

Estudio de la termo-hidráulica del tanque de agua de recarga (IRWST) en el reactor AP1000® durante un accidente tipo SBLOCA con el código GOTHIC 8.1.

Samanta Estévez / ETSIME, Universidad Politécnica de Madrid
Gonzalo Jiménez / ETSII, Universidad Politécnica de Madrid
Cesar Queral / ETSIME, Universidad Politécnica de Madrid
Javier Montero-Mayorga / ETSIME, Universidad Politécnica de Madrid
Dirección: C/Ramiro de Maeztu, 7. 28041 Madrid
Tlf: 913363112

Email: samanta.estevez.albuja@alumnos.upm.es, gonzalo.jimenez@upm.es

El reactor AP1000 se caracteriza por el uso de sistemas pasivos para refrigerar el reactor en caso de accidente. Uno de los sistemas más importantes, es el sistema pasivo de refrigeración del núcleo en emergencia (PXS), el cual, incluye uno de los principales componentes cruciales para gestionar los procesos que tienen lugar en el reactor el tanque de agua de recarga interno (IRWST). Este componente sirve como sumidero de masa y energía del sistema de despresurización automática (ADS) y también como sumidero del intercambiador de calor del Sistema Pasivo de Refrigeración del Calor Residual (PRHR) además de servir como sistema de aporte al núcleo a baja presión. Este componente además tiene dos tipos de venteos que lo comunican con la contención. Por tanto, su comportamiento termo-hidráulico durante el accidente influye de manera notable en la evolución de variables como la presión y la temperatura de la contención.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos con el código GOTHIC 8.1 para la simulación y estudio de la termo-hidráulica del IRWST, del intercambiador de calor del PRHR y del ADS durante el transitorio producido por un accidente tipo SBLOCA, en un reactor AP1000. Analizando los resultados se ha podido comprobar que, una vez que el sistema PRHR comienza a evacuar calor, se establecen en el IRWST corrientes horizontales que ayudan a uniformar la temperatura del mismo, evitando zonas muy calientes que puedan producir ebullición. Además, se ha podido comprobar la influencia que tienen en los resultados los distintos tamaños de malla utilizados, y se ha podido establecer un tamaño de celda óptimo en GOTHIC, balance entre tiempo computacional y precisión en el cálculo, para su incorporación en el modelo completo de contención del AP1000 que se está desarrollando actualmente.

1. INTRODUCCIÓN

El AP1000 es un reactor avanzado de Generación III+, cuya característica más importante es su concepto de seguridad pasiva. Ante un accidente base de diseño, el funcionamiento de los sistemas del reactor no está condicionado por el funcionamiento de sistemas activos como bombas o generadores diésel, ya que basan su funcionamiento en sistemas de seguridad pasivos los cuales utilizan fenómenos naturales tales como la diferencia de presiones, la gravedad o la circulación natural para la refrigeración del núcleo en emergencia.

Entre los sistemas pasivos de seguridad se encuentra el Sistema de Refrigeración Pasiva del Núcleo (PXS) cuya función es refrigerar el núcleo en caso de un accidente de pérdida de refrigerante. El PXS garantiza la Inyección de seguridad al núcleo a diferentes presiones y la evacuación de calor residual del núcleo.

El componente principal del PXS es el intercambiador del calor pasivo PRHR HX (Passive Residual Heat Exchanger), que se encuentra inmerso en el tanque de agua de recarga interno (IRWST) que se encuentra dentro de la contención. Entre las distintas funciones del IRWST se encuentran servir de sumidero de calor durante la operación del PRHR y proporcionar la capacidad de inyección necesaria para inundar el núcleo y posteriormente el sumidero de la contención. Sumergidos en el

interior del IRWST se encuentran además, dos aspersores de despresurización del ADS y dos rejillas de sumidero (*Sump Screen*), véase Figura 1.

El PRHR es un intercambiador que consta de 689 tubos en forma de C, conectados a unos cabezales de entrada y salida. La parte superior, el cabezal de entrada, de los tubos está conectada a una de las ramas calientes del RCS, y el cabezal de salida conecta a la rama fría de la caja de aguas de uno de los generadores de vapor [3].

Cada aspersor de despresurización del ADS consta de cuatro ramas de acero inoxidable inclinadas hacia abajo, situadas a 6.8 m del fondo del tanque. Cada rama tiene múltiples perforaciones por donde se expulsa vapor a alta presión y temperatura.

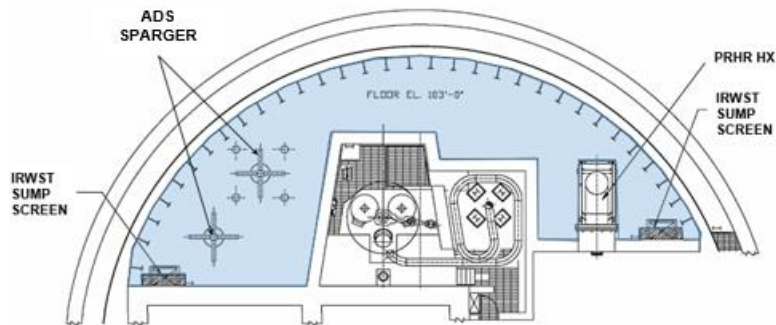


Figura 1. Alzado del IRWST con la ubicación de los distintos componentes

2. MODELO DEL IRWST EN GOTHIC 8.1.

2.1. Geometría y mallado

Para la modelización del IRWST en GOTHIC se han creado dos volúmenes de control. El primer volumen de control simula el agua del tanque y parte del aire superior. La geometría irregular del IRWST se obtiene aplicando seis restricciones geométricas (blockages) al volumen de control. El segundo volumen de control representa la atmósfera de la contención.

Se han creado dos casos con distintos tipos de mallado con el fin de ver cuál representaba mejor la fenomenología del tanque. El primero consta de una malla hexaédrica con celdas de 8 m³ (2 m de lado) en el primer volumen de control y una en el segundo (al ser Lumped) (Figura 2) obteniendo al final 1441 celdas; y el segundo una malla hexaédrica con celdas de 1 m de lado, que al ser el tamaño más pequeño posible (por limitaciones de memoria del código) será la malla de referencia, obteniendo finalmente 9991 celdas de 1 m³ (Figura 3).

Para representar que los dos volúmenes de control se encuentran unidos físicamente se utiliza un *3D connector* (conexión hidráulica entre los volúmenes) en todos los casos, uniendo la malla del volumen del tanque con el volumen de control que representa la atmósfera.

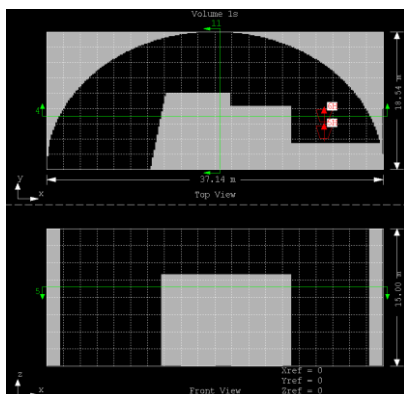


Figura 2. Caso 1: Malla 2 m

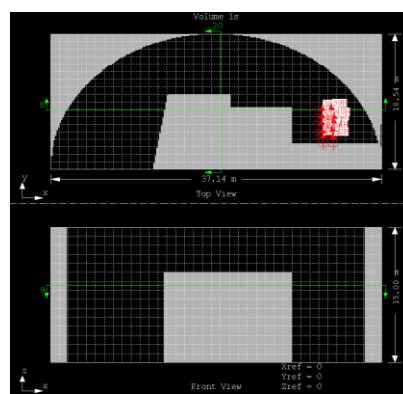


Figura 3. Caso 2: Malla 1 m

2.2. Condiciones de contorno e iniciales

Como condiciones iniciales se establece que el nivel de agua del tanque es de 9.8 metros, suponiendo que se encuentra totalmente lleno. La presión considerada es la atmosférica (101.35 kPa) y la temperatura inicial del líquido es de 48.9 °C. Tanto el aire en la piscina como el volumen que representa la atmósfera tienen las mismas condiciones iniciales: presión atmosférica (101.35 kPa), temperatura inicial de 26.6 °C, humedad relativa en condiciones normales del 60%. Las paredes del IRWST se consideran adiabáticas.

Dado que en GOTHIC es inviable modelar geoméricamente con detalle los 689 tubos del PRHR, se utilizan componentes del código para modelar los fenómenos más relevantes. Por un lado, el calor cedido por el PRHR durante el accidente se representa mediante varios calentadores (*heaters*) colocados dentro del tanque. En cada celda que estaría ocupada geoméricamente por el PRHR en la realidad se ubica un *heater*. La potencia aplicada es la obtenida de una simulación previa realizada en TRACE [2] durante un transitorio de 4445 segundos. Por otro lado la pérdida de carga que sufre el agua al paso a través de los tubos del PRHR se establece en cada celda que estaría ocupada por este. Para su cálculo se ha utilizado la correlación de Zukauskas para intercambiadores de calor [1].

La descarga del ADS se realiza mediante condiciones de contorno de flujo. Su simulación solo se ha realizado para el caso de referencia. Cada aspersor se simula mediante dos condiciones de contorno de flujo, una que representa el vapor y otra el agua descargados. Los datos de entrada de la presión, temperatura y flujo másico son los obtenidos en TRACE [2].

3. RESULTADOS

En esta sección se recogen los resultados de las simulaciones. En primer lugar se analizan los resultados del caso de referencia (Caso 2), y se compara con el Caso 1 para ver qué malla recoge de manera correcta los fenómenos que ocurren en el tanque. A continuación se presentan los resultados del caso de referencia con la inyección del ADS.

3.1. Caso de referencia. Celdas 1 m

Los parámetros analizados son la temperatura y el movimiento del fluido (vectores de velocidad). Las imágenes han sido obtenidas con el programa ParaView tras el procesamiento de los datos obtenidos en GOTHIC. Las imágenes posteriores representan un corte 2D a 10.5 m de la pared sur del tanque, la posición del plano de corte se puede ver en la Figura 8.

En lo referente a la temperatura hay cambios apreciables a lo largo del transitorio. La temperatura máxima alcanzada no supera los 60 °C en ningún punto del tanque y hay un aumento medio de 8 °C. El mayor pico de temperatura no se alcanza hasta a los 800 s.

La temperatura cambia apreciablemente a lo largo del tanque y del transitorio. Cuando el PRHR-HX comienza a transmitir calor el agua a su alrededor comienza a calentarse y sube a la parte superior de tanque, moviéndose a lo largo de su pared semicircular produciendo un fenómeno de 'estratificación horizontal' (Figura 4).

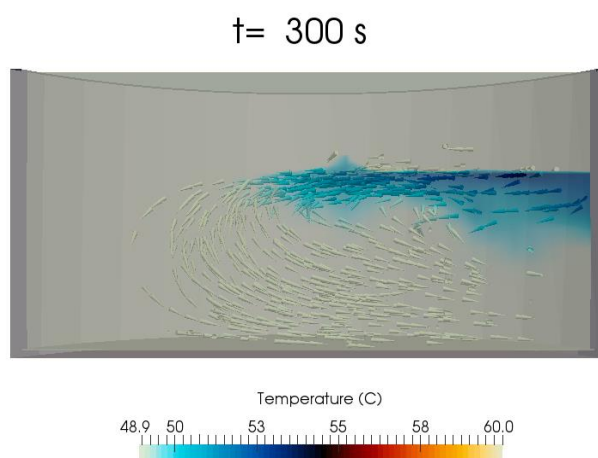


Figura 4. Líneas de corriente y temperatura (300 s)

A medida que pasa el tiempo el agua se sigue calentando hasta que llega a un equilibrio que da lugar a un fenómeno de estratificación vertical, donde se pueden ver temperaturas diferenciadas a varios niveles del tanque (Figura 6). Esta situación se mantiene desde los 1500 segundos hasta que el PRHR deja de transferir calor al tanque. A partir de este momento, primero el movimiento del fluido se vuelve caótico, más tarde la temperatura se homogeneiza y por último deja de haber movimiento del fluido (Figura 7).

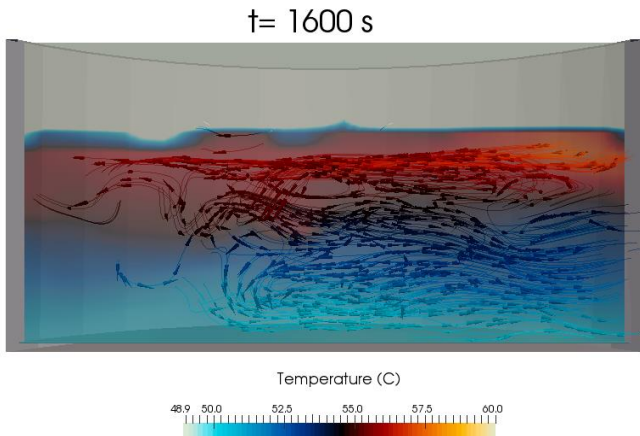


Figura 5. Líneas de corriente y temperatura (1600 s)

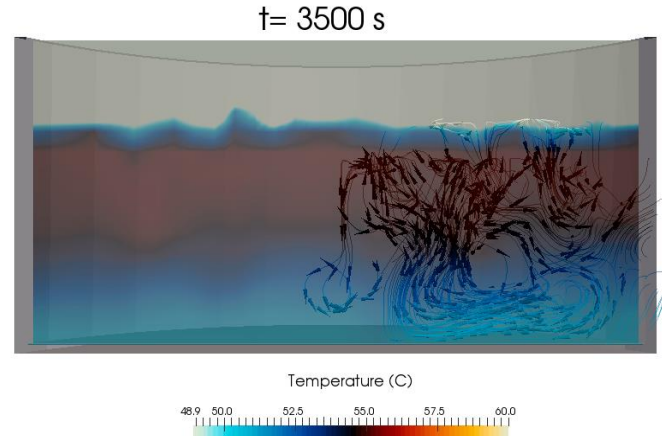


Figura 6. Líneas de corriente y temperatura (1980 s)

3.2. Caso 1. Celdas 2 m

La finalidad de crear varios casos con distintos tamaño de malla es ver a partir de qué tamaño de celda el movimiento del fluido del tanque se deja de apreciar. Se realiza una comparativa con el caso de referencia de los valores de temperatura y líneas de flujo.

A partir de los 400 s se pueden apreciar diferencias con el caso base. El movimiento del agua es más lento, y las zonas más alejadas tardan más tiempo en calentarse, aunque se ve el fenómeno de estratificación horizontal (Figura 7a). Las celdas convectivas se forman, pero la precisión y su distribución es menor, haciendo que la distribución de las temperaturas sea diferente al caso de referencia (Figura 7b). La estratificación vertical se puede apreciar aunque sigue un patrón inestable y desordenado (Figura 7c). Finalmente se ve que la temperatura del tanque al finalizar el transitorio es más homogénea y alcanza valores de hasta 53 °C (Figura 7d).

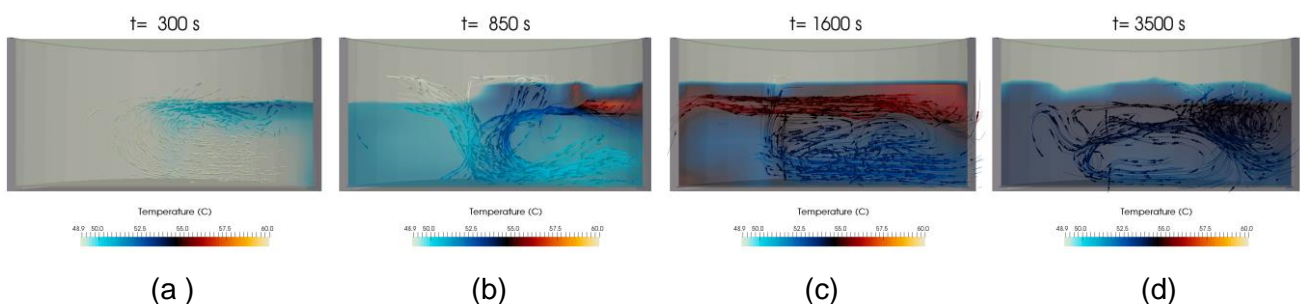


Figura 7. Líneas de corriente y temperatura durante el transitorio del caso 2.

De la comparación se puede concluir que se aprecia el movimiento del fluido en una malla con celdas de 2 m pero con menor detalle que con una celda mayor. El hecho de que en las últimas fases el fenómeno de estratificación vertical se aprecie vagamente y que el movimiento del fluido no siga una tendencia clara hace que la malla pueda no ser considerada para su aplicación en simulaciones que requieran una precisión alta.

3.3. Incorporación de la descarga del ADS y pérdida de carga

El comportamiento del fluido en el tanque es el mismo que en el caso sin ADS hasta los 1350 s aproximadamente, cuando el ADS comienza a descargar vapor y agua a alta presión y temperatura. Antes de comenzar la inyección existe estratificación vertical, pero al producirse la descarga de vapor el agua del tanque se mezcla con el vapor condensado de la inyección, moviendo el agua del tanque y favoreciendo la mezcla, haciendo que la temperatura máxima decrezca.

En la Figura 9 se puede ver como la temperatura es homogénea en todo el tanque (salvo en las zonas donde se produce la inyección). A medida que transcurre el transitorio la temperatura del tanque se va incrementando homogéneamente hasta alcanzar valores de casi 57 °C. Igualmente dado que se está inyectando vapor que posteriormente se condensa el nivel de agua aumenta.

El agua, al contrario que en el caso con ADS, aumenta su temperatura cuando deja de actuar el PRHR.

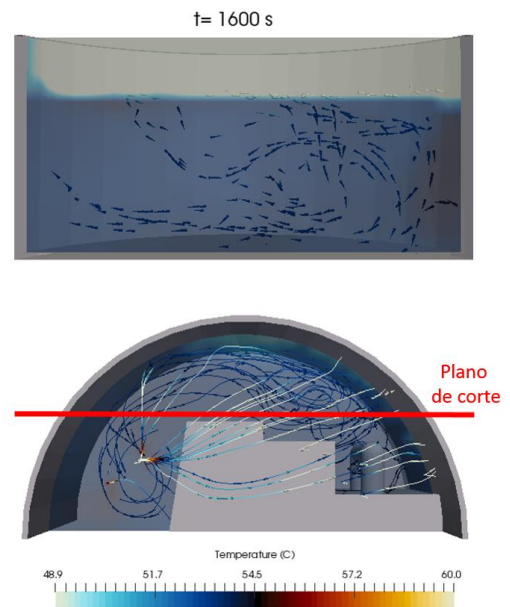


Figura 8. Líneas de corriente y temperatura. Caso ADS. 1600 s

4. CONCLUSIONES

En este proyecto, se ha conseguido simular un transitorio completo tipo SBLOCA en el tanque IRWST del AP1000. Analizando los resultados se ha podido comprobar que una vez que el sistema PRHR comienza a evacuar calor en el tanque se establecen corrientes horizontales que ayudan a uniformar la temperatura del mismo, evitando zonas muy calientes que puedan llegar a ebullición. Además se ha podido comprobar la influencia que tienen en los resultados los distintos tamaños de malla, y se ha podido establecer que un tamaño de celda de 1 m puede ser aceptable para su incorporación en un modelo del AP1000 completo.

Se ha podido ver la influencia de la inyección del ADS en la distribución de temperaturas del tanque así como el movimiento del agua dentro de él, concluyendo que la inyección del sistema ADS favorece considerablemente la mezcla en el tanque.

AGRADECIMIENTOS

El grupo investigador de Ciencia y Tecnología de Sistemas Avanzados de Fisión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) desea agradecer el apoyo de la Cátedra Juan Manuel Kindelán del Consejo de Seguridad Nuclear y del proyecto PYGAS: ENE2015-67638-R (MINECO/FEDER).

REFERENCIAS

1. F. Incropera et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7nd. USA : s.n., 2011. pág. 472.
2. *AP1000 SBLOCA simulations with TRACE code*. J. Montero-Mayorga; C. Queral y J. Gonzalez-Cadelo Agosto de 2014, Annals of Nuclear Energy.
3. Westinghouse Electric Company. *AP1000® European Design Control Document*. 2010.