

INVESTIGACIÓN DEL CIEMAT EN SECUENCIAS SGTR DE ACCIDENTE SEVERO

L.E. HERRANZ - C. LÓPEZ DEL PRÁ - F.J. SÁNCHEZ VELASCO

Unidad de Investigación sobre Seguridad Nuclear (CIEMAT)

En reactores de agua a presión, las secuencias de accidente severo con rotura de tubos del generador de vapor (SGTR, Steam Generator Tube Rupture) son dominantes del riesgo, a pesar de ser sucesos de muy baja probabilidad. Su importancia reside en la potencial liberación de radiactividad que supondrían desde el circuito primario al medio ambiente, sin intervención de la contención. La ausencia de información sobre la capacidad del generador de vapor para atenuar el Término Fuente, ha impedido su consideración en los estudios probabilistas de seguridad y en las guías de gestión de accidentes severos. CIEMAT ha lanzado un programa de investigación teórico y experimental que, vertebrado a través de proyectos internacionales (EU-SGTR y ARTIST), está proporcionando resultados sobre la retención de aerosoles en las proximidades de la rotura en las condiciones más adversas imaginables: ausencia total de agua en el lado secundario del intercambiador de calor. Este artículo describe los objetivos, el planteamiento y los resultados obtenidos (Fase I) y esperables (Fase II) del citado programa. Las actividades experimentales de la Fase I, realizadas en la instalación PECA-SGTR, han revelado una escasa deposición de partículas (inferior al 20% en masa) sobre las superficies de los tubos que rodean a la rotura. Asimismo, el flujo másico de gas a través de la rotura se ha destacado como una de las variables más influyentes, siendo su efecto sustancialmente superior al de otras variables, como la forma y la orientación de la rotura. Por encima de 100 kg/h, un incremento del gasto de gas en el tubo roto conduciría a una reducción de la retención. No menos importante, los ensayos realizados han señalado la importancia de fenómenos tales como la fragmentación y la resuspensión de las partículas. La Fase II está dirigida a confirmar y cuantificar las observaciones de la primera fase y a analizar el efecto de la naturaleza de los partículas. En la vertiente teórica, se está desarrollando un modelo (ARISG) basado en el concepto de filtro. En él se contemplan fenómenos de retención como el impacto inercial y la deposición turbulenta, que requieren una detallada caracterización aerodinámica del escenario. Para ello, se están efectuando simulaciones 3D con herramientas de fluido-dinámica computacional cuya validación se está realizando a través de ensayos planteados dentro de la Fase II del programa. Por otro lado, los primeros estudios realizados han permitido comprender algunas observaciones de los experimentos ya realizados en la Fase I.

Severe accident sequences with Steam Generator Tube Ruptures (SGTR) are risk dominant in PWR reactors, in spite of being very low probability events. Their relevance lies in the potential radioactive release from reactor coolant system to the environment (containment bypass). Lack of knowledge on the steam generator capability to mitigate Source Term has prevented its consideration in probabilistic safety studies and severe accident management guidelines. CIEMAT has undertaken a theoretical and experimental research program that is providing results on the aerosol retention in the nearby of the tube breach under the most credible challenging conditions: total absence of water in the secondary side of the steam generator. This paper describes the objectives, the approach and the obtained (Phase I) and foreseeable (Phase II) results of this program. Its development has been

internationally framed within the EU-SGTR and the ARTIST program.

The experimental activities of Phase I, carried out in the PECA-SGTR facility, showed a low particle deposition (less than 20%) on tube surfaces around the breach. Data highlighted that the gas mass flux effect was substantially more influencing than others, like the ones of breach shape and orientation. Above 100 kg/h, the higher the gas mass flux the lower the retention reduction. In addition, the tests pointed out the potential role that phenomena like particle fragmentation and/or resuspension could play in the scenario. The Phase II of the program will be aimed at confirming and quantifying the Phase I observations and at analyzing the effect of particle nature.

On the theoretical side, a model based on the filter concept is being developed (ARISG). It considers

inertial impaction and turbulent deposition as the main aerosol retention mechanisms. Both require a detailed aerodynamic characterization of the gas flow in the scenario, so that 3D fluid-dynamic simulations are being conducted and validated against ad-hoc experiments of the Phase II. Further than the aerodynamic characterization, 3D simulations are providing meaningful insights into Phase I aerosol tests.

MOTIVACIÓN

El generador de vapor de las centrales nucleares de agua a presión es un intercambiador de calor vertical del tipo carcasa-tubos. Durante su funcionamiento diversos procesos deterioran la interfase entre el primario y el secundario, pudiendo incluso producirse la rotura de algunos tubos. En el caso

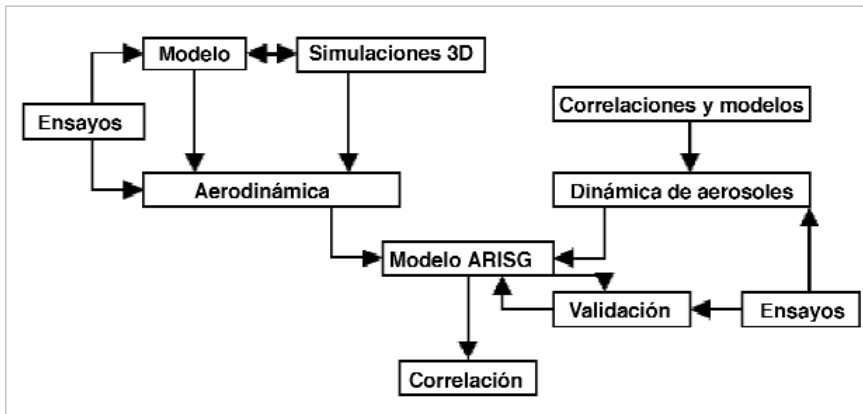


Figura 1. Planteamiento del programa de investigación sobre secuencias SGTR.

altamente improbable de un accidente con fusión de núcleo, el fallo de los tubos supondría una vía directa de escape de radiactividad al medio ambiente. A pesar de ello, la presencia de agua en el lado secundario del intercambiador proporcionaría factores de descontaminación (i.e., razón entre la masa entrante y la saliente del sistema) superiores a 100 (Güntay, 2004). Desafortunadamente, esta capacidad filtrante estaría drásticamente disminuida en ausencia de agua (condiciones secas). Sin embargo, incluso en estas circunstancias, es de esperar que una fracción de las partículas radiactivas transportadas por el vapor de agua entrante desde el circuito primario al secundario, queden retenidas en la superficies de los tubos.

La carencia de una base de datos fiable y completa sobre la atenuación del Término Fuente dentro del secundario del generador de vapor en escenarios SGTR con fusión de núcleo, ha impedido el desarrollo y la validación de modelos predictivos. Como consecuencia, esta capacidad filtrante no se ha tenido en cuenta ni en los estudios probabilistas de seguridad ni en guías de gestión de accidentes severos. A partir del proyecto EU-SGTR del V Programa Marco de EURATOM (Auvinen et al., 2003) y del actual proyecto internacional ARTIST (Güntay, 2004), se están obteniendo resultados experimentales que, junto con los desarrollos teóricos en curso, permitirán efectuar estimaciones de la atenuación del Término Fuente en estos escenarios.

Este artículo describe el programa de investigación sobre secuencias SGTR que, en el marco internacional de los proyectos EU-SGTR y ARTIST, la Unidad de Seguridad Nuclear del CIEMAT está llevando a cabo. A partir de la síntesis de los resultados obtenidos en la primera fase (2002-2004), se perfilan el estado actual y los objetivos

planteados para la segunda (2005-2007). Ha de subrayarse que, al ser ésta una investigación en curso, las conclusiones de este artículo tienen necesariamente un carácter preliminar.

OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo general del programa es caracterizar la retención de partículas en el lado secundario de un generador de vapor en condiciones prototípicas de secuencias SGTR con fusión del núcleo. Ante la diversidad y complejidad de escenarios posibles, la investigación se ha centrado en la etapa de rotura en ausencia de agua.

El objetivo específico del programa de investigación es el desarrollo de un modelo semi-empírico, que integre mecanismos relevantes de la física de aerosoles y una caracterización adecuada de la aerodinámica de chorros en medios discontinuos. Con objeto de facilitar su utilización en códigos integrales de análisis de accidentes, a partir de sus resultados se derivará una correlación capaz de predecir con precisión aceptable el efecto filtrante de la etapa de rotura de un generador de vapor seco sobre el flujo radiactivo entrante desde el primario, durante secuencias SGTR.

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN 2002-2004

El programa de investigación orquesta tres elementos fundamentales para la consecución de los fines planteados (Figura 1): la realización de ensayos, el desarrollo de modelos y las simulaciones aerodinámicas.

Actividades experimentales

La primera fase experimental contempló un total de 12 ensayos que se

realizaron en la instalación PECA-SGTR del CIEMAT (Figura 2). La instalación dispuso de un buen número de estaciones de muestreo y filtración para la caracterización del aerosol a la entrada y a la salida del dispositivo experimental, además de medidores y controladores de flujo (Q) y presión (P). El lado secundario del generador de vapor se simuló mediante una matriz de 11 x 11 tubos, en el que una de las posiciones estaba ocupada por el tubo roto. Estudios tridimensionales demostraron que esta dimensión del haz era suficiente para capturar los fenómenos de mayor interés en la etapa de la rotura (Quarini J., 1999). Tanto el diámetro de los tubos (19 mm) como el espacio entre ellos (9 mm) eran representativos de un generador de vapor real. La altura del haz era de aproximadamente 1.5 m.

El objetivo fundamental de los experimentos fue estudiar el efecto que el caudal másico entrante de gas y la configuración de la rotura tienen sobre la retención de partículas. Para ello, se varió el flujo másico de gas entre 75 y 250 kg/h y se utilizaron tubos con roturas en guillotina y en "boca de pez" en posiciones y orientaciones diversas. El resto de las condiciones se impusieron de acuerdo con los análisis previos realizados con los códigos MELCOR y SCDAP/RELAP (Bakker, 2001; Güntay et al., 2002). El aerosol fue simulado por partículas de TiO_2 de 5 a 7 μm de diámetro aerodinámico mediano de masa (AMMD, *Aerodynamic Mass Median Diameter*).

Los principales resultados obtenidos han sido descritos con detalle por Herranz et al. (2006a), y se resumen a continuación:

- La masa de aerosoles retenida en la etapa de rotura fue en todos los casos inferior al 20% de la masa total inyectada. Su distribución, como puede observarse en la Figura 3, no fue uniforme sobre los tubos. La densidad superficial de los depósitos disminuyó conforme aumentaba la distancia desde la rotura, apreciándose espesores considerables en aquéllos situados en las localizaciones más próximas a la rotura.

- La fracción másica retenida (η) disminuyó al incrementar el caudal gaseoso (Φ) de entrada a partir de 100 kg/h, de acuerdo con la correlación:

$$\eta(\%) = \frac{\xi}{\Phi^2} \quad \text{con} \quad \xi = (1.81 \pm 0.7) \cdot 10^5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]^2 \quad (1)$$

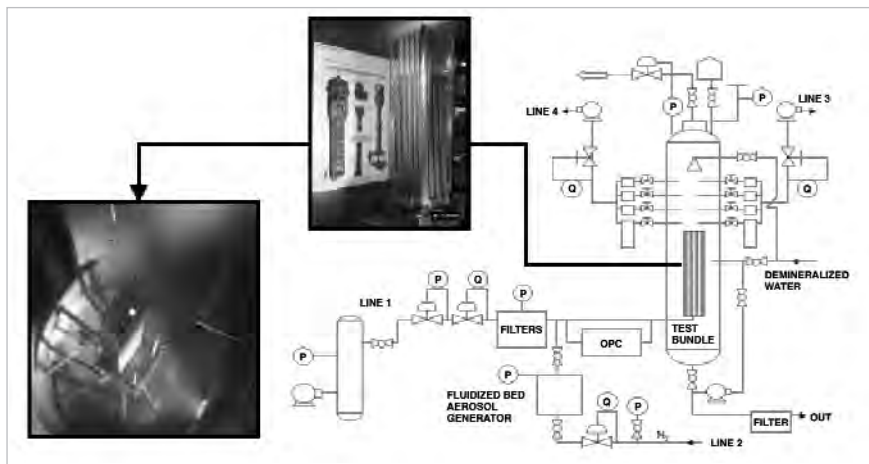
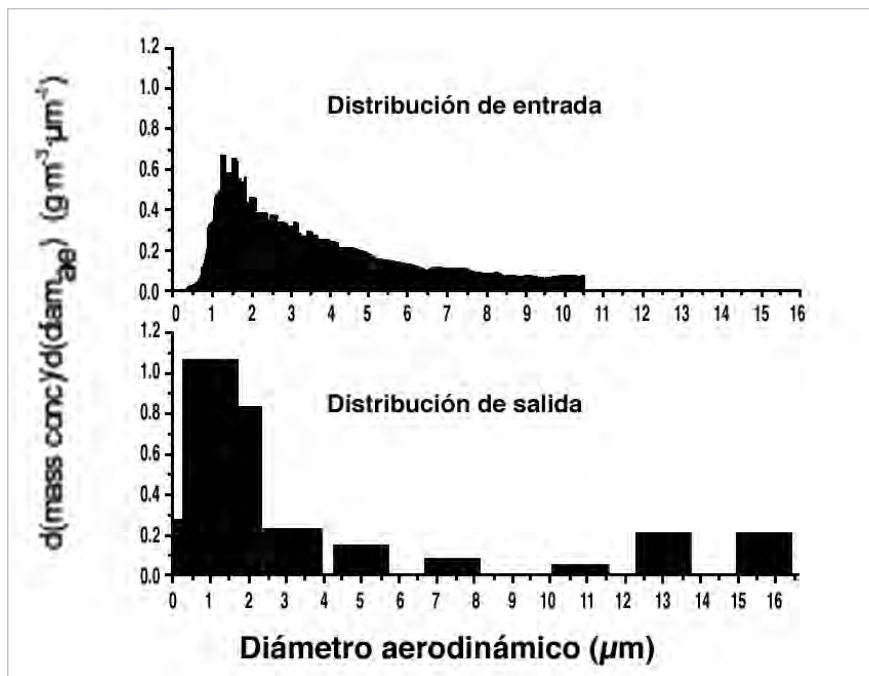


Figura 2. Diagrama de la instalación PECA-SGTR.



Figura 3. Depósitos de partículas en experimentos de rotura en guillotina.

Figura 4. Distribuciones de tamaño a la entrada y a la salida del dispositivo experimental.



Es decir, en términos cuantitativos la influencia del tipo de rotura, su orientación y su ubicación tuvieron un carácter secundario al compararla con la del caudal (esta tendencia no se mantuvo a caudales inferiores a 100 kg/h). Sin embargo, el efecto del tipo de rotura en la distribución de la masa en el haz de tubos fue apreciable.

Una observación adicional fue la aparición de partículas de tamaño inferior al mínimo inyectado en la corriente de salida (Figura 4). Una posible explicación sería la fragmentación de las partículas de TiO_2 debido a las tensiones creadas en su superficie por la elevada velocidad del flujo gaseoso. La presumible importancia de este fenómeno radica en la fuerte dependencia entre deposición y tamaño. No obstante, esta observación ha de ser confirmada con partículas distintas al TiO_2 , cuya cohesión y adherencia sean más representativas de las esperadas en caso de accidente.

Desarrollo de modelos

Un tratamiento riguroso de la deposición de aerosoles exigiría resolver las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el flujo de gas a través del haz de tubos. La extrema complejidad de este enfoque sugirió la adopción de un tratamiento aproximado que cumpliera dos condiciones fundamentales: precisión aceptable y facilidad de inclusión en códigos integrales de accidente severo, como los códigos MELCOR o ASTEC.

El modelo semi-empírico en desarrollo (ARISG) se basa en el concepto de filtro (i.e., partículas transportadas en un fluido que atraviesa una región con obstáculos). Las dos hipótesis fundamentales son: el movimiento del gas es perpendicular al eje de los tubos y la filtración se produce de modo uniforme en cualquier plano perpendicular a la dirección principal del flujo de gas (i.e., es decir, el modelo es unidimensional). La ecuación final resultante para la eficiencia de retención del haz de tubos es (Herranz et al. 2006b),

$$\eta_{TB} = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{1-\alpha} \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^{N_{\text{tubos}}} \left(1 - \frac{d_i}{s+d_i} \sum_{j=1}^{N_{\text{bins}}} y(j) \cdot \eta_{ST}(i,j) \right) \right] \right\} \quad (2)$$

donde α es empaquetamiento del haz de tubos, s el espacio entre tubos, d_i el diámetro de los tubos, $y(j)$ la fracción

másica de partículas de diámetro j , y $\eta_{st}(i,j)$ la eficiencia de retención individual de cada tubo.

La eficiencia de tubo, $\eta_{st}(i,j)$, se calcula suponiendo que los mecanismos de eliminación de partículas son independientes:

$$\eta_{st}(i) = \sum_j \eta_{st}^j(i) \quad (3)$$

Un análisis de orden de magnitud de los parámetros característicos de diversos procesos de deposición (Tabla I), indicó que los fenómenos más relevantes en el escenario son el impacto inercial y la deposición turbulenta. Ambos fenómenos son función de los diámetros de partícula y tubo y de la velocidad del gas. Esta dependencia puede expresarse en términos de números adimensionales, como los Reynolds de gas

$$Re_{gas} = \frac{\rho_{gas} \cdot v_{gas} \cdot d_t}{\mu_{gas}}$$

y de partícula

$$Re_p = \frac{\rho_{gas} \cdot v_{gas} \cdot d_p}{\mu_{gas}}$$

y el número de Stokes

$$Stk = C_c \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_{gas}}{18 \cdot \mu_{gas} \cdot d_t}$$

El rango de éstos en las condiciones SGTR y en las de los experimentos de la primera fase aparecen en la Tabla II. Junto a ellos se han incluido los estimados para las condiciones de otros ensayos que han sido utilizados para el desarrollo del modelo.

La deposición turbulenta es el mecanismo de deposición dominante a bajos números de Stokes ($Stk < 0.1$). Apenas existen datos disponibles en to-

pologías similares a la del secundario de un generador de vapor y la mayor parte de las correlaciones existentes en la literatura se refieren a flujos internos. Douglas et al. (1988) obtuvieron algunos datos a partir de los cuales se ha derivado la siguiente ecuación:

$$\eta_{st}^{H} = 0.438 + 0.071 \cdot \ln(Stk_e) \quad (4)$$

A pesar de ser éste el mejor ajuste logrado, la gran dispersión de los datos experimentales conduce a un valor bajo del coeficiente de regresión lineal ($R^2=0.516$). Es decir, las predicciones de la ec. (4) estarán afectadas de una gran incertidumbre.

El impacto inercial gobierna la deposición de aerosoles a elevados Stokes ($Stk > 0.1$). Correlacionando más de 135 datos experimentales (Ranz et al., 1952; Wong et al., 1953) se obtuvo la expresión de una sigmoide,

$$\eta_{st}^{imp} = \frac{0.75}{1 + 29.31 \cdot e^{-3.85 \cdot \sqrt{Stk_e}}} \quad (5)$$

donde la máxima eficiencia se estableció en 0.75 para tener en cuenta la presencia, a elevados números de Stokes, de fenómenos que limitan la retención, como la resuspensión, la erosión de los depósitos y las colisiones elásticas con las superficies. A pesar de ello, la importancia de alguno de estos procesos podría conducir a su consideración explícita en futuras versiones del modelo.

En las ecuaciones (4) y (5) el número de Stokes aparece corregido (Stk_e) para extenderlo a regímenes de Reynolds caracterizados por $Re_p > 1.0$:

$$Stk_e = Stk \cdot \left[3 \cdot \frac{0.158^{0.5} \cdot Re_p^{1.5} - \tan(0.158^{0.5} \cdot Re_p^{1.5})}{0.158^{1.5} \cdot Re_p} \right] \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriores muestran la enorme dependencia de la retención de partículas en el haz de tubos con la velocidad del

gas y el diámetro y densidad de las partículas. Estas variables están afectadas de incertidumbre notable, por lo que se dotó al modelo ARISG de un tratamiento estadístico de Montecarlo para ellas. Esta capacidad permitirá en un futuro la derivación de una correlación teórica a partir de ARISG, una vez que éste se halle suficientemente desarrollado y validado. No obstante, a fin de ilustrar el procedimiento y el tipo de expresiones que resultarán, se efectuaron más de 2000 simulaciones en el intervalo de Stk_e de interés. El resultado aparece en la Figura 5 y queda definido mediante la siguiente ecuación (Herranz et al., 2003):

$$\eta = \begin{cases} 0.422 - \frac{1}{6.67 + 145.36 \cdot Stk_e^{0.283}} & Stk_e \leq 0.1 \\ 0.618 - \frac{1}{4.54 + 8.03 \cdot Stk_e^{1.171}} & Stk_e > 0.1 \end{cases} \quad (7)$$

El modelo ARISG adolece de limitaciones. Por un lado, la evolución aerodinámica del flujo de gas a través del haz de tubos requiere una mejor caracterización. Actualmente, la evolución de la velocidad del gas obedece a una aplicación simple de los principios de conservación de masa y momento que supone movimiento unidireccional del gas (Leaver et al., 1998),

$$v_{gas}^i = \frac{1}{2^i} v_{gas}^0 \quad (8)$$

donde v_{gas}^0 representa la velocidad del gas incidente en el primer tubo y el superíndice "i" se refiere al número de orden del tubo dentro de la fila. La extraordinaria importancia de la aerodinámica del gas en el escenario, hace que esta descripción sea insuficiente. Por otro, la dinámica de los aerosoles es también mejorable. Las ecuaciones de los mecanismos de retención de partículas se obtuvieron a partir de datos en condiciones distintas a las esperadas en SGTR y, en particular, la deposición turbulenta tiene una imprecisión notable. Asimismo, ARISG carece de modelo específico para procesos que

TABLA I.
Parámetros característicos de los fenómenos de deposición de aerosoles.

	Parámetros Característicos	Estimación
Impacto inercial	$C_c \cdot \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_{gas}}{18 \cdot \mu_{gas} \cdot d_t}$	$> 10^{-2}$
Deposición turbulenta	$\left(\frac{\mu_{gas} \cdot v_{gas} \cdot d_t}{\rho_{gas} \cdot d_p} \right)^{0.75}$	$> 10^{-2}$
Sedimentación	$C_c \cdot \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot g}{18 \cdot \mu_{gas} \cdot v_{gas}}$	$\sim 10^{-6}$
Intercepción	d_p / d_t	$\sim 10^{-4}$

TABLA II.
Rangos de números adimensionales relevantes en escenarios SGTR.

	SGTR	Douglas et al., 1988	Ranz et al., 1952	Wong et al., 1953	Herranz et al., 2006
Re_{gas}	$10^4 - 10^5$	-	13 - 330	13 - 330	$10^4 - 10^5$
Stk	$10^{-2} - 10$	-	$10^{-1} - 10$	$10^{-2} - 10^2$	$10^{-2} - 10$
Re_p	$10^{-1} - 300$	-	$10^{-2} - 10$	$10^{-1} - 10$	$10^{-1} - 10^2$
Re_p^2 / Stk	$10^2 - 10^3$	-	0.1 - 10	1 - 10	$10^2 - 10^3$

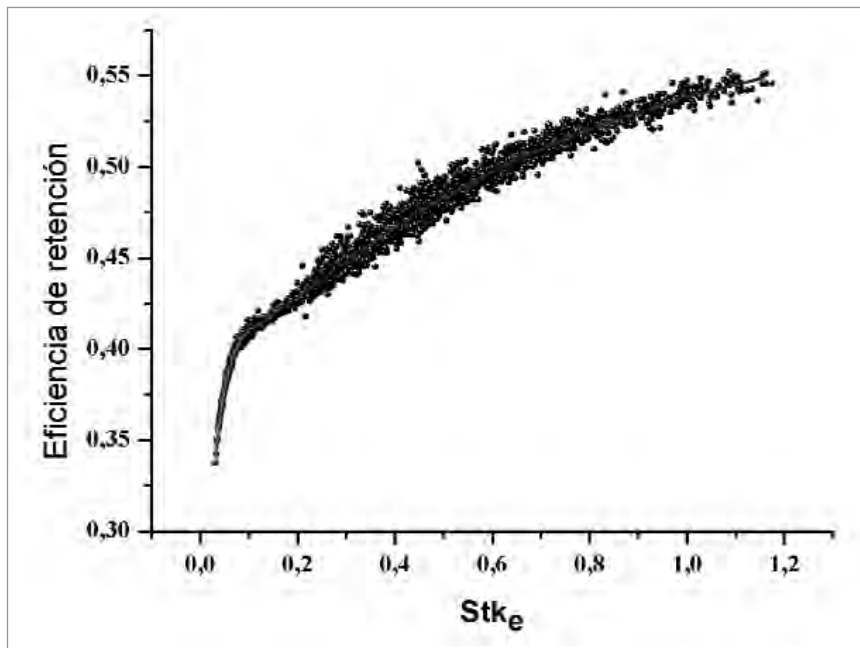


Figura 5. Correlación teórica obtenida a partir del modelo ARISG.

podrían tener un relieve importante, como la resuspensión o la fragmentación de partículas. Finalmente, las hipótesis implícitas en la aproximación de filtro han de ser validadas contra datos experimentales fiables.

Interpretación de resultados

Los resultados de la primera fase experimental han proporcionado información valiosa sobre la retención de aerosoles en la etapa de rotura. Sin embargo, dada la importancia de la aerodinámica del gas en los procesos de retención de partículas y la inexistencia

de medidas del campo de velocidades en el haz de tubos, se llevaron a cabo análisis fluido-dinámicos 3D que pudieran aportar información complementaria sobre la relación aerodinámica-deposición.

Mediante el código FLUENT 6.1 se simularon los ensayos de rotura en guillotina (Herranz et al., 2005). La simetría del dispositivo experimental permitió reducir el dominio a $1/4$ del mismo, que se dividió en aproximadamente 400.000 nodos hexaédricos. Inicialmente, se utilizó el modelo k- ϵ estándar de turbulencia. Los resultados señalaron diferencias cuantitativas sus-

tanciales en la aerodinámica del chorro al variar el caudal másico del gas de entrada en variables tales como velocidad del gas en la rotura, la penetración del chorro y el ángulo de deflexión. La Figura 6 muestra el tipo de resultados obtenidos para el caso de 150 kg/h.

Los análisis 3D permitieron hacer observaciones de excepcional interés para la deposición de partículas:

- Al interaccionar con el primer tubo, el chorro se divide en tres corrientes, dos de ellas mantienen una componente radial notable y se desarrollan alrededor del tubo, mientras que en la región frontal se establece una corriente donde prima la componente axial. Esta triple direccionalidad se ha denominado distribución del flujo en "hoja de arce".

- La zona de estela de los tubos recoge las dos corrientes laterales, estableciendo una región de elevada turbulencia y, por tanto, proclive a la deposición de aerosoles (Figura 7). Se puede apreciar que su situación se halla algunos centímetros sobre el punto de entrada del chorro debido a la componente ascensional del gas.

- La entrada de gas a elevada velocidad causa la succión del gas circundante, particularmente intensa en la zona superior del chorro próxima a la rotura. Como consecuencia se establece un vórtice que resulta en una corriente de gas descendente sobre la superficie del tubo roto por encima de la rotura. La Figura 3 muestra depósitos de aerosoles en esta región.

Los elevados valores obtenidos en el campo de velocidad (Re_{gas} iniciales comprendidos entre 10^4 y 10^5), señalaron dos hechos de extraordinaria importancia:

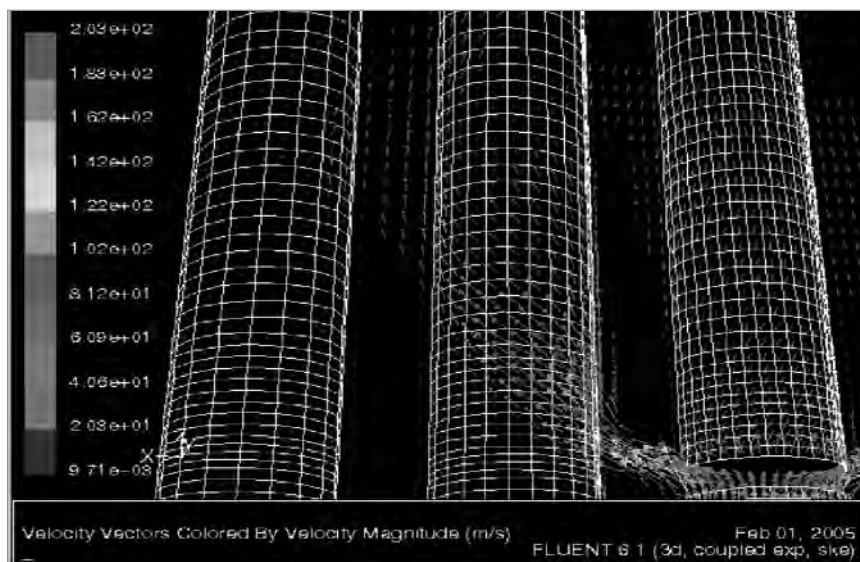


Figura 6. Simulaciones 3D de los ensayos en guillotina con FLUENT 6.1.



Figura 7. Imagen de la región de estela en ensayos de roturas en guillotina.

TABLA III.
Eficiencias medidas y estimadas en ensayos en guillotina.

Caudal másico de gas (kg/h)	AMMD (μm)	Experimental $\eta_{\text{normalizado}}$	Teórico $\eta_{\text{normalizado}}$
100	6.7	1.000	0.949
150	6.7	0.449	0.992
250	4.9	0.149	1.000

- En las superficies de los tubos vecinos más próximas a la rotura, la velocidad del gas propicia que la inercia de las partículas a cambios de dirección tenga un efecto considerable. En zonas más alejadas, con velocidades más moderadas, los mecanismos de deposición asociados a la elevada turbulencia del flujo serían dominantes.

- Fenómenos como la fragmentación o la resuspensión de partículas, de los cuales existen evidencias indirectas, serían factibles en las condiciones aerodinámicas de los escenarios SGTR y tendrían mayor influencia cuanto mayor fuera el caudal de entrada de gas.

De acuerdo con la última observación, una comparación entre las eficiencias experimentales y las estimadas por ARISG para los ensayos en guillotina ofreció tendencias inversas. Este hecho aboga por la existencia de fenómenos tendentes a disminuir la deposición de aerosoles conforme se incrementa el caudal másico de entrada de gas (Tabla III). Nótese que las eficiencias se han normalizado de forma independiente, con el máximo valor obtenido experimental o teórico.

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN 2005-2007

La segunda fase del programa de investigación tiene dos ejes fundamentales: la satisfacción del objetivo global del programa y la respuesta a las limitaciones y necesidades puestas de manifiesto durante la primera. Todas las actividades que a continuación se mencionan se están realizando en el marco del proyecto internacional ARTIST.

Actividades experimentales

El plan experimental en curso está compuesto por dos tipos de experimentos:

- Los ensayos aerodinámicos, denominados CAHTs (CAHT, *CIEMAT ARTIST Hydrodynamic Tests*), tienen como objetivos caracterizar el flujo de gas a través del haz de tubos y permitir

la validación de simulaciones aerodinámicas tridimensionales. Las variables a explorar son el caudal de gas de entrada (75-250 kg/h) y el tipo de rotura (i.e., guillotina y "boca de pez").

- Los ensayos de aerosoles, denominados CAATs (*CIEMAT ARTIST Aerosol Tests*), están dirigidos a estudiar el efecto de la naturaleza de las partículas en la retención y aportar datos para la validación de ARISG. No menos importante es su carácter confirmatorio, que acreditará los resultados de la fase anterior. Para ello se utilizarán aerosoles de naturaleza soluble (como CsI, CsOH o H₂O) e insoluble (como el TiO₂). Las condiciones de contorno restantes serán análogas a las de la primera fase experimental.

Los ensayos CAHTs han supuesto la construcción de un dispositivo experimental donde el haz de tubos se aloja en una estructura transparente. La nueva configuración optimizará el acceso óptico del dispositivo utilizado para la adquisición y procesamiento de imágenes (PIV, *Particle Image Velocimetry*). Los ensayos CAATs han exigido un nuevo diseño de la línea de inyección de la instalación PECA-SGTR que permita la generación y control de aerosoles solubles.

Mejora del modelo ARISG

Las principales áreas donde ARISG es susceptible de modificaciones sustanciales son:

- La descripción de la evolución aerodinámica del chorro (v_{gas}) a través del haz.
- La inclusión de una formulación específica para la resuspensión mecánica de partículas.
- La modificación de las correlaciones de mecanismos de deposición, en particular, de deposición turbulenta

La validación de ARISG contra datos experimentales de la segunda fase experimental del CIEMAT o incluso contra otros obtenidos por otros laboratorios (i.e., PSI en la instalación ARTIST),

conducirán presumiblemente a la identificación de otros aspectos mejorables o incluso a cambios en la aproximación global.

Simulaciones aerodinámicas 3D

Los resultados obtenidos mediante simulaciones 3D de la primera fase experimental han señalado el enorme potencial de esta técnica para lograr una comprensión detallada del escenario. En esta nueva fase, además de su papel como herramienta de interpretación, se pretenden utilizar los resultados 3D para, junto con los experimentos CAHTs y el desarrollo de modelos analíticos del comportamiento de chorros¹, obtener un modo sencillo (compatible con ARISG) de describir la evolución aerodinámica del gas a través del haz. Con este fin se están estudiando definiciones alternativas del escenario, como la utilización de la aproximación de medio poroso en la placa soporte o el uso de modelos k- ω (SST) para describir la turbulencia.

CONSIDERACIONES FINALES

A lo largo de este artículo se han puesto de manifiesto características del programa de investigación del CIEMAT sobre secuencias SGTR de accidente severo, que le otorgan un carácter paradigmático en el contexto de la investigación sobre accidente severo en España. Las más importantes son:

- **Interés tecnológico.** Las secuencias SGTR de accidente severo son dominantes en la estimación del riesgo de centrales nucleares de agua ligera a presión. La determinación del comportamiento del Término Fuente en el generador de vapor tendrá previsible aplicación en los análisis probabilistas de seguridad y en las guías de gestión de accidente severo.

- **Interés científico.** La complejidad de los escenarios característicos de secuencias SGTR de accidente severo, hace que su comprensión requiera particular y extender conocimientos de múltiples disciplinas, como la dinámica de aerosoles y la aerodinámica. Algunos fenómenos cuya investigación supondrá un avance en el estado actual del conocimiento son: la fragmentación y la resuspensión de partículas, y la aerodinámica de chorros en medios discontinuos.

- **Dimensión internacional.** El problema global planteado por las secuencias SGTR de accidente severo es de

¹ Este trabajo está siendo específicamente desarrollado por el Departamento de Ingeniería y Química Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia en colaboración con el equipo del CIEMAT.

tal envergadura que sólo a través de la colaboración científica y de la comparación de recursos con otras instituciones podría ser resuelto. Los proyectos internacionales EU-SGTR y ARTIST han proporcionado el marco apropiado a las actividades emprendidas por el CIEMAT.

- **Estructuración.** El objetivo del programa de investigación se definió de un modo muy específico. A partir de él se elaboró una estrategia de actuación global (Figura 1) que, junto a la propia realimentación del proyecto, han permitido definir las actividades específicas oportunas a lo largo de las dos fases del programa.

- **Aproximación científica plural.** El programa del CIEMAT articula medios experimentales (realización de diversos tipos de ensayos), teóricos (desarrollo de modelos) y analíticos (simulaciones aerodinámicas 3D) para, mediante su complementariedad, lograr una respuesta de calidad al fin propuesto.

- **Colaboración nacional.** El equipo investigador del CIEMAT se ha potenciado mediante un acuerdo específico de cooperación con la Universidad Politécnica de Valencia, quien lidera tareas concretas en la segunda fase del programa. No menos importante, el Consejo de Seguridad Nuclear está financiando parcialmente la segunda fase del programa.

La calidad del trabajo realizado hasta el momento está acreditada por las publicaciones internacionales resultan-

tes. No obstante, el éxito final del proyecto dependerá de la satisfacción final del objetivo planteado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea (proyecto EU-SGTR) y al Consejo de Seguridad Nuclear (proyecto ARTIST) su soporte financiero para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, reconocen el inestimable apoyo técnico prestado desde el PSI (Suiza).

No menos importante, el CIEMAT desea agradecer a la Sociedad Nuclear Española la oportunidad de comunicar, a través de Nuclear España, parte de las actividades que desarrolla en el área de la investigación en Seguridad Nuclear.

REFERENCIAS

Auvinen A., Jokiniemi J.K., Lähde A., Routamo T., Lundström P., Tuomisto H., Dienstbier J., Güntay S., Suckow D., Dehbi A., Sloodman M., Herranz L.E., Peyres V., Polo J., "Steam Generator Tube Rupture (SGTR) Scenarios", Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 457-472.

Bakker P., "Important Accident Scenarios and Conditions", SAM-SGTR-D001 (2001).

Douglas P.L., Ilias S., "On the Deposition of Aerosol Particles on Cilindres in Turbulent Cross Flow", J. Aerosol Sci., 19,4, 451-462, 1988.

Güntay S., Dehbi A., Suckow D. Birchley J., "ARTIST: An International Project Investigating Aerosol Retention in a Ruptured Steam Generator", Proceedings of the Inter-

national Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP), 2002.

Güntay S., Suckow D., Dehbi A., Kapulla R., "ARTIST: Introduction and First Results", Nuclear Engineering and Design, 231(2004) 109-120.

Herranz L.E., del Prá C.L., Muñoz-Cobo J.L., "A Theoretical Correlation to Estimate Aerosol Retention within the Secondary Side of a Nuclear Power Plant Steam Generator under Accident Conditions", Proceedings of the European Aerosol Conference, 2003.

Herranz L.E., del Prá C.L., Velasco F.J.S., Muñoz-Cobo J.L., Escrivá A., "Insights into Aerosol Depletion from High Velocity Flow across a Tube Bank: A Key Scenario for Nuclear Safety", 6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2005.

Herranz L.E., Velasco F.J.S., del Prá C.L., "Aerosol Retention near the Tube Breach during Steam Generator Tube Rupture Sequences, to be published in Nuclear Technology, April 2006.

Herranz L.E., Del Prá C.L., Dehbi A., "An Approach to Aerosol Retention in SGTR Sequences: from Modelling Fundamentals to Research Needs", enviado a Nuclear Technology para su publicación, 2006.

Leaver D.E., Li J., Sher R., "New Design Applications of Natural Aerosol Deposition in Nuclear Plant Accident Analyses", NEA/CSNI/R(98)4, 1998.

Ranz W.E., Wong J.B., "Impaction of Dust and Smoke Particles on Surface Body and Body Collectors", Ind. & Eng. Chem., 44,6,1371 (1952).

Quarini J., "CFD Model of the PSI Steam Generator", Report submitted to Paul Scherrer Institute, 1999.

Wong J.B., Johnstone H.F., "Engineering Experimental Station", University of Illinois, Tech. Rep. N. 11, 1953.



Luis E. HERRANZ se licenció en Ciencias Químicas en la UAM en el año 1986. Es diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios de la Energía (1987) y doctor por la UPM desde 1996. En 1987 se incorporó al Programa de Seguridad Nuclear del CIEMAT, y actualmente dirige la Unidad de Investigación sobre Seguridad Nuclear del Departamento de Energía de dicho organismo. Su investigación se desarrolla en las áreas de los accidentes severos, el comportamiento del combustible nuclear altamente irradiado, los sistemas de seguridad pasivos de centrales avanzadas y los ciclos de potencia de reactores de IV Generación. En la actualidad es coordinador de las líneas de investigación sobre el comportamiento de aerosoles y la química del yodo en contención de la Red Europea de Investigación sobre Accidente Severo (SARNET).



Claudia LÓPEZ DEL PRÁ es Licenciada en Ciencias Matemáticas por la Universidad Autónoma de Madrid (1999) y Máster en Matemáticas Industriales por la Universidad de Strathclyde en Glasgow (Escocia) (2000). En 2003 se incorporó a la Unidad de Investigación sobre Seguridad Nuclear del CIEMAT. Sus actividades se han desarrollado en el marco de la termo-hidráulica y el comportamiento de aerosoles durante accidente severo. Actualmente es responsable de los estudios fluido-dinámicos computacionales que se están llevando a cabo en el marco del proyecto ARTIST.



Francisco Javier SÁNCHEZ VELASCO es Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Cartagena (2003) y postgraduado en técnicas experimentales en mecánica de fluidos por el von Karman Institut (Bélgica) (2004). En 2004 se incorporó a la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear del CIEMAT. Su área de investigación es la fenomenología de accidente severo y, en particular, la fluido-dinámica y el comportamiento de aerosoles. Actualmente, es responsable del Laboratorio de Análisis de Sistemas de Seguridad (LASS), donde se desarrollan las labores experimentales pertenecientes al proyecto ARTIST.