso es dependiente de

la superficie de intercambio, mucho mayor en un jet que en un glóbulo. En el caso de jets sumergidos existen múltiples estudios que fueron compilados y revisados por Gulawani et al. (2007); las letras que aparecen en el mapa de condensación (Figura 5) son los respectivos regímenes de condensación encontrados.

Además del régimen de condensación, existen otros factores determinantes de la transferencia de energía y masa entre mezcla gaseosa y volumen líquido, como son la sobresaturación del vapor de agua y el contenido de gases incondensables (i.e., H_2 , N_2 , aire, etc.).

Una vez iniciado el movimiento ascensional, los grandes volúmenes de gas se hacen hidrodinámicamente inestables y se fragmentan progresivamente hasta alcanzar una distribución de tamaños cuya media se sitúa entre 4 y 6 mm y velocidades en torno a los 0,20 m/s (Kubasch, 2001). Esta transición sucede a lo largo de una distancia de aproximadamente 12 veces el tamaño del volumen inicial. A partir de esta cota, el enjambre de burbujas de formas múltiples alcanza la superficie en unos segundos. Durante su trayectoria las burbujas interaccionan mecá-

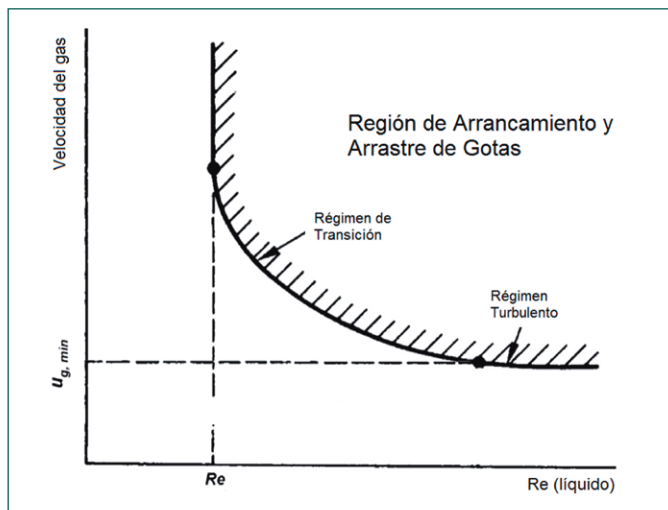
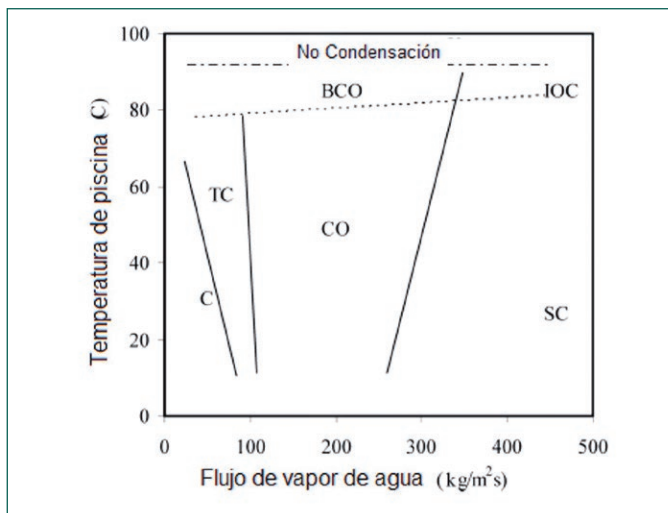


Figura 4. Representación conceptual del arrancamiento y arrastre de gotas (adaptación de Berna et al. 2014).

Figura 5. Mapa de condensación (adaptación de Gulawani et al. 2007).



nicamente entre ellas y con el medio, a través de fenómenos tales como la coalescencia y fragmentación de burbujas, la circulación de la mezcla gaseosa en el interior de la burbuja, la vaporización desde la interfase, etc. Al contrario, el equilibrado térmico de gas y piscina sucede en tiempos del orden de las fracciones de segundo (Moody and Nagy, 1983) y suele considerarse que no existe transferencia térmica entre gas y líquido en la zona de ascenso (Owczarski and Burk, 1991).

Una vez que las burbujas alcanzan la superficie se produce su ruptura y la consiguiente formación de gotas. Esta tiene lugar por dos mecanismos principales (Cliff et al., 1978): la fragmentación de la película líquida sobre la burbuja cuando la presión interna excede la tensión superficial y la desintegración del jet formado en el centro de la superficie inferior de la burbuja (consecuencia de la depresión tras la rotura). El resultado es la incorporación de una población más o menos densa de gotas que aceleraría el intercambio térmico piscina-atmósfera y alteraría los patrones de flujo sobre la superficie del lecho acuoso.

Además de los intercambios térmicos y mecánicos aludidos en los párrafos anteriores, cuando la mezcla gaseosa acarrea partículas y vapores radiactivos, éstos están sometidos a fuerzas que causan su transporte hasta la interfase gas-líquido y su ulterior absorción en el agua. Ejemplos de mecanismos de carácter mecánico son el impacto inercial gota-partícula, en el caso de jets, o la deposición inercial por la acción de fuerzas centrífugas en los lazos de circulación que se forman dentro de las burbujas. Ejemplo de procesos de naturaleza térmica es la difusioforesis. En el caso de vapores la distribución de equilibrio gas-líquido viene determinada por la ley de Henry, y su cinética estaría afectada por fenómenos tales como la nucleación homogénea y/o heterogénea sobre partículas e interfase.

Actuación en accidente

Desde el punto de vista de la actuación de las piscinas de supresión, las secuencias accidentales pueden agruparse según el componente del sistema del que procede la mezcla gaseosa, ya que esto determina la topología de la inyección a través de

grandes tuberías o de distribuidores de flujo. Así, secuencias en las que se produjera una liberación de refrigerante al pozo seco (i.e., accidentes con pérdida de refrigerante, LOCA), conducirían a un aumento de presión en dicho recinto y la consiguiente entrada de la mezcla gaseosa en la piscinas a través de los venteos que comunican pozo seco y pozo húmedo (Figura 3b): inyección vertical en sentido descendente a través de tuberías de diámetro próximo a 0,5 m. Otros accidentes con alta presión en la vasija del reactor (i.e., accidentes con pérdida total de energía eléctrica, SBO), supondrían la apertura de las válvulas de alivio y seguridad del reactor, que conectarían directamente vasija y pozo húmedo del reactor a través de distribuidores que descargan en las piscinas de supresión (Figura 3b); entradas de vapor e incondensables a través de orificios múltiples de orientación variables y 0,01 m de diámetro. La diferencia en las condiciones iniciales del gas (i.e., presión, temperatura, composición, etc.), en el sistema inyector, e incluso en la distribución de las descargas en las piscinas, se traducen en diferencias sustanciales entre escenarios termohidráulicos:

- Los venteos verticales suponen una inyección uniforme circunferencialmente a velocidades lejanas a las necesarias para la formación de jets, en sentido descendente, a una profundidad determinada y con una composición de incondensables inicialmente dominada por el nitrógeno (N_2).
- Los distribuidores podrían resultar en inyecciones en localizaciones específicas con velocidades elevadas que podrían llegar a formar jets (particularmente si la vasija se mantiene a alta presión), de orientación variable, a mayor profundidad que los venteos y con H_2 como único gas incondensable, más allá de los gases nobles una vez se inicia el deterioro del combustible.

No obstante, ha de subrayarse que las condiciones varían a lo largo de una secuencia accidental, de modo que lo dicho podría no ser totalmente generalizable; por otro lado, las diferencias citadas son significativas para los fenómenos descritos anteriormente, pero no son las únicas.

En el caso de la Unidad 1 de Fukushima Daiichi, hubo pérdida total de energía eléctrica y malfuncionamiento del condensador de aislamiento cuya operación intermitente se detuvo poco después de la llegada del tsunami (TEPCO, 2012). Como consecuencia la presión en el reactor aumentó hasta alcanzar el punto de tarado de la única válvula de alivio cuyo funcionamiento permitió mantener condiciones cuasinominales en la vasija durante horas, hasta que finalmente el fondo de la vasija falló en algún momento entre las 5 y las 12 h (TEPCO, 2015). Durante todo ese tiempo el agua del pozo húmedo de la contención recibió vapor de agua en los instantes iniciales y, posteriormente, comenzado ya el deterioro del núcleo, una mezcla de vapor de agua e H_2 . De manera coetánea o ligeramente retrasada con la mezcla de gases, habrían comenzado a llegar también a la piscina los productos de fisión más volátiles (i.e., gases nobles, yodo, cesio y quizás algo de telurio). Fracciones del inventario en el núcleo de otros radionúclidos considerados semivolátiles y poco volátiles podrían haber llegado en etapas ulteriores del accidente.

Uno de los aspectos termohidráulicos relacionados con la piscina de relajación que, probablemente, condicionó de forma sobresaliente la evolución accidental fue la posible estratificación axial y azimutal que algunos analistas postulan (Herranz et al., 2015a-b). De acuerdo con los datos (TEPCO, 2015), sólo una de las válvulas de alivio funcionó durante el accidente. Es decir, la mezcla gaseosa accidental alcanzó la piscina en una sola localización específica del toro: la inyección de masa y energía habría tenido lugar en una determinada posición circunferencial y profundidad en el toro. Dadas las grandes dimensiones de la piscina de supresión ($\sim 1750 \text{ m}^3$), asumir la distribución homogénea de aquéllas no resulta creíble. La importancia de esta inhomogeneidad en el agua provoca que la zona de inyección sea más susceptible de alcanzar la saturación térmica (i.e., la masa líquida implicada en la absorción del calor sensible y del calor latente del vapor queda ostensiblemente redu-

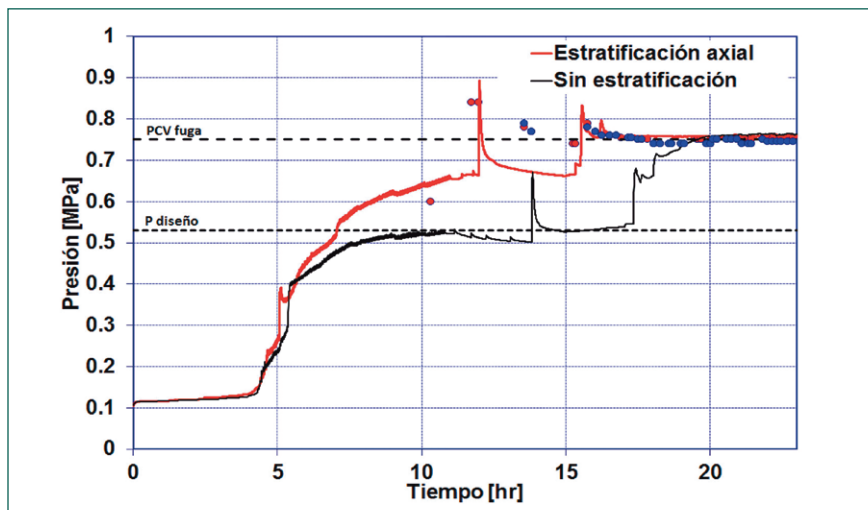


Figura 6. Efecto de la estratificación axial en la presión de contención (Herranz et al., 2015a)

cida). Las consecuencias son directas:

- Aminoración de la eficiencia de la piscina como sumidero de masa y energía; esto es, menor capacidad de condensación de vapor de agua y, en consecuencia, mayores presiones en el recinto de contención.
- Reducción de la capacidad de descontaminación de la piscina por la práctica eliminación de fenómenos tales como la difusioforesis.

Con objeto de ilustrar estos efectos, la Figura 6 muestra las predicciones de presión en contención obtenidas con el código MELCOR 2.1 en dos análisis de la secuencia de la Unidad 1. En ambas simulaciones el toroide se re-

presenta mediante ocho nodos circunferenciales; la diferencia entre ellas reside en la consideración o no de estratificación axial. Las estimaciones más próximas a las medidas son aquellas que suponen una "estratificación axial perfecta" (i.e., el agua situada en cotas inferiores al punto de inyección es ajena a la inyección de vapor). Se puede observar que, en este caso, la presión es superior que si se tuviera en cuenta la masa térmica del agua en la lámina líquida por debajo de la inyección.

El efecto de la nodalización circunferencial referida en el párrafo anterior fue estudiado por Herranz et al.

(2015b). Este trabajo subrayaba el efecto potencial sobre la presión de la contención y se analizaba en detalle la influencia de distintos esquemas de contención en el estado de saturación de la piscina de supresión. La Figura 7 muestra dichos resultados a través de la comparación de la temperatura de la piscina en dos modelos distintos de nodalización de piscina (1 nodo vs. 8 nodos); se aprecia que en la región de inyección del modelo multinodo se llegan a temperaturas muy superiores a la estimada en el caso de 1 solo nodo (aproximación tradicional en que toda la masa líquida actuaría como sumidero), llegando durante algunos períodos a condiciones de saturación o próximas a ella (Figura 7a.). No obstante, el mismo estudio subraya la sensibilidad de tales resultados no sólo al propio esquema de nodalización (número de nodos), sino a las interacciones que han de definirse entre nodos (i.e., longitudes de intercambio; factores de pérdidas; distribución de fases en los caminos de flujo, etc.). La Figura 7b, presenta los resultados para otro modelo de ocho nodos cuando se adoptan hipótesis de intercambio rápidos de masa y energía entre nodos vecinos. El análisis concluye que sólo una nodalización de la piscina coherente con la total de la planta y basada en los patrones de flujo esperados puede merecer cierto crédito. Esta labor, sin embargo, es ardua, no está

Figura 7. Temperatura de piscina según nodalización de las piscinas de supresión (Herranz et al., 2015b).

