



Nuclear España

LA REVISTA DE LOS PROFESIONALES DEL SECTOR NUCLEAR



SOCIEDAD NUCLEAR ESPAÑOLA



30º ANIVERSARIO DE CENTRAL NUCLEAR



TRILLO

SUMARIO

EDITORIAL

4

PRESENTACIÓN

6

Eduardo LASSO DE LA VEGA.

Director general de Centrales Nucleares Almaraz-Trillo, A.I.E.

ENTREVISTA

9

Aquilino RODRÍGUEZ. Director de la central nuclear de Trillo.

CENTRAL NUCLEAR DE TRILLO

14

ENFOQUE OPERACIONAL. **Belarmino Huergo.**

14

EVALUCACIONES EXTERNAS (Peer Review). **Álvaro Salado Hidalgo.**

16

ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA

18

ACTUALIZACIÓN DEL ATI. **Ingeniería de Planta.**

28

MEDIOAMBIENTE. **Francisco Yague**

32

CN TRILLO Y SU ENTORNO. 30 años de divulgación e información

38

LA MEJORA DE LA CULTURA PREVENTIVA

41

ARTÍCULO DIVULGATIVO

45

La notación matemática. **Begoña Pereira Pagán y Guadalupe Cansado Parrondo.**

MEJORES PONENCIAS DE LA 43ª REUNIÓN ANUAL

50

COMBUSTIBLE: Equipos de inspección visual automática de pastillas de UO₂ para combustible nuclear
David Verdejo Garrido

50

SIMULACIÓN CON CÓDIGOS: Aplicación de la metodología de escalado a una rotura de pequeño tamaño entre la instalación experimental ROSA-LSTF y una planta PWR de 3 lazos del tipo Siemens-KWU.

54

César Berna, José Luis Muñoz-Cobo y Alberto Escrivá

SECCIONES FIJAS

64

SOCIOS COLECTIVOS DE LA SNE

AHLBERG CAMERAS AB
ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD
AMARA, S.A..
APPLUS NORCONTROL, S.L.U.
ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ - VANDELLÓS II
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ - TRILLO AIE
CEGELEC, S.A.
CIC CONSULTING INFORMÁTICO DE CANTABRIA S.L.
CIEMAT
COAPSA CONTROL, S.L.
COLEGIO DE INGENIEROS DEL ICAI
CUADROS ELECTRICOS NAZARENOS, S.L.
EDP ESPAÑA, S.A.U.
ELECOR, S.A.U.
EMPRESARIOS AGRUPADOS
ENDESA GENERACION, S.A.
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS S.A.
ENWESA OPERACIONES
EPRI
EQUIPOS NUCLEARES, S.A.
EULEN, S.A.
EXPRESS TRUCK S.A.U.
FRAMATOME
GAMESA ELECTRIC S.A.U.
GAS NATURAL FENOSA ENGINEERING, S.L.U.
GAS NATURAL FENOSA GENERACION, SLU
GD ENERGY SERVICES, S.A.U.
GE - HITACHI NUCLEAR ENERGY INTERNACIONAL
GEOCISA
HELGESON SCIENTIFIC SERVICE
IBERDROLA GENERACION NUCLEAR S.A.U.
IBERDROLA INGENIERIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.
IDOM CONSULTING, ENGINEERING AND
ARCHITECTURE, S.A.U.
INGECID, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE
PROYECTOS, S.L.
MANSERVA, S.L.
MANTENIMIENTOS, AYUDA A LA EXPLOTACION Y
SERVICIOS, S.A.
MARSEIN, S.A.
MEDIDAS AMBIENTALES S.L.
MOMPRESA
MONCOBRA
NUCLEONOR, S.A.
NUCLEONOVA S.L.
ORANO CYCLE
ORANO TN
PROINSA
PROSEGUR
PRYSMIAN SPAIN, S.A.
RINGO VALVULA S.L.L.
SGS TECNOS, S.A.U.
SIEMSA INDUSTRIA, S.A.
TECNALIA
TECNASA
TECNATOM, S.A.
TÜV SÜD ATISAE SAU
VECTOR & WELLHEADS ENGINEERING, S.L.
WESTINGHOUSE ELECTRIC SPAIN
WESTINGHOUSE TECHNOLOGY SERVICES, S.A.

Edita  SENDIA EDITORIAL, S.A.

Directora: Matilde PELEGRÍ
Consejo de Redacción: Comisión de Publicaciones de la SNE - **Traducciones Inglés:** IPT Translations
Diseño y Maqueta: José RIBERA y Clara TRIGO - **Administración y suscripciones:** Lola PATIÑO

C/ Poeta Joan Maragall, 56. 7º D. 28020 MADRID - Tel: (34) 91 373 47 50 • email: nuclear@gruposenda.es
Suscripción: España: 113€ + IVA - Europa: 221€ Otros: 226€

Depósito legal: M-22.829/1982 - ISSN: 1137-2885



Esta publicación está asociada a la AEEPP, que a su vez es miembro de CEOE, CEPYME, EMMA y FIPP.



La SNE permite la reproducción en otros medios de los resúmenes de los artículos publicados en NUCLEAR ESPAÑA, siempre que se cite al principio del texto del resumen reproducido su procedencia y se adjunte un enlace a la portada del sitio web www.sne.es, así como también el nombre del autor y la fecha de publicación. Queda prohibida cualquier reproducción o copia, distribución o publicación, de cualquier clase del contenido de la información publicada en la revista sin autorización previa y por escrito de la SNE.

La reproducción, copia, distribución, transformación, puesta a disposición del público, y cualquier otra actividad que se pueda realizar con la información contenida en la revista, así como con su diseño y la selección y forma de presentación de los materiales incluidos en la misma cualquiera que fuera su finalidad y el medio utilizado para ello, sin la autorización expresa de la SNE quedan prohibidos.

NUCLEAR ESPAÑA no se hace responsable de las opiniones expresadas por los autores.



APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESCALADO A UNA ROTURA DE PEQUEÑO TAMAÑO ENTRE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL ROSA-LSTF Y UNA PLANTA PWR DE 3 LAZOS DEL TIPO SIEMENS-KWU

La metodología de escalado consiste en una descripción cuantitativa de las condiciones que se deben cumplir en una instalación experimental para poder reproducir adecuadamente el comportamiento de una planta comercial. El análisis de escala *top-down* de la metodología H2TS se ha aplicado a una rotura de pequeño tamaño en la rama caliente entre la instalación experimental LSTF-ROSA y un reactor comercial de distinto tipo al de referencia de esta (planta de referencia tipo Westinghouse, aplicada a tipo Siemens-KWU). Las cinco etapas fundamentales de un LOCA se han analizado, habiéndose calculado un total de 53 grupos de escala (monomios π).

INTRODUCCIÓN

Los análisis de escala han sido tradicionalmente una herramienta previa a la construcción de plantas nucleares, dado que su diseño y construcción son procesos de una complejidad técnica muy elevada. Unida a la práctica imposibilidad de caracterizar el comportamiento general de la planta bajo las condiciones de diseño previamente a su construcción. En este sentido, la importancia del escalado radica en que a partir de experimentos realizados en pequeñas instalaciones experimentales se puede conocer la respuesta de una planta comercial. De modo que el objetivo fundamental del escalado debe ser ayudar a diseñar los experimentos en las instalaciones experimentales, de tal forma que se pueda inferir la evolución de los procesos físicos fundamentales en la planta sin una gran desviación en cuanto a los resultados obtenidos.

La metodología de escalado H2TS desarrollada por Zuber [1] es la más ampliamente usada para efectuar estos análisis de escala. El escalado del sistema completo, primer paso de la metodología H2TS, es el desarrollado a lo largo del presente documento. En él se obtendrán, a partir de la resolución de las ecuaciones de conservación, una serie de grupos de escala para cada proceso relevante que tenga lugar durante el transitorio bajo estudio, los llamados grupos de monomios π .

El estudio de roturas de pequeño tamaño (SBLOCA) es uno de los escenarios accidentales postulados para

la licencia de las plantas nucleares. Por ello, diferentes experimentos de este tipo han sido llevados a cabo en diferentes plantas experimentales, como por ejemplo la LSTF-ROSA en Japón, la PKL en Alemania, la Atlas en Corea del Sur.

El experimento SBLOCA empleado aquí para desarrollar la metodología de escalado ha sido el ROSA 1.2 de la OCDE / NEA realizado en la instalación LSTF, instalación a escala de una planta comercial PWR del tipo Westinghouse de cuatro lazos y 3.423 MWt. Dado que los datos experimentales no llegan al grado de profundidad requerida para realizar el análisis bajo estudio, de forma complementaria se ha realizado una simulación del transitorio con el código TRACE, código consolidado de la NRC. La planta comercial frente a la que se ha evaluado la escalabilidad ha sido del tipo Siemens-KWU, es decir, tipo diferente a la de referencia de la instalación experimental LSTF. La simulación del transitorio para la planta PWR del tipo Siemens-KWU (TSK-PWR) también ha sido realizada con dicho código de simulación, dado que no se dispone de datos de planta del transitorio.

INSTALACIÓN LSTF-ROSA, PLANTA TSK-PWR Y TEST ROSA 1.2 Modelos de la instalación LSTF y la planta TSK-PWR

El modelo de TRACE de la instalación experimental LSTF-ROSA consta tanto del circuito primario como del secundario (Figura 1). El modelo tiene alrededor de 80 componentes hidráulicos (vasija 3-D, bombas de refrige-



CÉSAR BERNA

Investigador, Instituto Universitario de Ingeniería Energética.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



JOSÉ L. MUÑOZ-COBO

Catedrático Universidad, Instituto Universitario de Ingeniería Energética.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



ALBERTO ESCRIVÁ

Catedrático Universidad, Instituto Universitario de Ingeniería Energética. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

APPLICATION OF THE SCALING METHODOLOGY TO A SMALL SIZE BREAK BETWEEN THE EXPERIMENTAL FACILITY ROSA-LSTF AND A 3-LOOP PWR PLANT OF THE SIEMENS-KWU TYPE

The scaling methodology consists of a quantitative description of the conditions that must be met in an experimental facility to adequately reproduce the behavior of a commercial plant. The "top-down" scaling analysis of the H2TS methodology has been applied to a small size break in the hot leg between the LSTF-ROSA experimental facility and a commercial reactor of different type to its reference plant (reference plant is a Westinghouse, applied to a Siemens-KWU type). The five fundamental stages of a LOCA have been analyzed, having been calculated a total of 53 scaling groups (π -monomials).

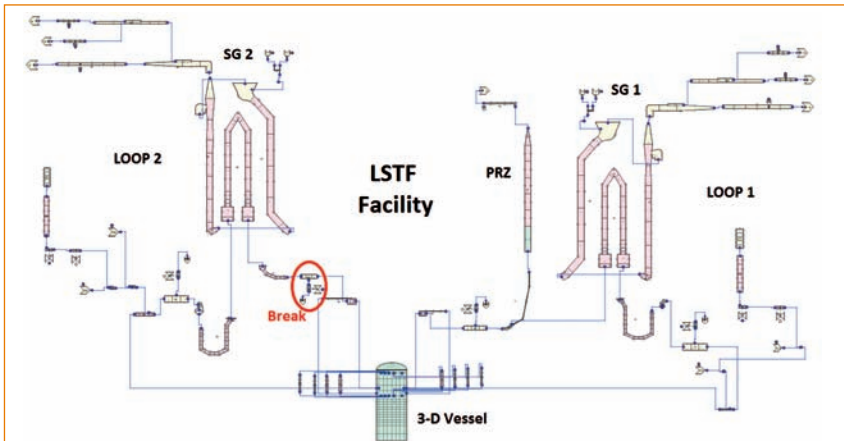


Figura 1. Nodalización del modelo de TRACE de la instalación LSTF-ROSA.

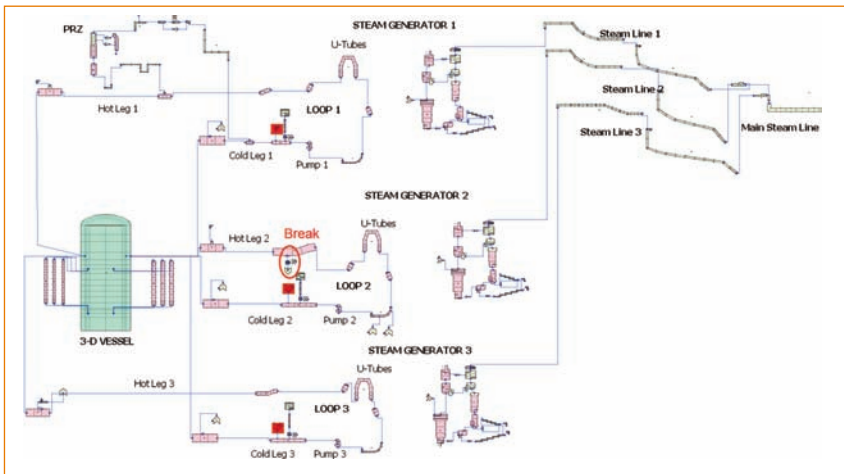


Figura 2. Nodalización del modelo de TRACE de la planta TSK-PWR.

Evento	Condición	Tiempo [s]
Rotura en la rama caliente	$D_n = 10.01 \text{ mm.} \gg 1\% \text{ área}$	0
Señal de scram	12.97 MPa	37
Inicio de la curva de decaimiento	Con el scram del reactor	37
Inicio de la parada de las bombas de primario	Con el scram del reactor	37
Parada de la alimentación del secundario	Con el scram del reactor	37
Parada de los calentadores del presionador	Con el scram del reactor	37
Señal de inyección de seguridad de alta presión (HPIS)	12.27 MPa	77
Inyección de seguridad de alta presión	Señal HPIS + 12 s.	89
Inyección de los acumuladores (AIS)	4.51 MPa	2350
Fin del experimento	-	5000

Tabla 1. Secuencia de eventos durante el experimento ROSA 1.2 en la instalación LSTF.

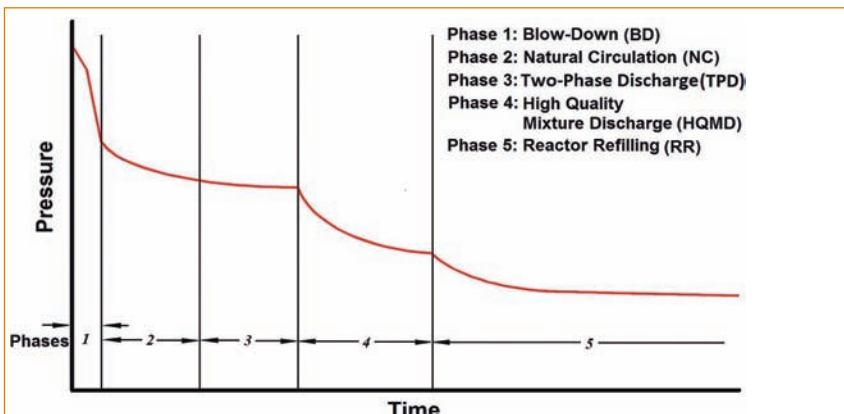


Figura 3. Evolución de la presión durante las fases de un SBLOCA.

ración, presionador, ramas caliente y fría, sellos de las bombas, primario y secundario de los generadores de vapor, etc.), 2 componentes de potencia (núcleo y calentadores del presionador), más de 50 estructuras de calor cuyo fin es considerar los principales intercambios de calor que tienen lugar entre los diferentes componentes del modelo (núcleo, generadores de vapor, presionador y pérdidas de calor), así como más de 200 bloques de control.

En cuanto al modelo de TRACE de la instalación comercial TSK-PWR decir que este consta también tanto del circuito primario como del secundario (Figura 2). El modelo tiene alrededor de 150 componentes hidráulicos (vasija 3-D, bombas de refrigeración, presionador, ramas caliente y fría, sellos de las bombas, primario y secundario de los generadores de vapor, etc.), 6 componentes de potencia (núcleo interno y externo, cuatro etapas de calentadores del presionador), más de 100 estructuras de calor cuyo fin es considerar los principales intercambios de calor que tienen lugar entre los diferentes componentes del modelo (núcleo, generadores de vapor, presionador y pérdidas de calor), así como más de 200 bloques de control.

Eventos y evolución temporal del experimento

El experimento ROSA 1.2 realizado en la instalación LSTF es un SBLOCA de 1% del área de la rama caliente de uno de los lazos de la planta de referencia, es decir 1% de la sección de uno de los lazos de un reactor PWR del tipo Westinghouse de cuatro lazos. La secuencia de eventos que tiene lugar en el experimento se muestra en la Tabla 1. Información más detallada del experimento se puede consultar el NUREG de Muñoz-Cobo et al. [2].

Escalado de la rotura en la planta TSK-PWR

En cuanto a la simulación del transitorio en la instalación TSK-PWR, dado que el escenario simulado en la instalación experimental LSTF es una pequeña rotura de 10.1 mm de diámetro en la parte inferior de la rama caliente del lazo B (lazo sin el presionador), se han debido realizar algunos cálculos para determinar las dimensiones de la rotura en dicha planta. Como se dijo anteriormente, este diámetro de la rotura corresponde al 1.0% del área de la sección transversal volumétrica de la rama caliente del reactor PWR de referencia. Como el área total de cada una de las ramas de un reactor Westinghouse es $A_{Westinghouse} = 0.383 \text{ m}^2$ y dado que la relación de volúmenes entre ambas es



$\frac{V_{TSK-PWR}}{V_{Westinghouse}} \approx \frac{1}{1.07}$. Entonces el área total de la rotura implementada en el modelo de TRACE de la planta TSK-PWR es, $A_{Break,TSK-PWR} = 0,01 \times \frac{1}{V_{TSK-PWR} / V_{Westinghouse}} \times A_{Westinghouse=3,58 \cdot 10^{-3} m^2}$, lo que corresponde a un diámetro $D_{TSK-PWR} = 67.7$ mm.

Fases de un SBLOCA

En general cualquier experimento LOCA, y en particular los SBLOCA, pueden ser desglosados en una serie de fases (Figura 3). Estas son: despresurización inicial; circulación natural; descarga bifásica; descarga de vapor de alta calidad; y rellenado del reactor.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESCALADO TOP-DOWN A LAS CINCO FASES DE UN SBLOCA

El análisis de escala *top-down* es el primer paso de la metodología H2TS que originalmente fue desarrollada por Zuber [1]. Mediante esta metodología se establecen los criterios que deben cumplir las respuestas globales de los sistemas de ambas instalaciones, instalación experimental de tamaño reducido y planta comercial, para poder relacionarlas. En ella se clasifican los fenómenos que tienen lugar en ambas instalaciones y se identifican posibles desviaciones (distorsiones de escala). Para realizar el análisis de escala *top-down* durante las diferentes fases del transitorio hemos utilizado algunos de los métodos y aproximaciones desarrollados por Banerjee et al. [3] que fueron aplicados a posteriori por los ingenieros de Mitsubishi [4]. Además, también hemos tenido en cuenta el desarrollo y las consideraciones realizadas por Wulff [5], especialmente durante la fase circulación natural. En la metodología de escalado se normalizan las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía para obtener los grupos de escala. A lo largo de este proceso de adimensionalización de las ecuaciones de conservación, hemos tratado de expresar los coeficientes de las ecuaciones adimensionales en términos de grupos de monomios π . De tal manera que hemos dado un significado físico a cada uno de los diferentes monomios π que forman cada grupo. Siempre que fue posible, hemos expresado los monomios π como el producto de la frecuencia específica asociada a un proceso por el tiempo de respuesta de interés en la estructura deseada o nivel de componente.

Hay que señalar que si un componente implica varios procesos de transferencia, los grupos adimensionales pueden compararse y clasificarse de acuerdo con sus valores numéricos generando una jerarquía de escala. De forma habitual, a la hora de jerarquizar los grupos de monomios π se tienen en cuenta dos aspectos diferentes [6], por un lado, un criterio para evaluar la relevancia de cada fenómeno en cada instalación y, por otro, un criterio para evaluar la diferencia en magnitud entre cada término en cada instalación, es decir, la distorsión de escala.

Para el primer criterio, dado que la magnitud de cada grupo de monomios π considera cuantitativamente su magnitud comparada con el término contra el cual se ha normalizado, consecuentemente, cada grupo de monomios π indica directamente cuánto más grande/más pequeño es cada término en comparación con aquel cuyo valor es igual a la unidad. En este sentido, habitualmente se considera un fenómeno como importante cuando el valor de su grupo de monomios π es mayor que 1/10 del de mayor valor en la ecuación en estudio para el peor caso de ambas instalaciones (criterio comúnmente usado en ingeniería, tener en cuenta los términos de primer orden e ignorar las contribuciones de los términos de orden superior).

El segundo criterio utilizado para determinar el desempeño de la metodología de escalado, criterio para evaluar las distorsiones de escala, es dividir los grupos de monomios π de ambas instalaciones (LSTF-ROSA y TSK-PWR) para cada uno de los procesos dominantes en cada una de las fases del transitorio ROSA 1.2. De tal manera que un cociente en las proximidades de 1 indica una muy buena correlación entre la instalación experimental y la planta comercial, es decir:

$$\frac{\Xi_{x,y,LSTF-ROSA}}{\Xi_{X,Y,TSK-PWR}} \approx 1 \quad (1)$$

de forma que valores por debajo de 0.5 o por encima de 2 en los cocientes de monomios π se considera que conducen a la conclusión de la existencia de distorsiones de escala. En este sentido se considera que una distorsión de escala es conservativa si la magnitud afectada se mueve hacia valores más inseguros en la instalación experimental que en la planta comercial.

Escalado *top-down* de la fase de despresurización

El criterio para considerar el fin de esta fase es el vaciado del presionador. En esta fase se considera que el sistema se puede representar de manera esquemática dividido en dos volúmenes, Figura 4, donde deberemos analizar las ecuaciones de conservación en el presionador.

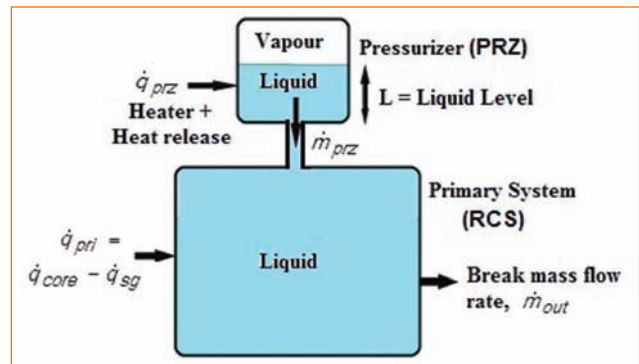


Figura 4. Volúmenes de control durante la fase de despresurización.

A partir de las ecuaciones de conservación de masa y energía, tras la adimensionalización de las diferentes variables, se llega a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dp^*}{dt^*} = -\Xi_{\rho, m \dot{h}_{out}} \frac{1}{M^*} \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_v \dot{m}_{prz}^* (h_{out} - \mu)^* - \Xi_{\rho, \dot{m}v} \frac{1}{M^*} \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_v \dot{m}_{prz}^* v^* \frac{\mu_{fg}}{v_{fg}} + \Xi_{\rho, \dot{q}} \frac{1}{M^*} \left(\frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_v \dot{q}_{prz}^* \quad (2)$$

$$\frac{dL^*}{dt^*} = -\Xi_{L, \dot{m}} \left(\frac{\dot{m}_{prz}}{\rho_f - \rho_g} \right)^* - \Xi_{L, \rho} \left(\frac{1-L^*}{\rho_f^* - \rho_g^*} \right) \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial p} \right)_{sat} \left(\frac{dp}{dt} \right)^* \quad (3)$$

donde $\Xi_{x,y}$ se refiere a la contribución en la variable x por la variable y . En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para esta fase de despresurización mediante la metodología de escala *top-down*.

Como conclusiones más importantes entre los cocientes de los grupos adimensionales de monomios π decir que todos ellos están cerca de la unidad, entre 0.91 y 1.08, excepto $\Xi_{\rho, \dot{q}}$ que no ha sido escalado porque está determinado por las condiciones de diseño para la planta TSK-PWR



Grupos de monomios π	LSTF-ROSA		TSK-PWR		$\frac{\Xi_{x,y,LSTF}}{\Xi_{x,y,TSK-PWR}}$
	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	
$\Xi_{\dot{p},\dot{m}\Delta h_{out}}$	$8.63 \cdot 10^{-2}$	1.0	$7.99 \cdot 10^{-2}$	1.0	1.08
$\Xi_{\dot{p},\dot{m}v}$	$8.19 \cdot 10^{-4}$	0.095	$7.71 \cdot 10^{-4}$	$9.70 \cdot 10^{-2}$	1.06
$\Xi_{\dot{p},\dot{q}}$	$1.38 \cdot 10^{-2}$	0.160	$2.91 \cdot 10^{-3}$	$3.60 \cdot 10^{-2}$	4.74
$\Xi_{L,\dot{m}}$	1.0	0.895	1.0	0.814	1.00
$\Xi_{L,\dot{p}}$	1.12	1.0	1.23	1.0	0.91

Tabla 2. Resultados del análisis de escala durante la fase de despresurización.

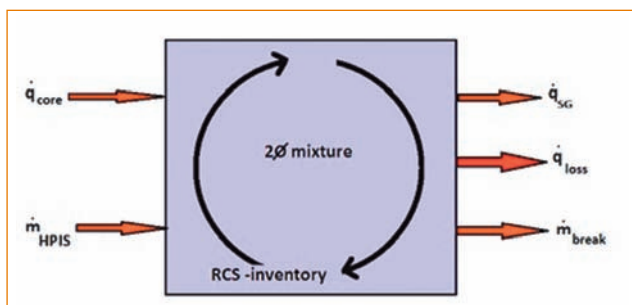


Figura 5. Visión esquemática del modelo usado durante la fase de circulación natural.

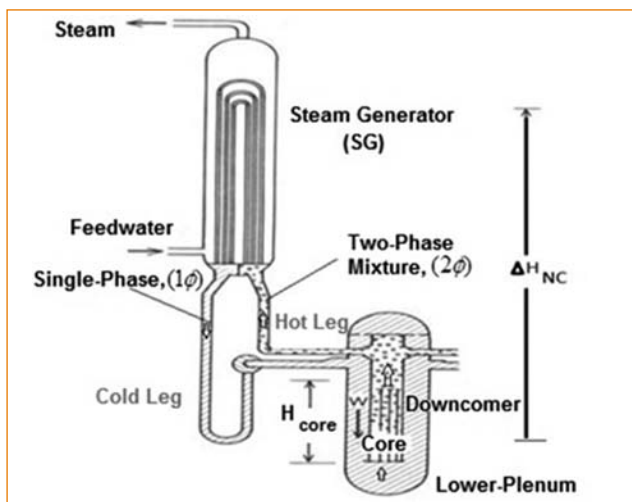


Figura 6. Visión esquemática de la fase de circulación natural en un lazo cerrado.

y por las condiciones experimentales de los calentadores del PRZ en la instalación LSTF. Pero esta distorsión no causa un efecto importante en el comportamiento del transitorio, ya que la potencia neta de calor no tiene una alta contribución relativa a la tasa de despresurización (el término de mayor peso es el de la energía de presión que sale del sistema, $\Xi_{\dot{p},\dot{m}\Delta h_{out}}$). En consecuencia, se ha constatado la buena escalabilidad entre ambas instalaciones, ya que no se observó ninguna distorsión significativa que afecte a los resultados finales durante la fase BD.

Escalado top-down de la fase de circulación natural

Los criterios a cumplir para que se considere que el sistema se encuentre en la fase de circulación natural son los siguientes: vaciado completo del presionador; bombas de recirculación del primario detenidas; y presión del circuito primario próxima a la del secundario, pero ligeramente por encima. La última de estas condiciones que se alcanza es la detención de las bombas, la cual tiene lugar alrededor del segundo 200 para ambas instalacio-

nes (velocidad de rotación de la bomba por debajo del 5% de su valor nominal). Esta fase se extiende hasta que finaliza el paso de agua líquida a través de la parte superior de los tubos en U de los generadores de vapor, situación que tiene lugar a los 350-400 segundos aproximadamente en ambas instalaciones.

En cuanto a la representación esquemática del sistema en esta fase para el estudio de escala, esta se puede describir como una mezcla

bifásica, Figura 5. A diferencia de la fase anterior, donde solamente las ecuaciones de conservación de masa y energía eran necesarias, en esta fase de circulación natural se hace necesaria la utilización de la ecuación de conservación del momento aplicada a un lazo cerrado del circuito primario [7], Figura 6.

Procediendo de forma análoga a la desarrollada en el apartado anterior, se llega a las siguientes ecuaciones adimensionalizadas y expresadas en términos de grupos de monomios π :

$$\Xi_{\dot{M},\dot{m}} = \Pi_{\tau} = \frac{\dot{m}_0 \tau_0}{M_0} = \omega \dot{m}_0 \tau_0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{p}^*}{dt^*} = & \Xi_{\dot{p},\dot{m}(h_m - \mu_m)} \left(\frac{\partial \dot{p}}{\partial \mu_m} \right)_{v_m} \frac{1}{M^*} \dot{m}_{HPIS}^* (h_m^* - \mu_m^*) \\ & - \Xi_{\dot{p},\dot{m}(h_m - \mu_m)} \left(\frac{\partial \dot{p}}{\partial \mu_m} \right)_{v_m} \frac{1}{M^*} \dot{m}_{break}^* (h_m^* - \mu_m^*) + \Xi_{\dot{p},\dot{q}_{net}} \left(\frac{\partial \dot{p}}{\partial \mu_m} \right)_{v_m} \frac{1}{M^*} \dot{q}_{net}^* \\ & - \Xi_{\dot{p},\dot{m}v_m} \left(\frac{\partial \dot{p}}{\partial v_m} \right)_{\mu_m} \frac{1}{\rho_m^*} (\dot{m}_{HPIS}^* - \dot{m}_{break}^*) \end{aligned} \quad (5)$$

Finalmente, tras la adimensionalización y expresión en términos de monomios π de la ecuación de conservación del momento aplicada a un lazo se tiene la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \Pi_{L/A,i} \frac{d}{dt^*} W_{m,i}^* = & - \sum_i \Delta (MF_i^*) + \Pi_{RI} (\rho_f - \rho_m)^* \\ & - \Pi_{F,1\phi} \sum_{i \in 1\phi} \left\{ \left(\frac{f_i L_i}{2D_{h,i}} + \frac{k_i}{2} \right) \left(\frac{A_0}{A_i} \right)^2 \right\} \frac{W_i^{*2}}{\rho_i^*} \\ & - \Pi_{F,2\phi} \sum_{i \in 2\phi} \left\{ \left(\frac{f_i L_i}{2D_{h,i}} \phi_i^2 + \frac{k_i}{2} \phi_i^2 \right) \left(\frac{A_0}{A_i} \right)^2 \right\} \frac{W_{m,i}^{*2}}{\rho_i^*} \end{aligned} \quad (6)$$

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para esta fase de circulación natural mediante la metodología de escala top-down.

El análisis de escala de la fase de circulación natural muestra una buena escalabilidad entre ambas instalaciones, dado que todas los cocientes de los grupos de monomios π están cercanos de la unidad, entre 0.72 y 1.54. En cuanto a la importancia relativa de cada grupo de monomios π para cada ecuación de conservación: la ecuación de conservación de masa tiene un sólo un término, por lo que este se normaliza a la unidad; en la ecuación de evolución de la presión, los términos de entalpía (inyectada y saliendo del sistema) seguida del calor neto transferido al sistema, son los términos dominantes, también cercanos a



Grupos de Monomios π	LSTF-ROSA		TSK-PWR		$\frac{\Xi_{x,y,LSTF}}{\Xi_{x,y,TSK-PWR}}$
	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	
$\Xi_{\dot{M},\dot{m}}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00
$\Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{in}-\mu_m)}$	-7.51	0.951	-6.72	0.946	1.12
$\Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{out}-\mu_m)}$	7.90	1.0	7.1	1.0	1.11
$\Xi_{\dot{\rho},\dot{q}_{net}}$	-2.58	0.326	-2.20	0.31	1.17
$\Xi_{\dot{\rho},\dot{m}v_m}$	-0.201	$2.54 \cdot 10^{-2}$	-0.194	$2.73 \cdot 10^{-2}$	1.03
$\Pi_{LI A}$	49.1	$6.75 \cdot 10^{-2}$	50.0	$4.93 \cdot 10^{-2}$	0.98
Π_{Ri}	727.5	1.0	1014	1.0	0.72
$\Pi_{F,1\psi}$	12.08	$1.66 \cdot 10^{-3}$	7.83	$7.72 \cdot 10^{-3}$	1.54
$\Pi_{F,2\psi}$	0.52	$7.15 \cdot 10^{-4}$	0.404	$3.98 \cdot 10^{-4}$	1.29

Tabla 3. Resultados del análisis de escala durante la fase de circulación natural.

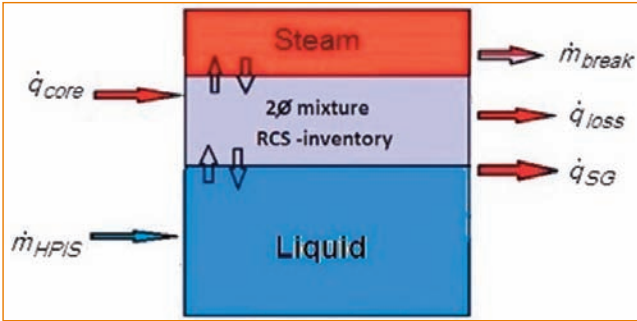


Figura 7. Visión esquemática del modelo usado durante la fase de descarga bifásica.

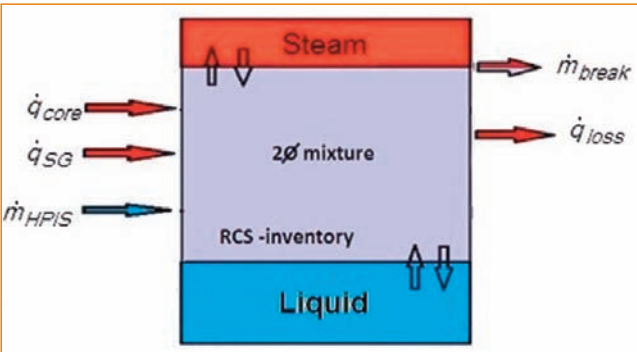


Figura 8. Visión esquemática del modelo usado durante la fase de descarga de vapor de alta calidad.

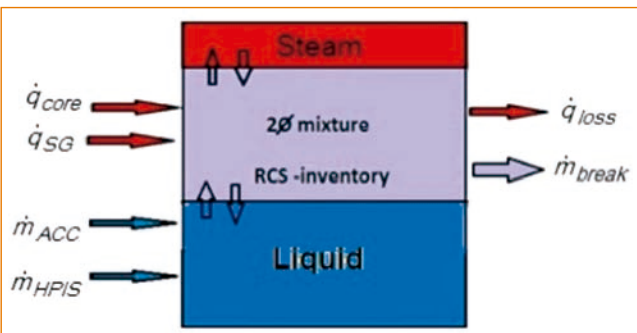


Figura 9. Visión esquemática del modelo usado durante la fase de relleno del reactor.

la unidad; mientras que para la ecuación de la conservación del momento del lazo, la contribución principal es la del monomio del número Richardson.

Escalado top-down de la fase de descarga bifásica

Durante esta fase se tiene un aumento de la calidad del vapor que se pierde a través de la rotura. La fase finaliza

cuando a través de la rotura prácticamente sólo se descarga vapor, esta situación se da aproximadamente en los segundos 900 y 1000 para la instalación LSTF-ROSA y TSK-PWR respectivamente. La representación esquemática del sistema adoptada para la representación de esta fase para la realización del análisis de escala se muestra en la Figura 7, donde se aprecia que el sistema ha sido dividido en tres regiones: vapor, mezcla bifásica y líquido.

Procediendo de forma análoga a la desarrollada en los dos apartados anteriores, se llega a las siguientes ecuaciones adimensionalizadas y expresadas en términos de grupos de monomios π :

$$\frac{dM^*}{dt^*} = \frac{\dot{m}_0 \tau_0}{M_0} \sum_{k=g,m,l} [\sum \dot{m}_{in,k}^* - \sum \dot{m}_{out,k}^*] = \Xi_{\dot{M},\dot{m}} \sum_{k=g,m,l} [\sum \dot{m}_{in,k}^* - \sum \dot{m}_{out,k}^*] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp^*}{dt^*} = & \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{in}-\mu)_k} C_{i,k}^* \sum \dot{m}_{in,k}^* (h_{in,k} - \mu_k)^* \\ & - \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{out}-\mu)_k} C_{i,k}^* \sum \dot{m}_{out,k}^* (h_{out,k} - \mu_k)^* \\ & + \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{q}_k} C_{i,k}^* \dot{q}_{net,k}^* - \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}v_k} C_2^* v_k^* [\sum \dot{m}_{in,k}^* - \sum \dot{m}_{out,k}^*] \end{aligned} \quad (8)$$

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para esta fase de descarga bifásica mediante la metodología de escala top-down.

En resumen, para esta fase de descarga bifásica se tiene que el análisis de escala muestra una buena escalabilidad entre ambas instalaciones, ya que todos los cocientes entre los grupos de monomios π adimensionales están cerca de la unidad, en particular entre 0.93 y 1.38, por lo que no se producen distorsiones de escala. Con respecto a la contribución relativa a cada una de las variables principales de cada término: la masa total del sistema depende sólo de un término, por lo que éste es el dominante; y con respecto a la tasa de despresurización, los términos de entalpía de la fase gaseosa son los dominantes durante la fase descarga bifásica.

Escalado top-down de la fase de descarga de vapor de alta calidad

Durante esta fase se tiene que la calidad del vapor que se pierde a través de la rotura se encuentra en valores próximos a la unidad. La fase finaliza cuando los acumuladores comienzan a descargar, de forma que se acentúa la recuperación de inventario de agua del circuito primario. Esta situación se da aproximadamente en los segundos 2350 y 2200 para la instalación LSTF-ROSA y TSK-PWR respectivamente. Al igual que en la fase anterior, el sistema se ha dividido en tres regiones diferenciadas para la realización del análisis de escala, Figura 8.

Procediendo de forma análoga a la desarrollada en los dos apartados anteriores, se llega a las siguientes ecuaciones adimensionalizadas y expresadas en términos de grupos de monomios π :

$$\frac{dM^*}{dt^*} = \Xi_{\dot{M},\dot{m}} \sum_{k=g,m,l} [\sum \dot{m}_{in,k}^* - \sum \dot{m}_{out,k}^*] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp^*}{dt^*} = & \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{in}-\mu)_k} C_{i,k}^* \sum \dot{m}_{in,k}^* (h_{in,k} - \mu_k)^* \\ & - \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}(h_{out}-\mu)_k} C_{i,k}^* \sum \dot{m}_{out,k}^* (h_{out,k} - \mu_k)^* \\ & + \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{q}_k} C_{i,k}^* \dot{q}_{net,k}^* - \sum_{k=g,m,l} \Xi_{\dot{\rho},\dot{m}v_k} C_2^* v_k^* [\sum \dot{m}_{in,k}^* - \sum \dot{m}_{out,k}^*] \end{aligned} \quad (10)$$



Grupos de Monomios π	LSTF-ROSA		TSK-PWR		$\frac{\Xi_{x,y,LSTF}}{\Xi_{x,y,TSK-PWR}}$
	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	
		$\Xi_{x,y,max}$		$\Xi_{x,y,max}$	
$\Xi_{\dot{M},\dot{m}}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00
$\left\{ \Xi_{\rho,m}(h_{in}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	-22.11	1.0	-20.21	1.0	1.09
	-1.73·10 ⁻²	7.82·10 ⁻⁴	-1.39·10 ⁻²	6.88·10 ⁻⁴	1.25
$\left\{ \Xi_{\rho,m}(h_{out}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	2.14·10 ⁻³	9.68·10 ⁻⁵	1.89·10 ⁻³	9.35·10 ⁻⁵	1.13
	-22.11	1.0	-20.21	1.0	1.09
$\left\{ \Xi_{\rho,q_{net},k} \right\}^{k=g,m,l}$	7.92·10 ⁻⁴	3.58·10 ⁻⁵	5.72·10 ⁻⁴	2.83·10 ⁻⁵	1.38
	-0.49	2.22·10 ⁻²	-0.53	2.62·10 ⁻²	0.93
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	-4.43	0.200	-4.32	0.214	1.03
	-2.17·10 ⁻²	9.81·10 ⁻⁴	-1.86·10 ⁻²	9.20·10 ⁻⁴	1.17
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	-0.102	4.63·10 ⁻³	-9.90·10 ⁻²	4.90·10 ⁻³	1.03
	13.88	0.628	14.52	0.718	0.96
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	1.42	6.42·10 ⁻²	1.34	6.61·10 ⁻²	1.06
	0.819	3.70·10 ⁻²	0.847	4.19·10 ⁻²	0.97

Tabla 4. Resultados del análisis de escala durante la fase de descarga bifásica.

Grupos de Monomios π	LSTF-ROSA		TSK-PWR		$\frac{\Xi_{x,y,LSTF}}{\Xi_{x,y,TSK-PWR}}$
	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	
		$\Xi_{x,y,max}$		$\Xi_{x,y,max}$	
$\Xi_{\dot{M},\dot{m}}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00
$\left\{ \Xi_{\rho,m}(h_{in}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	-22.11	1.0	-20.21	1.0	1.09
	-1.73·10 ⁻²	7.82·10 ⁻⁴	-1.39·10 ⁻²	6.88·10 ⁻⁴	1.25
$\left\{ \Xi_{\rho,m}(h_{out}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	2.14·10 ⁻³	9.68·10 ⁻⁵	1.89·10 ⁻³	9.35·10 ⁻⁵	1.13
	-22.11	1.0	-20.21	1.0	1.09
$\left\{ \Xi_{\rho,q_{net},k} \right\}^{k=g,m,l}$	7.92·10 ⁻⁴	3.58·10 ⁻⁵	5.72·10 ⁻⁴	2.83·10 ⁻⁵	1.38
	-0.49	2.22·10 ⁻²	-0.53	2.62·10 ⁻²	0.93
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	-4.43	0.200	-4.32	0.214	1.03
	-2.17·10 ⁻²	9.81·10 ⁻⁴	-1.86·10 ⁻²	9.20·10 ⁻⁴	1.17
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	-0.102	4.63·10 ⁻³	-9.90·10 ⁻²	4.90·10 ⁻³	1.03
	13.88	0.628	14.52	0.718	0.96
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	1.42	6.42·10 ⁻²	1.34	6.61·10 ⁻²	1.06
	0.819	3.70·10 ⁻²	0.847	4.19·10 ⁻²	0.97

Tabla 5. Resultados del escalado durante la fase de descarga de vapor de alta calidad.

Grupos de Monomios π	LSTF-ROSA		TSK-PWR		$\frac{\Xi_{x,y,LSTF}}{\Xi_{x,y,TSK-PWR}}$
	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	$\Xi_{x,y}$	$\frac{\Xi_{x,y}}{\Xi_{x,y,max}}$	
		$\Xi_{x,y,max}$		$\Xi_{x,y,max}$	
$\Xi_{\dot{M},\dot{m}}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}}(h_{in}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	-231.5	1.0	-281.1	1.0	0.88
	-4.52·10 ⁻³	1.95·10 ⁻⁵	-6.56·10 ⁻³	2.33·10 ⁻⁵	0.74
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}}(h_{out}-\mu)_k \right\}^{k=g,m,l}$	1.27·10 ⁻⁴	5.49·10 ⁻⁷	2.14·10 ⁻⁴	7.61·10 ⁻⁷	0.59
	-231.5	1.0	-281.1	1.0	0.88
$\left\{ \Xi_{\rho,q_{net},k} \right\}^{k=g,m,l}$	8.48·10 ⁻⁴	3.66·10 ⁻⁶	1.13·10 ⁻³	4.02·10 ⁻⁶	0.8
	1.27·10 ⁻⁴	5.49·10 ⁻⁷	2.14·10 ⁻⁴	7.61·10 ⁻⁷	0.59
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	219	0.946	108.5	0.386	2.02
	1.40	6.05·10 ⁻³	0.655	2.33·10 ⁻³	2.14
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	0.240	1.04·10 ⁻³	0.151	5.37·10 ⁻⁴	1.58
	7.76	3.35·10 ⁻²	7.36	2.62·10 ⁻²	1.05
$\left\{ \Xi_{\rho,\dot{m}v}_k \right\}^{k=g,m,l}$	5.90·10 ⁻²	2.55·10 ⁻⁴	6.56·10 ⁻²	2.33·10 ⁻⁴	0.9
	5.22·10 ⁻²	2.25·10 ⁻⁴	5.77·10 ⁻²	2.05·10 ⁻⁴	0.9

Tabla 6. Resultados del escalado durante la fase de relleno del reactor.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para esta fase de descarga de vapor de alta calidad mediante la metodología de escala *top-down*.

En resumen, el análisis de escala de la fase de descarga de vapor de alta calidad muestra una buena escalabilidad entre ambas instalaciones, sin distorsiones de escala. En cuanto a la importancia relativa de cada término en la des-

presurización, los términos dominantes son el calor neto transferido al sistema seguido de la entalpía del HPIS.

Escalado *top-down* de la fase de relleno del reactor

La fase comienza con el inicio de la inyección de líquido por parte de los acumuladores, de forma que se produce el relleno de agua del circuito primario. Como se ha dicho en el apartado anterior, esta situación se da aproximadamente en los segundos 2350 y 2200 para la instalación LSTF-ROSA y TSK-PWR respectivamente. De igual modo que en las dos fases anteriores, el sistema se ha dividido en tres regiones diferenciadas para la realización del análisis de escala, Figura 9.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para esta fase de relleno del reactor mediante la metodología de escala *top-down*.

En cuanto a las conclusiones del análisis de escala de la fase relleno del reactor decir que los cálculos efectuados muestran una escalabilidad razonable entre ambas instalaciones, dado de que los cocientes de los grupos de monomios π adimensionalizados no están muy lejos de la unidad. Esto es así en todos ellos a excepción del calor neto transferido desde/hacia el sistema para los términos correspondientes a las fases gaseosa y mezcla, en los que los valores de los grupos de monomios π se encuentran próximos a 2, si bien solamente la fase gaseosa podría tener alta relevancia atendiendo al criterio de importancia. Finalmente, subrayamos que, como se explicó anteriormente, estas discrepancias provienen principalmente de las diferencias en el diseño del HPIS de ambas instalaciones. Pero añadido al hecho de que estas discrepancias están en el lado de la seguridad, es decir, el calor neto es una distorsión de escala conservadora. Lo que lleva a la consecuencia de poder concluir que esta distorsión de escala es totalmente aceptable. En cuanto a la contribución relativa a la despresurización del sistema, los términos de entalpía entrante-saliente y el calor neto transferido al sistema de la fase gaseosa son los términos dominantes con casi la misma contribución.

CONCLUSIONES

Las técnicas de escalado son una herramienta esencial para el diseño y operación de instalaciones experimentales de pequeño tamaño, ya que a partir de estas técnicas se puede inferir de una forma más precisa el comportamiento de los experimentos realizados en ellas en las instalaciones reales. En este sentido, los análisis de escala son un elemento cuantitativo que permite confirmar la escalabilidad entre instalaciones. En este documento se desarrolla el análisis *top-down* de la metodología de escalada H2TS aplicada a un escenario SBLOCA (test ROSA 1.2 de la instalación LSTF) usando el código TRACE.



MEJORES PONENCIAS DE LA 43ª REUNIÓN ANUAL SNE

A lo largo del documento se ha llevado a cabo el análisis de escala de las cinco fases de que consta dicho transitorio, la base de esta escalabilidad nace de la mencionada metodología H2TS, donde las ecuaciones de conservación se aplican a cada una de las fases en las que se ha dividido el transitorio. De la aplicación de estas ecuaciones de conservación en las dos instalaciones un total de 53 grupos de monomios π han sido obtenidos. Los cocientes de ellos entre ambas instalaciones han estado en la práctica totalidad en la vecindad de la unidad, por lo que la escalabilidad ha sido constatada, mostrando una buena escalabilidad entre la instalación experimental LSTF-ROSA y las plantas comerciales del tipo TSK-PWR para un transitorio SBLOCA, concretamente el experimento ROSA 1.2.

Como resultado relevante destacar que, a lo largo del presente documento, se ha constatado la escalabilidad de un transitorio SBLOCA entre una planta experimental y un reactor comercial de diferente tipo al de la planta de referencia de dicha instalación experimental para un experimento SBLOCA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el soporte financiero del proyecto MODEXFLAT, referencia: ENE2013-48565-C2-1-P y el soporte financiero del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Agradecer a JAERI por proporcionar los datos experimentales a través del proyecto CAMP-OECD. ■

- [1]. Zuber N., "Hierarchical, Two-Tiered Scaling Analysis - Appendix D: An Integrated Structure and Scaling Methodology for Severe Accident Technical Issue Resolution". NUREG/CR-5809, EGG-2659, November 1991.
- [2]. Muñoz-Cobo J. L., Romero A., & Chiva S., "Analysis with TRACE Code of ROSA Test 1.2: Small LOCA in the Hot-Leg with HPI and Accumulator Actuation", NUREG/IA-420, 2012.
- [3]. Banerjee S., Ortiz M. G., Larson T. K., & Reeder D. L., "Top-Down Scaling Analyses. Methodology for AP600 Integral Tests", INEL-96/0040, May 1997.
- [4]. Mitsubishi Heavy Industries Ltd, "Scaling Analysis for US-APWR Small Break LOCAs", Report UAP-HF-09568-NP 2009.
- [5]. Wulff W., "Scaling of Thermohydraulic Systems", Nuclear Engineering and Design, Vol 163, pp. 359-395, 1996.
- [6]. Wulff W., & Rohatgi U., "System Scaling for the Westinghouse AP600 Pressurized Water Reactor and Related Test Facilities". USNRC Report, Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-5541, 1998.
- [7]. Reyes J.N. Jr, & Hochreiter L., "Scaling analysis for the OSU AP600 test facility (APEX)", Nuclear Engineering and Design, Vol. 186, pp. 53-109, 1998.

REFERENCIAS

CONVOCATORIAS 2018

14 - 18 OCTUBRE Qingdao City, China	NUTHOS-12 — 12TH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON REACTOR THERMAL-HYDRAULICS, OPERATION, AND SAFETY http://www.nuthos-12.org/dct/page/1
15 - 18 OCTUBRE Ontario, Canada	ISAMC-2018: INTERNATIONAL SEVERE ACCIDENT MANAGEMENT CONFERENCE http://nuclearsafety.gc.ca/eng/stay-connected/get-involved/session-workshop/2018-ISAMC.cfm
22-24 OCTUBRE Avignon, Francia	DEM 2018: DISMANTLING CHALLENGES: INDUSTRIAL REALITY, PROSPECTS AND FEEDBACK EXPERIENCE https://www.sfen-dem2018.org/
22 - 26 OCTUBRE Trieste, Italy	FIRST JOINT IAEA/ICTP COURSE ON SCIENTIFIC NOVELTIES IN THE PHENOMENOLOGY OF SEVERE ACCIDENTS IN WATER COOLED REACTORS https://www.iaea.org/events
24 - 26 OCTUBRE Avignon, Francia	NUWCEN 2018: CEMENT-BASED MATERIALS FOR NUCLEAR WASTES https://www.sfen-nuwcem2018.org/
22 - 27 OCTUBRE Gandhinagar India	FEC 2018: 27TH IAEA FUSION ENERGY CONFERENCE (FEC 2018) https://www.iaea.org/events/fec-2018
5 - 9 NOVIEMBRE Vienna, Austria	SYMPOSIUM ON INTERNATIONAL SAFEGUARDS www.iaea.org
13 - 23 NOVIEMBRE Vienna, Austria	TRAINING/WORKSHOP ON STRATEGIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENTS OF NUCLEAR POWER PROGRAMMES https://www.iaea.org/events/security-of-radioactive-material-conference-2018
4- 7 DICIEMBRE Vienna, Austria	TECHNICAL MEETING ON REACTOR CORE MANAGEMENT AND ENGINEERING IN OPERATING NUCLEAR POWER PLANTS https://www.iaea.org/events/
3 - 7 DICIEMBRE Vienna, Austria	INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SECURITY OF RADIOACTIVE MATERIAL: THE WAY FORWARD FOR PREVENTION AND DETECTION https://www.iaea.org/events