

Modelado y análisis con TRACE de un transitorio SBLOCA en la instalación ATLAS

D. Blanco, R. Herrero, C. Berna, A. Escrivá, J.L. Muñoz-Cobo
Instituto de Ingeniería Energética
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera 14, 46022 Valencia (España)
Tel.: 0034-963879245, Fax: 0034-963877639, Email: dablade@upv.es

Resumen – En las últimas décadas se ha destinado un esfuerzo considerable al desarrollo del campo de códigos termo-hidráulicos, pudiendo con estos simular el comportamiento de un reactor ante transitorios y accidentes. Acuerdos entre la NRC y el CSN en el área de investigación en seguridad nuclear han dado como resultado el acceso del CSN a los códigos best-estimate de la NRC en fase de desarrollo, como TRACE.

Se están efectuando multitud de series experimentales en diferentes instalaciones a escala de plantas reales, este es el caso de la instalación ATLAS. Esta reproduce el comportamiento de un reactor comercial PWR de 1400MWe. El objetivo de este trabajo es simular el comportamiento de un SBLOCA localizado en la parte superior de la vasija con el código. Así mismo, se realizará un análisis de sensibilidad del modelo para establecer los efectos de distintos fenómenos en el transitorio.

Se ha modelado una rotura de pequeño tamaño en la parte superior de la vasija del reactor para la instalación ATLAS. El transitorio estudiado reproduce una rotura de un tamaño del 1% de la rama fría del reactor escalado. Esta rotura inicia la pérdida de refrigerante y provoca una despresurización en el circuito primario que trae consigo la activación de distintos sistemas auxiliares de inyección de refrigerante. Tras la simulación, se ha realizado el estudio comparativo de los resultados confirmando el correcto funcionamiento del modelo, aportando avances al testeo de las capacidades del código TRACE y su correspondencia con la realidad.

1. INSTALACIÓN ATLAS

La planta experimental ATLAS (Figura 1), es una instalación a escala de un reactor comercial PWR, concretamente del APR-1400 [1,2]. Se utiliza para la investigación del comportamiento del sistema termohidráulico bajo situaciones de accidentes, tanto con como sin pérdida de refrigerante. Simula la totalidad del sistema primario, compuesto por dos lazos (divididos en una rama caliente y dos frías cada uno), y las partes esenciales del circuito secundario. Las elevaciones de la instalación corresponden a la mitad de las dimensiones reales del reactor, el volumen total tiene una dimensión de escala de 1:288 y está diseñado para trabajar en condiciones de plena presión y temperatura. Con el fin de tener en cuenta todos los fenómenos importantes en las ramas calientes, tales como la separación del flujo y las limitaciones por el flujo a contracorriente, en el diseño de las bases de las ramas calientes se ha conservado el número de Froude.

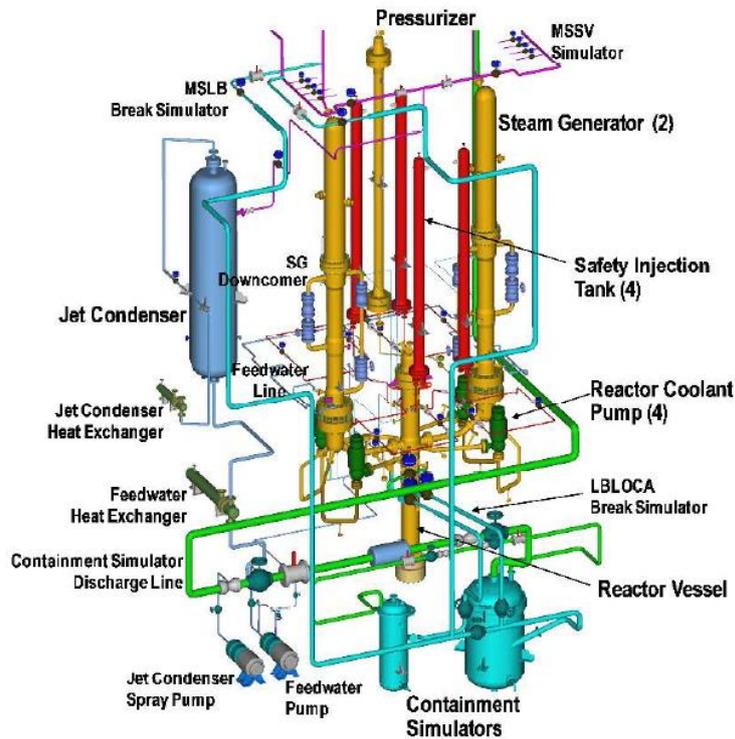


Figura 1. Esquema de la Instalación Integral ATLAS. Escalado: Volumen 1:288 y elevaciones 1:2; Potencia nominal 1560 kW.

2. DESCRIPCIÓN DEL TRANSITORIO ESTUDIADO

El objetivo fundamental del transitorio es investigar los principales fenómenos termohidráulicos que tienen lugar durante una rotura de pequeño tamaño (SBLOCA) que tiene lugar en la vasija del reactor cuando se realizan acciones de mitigación del accidente. Con tal fin, el transitorio estudiado es el test B5.1, el cual consiste en una rotura de 5.41 mm (1% de la sección de la rama fría del reactor APR-1400, que es el reactor escalado por la instalación ATLAS), dicha rotura se encuentra situada en el Upper Head de la vasija de la instalación experimental. Una vista en detalle de la rotura se muestra en la figura 2.

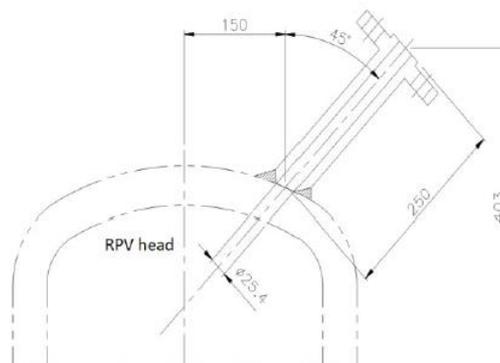


Figura 2. Geometría de la rotura del transitorio ATLAS B5.1.

Las condiciones iniciales de la instalación antes del comienzo del transitorio se resumen en la Tabla 1. Mientras que los principales eventos que tienen lugar a lo largo del desarrollo del transitorio se resumen en la Tabla 2.

Tabla 1. Condiciones iniciales del Test B5.1.

	Circuito primario	<u>Test ATLAS B5.1</u>
Potencia	Núcleo (kW)	1600
Lazos del Primario	Temperatura fluido rama caliente (K)	600.23
	Temperatura fluido rama fría (K)	562.00
	Flujo másico por lazo (kg/s)	3.75
Presionador (PZR)	Presión (MPa)	15.5
	Nivel de Líquido (m)	4.28
Generador de Vapor	Presión del Circuito Secundario (MPa)	7.75/7.75
	Nivel de Líquido del Secundario (m)	5.14/5.14
	Flujo Másico de Vapor (kg/s)	0.3855/0.4074
	Flujo Másico de Agua de Alimentación (kg/s)	0.4284/0.4229
	Temperatura del Agua de Alimentación (K)	491.72/490.78
	Temperatura de Alimentación Auxiliar (K)	296.33/292.07
Sistema de Acumuladores	Presión (MPa)	4.56
	Temperatura (K)	315.06
	Nivel Inicial de Agua (m)	2.63

Tabla 2. Secuencia de eventos relevantes a lo largo del Test B5.1.

Eventos	Condiciones
Rotura (Inicio)	t=0
Señal de Scram	$P_{\text{prim}} = 12.97\text{MPa}$
PZR parada calentador proporcional	Generación Señal de Scram Nivel del PZR menor de 0.9816m
PZR parada calentador de apoyo	Nivel del PZR menor de 0.9816m
Inicio de la curva de decaimiento	Generación de la Señal de Scram
Inicio de la parada de la bombas principales	Generación de la Señal de Scram
Cierre de la válvula de parada principal de vapor del SG	Generación de la Señal de Scram
Cierre manual de la válvula de aislamiento principal de vapor del SG	Generación de la Señal de Scram
Finalización de la alimentación de agua del SG	Generación de la Señal de Scram
Inyección manual desde el sistema HPI en las ramas frías en ambos lazos (1ª acción de mitigación)	Máxima temperatura de salida del núcleo alcanza los 623 K
Inicio de descarga de Acumuladores en ambos lazos	Presión en el primario alcanza los 4.51 MPa
Despresurización del secundario de los GVs por apertura total de las válvulas RV en ambos SGs (2ª acción de mitigación)	Presión en el primario alcanza los 4 MPa
Inicio de inyección AFW en el secundario de ambos SGs	Inicio de la segunda acción de mitigación

Como se detalla en la Tabla 2, el inicio del test lo origina el comienzo de la pérdida de refrigerante por la rotura, que en este caso supone la apertura de la válvula de la rama de descarga. Tras este suceso, la primera respuesta que se produce en la instalación es la señal de Scram, la cual produce la caída de potencia del reactor. La señal de Scram junto con la bajada de nivel del PZR lleva asociados una serie de eventos que se han descrito en la tabla. Como primera acción de mitigación se produce seguidamente la inyección por parte del sistema HPI. Los acumuladores se descargan a continuación. Retomándose finalmente de nuevo la alimentación de agua de los GVs.

3. MODELADO CON TRACE.

Los modelos utilizados en la simulación de este ensayo son transmitidos desde diferentes entidades o heredados de estudios previos antes de realizar el acondicionamiento para la ejecución de este test. La configuración del modelo de partida de la instalación ATLAS nos ha sido facilitada por el grupo Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, los cuales ya realizaron ciertas modificaciones del modelo original, proveniente de la NRC, eliminando algunos errores y habiendo revisado la nodalización de los circuitos primario y secundario.

Con el objetivo de ajustarnos a las condiciones del test B5.1, se han tenido que adaptar los parámetros de control para que cada elemento actúe según el criterio indicado, pero además, con el fin de obtener unos resultados lo más realistas posibles, se han ido realizando cambios en algunos componentes que no respondían de manera fiable y provocaban ciertos problemas o distorsiones en los resultados de la simulación.

Como se ha comentado con anterioridad, se han realizado varias modificaciones y se han ajustado ciertos parámetros, tanto para el funcionamiento adecuado del modelo como para el ajuste de escala entre ambas instalaciones. En primer lugar, se explicarán los cambios realizados desde el modelo heredado para conseguir una simulación correcta, en la que el desarrollo del flujo y el comportamiento de todos los componentes no presenten problemas en funcionamiento estacionario para, posteriormente, ajustarnos a las características del transitorio.

En primer lugar, en el modelo de ATLAS se localizaron problemas con el presionador. Para las condiciones de funcionamiento de la instalación, en su estado estable previo al comienzo del transitorio, encontramos que las condiciones del fluido varían de manera no aceptable dentro de este componente, existiendo una estratificación en la que se podían encontrar variaciones en la temperatura superiores a 10K entre una celda y otra, pudiendo llegar a diferencias de más de 100K entre los extremos del elemento cuya longitud está en torno a los 7,5m. Esto produjo la necesidad de modificar el elemento.

El presionador se componía de dos pipes caracterizadas con las dimensiones del componente real. Existía una pipe inferior en la que se situaban los calentadores y una superior que únicamente incluía una estructura de calor que consideraba pérdidas constantes. Para solucionar los problemas expuestos se decidió sustituir este componente por uno 3D (vessel), de manera que la interacción y mezcla del fluido entre celdas dentro del mismo componente se viera favorecida. Además, se han introducido ciertos controles propios del presionador como el sistema de aspersion o el control de los calentadores.

En la figura 3 se muestra la comparación de la apariencia del componente anterior y el actual en la interfaz gráfica SNAP:

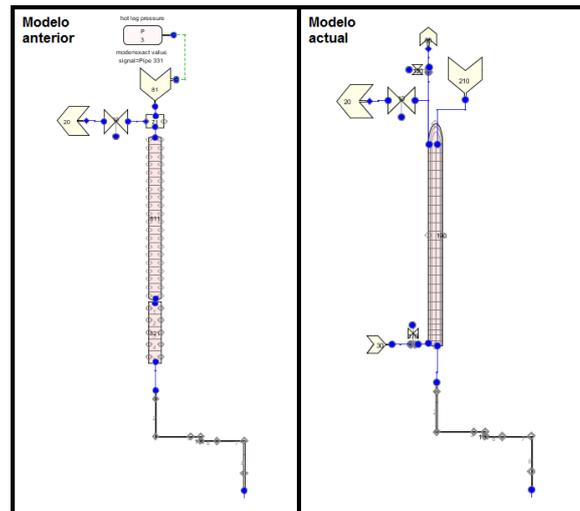


Figura 3. Modificaciones en el presionador para el modelo de ATLAS.

Otros cambios realizados, en cuanto control y estabilización de diferentes elementos se refiere, pueden ser nombrados; como el ajuste de la potencia, un control de estabilización de los SGs en el secundario o la incorporación de estructuras de calor para añadir pérdidas en más componentes del circuito primario. Además, una pequeña modificación ha sido muy relevante en la consecución de tiempos de los eventos del test, siendo esta el estrechamiento de la entrada y la salida de la surge line. Esta consideración viene dada por la utilización de diferentes manguitos para el acoplamiento de este componente, variando la sección de estos de manera dependiente de las condiciones de cada test realizado.

4. RESULTADOS.

Tras llegar a un acondicionamiento adecuado para iniciar el test, se procede a la reproducción del transitorio. Las gráficas presentadas a continuación muestran los resultados obtenidos mediante el código TRACE para las principales variables a considerar. Estas graficas representan la evolución de la presión en el circuito primario y secundario, la descarga por la rotura, la inyección de los acumuladores y de los sistemas HPI y la evolución de las temperaturas de pico de vaina y de entrada en el núcleo.

Como comentario general, destacar que los resultados obtenidos en el test son satisfactorios, dado que, tras realizar las mejoras explicadas en la sección anterior, se ha obtenido una evolución de los parámetros principales que se corresponde con la esperada para este tipo de transitorios. En la figura 4 se puede observar que la presión en el primario consta de una primera fuerte despresurización inicial, seguida de un periodo largo de tiempo en el que la presión se mantiene casi constante (fases de circulación natural y descarga bifásica), seguida de una segunda despresurización (fase de descarga de vapor de alta calidad) y finalmente una última fase donde la presión se mantiene constante en un valor bajo, de unos pocos bares (fase de rellenado del reactor).

La figura 5 muestra el gasto másico a través de la rotura, en ella se aprecia un pico importante coincidiendo con la rotura, para seguidamente disminuir y mantenerse estabilizada en valores de unos 0.2 kg/s. Hacia el final de transitorio esta aumenta de nuevo durante el rellenado del reactor.

Las figuras 6 y 7 muestran las evoluciones de los 2 sistemas de seguridad que actúan a lo largo del transitorio, las inyecciones del sistema HPI y la descarga de los acumuladores. En ellas podemos apreciar como ambos sistemas actúan aproximadamente en los mismos tiempos, dado que ambos comienzan a actuar a lo largo de la segunda caída de presión.

En cuanto a la PCT, decir que como se aprecia en la figura, esta alcanza poco más de los 1000K, no alcanzándose temperaturas próximas a la fusión del núcleo. Como se aprecia en la figura, el máximo de la temperatura de vaina (PCT) coincide con el inicio de las inyecciones de seguridad.

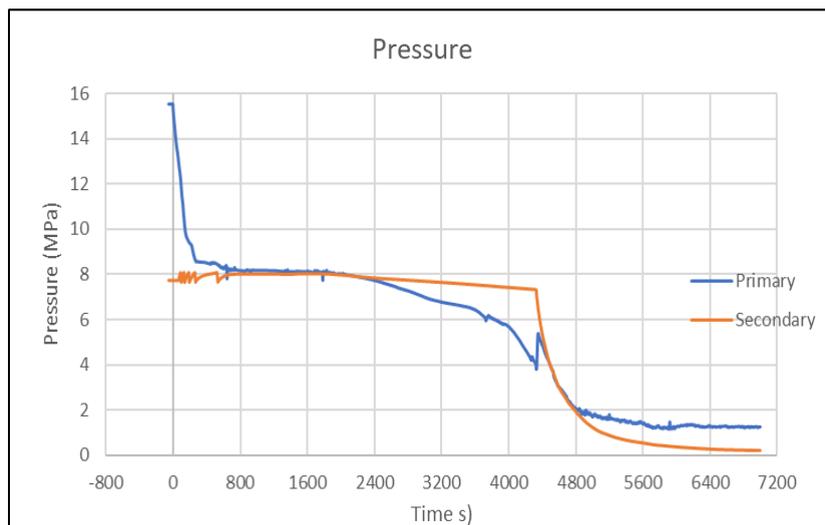


Figura 4. Evolución de la presión en los circuitos primario y secundario.

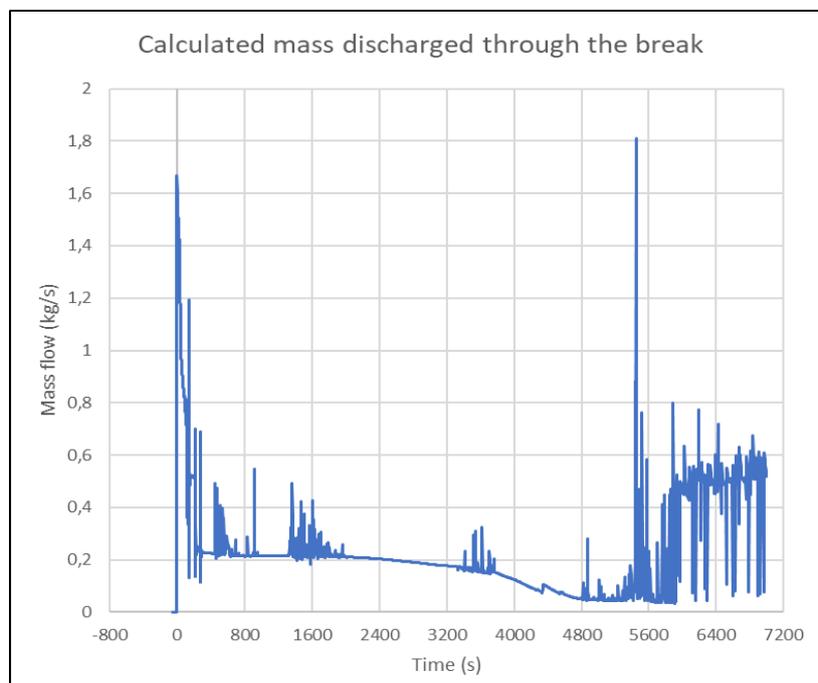


Figura 5. Descarga calculada a través de la rotura.

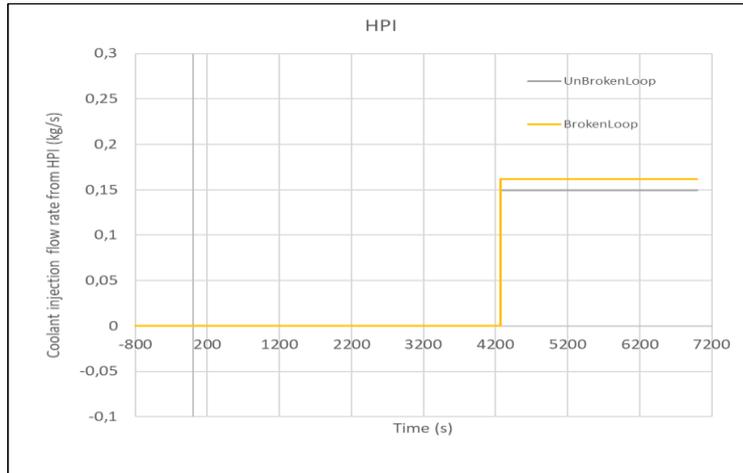


Figura 6. Sistema de inyección de alta presión

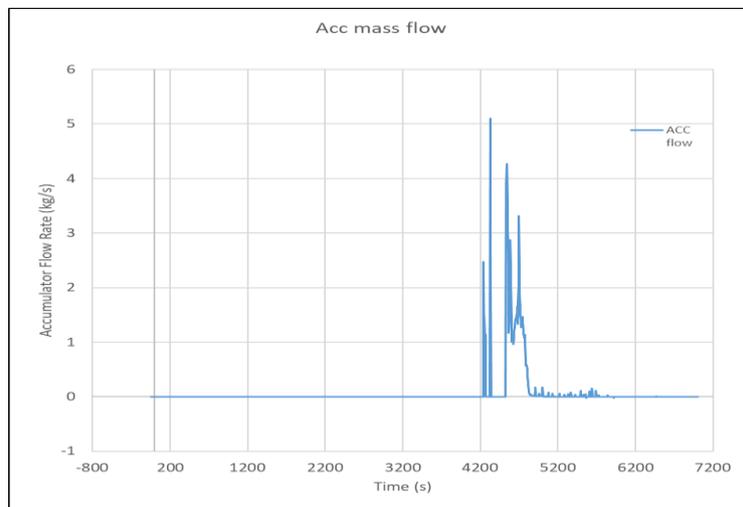


Figura 7. Inyección de los acumuladores.

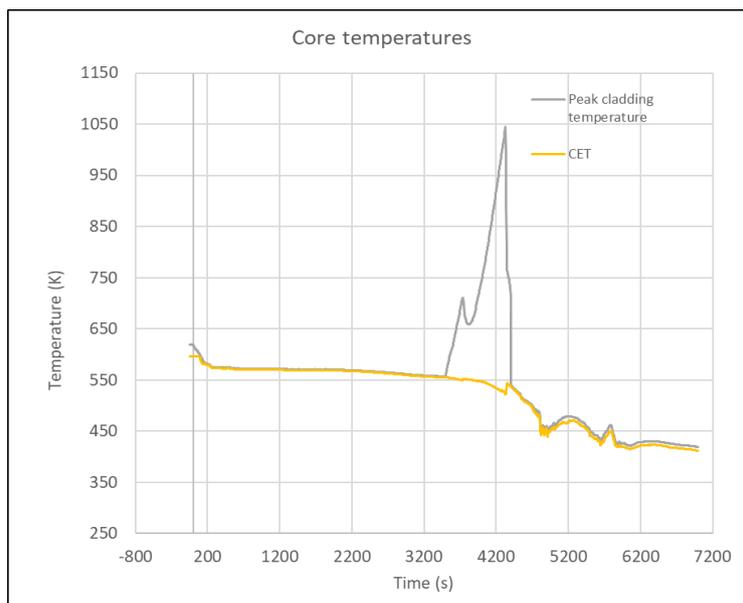


Figura 8. Evolución de la temperatura de pico de la vaina y a la salida del núcleo.

5. CONCLUSIONES.

En general, todos los parámetros tienen una evolución lógica durante el transitorio, según lo esperado para este tipo de transitorios, por lo que podemos calificar los resultados como satisfactorios. Por lo que el comportamiento global del modelo TRACE se puede considerar como adecuado. Cuestión que deberá constarse en próximas fases del trabajo, cuando ya se disponga de los datos experimentales del transitorio en la propia instalación experimental ATLAS.

En cuanto a posibles mejoras del modelo, decir que se pueden enfocar los trabajos futuros centrándonos en la adaptación de varios componentes como, por ejemplo, el aumento en el número de componentes o celdas para algunos elementos. No obstante, la verificación posterior a este trabajo, cuando se disponga de datos experimentales reales, marcará las capacidades del modelo o el margen de mejora del que disponemos. Por el momento, los resultados obtenidos indican que el modelo TRACE actual tiene la capacidad para reproducir el comportamiento de la instalación ATLAS correctamente, como para este transitorio de SBLOCA.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo, proveniente de los proyectos CAMP-OECD, al Consejo de Seguridad Nuclear en colaboración con la NRC.

REFERENCIAS.

1 – Scaling Analysis Report of the ATLAS Facility
KAERI/TR-5465/2014

2 _ OECD/NEA ATLAS Phase 2 benchmark specifications
RELAP/4NT/0000094/000/01

3 - Quick-Look Report on the OECD-ATLAS A4.1 Test: Counterpart Test of Cold Leg Intermediate Break (17%) Loss-of-Coolant-Accident (IBLOCA) in ATLAS
OECD-ATLAS-QLR-08, December 20, 2016
Byoung-Uhn Bae, Kyoung-Ho Kang, Ki-Yong Choi