

Actualización del Modelo de Calor de Decaimiento en los Códigos TRAC-BF1 y PARCS para la Simulación en modo *Stand-Alone* y Acoplado de Transitorios 3D.

Ana Jambrina¹, Teresa Barrachina¹, Amparo Soler², Rafael Miró¹, Gumersindo Verdú¹,
Alberto Concejal³

¹*Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM).
Universitat Politècnica de València (UPV).
Camí de Vera, s/n.
46021 Valencia, Spain.
(ajambrina@iqn.upv.es, tbarrachina@iqn.upv.es, rmiro@iqn.upv.es,
gverdu@iqn.upv.es)*

²*SEA Propulsion S. L.
Av. Atenas, 75.
28290 Las Rozas (Madrid), Spain.
(asoler@iberdrola.es)*

³*Iberdrola Ingeniería y Construcción S.A.U.
Av. Manoteras, 20.
28050 Madrid, Spain.
(acbe@iberdrola.es)*

Resumen – *En el análisis de seguridad nuclear, es muy importante ser capaz de simular los diferentes transitorios que pueden ocurrir en una planta nuclear con una alta precisión. Las simulaciones transitorias implican tanto cálculos termohidráulicos como neutrónicos, que se resuelven por diferentes códigos como, TRAC-BF1 y PARCS, respectivamente. Los modelos implementados en los códigos TRAC-BF1 y PARCS para los cálculos de calor de decaimiento se basan en el estándar ANS 1971 (por defecto) y la norma ANS 1979 (opción del usuario). Con la entrada en vigor de la norma ANS 1994, y la revisión posterior ANS 2005, los modelos de TRAC-BF1 y PARCS son totalmente obsoletos, por lo tanto, una revisión de los modelos más antiguos y la implementación de ANSI/ANS-5.1-2005 en el código son obligatorios. El presente trabajo describe un estudio comparativo de los modelos de calor de decaimiento implementados en los códigos TRAC-BF1 y PARCS con respecto al estándar ANSI/ANS-5.1-2005.*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los parámetros más importantes en la simulación del transitorio ATWS en un reactor BWR es el calor de desintegración, debido a su influencia en el valor máximo de temperatura de vaina alcanzado.

Por este motivo, se revisó el modelo que incorporaba TRAC-BF1 [1] para el cálculo del calor de desintegración y el método de resolución implementado en el mismo. El mismo proceso se ha seguido con el código PARCS v2.7 [2], a fin de poder realizar transitorios con cinética tridimensional utilizando el código acoplado TRAC-BF1/PARCS v2.7.

Antes de abordar este trabajo de acoplamiento, se ha revisado el modelo del calor de desintegración en PARCS. El resultado de esta revisión se presenta en esta ponencia

que incluye la explicación del modelo del decay heat original como el modelo estándar ANSI/ANS-5.1-2005 [3], tanto las ecuaciones como la implementación del mismo en el código fuente de PARCS V2.7.

2. MODELO DE DECAY HEAT ORIGINAL EN PARCS V2.7

El modelo original para el cálculo del calor de desintegración en PARCS es un modelo muy sencillo en el que únicamente se considera seis grupos de precursores de calor de desintegración [2].

La densidad de calor volumétrica total $q(\vec{r}, t)$ con las contribuciones del calor de desintegración se expresa mediante la fórmula siguiente:

$$q(\vec{r}, t) = (1 - \alpha_T) \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t) \phi_g(\vec{r}, t) + \sum_{i=1}^I \zeta_i D_i(\vec{r}, t), \quad (1)$$

donde

$D_i(\vec{r}, t)$ es la concentración de los precursores de calor de decaimiento en cada grupo de DH i [J/cm^3]

ζ_i es la constante de desintegración del grupo de DH i [sec^{-1}].

$\alpha_T = \sum_{i=1}^I \alpha_i$ es la fracción total de la energía de fisión que aparece como calor de desintegración

I es el número total de grupos de DH.

α_i es la fracción total de la energía de fisión que aparece como calor de desintegración para cada grupo de DH i .

La concentración de precursores de DH $D_i(\vec{r}, t)$ se calcula mediante la ecuación diferencial siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} D_i(\vec{r}, t) = \alpha_i \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t) \phi_g(\vec{r}, t) - \zeta_i D_i(\vec{r}, t) \quad (2)$$

Integrando esta ecuación en el intervalo de tiempo $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ se obtiene:

$$D_i(\vec{r}, t_{n+1}) = D_i(\vec{r}, t_n) e^{-\zeta_i \Delta t} + \alpha_i \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left(\sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t') \phi_g(\vec{r}, t') e^{-\zeta_i (t_{n+1} - t')} \right) dt' \quad (3)$$

Suponiendo que el término fuente de fisiones es constante en el intervalo $t' \in [t_n, t_{n+1}]$ e igual al valor de tiempo anterior t_n , la expresión del término fuente de fisiones es la siguiente:

$$\sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t') \phi_g(\vec{r}, t') = \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t_n) \phi_g(\vec{r}, t_n) \quad (4)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (3) se obtiene:

$$D_i(\vec{r}, t_{n+1}) = D_i(\vec{r}, t_n) e^{-\zeta_i \Delta t} + \frac{\alpha_i}{\zeta_i} [1 - e^{-\zeta_i \Delta t}] \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t_n) \phi_g(\vec{r}, t_n) \quad (5)$$

Las condiciones iniciales se determinan a partir de la solución en el estado estacionario:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} D_i(\vec{r}, t) &= 0, \\ D_{i\infty} &= \frac{\alpha_i}{\zeta_i} \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg} \phi_g \end{aligned} \quad (6)$$

3. MODELO ANALÍTICO DE DECAY HEAT.

La Ecuación (7) nos permite obtener el calor de desintegración para cada isótopo fisible i mediante el método de cálculo del pulso de fisión f_i , debido a históricos de potencia del reactor con un tiempo total de duración T a partir del tiempo de *shutdown*, t [3].

$$P'_{di}(t, T) = \int_0^T \frac{P_i(T')}{Q_i} f_i(t + T - T') dT'. \quad (7)$$

donde, según el estándar ANS [3],

$$f_i(t) = \alpha_i e^{-\lambda_i t}. \quad (8)$$

Incorporando la Ecuación (8) en la Ecuación (7) se obtiene que:

$$P'_{di}(t, T) = \int_0^T \frac{P_i(T')}{Q_i} \alpha_i e^{-\lambda_i(t+T)} e^{\lambda_i T'} dT'. \quad (9)$$

Supongamos que en el tiempo total T han habido n históricos de operación $T_1, T_2, \dots, T_k, \dots, T_n$, donde:

$$\begin{aligned} T_{k-1} &= 0 \quad \text{si } k = 1, \\ T_n &= T \quad \text{si } k = n \end{aligned}$$

De esta forma, el calor residual en función de todos los históricos de operación del reactor puede obtenerse mediante:

$$P'_{di}(t, T) = \sum_{k=1}^{hist} \int_{T_{k-1}}^{T_k} \frac{P_i(T')}{Q_i} \alpha_i e^{-\lambda_i(t+T)} e^{\lambda_i T'} dT'. \quad (10)$$

Sacando fuera las constantes que no dependen de los históricos e integrando la Ecuación (10) obtenemos la siguiente expresión

$$P'_{di}(t, T) = \frac{e^{-\lambda_i(t+T)}}{Q_i} \alpha_i \sum_{k=1}^{hist} \frac{P_i(T_k)}{\lambda_i} [e^{\lambda_i T_k} - e^{\lambda_i T_{k-1}}]. \quad (11)$$

Finalmente, teniendo en cuenta que cada isótopo físil i presenta 23 grupos de energía y constantes de decaimiento j , el calor residual total obtenido en función de todos los históricos de operación y de todos los isótopos físis es calculado mediante la siguiente expresión que permite la obtención del cálculo del calor de desintegración de forma analítica para condiciones de potencia constante al que le sigue un *shutdown*:

$$P'_d(t, T) = \sum_{k=1}^{hist} \sum_{i=1}^{nfi} \sum_{j=1}^{23} \frac{e^{-\lambda_{ij}(t+T)}}{Q_i} \alpha_{ij} \frac{P_i(T_k)}{\lambda_{ij}} [e^{\lambda_{ij} T_k} - e^{\lambda_{ij} T_{k-1}}], \quad (12)$$

donde

P'_{di} es el calor residual debida al isótopo i sin el efecto de la captura neutrónica.

P'_d es el calor residual debido a todos los isótopos físis sin el efecto de la captura neutrónica.

P_i es la fracción de potencia debida al isótopo i durante el periodo k .

Q_i es la energía liberada por fisión del isótopo i .

α_{ij} es la energía para cada grupo j correspondiente al isótopo i .

λ_{ij} es la constante de decaimiento para cada grupo j correspondiente al isótopo i .

nfi es el número total de físis

$hist$ es el número de historias de operación del reactor.

T_k es la duración del periodo k .

T es la duración total de todos periodos k .

t es el tiempo transcurrido desde la parada del reactor o *shutdown*.

Si las condiciones de operación no conllevan una parada repentina del reactor, como es el caso de un ATWS, la potencia del reactor no puede considerarse constante y

por lo tanto ha de ser obtenida en función del tiempo. En casos como este, el calor de desintegración puede obtenerse a partir de la potencia instantánea entre dos pasos de tiempo consecutivos t_1 y t_2 .

Partiendo de la siguiente ecuación:

$$\frac{dP'_{di}(t')}{dt'} = \frac{\alpha_i}{Q_i} P'(t') - \lambda_i P'_{di}(t'), \quad (13)$$

donde

$$P'(t') = P'(t_1) - a(t' - t_1),$$

$$a = \frac{P'(t_2) - P'(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{P'(t_2) - P'(t_1)}{\Delta t}$$

Sustituyendo las dos expresiones anteriores y operando e integrando obtenemos:

$$|P'_{di}(t')e^{\lambda_i t'}|_{t_1}^{t_2} = \frac{\alpha_i}{Q_i} [P'(t_1) - a(t' - t_1)] \frac{1}{\lambda_i} |e^{\lambda_i t'}|_{t_1}^{t_2} + \int \frac{\alpha_i}{Q_i} a t' e^{\lambda_i t'} dt'. \quad (14)$$

Realizando la integración por partes del último término de la ecuación y sustituyendo en la ecuación anterior podemos calcular el calor de desintegración en un instante t_2 mediante la siguiente expresión,

$$P'_{di}(t_2) = P'_{di}(t_1)e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{\alpha_i}{Q_i} \left[\frac{P'(t_1) - a t_1}{\lambda_i} \right] [e^{\lambda_i t_2} - e^{-\lambda_i t_1}] e^{-\lambda_i t_2} + \frac{\alpha_i a}{Q_i \lambda_i} [t_2 - t_1 e^{-\lambda_i \Delta t}] - \frac{\alpha_i a}{Q_i \lambda_i^2} [1 - e^{-\lambda_i \Delta t}].$$

Finalmente, teniendo en cuenta que cada isótopo físil presenta 23 grupos j de energía y constantes de decaimiento, el calor residual producido por cada físil i puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$P'_{di}(t_2) = \sum_{j=1}^{23} P'_{di}(t_1) e^{-\lambda_{ij} \Delta t} + \frac{\alpha_{ij} P'(t_1)}{Q_i \lambda_{ij}} [1 - e^{-\lambda_{ij} \Delta t}] + \frac{\alpha_{ij} a}{Q_i \lambda_{ij}} [t_2 - t_1] - \frac{\alpha_{ij} a}{Q_i \lambda_{ij}^2} [1 - e^{-\lambda_{ij} \Delta t}].$$

Así pues, el calor residual total, teniendo en cuenta todos los físil, se obtendrá con la expresión:

$$P'_a(t_2) = \sum_{i=1}^{nfi} \sum_{j=1}^{23} P'_{di}(t_1) e^{-\lambda_{ij} \Delta t} + \frac{\alpha_{ij} P'(t_1)}{Q_i \lambda_{ij}} [1 - e^{-\lambda_{ij} \Delta t}] + \frac{\alpha_{ij} a}{Q_i \lambda_{ij}} [t_2 - t_1] - \frac{\alpha_{ij} a}{Q_i \lambda_{ij}^2} [1 - e^{-\lambda_{ij} \Delta t}]. \quad (15)$$

donde

P'_{di} es el calor residual debida al isótopo i sin el efecto de la captura neutrónica.

P'_d es el calor residual debido a todos los isótopos físiles sin el efecto de la captura neutrónica.

P' es la potencia instantánea en el instante t_1 .

Q_i es la energía liberada por fisión del isótopo i .

α_{ij} es la energía para cada grupo j correspondiente al isótopo i .

λ_{ij} es la constante de decaimiento para cada grupo j correspondiente al isótopo i .

nfi es el número total de físiles (1, 3 o 4).

Δt es el incremento de tiempo entre dos instantes consecutivos.

Finalmente, para el cálculo del calor residual durante transitorios, la ecuación (12) es empleada para la obtención del calor residual inicial en función de los históricos de operación del reactor mientras que la ecuación (15) es empleada para el cálculo del calor residual en las condiciones específicas del transitorio simulado.

La densidad de calor volumétrica total $q(\vec{r}, t)$, con las contribuciones del calor de desintegración se expresa mediante la fórmula siguiente:

$$Total\ Power = (1 - \beta) \times Total\ Power + Decay\ Heat . \quad (16)$$

La correspondencia entre la notación de la ecuación (1) y la ecuación (16) es la siguiente:

$$\begin{aligned} q(\vec{r}, t) &= Total\ Power, \\ (1 - \alpha_T) &= (1 - \beta), \\ (1 - \beta) \times \sum_{g=1}^G \kappa_g \Sigma_{fg}(\vec{r}, t) \Phi_g(\vec{r}, t) &= Fission\ Power, \\ \sum_{i=1}^I \zeta_i D_i(\vec{r}, t) &= Decay\ Heat. \end{aligned}$$

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO EN PARCS V2.7.

La secuencia de la llamada a las diferentes subrutinas dentro de PARCS es la siguiente: la subrutina principal **parcs.f** llama a la subrutina **dep_main.f** y esta a su vez a la subrutina **sseig.f**, la cual realiza un cálculo inicial estacionario. Para tal cálculo de la potencia llama a la subrutina **relpow.f**.

En la figura siguiente se muestra un esquema del proceso de cálculo en PARCS:

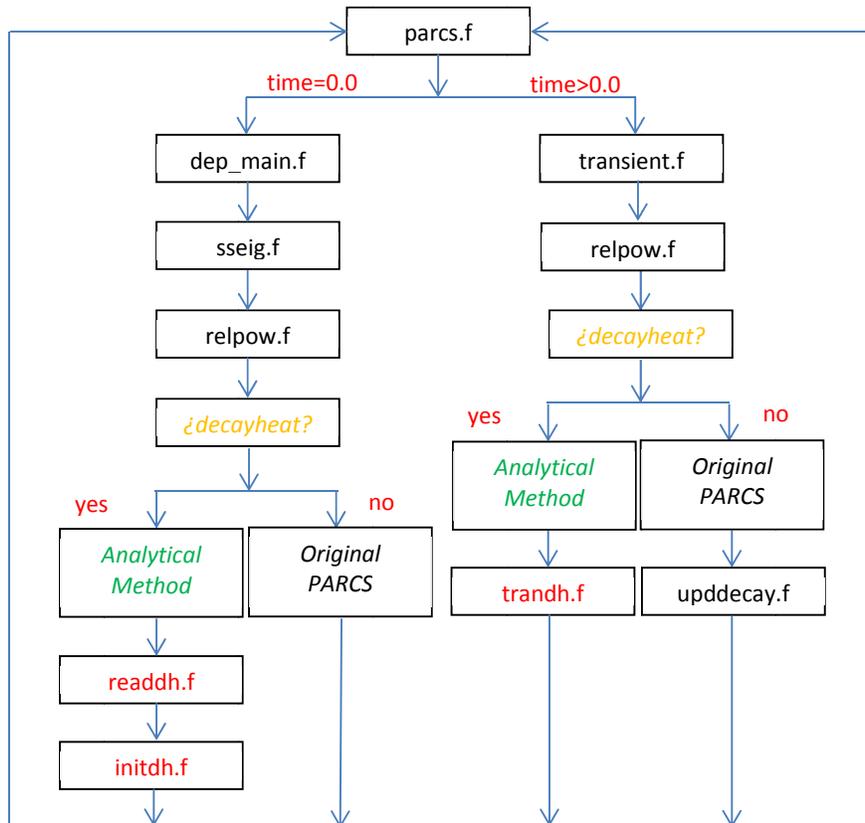


Figura 1. Secuencia del cálculo de calor residual en PARCS

La subrutina **relpow.f** es la encargada del cálculo de la potencia, producto de las fisiones como del *decay heat*. La selección de uno u otro modelo de cálculo para el *decay heat* se ha condicionado a la existencia o no del fichero llamado **decayheat** donde se definen una serie de parámetros relativos al nuevo cálculo del *decay heat* empleados para el modelo analítico.

Se diferencia el cálculo para el paso de tiempo inicial (cuando el tiempo es igual a 0.0) ya que se realizará una inicialización de la potencia del *decay heat* como si en vez de un cálculo transitorio se tratara de un cálculo estacionario. Para ello una vez que se ha verificado que el método a emplear es el analítico, se realiza la llamada a la subrutina **readdh.f** la cual lee los parámetros necesarios para llevar a cabo el cálculo del *decay heat*. Después se llama a la subrutina **initdh.f** la cual llevará a cabo el anteriormente mencionado cálculo estacionario del *decay heat*.

De forma análoga a como sucedía originalmente en PARCS, el término de potencia de *decay heat* se suma al término de potencia por fisiones para dar como resultado la potencia total por nodo, la cual se empleará para proseguir los cálculos de PARCS.

Para posteriores pasos de tiempo, la secuencia es la siguiente, la subrutina principal **parcs.f** llama a la subrutina **transient.f**, la cual a su vez, realiza la llamada a la subrutina **relpow.f** para el cálculo de la potencia. En este caso, y para el método analítico para el cálculo del *decay heat* se procederá a la llamada de la subrutina **trandh.f**, encargada de realizar el cálculo para el transitorio de la potencia de *decay heat*.

Una vez se ha realizado el cálculo de la potencia de *decay heat*, y que se ha sumado ésta a la potencia de fisiones para cada nodo, se procederá a continuar con el cálculo en PARCS. A diferencia de como ocurría anteriormente con PARCS, no se procederá a la llamada de la subrutina **upddeca.f** en **transient.f** para actualizar los parámetros asociados al *decay heat*, puesto que en nuestro caso, dicha actualización se lleva a cabo dentro de la propia subrutina **trandh.f**.

También hay que señalar que el cálculo del decay heat nodal realizado tanto en la subrutina **initdh.f** como **trandh.f** se lleva a cabo en las unidades de watios (W), a diferencia del cálculo de la potencia por fisiones calculada en PARCS en la subrutina **relpow.f**, ya sea mediante el método original o teniendo en cuenta la modificación introducida para el método analítico. Por ello se hace necesario adecuar las unidades para cada subrutina. La figura siguiente muestra el procedimiento seguido:

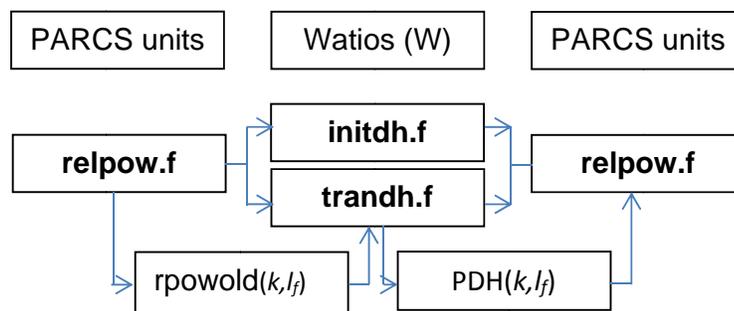


Figura 2. Secuencia conversión de unidades para el cálculo del calor residual en PARCS.

El cálculo de la constante para la conversión de unidades se realiza para el paso de tiempo inicial (con tiempo igual a 0.0) para el proceso de inicialización y para el primer paso de tiempo de transitorio (para el primer paso de tiempo mayor a 0.0).

$$cte_norm = (corepow0 - Tpdh_ss) / fispowDH$$

donde:

$$corepow0 = plevel \times powfa \times nfuelfa \times isymmetry$$

siendo *corepow0* la potencia inicial total, en W; *Tpdh_ss* potencia inicial de *decay heat* calculada en la subrutina **initdh.f**, en W; y *fispowDH* la potencia total para el paso de tiempo inicial o para el paso de tiempo inicial del transitorio (según corresponda), en unidades de PARCS.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el proceso llevado a cabo para la mejora del cálculo del calor de desintegración en los códigos TRAC-BF1 y PARCS. En la fase inicial se analizó los modelos de cálculo que incorporaban ambos códigos; en el caso del TRAC-BF1 en cuanto al cálculo unidimensional. Esta primera fase puso de manifiesto la necesidad de modificar el código fuente de ambos códigos para incorporar el cálculo del decay heat según la norma ANSI/ANS-5.1-2005.

En ambos códigos se ha implementado la resolución analítica del calor de desintegración. En trabajos futuros se mostrará la influencia de estas modificaciones en los resultados de las simulaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en colaboración con IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN.

REFERENCIAS

- [1] Dunn, E. Floyd., "Decay Heat Calculations for Transient Analysis", Reactor Analysis Methods II
- [2] T. Downar, D. Lee, Y. Xu, T. Kozlowski, J. Staundenmier, *PARCS v2.6 U.S. NRC Core Neutronics Simulator THEORY MANUAL (2004)*.
- [3] ANSI/ANS- 5.1-2005: Decay Heat Power in Light Water Reactors. American Nuclear Society. 2005.
- [4] *TRAC-BF1: An advanced best-estimate computer program for BWR accident analysis*. NUREG/CR-4356. vol. 2. 1992.