

## El rozamiento de las barras de control de una central nuclear como índice del mantenimiento predictivo

**A. García-Berrocal**

*Grupo de Investigación AMERPREM, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España  
agustin.garciaberrocal@upm.es*

**J. Blázquez, I. Vallejo**

*Departamento de Fisión Nuclear, CIEMAT. Avenida Complutense 22, 28040 Madrid, España*

**C. Montalvo, M. Balbás**

*Grupo de Investigación AMERPREM, ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España*

---

### Resumen

*En caso de grandes niveles de quemado del combustible nuclear, pueden combarse los tubos guía de las barras de control de los reactores comerciales de agua a presión (Pressurized Water Reactor, PWR). En consecuencia, la caída de las barras de control podría dar lugar a una inserción parcial de alguna de ellas, quedando entonces no operativa. En el presente trabajo se propone la prevención temprana de este tipo de incidentes realizando un ensayo en el que se midan dos coeficientes de rozamiento asociados a la caída: el hidráulico y el de fricción de la barra con la pared interna del tubo guía. El coeficiente hidráulico apenas cambia con la curvatura del tubo guía, por lo que ésta solo puede detectarse gracias a la variación del coeficiente de fricción. También, se establece un modelo simplificado para describir la dinámica de la caída de las barras de control. Su validación se lleva a cabo confrontándolo con registros reales de ensayos de caída de barras en una central nuclear comercial. Finalmente, tomando de los registros de los ensayos el tiempo que transcurre hasta que la velocidad de caída alcanza su máximo, se ha encontrado que existe una relación lineal entre el inverso del cuadrado de dicho tiempo y el coeficiente de fricción de la barra con el interior del tubo guía.*

---

### INTRODUCCIÓN

Por razones de seguridad, los reactores de agua a presión (Pressurized Water Reactor, PWR) se diseñan para volverse subcríticos tras la caída de cualquier barra de control (BC). En caso de que una BC quede parcialmente insertada, la subcriticidad no puede asegurarse. La gravedad siempre actúa, y dada la longitud del núcleo del reactor, el tiempo de caída debería ser del orden de 0,9 s. Sin embargo, siguiendo las especificaciones técnicas de obligado cumplimiento, el tiempo de caída de la BC se mide frecuentemente, y resulta ser del orden de 2 s, desde que la barra está completamente extraída hasta que alcanza el fondo del núcleo. Lo que significa que el efecto de los rozamientos durante la caída debe tenerse en cuenta.

La cubierta de la BC se denomina tubo guía y tiene como función aislar la BC del exterior. El tubo guía se fija por sus extremos, lo que puede provocar que pueda combarse en caso de producirse un fuerte quemado del combustible nuclear. La curvatura del tubo guía incrementa la fricción de la BC con las paredes internas del tubo, y puede impedir que, tras la caída, la BC quede completamente insertada [1, 2].

Por ello, más allá del efecto de la gravedad, deben considerarse las otras fuerzas que actúan sobre la BC durante su caída. A saber: la resistencia hidráulica, que es proporcional al cuadrado de la velocidad de la barra, es la más importante; junto con la fricción de la BC con la pared interna del tubo guía. Otras menos importantes son la flotación y el rozamiento viscoso proporcional a la velocidad.

En orden a establecer el modelo físico simplificado del presente trabajo, solamente se han considerado tres fuerzas: la gravedad, la resistencia hidráulica y la fricción de la BC con el tubo guía. En cualquier caso, como se

verá más adelante, y dada la estructura del modelo, la fuerza de fricción puede incluir todas las fuerzas proporcionales a la longitud insertada de la BC. Otras fuerzas menos importantes, como la flotación, se han considerado despreciables.

El modelo se ha ajustado con las gráficas de velocidad registradas en los ensayos reales para medir el tiempo de caída de las barras de control. La bondad de estos ajustes no lineales sirve de validación del modelo propuesto. De los parámetros de las curvas de ajuste se obtienen los coeficientes de rozamiento hidráulico y de fricción de la BC con el tubo guía. Asimismo, se ha relacionado el tiempo que tarda en alcanzar la BC su velocidad máxima con el coeficiente de fricción; estableciéndose el criterio de alarma por incipiente inserción parcial cuando dicho coeficiente comience a aumentar.

## ANTECEDENTES

El mecanismo de control de posición de la BC en un PWR es un dispositivo magnético de sujeción. Su principal característica es que la BC se introduce o se extrae del núcleo de manera incremental, por medio de una serie de pasos discretos. Es habitual tener que cubrir 231 pasos entre la posición en que la BC está completamente extraída y la de inserción completa. Cada uno de estos pasos equivale a una distancia de 1,59 cm, indicándose con un número de pasos igual a cero la posición en la que la BC está completamente insertada; y con un número igual a 231, la posición en la que la barra está completamente extraída.

Cuando se dan altos niveles de quemado, mayores que 3 000 MW-día por tonelada métrica de uranio, el tubo guía de la BC puede combarse. En consecuencia, el coeficiente de fricción de la BC con el tubo guía puede incrementarse; y no se puede asegurar que, en esas condiciones, la barra de control pueda alcanzar la posición igual a cero. Lo que conduciría a un incidente de inserción incompleta, tal y como ya ha ocurrido en el pasado [3], y se muestra en la Tabla (1).

*Tabla 1. Plantas que han sufrido incidentes por inserción incompleta de las barras de control.*

EE. UU.	Wolf Creek North Anna South Texas 1
Bélgica	Tihange 3 Doel 4
Francia	Belleville 1 Paluel 3 Nogent 1
Suecia	Ringhals 1
España	Almaraz

## MODELO SEMIEMPÍRICO

Debido al interés económico que supone operar los reactores PWR alcanzando un alto quemado, y dada la posible aparición de incidentes de inserción incompleta de barras de control que ello puede acarrear, se han desarrollado modelos teóricos detallados [4-9] que describen la dinámica de la caída de las barras. Estos modelos tienen en cuenta todas las fuerzas que puedan actuar sobre la BC, y calculan su velocidad instantánea a lo largo de la caída hasta alcanzar el fondo del reactor. Para validar dichos modelos se emplean los registros de velocidad de los ensayos de tiempo de caída realizados en la planta.

El punto de vista de este trabajo para abordar la caída de las barras es considerar un problema inverso: partiendo de un modelo semiempírico sencillo, se determina tanto el coeficiente de rozamiento hidráulico como el de fricción de la BC con el tubo guía, empleando los registros de los ensayos de tiempo de caída de barras.

Como se muestra en la Fig. (1), inicialmente la velocidad de la BC se incrementa de manera lineal, tal y como correspondería a una caída libre; después comienza a manifestarse la resistencia hidráulica, proporcional al

cuadrado de la velocidad, y la aceleración decrece hasta que la velocidad de caída alcanza su máximo. Al final se observa que la velocidad es menor que dicho máximo, debido a la fricción entre la BC y el tubo guía.

En el modelo que se propone, la fuerza de fricción mecánica se considera proporcional a la longitud de la BC insertada en el tubo guía. La fase final de frenado brusco, una vez alcanzado el fondo del núcleo, no se considera en el modelo. En esta última fase, la BC ya está completamente insertada, y no tiene interés desde el punto de vista de la seguridad de la operación de la planta.

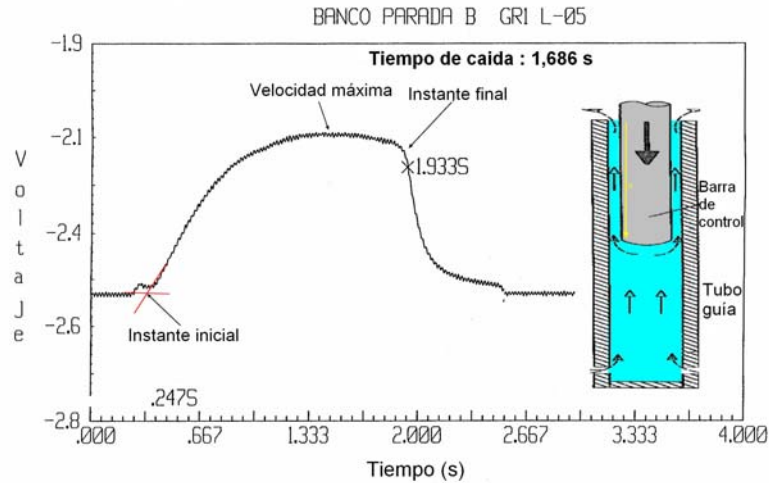


Fig. 1. Ensayo de tiempo de caída realizado en planta y detalle de la barra de control en el tubo guía.

Considerando la fuerza resultante por unidad de masa debida a las tres fuerzas principales arriba enumeradas, y aplicando la segunda ley de Newton:

$$\frac{dv}{dt} = g - bv^2 - ax ; v(0) = 0 \tag{1}$$

siendo  $v$ , la velocidad de la BC, medida en m/s;  $x$ , la longitud insertada de la BC, medida en metros desde la posición de barra completamente extraída;  $g$ , la aceleración de la gravedad, tomada como  $9,8 \text{ m/s}^2$ ;  $b$ , el coeficiente de rozamiento hidráulico, expresado en  $\text{m}^{-1}$ ; y  $a$ , el coeficiente de fricción de la BC con el tubo guía, en  $\text{s}^{-2}$ .

El sistema de medida asociado a la sujeción magnética de la BC mide la velocidad en unidades de voltaje, y debe convertirse a m/s teniendo en cuenta que la derivada de la velocidad, en el instante inicial, debe valer  $g$ . La transformación de voltaje en m/s se calibra al principio del movimiento, cuando la flotación es despreciable, ya que después será proporcional a  $x$  y estará incluida en el coeficiente  $a$ .

Una vez se ha convertido a velocidad en m/s el registro primario de voltaje, se calcula la posición  $x$  en función del tiempo integrando numéricamente la señal de velocidad, y también se evalúa numéricamente la derivada de la velocidad. A partir de estos resultados, los coeficientes de rozamiento  $a$  y  $b$  se calculan por medio de la regresión lineal:

$$z \equiv -\frac{dv}{dt} + g, \quad y = v^2, \quad z = by + ax \tag{2}$$

Una vez se han determinado empíricamente los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de rozamiento, la velocidad se ajusta resolviendo numéricamente la ecuación diferencial del modelo, Ec. (1); y el resultado obtenido se compara con la velocidad registrada en el ensayo, según se muestra en la Fig. (2).

El coeficiente  $b$  de rozamiento hidráulico no es exactamente constante porque el tubo guía presenta cambios locales en su sección transversal [10]. La experiencia del presente trabajo con los ajustes muestra que puede considerarse que dicho coeficiente puede considerarse constante, al menos, a lo largo de los dos primeros dos metros de caída. En ese rango se observa que es lineal, con pendiente negativa, la representación de la aceleración frente a la velocidad al cuadrado. La simplificación que se propone consiste en suponer que las desviaciones de esa linealidad se incluyen en el coeficiente de fricción  $a$ .

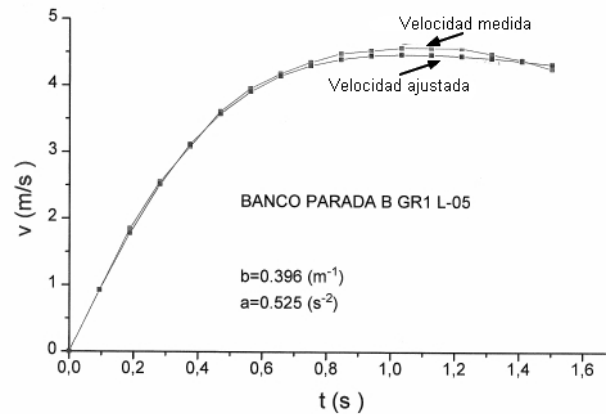


Fig. 2. Validación del modelo teniendo en cuenta la bondad del ajuste.

En los casos en los que el tubo guía se comba en forma de “banana”, la velocidad se ajusta bien al modelo de la Ec. (1). Por otra parte, si se comba en forma de “S”, el ajuste empeora; ya que entonces el coeficiente de fricción no puede suponerse constante. Aunque en ese caso podría despejarse de la Ec. (1) un valor empírico de  $a$  en función de la posición, debe concluirse que un ajuste deficiente indica una deformación severa del tubo guía.

## RESULTADOS

El modelo semiempírico se ha ajustado a varios registros procedentes de ensayos de caída de barras realizados en una central comercial PWR. Para un gran número de barras, el coeficiente hidráulico  $b$  es prácticamente constante, mientras que la curvatura del tubo guía puede detectarse solamente a través del coeficiente de fricción  $a$ . Si este último fuese nulo, el cuadrado de la velocidad máxima alcanzada durante la caída sería  $g/b$ .

Cuando no es despreciable la fricción barra-tubo, la velocidad máxima obtenida del registro del ensayo es menor que el valor relacionado con  $g/b$ . Por tanto, se define la magnitud  $q$  como el cociente entre la velocidad máxima medida y la velocidad máxima si fuese despreciable la fricción barra-tubo. Como se muestra en la Fig. (3) y en la Fig. (4), la bondad del ajuste puede utilizarse como una alarma cualitativa de alta fricción barra-tubo. En la Fig. (4) también se observa que la aceleración cambia de signo en el instante 1,2 s, lo que indica una posible deformación en “S”, puesto que dicho cambio de signo no es compatible con el modelo.

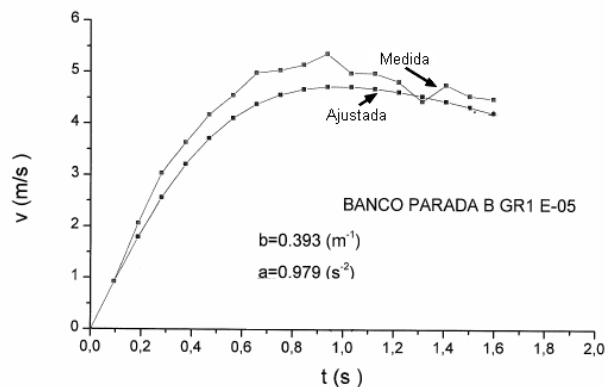


Fig. 3. Ajuste deficiente debido a un valor alto del coeficiente mecánico de fricción.

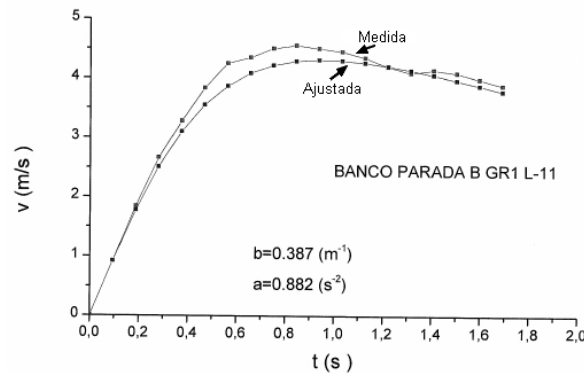


Fig. 4. Cambio de tendencia en la velocidad no compatible con el modelo.

Para los técnicos de planta no es operativo aplicar el ajuste de la Ec. (2) a los registros de ensayo de tiempo de caída. Para encontrar un método más sencillo, debe considerarse la Tabla (2), donde se recogen los análisis realizados con los datos de cuatro barras de control.

Tabla 2. Coeficientes de rozamiento  $a$  y  $b$ , instante  $t_{mx}$  correspondiente a la velocidad máxima, y cociente  $q$  entre la velocidad máxima medida y la extrapolada considerando nula la fricción con el tubo guía.

BC	$b$ ( $m^{-1}$ )	$a$ ( $s^{-2}$ )	$t_{mx}$ (s)	$q$
L-05	0,40	0,53	1,03	0,92
E-05	0,39	0,98	0,94	0,93
L-11	0,39	0,88	0,85	0,91
E-11	0,43	1,61	0,66	0,87

En la Tabla (2) se recogen los coeficientes de rozamiento medidos, el instante  $t_{mx}$  en que se alcanza la velocidad máxima y el cociente  $q$  entre la velocidad máxima medida y la velocidad extrapolada considerando nula la fricción con el tubo guía. Se observa que podría plantearse la siguiente correlación entre el instante  $t_{mx}$  y el coeficiente  $a$ :

$$\frac{1}{t_{mx}^2} = \gamma_1 a + \gamma_0 \tag{3}$$

Para comprobar la validez de la Ec. (3), se ha resuelto la ecuación diferencial del modelo, manteniendo constante el coeficiente hidráulico  $b$  y variando el coeficiente de fricción  $a$ . Los resultados se muestran en la Fig. (5), donde  $\gamma_1 = 0,48$  y  $\gamma_0 = 0,18 s^{-2}$ .

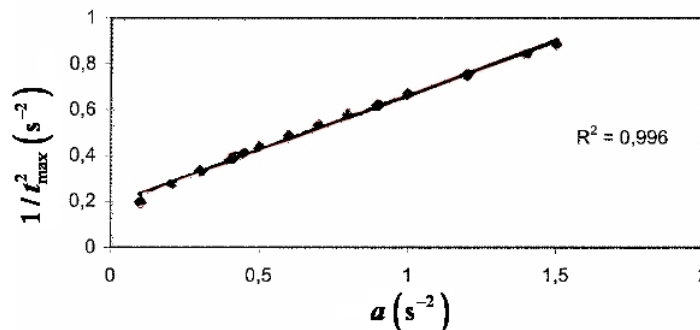


Fig. 5. Comprobación de la correlación lineal entre el coeficiente  $a$  y el instante  $t_{mx}$ .

La relación lineal de la Fig. (5) puede utilizarse fácilmente en la planta, ya que el instante  $t_{mx}$  se obtiene directamente del registro primario del ensayo de tiempo de caída. Aunque no hay necesidad de calibrar el voltaje

de salida en m/s, sí es necesario tomar precauciones para determinar el origen de la escala de tiempos, véase Fig. (1). En definitiva, aplicando la Ec. (3) se obtiene el coeficiente  $a$ , suponiendo despreciable la variación del coeficiente hidráulico, lo que permite realizar la vigilancia de la curvatura del tubo guía de la BC.

## CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo sencillo para explicar la dinámica caída de las barras de control en los ensayos que habitualmente se llevan a cabo en las centrales nucleares con reactores de agua a presión. Además de la fuerza de la gravedad y el coeficiente hidráulico de rozamiento, dicho modelo tiene en cuenta la fricción mecánica entre la barra de control y su tubo guía, considerando ésta proporcional a la longitud de barra insertada. La velocidad de caída observada durante los ensayos se caracteriza solamente con dos coeficientes empíricos, obtenidos aplicando una regresión lineal.

A partir de medidas procedentes de un reactor comercial de agua a presión, se ha observado que el coeficiente hidráulico de rozamiento se mantiene prácticamente constante, en torno a  $0,40 \text{ m}^{-1}$ ; mientras que el coeficiente de fricción mecánica con el tubo guía cambia: de  $0,53 \text{ s}^{-2}$  (tubo guía en buenas condiciones) a  $1,61 \text{ s}^{-2}$  (malas condiciones). Esto permite establecer una alerta temprana para incidentes de inserción incompleta. Se ha encontrado una relación lineal entre el coeficiente de fricción y el inverso del cuadrado del tiempo correspondiente a la máxima velocidad alcanzada por la barra de control en su caída; lo que permite, en la práctica, la obtención en planta de dicho coeficiente.

La determinación de los coeficientes de rozamiento, tanto hidráulico como mecánico, aunque no excluye la necesidad de evaluar el tiempo total de caída de la barra de control, es una metodología complementaria que permite prever posibles incidentes de inserción incompleta.

## REFERENCIAS

- [1] S. Jacobson, E. Francillon, *Incomplete of control rod insertion due to extreme fuel element bow*, Proc. of OCDE's Specialist Meeting on Nuclear Fuel and Control Rods, Madrid, Spain, Nov. 5-7, (1996).
- [2] H. Lettau, J. Slabel, L. Heins, *Assembly bow kccx1 drop times experiences and methods*, Proc. of the 23 Meeting of Spanish Nuclear Society, A Coruña, 5-7 Nov, (1997).
- [3] Nuclear Regulatory Commission, *Control rod insertion problems*, NRC Bulletin, 96-01, March, (1996).
- [4] J.M. Donis, H. Goller, *A mathematical model of a control rod drop*, Nucl. Eng. & Design, 23, (1972), 107-120.
- [5] K.S. Choi, I. Kim, *Development of a component program for drop time and impact velocity of the rod cluster control assembly*, Journal of the Korea Nucl. Society, Vol. 26, N° 2, June, (1994).
- [6] L. Sun et al, *The development of CRFD program for control rod assembly drop time analysis*, Proc. of 18 International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), Beijing, China, Aug., 7-12, (2005).
- [7] M. Ren, J. Slabel, *Analytical modelling of control rod drop behaviour*, Proc. of SMiRT 15, Seoul, Korea, Aug., 15-20, (1999).
- [8] K.H. Yoon et al, *Control rod drop analysis by finite elements method using fluid-structure interaction for a PWR power plant*, Nucl. Eng. & Design, 239, issue 10, (2009), 1857-1861.
- [9] H. Andriambolona, D. Bosselut, P. Massin, *Methodology for a numerical simulation of an insertion or a drop of the rod cluster control assembly in a PWR*, Nucl. Eng. & Design, 236, (2007), 600-606.
- [10] B. Collard, *Rod cluster control assembly drop kinetics with seismic excitation*, Nuclear Engineering, Proc. 11th Int. Conf. ICONE-11, JSME/ASME, Tokyo, 20-23 April, paper 36419, (2003).