

DESARROLLO DE MODELOS Y SUBROUTINAS DE TRAC/GE PARA EL ANALISIS DE LA CONTENCION DEL REACTOR DE SEGURIDAD PASIVA SBWR

J.L. MUÑOZ COBO - G. VERDU - A. ESCRIVA - C. PEREIRA - V. GARCIA
I. TKACHENKO - R. SANCHIS

La empresa General Electric con el apoyo del DOE (Departamento de Energía de los Estados Unidos de América), dirige un proyecto global de colaboración entre varios países para el diseño del Reactor de Agua en Ebullición Simplificado (SBWR) [1], que es un reactor nuclear avanzado de seguridad pasiva de potencia media (600 MWe).

Una de las actividades encomendadas al CIEMAT, dentro del proyecto de reactores avanzados que dirige UNESA, es el desarrollo de modelos de TRAC/GE, para el análisis de la contención del reactor SBWR. Dicha actividad se realiza en colaboración con el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV, y consta fundamentalmente de dos subactividades principales y una secundaria.

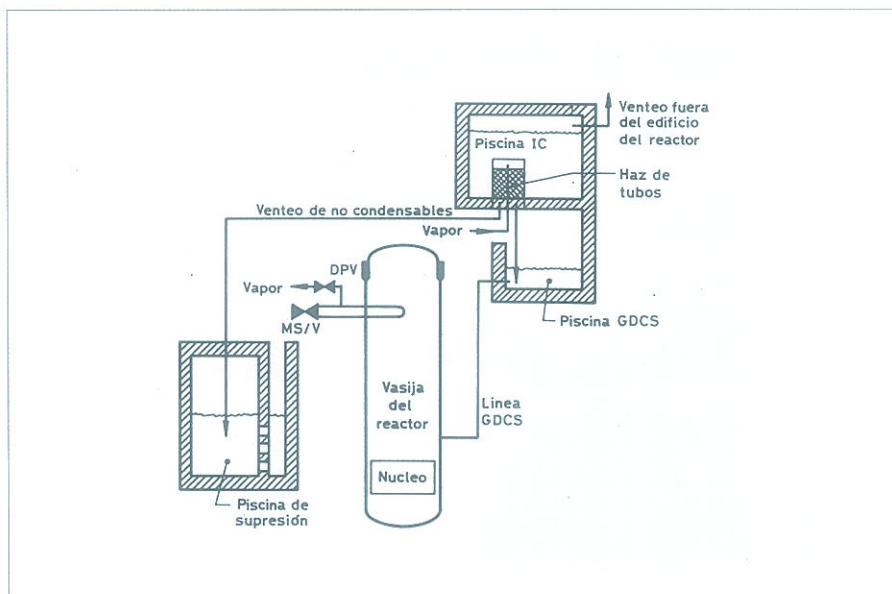
En la primera subactividad se trata de desarrollar modelos de transmisión de calor en presencia de gases no condensables, en el interior de los tubos de los condensadores del sistema PCCS (Passive Containment Cooling System) y los de aislamiento (IC), e im-

plementarlos en una subrutina apropiada para TRAC/GE.

El fenómeno físico que tiene lugar en el interior de los condensadores PCCS e IC, es una condensación de película en presencia de gases no condensables con flujo concurrente de vapor. La presencia de gases no condensables, incluso en una pequeña proporción tiende a reducir enormemente la transferencia de calor. Por otra parte, altos flujos de gas favorecen la transferencia de calor debido a dos causas, por un lado la tensión interfacial líquido-gas tiende a reducir el espesor de película a altos números de Reynolds de la fase gaseosa, y por otro, la existencia de régimen muy turbulento en el vapor hace que la mezcla de gases no condensables (NC) y vapor tienda a homogeneizarse, reduciendo las altas concentraciones de no condensables que se alcanzan en la interfase líquido-vapor debido al transporte del gas NC junto con el vapor hacia la superficie de condensación.

El objetivo es modelizar convenientemente todos estos fenómenos con el

F1 Sistema pasivo de refrigeración de la contención.



fin de predecir de forma fiable el comportamiento de los condensadores IC y los condensadores PCCC, que son elementos básicos de los sistemas de seguridad pasiva del reactor SBWR.

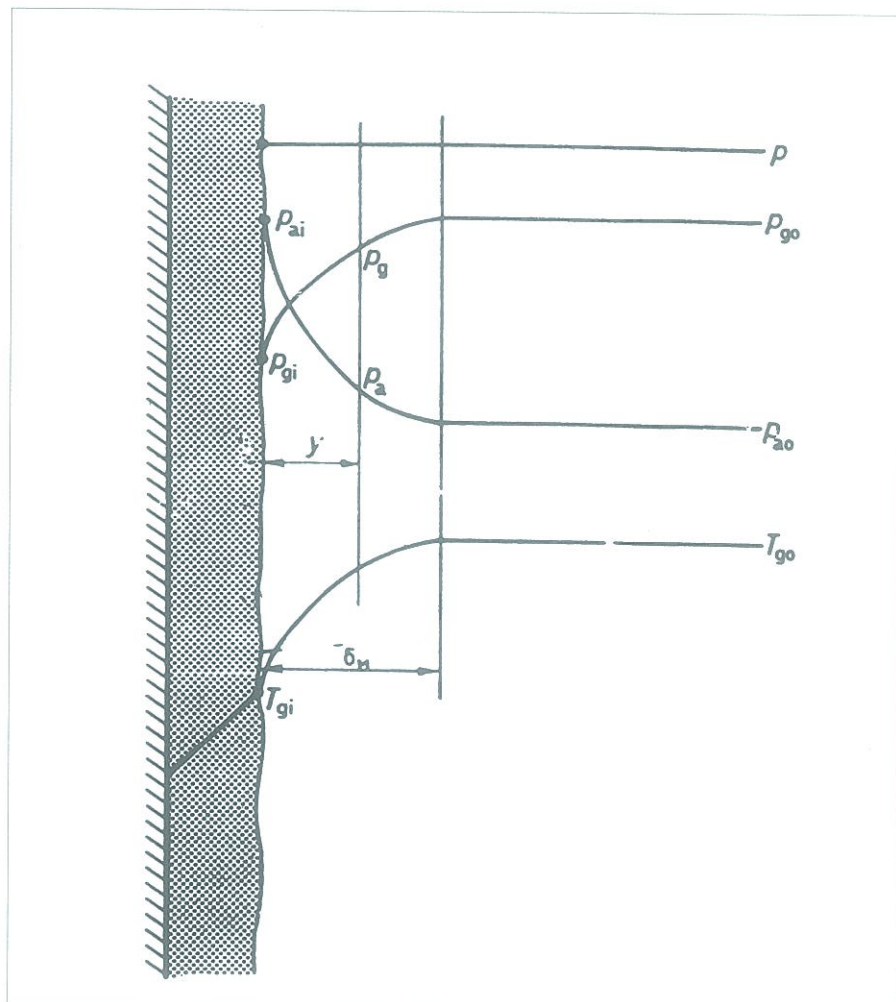
En la segunda subactividad se trata de desarrollar modelos de mezcla bi y tridimensionales de vapor y gases no condensables con el agua de la piscina de supresión. El vapor y gases no condensables pueden proceder de los venteos horizontales que comunican el pozo húmedo con el anillo, estando este último comunicado con el pozo seco. También se produce una descarga de NC y algo de vapor en la piscina de supresión, a través de los venteos de no condensables procedentes de los condensadores IC y PCCC.

La importancia de estos fenómenos de mezcla radica en que dan lugar a importantes fenómenos de estratificación de temperatura en la piscina lo que puede originar importantes tensiones térmicas; además los fenómenos de estratificación afectan obviamente a la evolución de la presión en la contención.

En la tercera subactividad se trata de modelizar la contención del SBWR con los códigos TRAC y CONTAIN, y calcular la evolución de la presión a largo plazo.

LOS CONDENSADORES PCCC Y CONDENSADORES IC

Un objetivo de diseño para el SBWR, es dotarle de una capacidad pasiva para eliminar la potencia diferida en el caso de accidente. En el accidente de diseño base de pérdida de refrigerante (LOCA), el vapor entrará en el pozo seco de la contención procedente del circuito primario del reactor, donde se mezclará con el gas residual de la contención (Nitrógeno). En este sistema de refrigeración de la contención pasivo, que hemos llamado PCCS, la mezcla de vapor y no condensables (Nitrógeno y Oxígeno), fluye hacia el condensador (del cual existen varias unidades, 2 ó 3), el cual se encuentra localizado en el interior de una piscina de agua a presión atmosférica situada por encima del nivel del pozo seco de la contención (figura 1). De esta forma el calor por desintegración será enviado a la atmósfera como calor de vaporización del agua de la piscina. La circulación tiene lugar por convección natural, y el sistema funcionará sin la ayuda de dispositivos mecánicos como por ejemplo bombas. Así pues, mientras que la misión de los condensadores PCCC es eliminar el calor de desintegración de la contención después de un LOCA, manteniendo la presión en la contención dentro de los límites de diseño, resulta que la función de los condensadores de aislamiento, es eliminar el calor de desintegración en el caso de que el reactor se quede aislado durante operaciones de potencia, como consecuencia de un transitorio. En este caso el sistema IC controlará la presión y la temperatura



FII Condensación en presencia de no condensables. Se supone que la temperatura T_{gi} en la interfase líquido-vapor corresponde a la temperatura de saturación a la presión parcial del vapor. Conviene fijarse que al condensarse el vapor en la interfase disminuye la presión parcial P_g .

del refrigerante del reactor, dentro de los márgenes de diseño, de forma que no se abran las válvulas de alivio SRV, y no tenga lugar la despresurización del núcleo.

Explicaremos ahora con un poco más de detalle la operación de los condensadores del sistema PCCS, en este caso el condensador recibe una mezcla de vapor y gases no condensables, directamente del pozo seco. El vapor se condensa dentro de los tubos verticales de los PCCC, que son drenados hacia la piscina del sistema de refrigeración por gravedad, localizada dentro del pozo seco de la contención. Los gases no condensables, son conducidos a la piscina de supresión en el pozo húmedo a través de una línea de venteo, que al igual que la línea de drenado no tiene válvulas. Las unidades de los PCCC, se han diseñado basándose en el concepto de los condensadores IC teniendo en cuenta que sus condiciones son menos severas que en estos últimos.

En cuanto a la operación de los condensadores IC, una línea de suministro

de vapor conecta la vasija del reactor con cada unidad de IC, que está situada en una gran piscina de agua fuera de la contención y a una mayor elevación. Cuando la presión en el reactor es demasiado elevada se abren unas válvulas que permiten la entrada en funcionamiento de los IC. El condensado se drena hacia el downcomer de la vasija del reactor, siendo los no condensables dirigidos a través de venteos a la piscina de supresión produciéndose allí junto con el vapor que arrastran, fenómenos de mezcla que dan origen a una estratificación de temperatura en la piscina.

El IC, se opera simplemente abriendo la válvula de retorno del condensado, lo que significa que este componente está a la presión de la vasija del reactor y que por lo tanto experimentará un transitorio térmico cada vez que entre en funcionamiento.

De todo lo dicho anteriormente se deduce la gran importancia de los modelos de transmisión de calor en presencia de no condensables, pues la presencia de no condensables tiende a

reducir la transmisión de calor y por tanto a reducir la eficiencia de los sistemas de seguridad pasiva.

DESARROLLO DE MODELOS Y SUBROUTINAS PARA TRAC/GE: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

Expondremos primero en este apartado los avances realizados en el desarrollo de modelos de transmisión de calor en el interior de los tubos de los condensadores PCCC e IC, en presencia de no condensables.

Hasta la fecha se han realizado experimentos en Berkeley, MIT y Toshiba, estando previstos nuevos experimentos en el Paul Scherrer Institute de Zurich en

Octubre de 1993, y en ANSALDO (Milán) en Febrero de 1994.

Dentro de esta primera actividad hemos desarrollado un modelo complejo de transmisión de calor en presencia de gases no condensables que incluye efectos de esfuerzos cortantes debidos al flujo de vapor más gas no condensable.

Hay que tener en cuenta que los gases no condensables, son arrastrados por el vapor que se dirige a la interfase líquido-gas para condensarse, acumulándose en dicha interfase tal como puede verse en la figura 11. De esta forma, la presión parcial de no condensables en dicha zona aumenta, mientras

la del vapor disminuye, lo que origina una disminución de la temperatura del vapor en la interfase, reduciéndose de esta forma la transmisión del calor [2]. Una versión simplificada del modelo desarrollado por nosotros, ha sido implementada en una subrutina adaptable a TRAC/GE, ya que utiliza subrutinas del código TRAC, y además permite la obtención de los coeficientes de transferencia de calor locales en las distintas zonas de los tubos de los condensadores. Dicho programa permite también el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor locales con distintos modelos entre ellos el de GE-Berkeley, y el de Nusselt-Rosenhow, con el fin de compararlos con los nuestros.

A continuación se definen para cada tipo de modelo los factores de degradación de ese modelo, que son números de Nusselt basados en el espesor de película calculado para cada modelo particular, y que puede escribirse en la forma [3]:

$$f = \frac{h_{exp}(z)}{h_{teor}(z)} = \frac{h_{exp}(z) \cdot \delta(z)}{k_l} \quad (1)$$

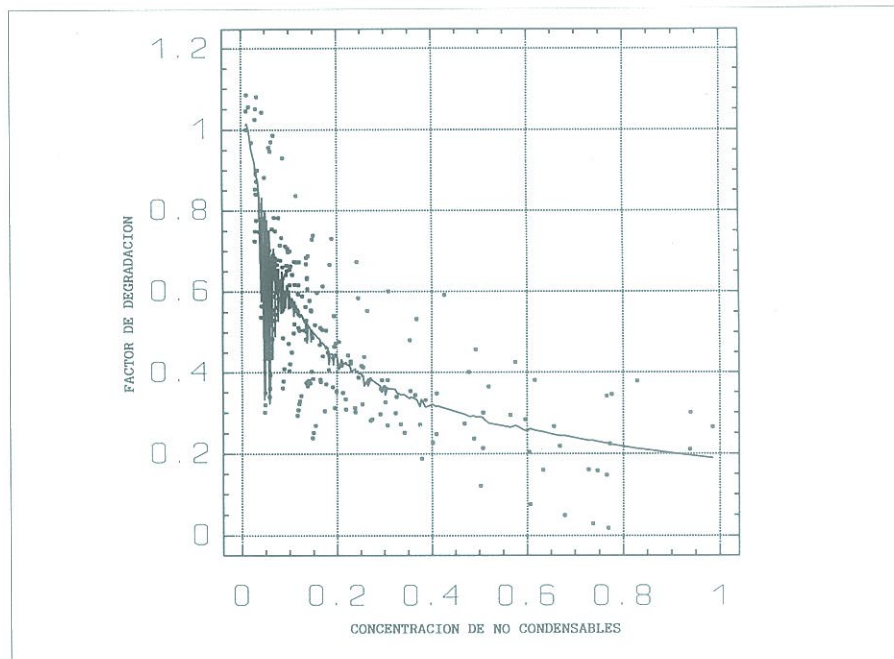
en donde $h_{exp}(z)$ es el coeficiente local de transferencia de calor en la posición z del tubo, $h_{teor}(z)$ es el coeficiente teórico local de transferencia de calor por condensación para un tipo de modelo determinado, $\delta(z)$ es el espesor local de la película de líquido calculado con ese modelo, y k_l es la conductividad térmica de líquido. Ha de observarse que un modelo es tanto mejor cuanto los factores de degradación estén más próximos a la unidad, sean cuales sean las condiciones termodinámicas en el interior del tubo.

A continuación los factores de degradación obtenidos para todos los experimentos y las distintas posiciones z dentro de cada experimento, se correlacionan con la fracción en masa de gases no condensables M_{NC} , y con el número de Reynolds de la mezcla de vapor y gases no condensables Re_m , es decir escribimos f en la forma:

$$f = f_1(Re_m) \cdot f_2(M_{NC}) \quad (2)$$

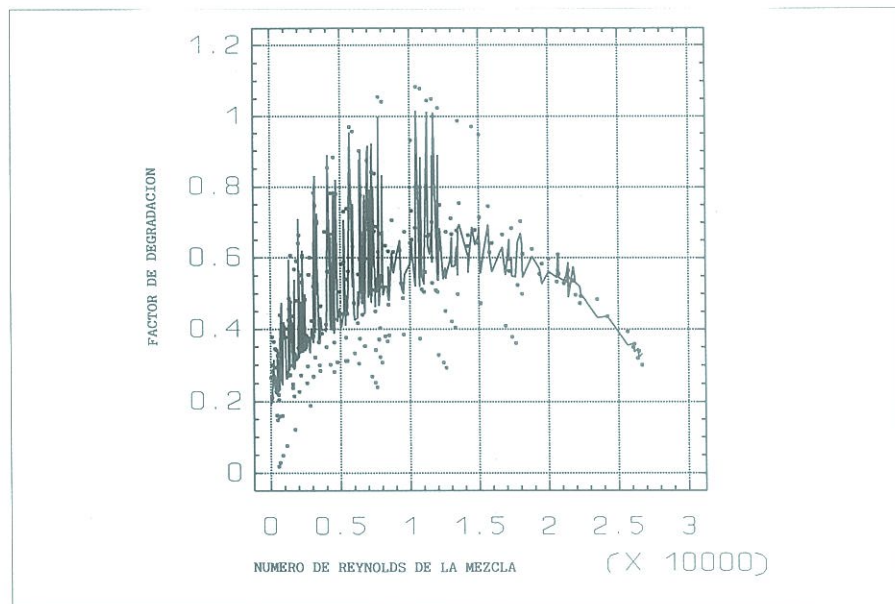
en donde f_1 y f_2 son funciones que deben determinarse mediante un algoritmo de ajuste no lineal de Levenbger-Marquardt[4]. El mejor tipo de modelo será aquel en el cual la suma de los cuadrados de los errores sea lo más pequeña posible, y el coeficiente de correlación múltiple lo más próximo que podamos a la unidad.

Con el fin de determinar $f_1(Re_m)$ y $f_2(M_{NC})$, hemos procedido de la siguiente forma, en primer lugar hemos creado un fichero conteniendo los datos necesarios de todos los casos de los experimentos de Berkeley. De estos, hemos eliminado aquellos casos en los cuales se producía inversión de temperatura.



F III Factor de degradación en función de la concentración de no condensables.

F IV Factor de degradación en función del número de Reynolds de la mezcla.



A continuación se ha ejecutado el programa HTCPIPE.f desarrollado por nosotros, y que es capaz de efectuar los cálculos de todos los experimentos, creando un fichero de salida para cada modelo. Los casos analizados son doscientos cuarenta y cinco, para cada uno de estos casos el fichero de salida contiene los siguientes datos: número de Reynolds de la película de líquido, número de Reynolds de la mezcla de vapor y gases no condensables, fracción en masa de los gases no condensables, factor de degradación.

A continuación se han sometido estos datos a un análisis de Regresión No Lineal, encontrándose para el modelo mecanicista desarrollado por nosotros que la expresión que mejor ajuste los factores de degradación obtenidos con el Reynolds de la mezcla y la fracción en masa de gases no condensables es:

$$f = (1 + P_1 Re_m - P_2 Re_m^2) \cdot (1 - P_3 M_{NC}^4 + P_5 e^{(-P_6 M_{NC})}) \quad (3)$$

donde $P_1 = 3.13E-5$, $P_2 = 6.16E-5$, $P_3 = 0.813$, $P_4 = 0.169$, $P_5 = 0.39$, $P_6 = 16.69$

La suma de los cuadrados de los errores obtenida con nuestro modelo fue aproximadamente la mitad que la obtenida con el modelo de GE, aunque el coeficiente de correlación fue ligeramente inferior e igual a 0.83, que es un valor razonable, siendo nuestra varianza aproximadamente la mitad que la de GE.

En la figura III hemos representado el factor de degradación en función de la concentración de no condensables. Los puntos representan los factores de degradación para los distintos casos; Ha de tenerse en cuenta que para una misma fracción de no condensables en la mezcla, los distintos casos poseen condiciones de presión, temperatura de pared, temperatura de subenfriamiento del líquido, etc., muy diferentes unos de otros, lo que origina la dispersión de los puntos observada en la figura. Es de esperar que sucesivas mejoras ya diseñadas y que se introducirán en nuestro modelo permitirán mejorar aun más nuestros resultados.

En la figura IV hemos representado el factor de degradación en función del número de Reynolds de la mezcla. La línea continua representa los valores de la función de ajuste dada por la ecuación (3), las oscilaciones de la curva se deben obviamente a que dicha curva es realmente la proyección de la superficie $f(Re_m, M_{NC})$ sobre el plano (f, Re_m) , ya que para un mismo Re_m , tenemos distintas fracciones de gases no condensables por tener distintas condiciones en los distintos experimentos.

En cuanto a la segunda subactividad hemos de añadir que, de cara a analizar con detalle los procesos de mezcla en la piscina de supresión, se ha empezado a realizar un programa de si-

mulación de flujo bifásico en tres dimensiones. Se pretende que este programa, actualmente en fase de diseño, de respuestas más precisas que las de los programas en uso, gracias a la incorporación de nuevos algoritmos, considerablemente más precisos y razonablemente robustos. El algoritmo construido es de tipo semimplícito, tal como TRAC, RELAP5 / MOD2 y otros; la principal diferencia es la eliminación del "upwinding" de primer orden y su sustitución por un algoritmo de volúmenes finitos, de mucha más resolución. Además, se está introduciendo todo el paralelismo posible en el algoritmo, lo que puede disminuir apreciablemente el tiempo de ejecución.

A pesar de las mejoras, es dudoso que en los primeros intentos se puedan obtener resultados aceptables, especialmente en la zona de descarga de gases. Sin embargo, se prevé que en esta zona podrán usarse correlaciones empíricas si es necesario.

CONCLUSIONES

Si representamos los factores de degradación que se obtienen para nuestro modelo, h_{exp}/h_{teor} en función de los predichos por el modelo no lineal de regresión se obtiene la nube de puntos de la figura V. Observamos que la distribución de dichos puntos es bastante aceptable.

El análisis de la varianza que se ha efectuado con el programa STATGRA-FIFCS dio los siguientes resultados:

- Coeficiente de correlación $(R) = 0.829$
- Suma de los cuadrados de los errores para los 245 casos $(\sum e_i^2) = 3.435$
- Estimador insesgado de la varianza $(S^2 = \sum e_i^2 / (n-k)) = 0.014$ en donde n es el número de puntos considerados y k el de parámetros.

Luego S es igual a 0.11, aproximadamente la tercera parte del que se obtuvo en Estados Unidos con el modelo de GE.

El análisis realizado hasta la fecha sugiere que se podrán predecir bastante razonablemente los coeficientes de transferencia de calor en los tubos de los condensadores PCCC e IC. Por consiguiente se podrán tener estimaciones bastante fiables de la respuesta de dichos componentes pasivos en situaciones accidentales.

REFERENCIAS

- (1) R.J. Mc Candless, J.R. Redding. "Simplicity: the key to improved performance and economics". Nuclear Engineering International. November 1989.
- (2) J.G. Collier. "Convective Boiling and Condensation". Mc Graw-Hill. 1981.
- (3) K.M. Vierow, V.E. Schrock. "Condensation in a Natural Circulation Loop With Non-Condensable Gas Present". Int. Journal of Multiphase Flow. June 1991.
- (4) W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. "Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing". Cambridge University Press. 1992.

F V Factor de degradación del modelo CIEMAT-UPV, en función del factor de degradación obtenido del ajuste no lineal.

