

# Validación del programa FERCIN para la calibración de las barras de control del reactor RP-10

José Castro<sup>(1)</sup> [jcastro@ipen.gob.pe](mailto:jcastro@ipen.gob.pe); Magaly Zapata<sup>(2)</sup> [magalibalcazar@yahoo.com](mailto:magalibalcazar@yahoo.com);  
Rubén Bruna<sup>(3)</sup> [rbruna@ipen.gob.pe](mailto:rbruna@ipen.gob.pe)

(1) IPEN, Dirección General de Instalaciones, Cálculo, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

(2) Universidad de Ingeniería, Av. Tupac Amaru s/N, Lima 1, Perú

(3) IPEN, Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, Calle Sánchez Carrión No. 456  
Magdalena del Mar, Lima, Perú

## Resumen

A fin de incorporar un nuevo sistema de calibración de las barras de control, que permita obtener resultados con menor incertidumbre y en menor tiempo, se realizaron pruebas para la validación de los programas Fercin 1 y 2 que forman parte del sistema de ruido neutrónico adquirido mediante el convenio Perú-Argentina. Las opciones del programa que se validaron fueron las del reactímetro y rod-drop por comparación con el método del Período Asintótico, que es el usualmente empleado por el grupo de operación. La configuración de núcleo utilizada fue la N° 24.

## 1. Introducción

La calibración de barras de control en un reactor nuclear es muy importante tanto para saber la inserción de reactividad negativa que se inserta al núcleo, como para conocer el exceso de reactividad del mismo. Existen diversos métodos para realizar la calibración de barras.

La validación del programa FERCIN consiste en comparar en forma experimental tres métodos de calibración de barras conocidos, como son: Método del Período Asintótico, Método del Reactímetro y el Método Rod – Drop. Todos estos métodos de calibración trabajan en función de la cinética inversa; es decir, se conoce la evolución de la población neutrónica y se desea conocer la evolución de la relación Producción/Destrucción, que en nuestro caso sería la reactividad, ya sea expresada en \$ (dólares) o pcm (partes por cien mil). Otro criterio que se emplea en el proceso de calibración es el método MRP (Modelo del Reactor Puntual), que consiste en definir la evolución de la densidad neutrónica como función del Factor de Forma y de la Potencia, donde existe separabilidad espacio-energética temporal, según se observa en la ec. (1)

$$N(\vec{r}, E, t) = \varphi(\vec{r}, E) * p(t) \quad (1)$$

y donde  $\varphi(\vec{r}, E)$  permanece constante, y por tanto la evolución de la densidad neutrónica es la misma en cualquier punto del reactor y para cualquier energía y coincide con la evolución de potencia.

Para analizar cuantitativamente el MRP es necesario un modelo que involucre a más de un grupo de neutrones retardados, es por ello que se emplea la siguiente ec. (2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{(\$ - 1)}{\Lambda^*} n(t) + \sum_{i=1}^m \lambda_i c_i(t) \\ \frac{dc_i(t)}{dt} &= b_i \frac{n(t)}{\Lambda^*} - \lambda_i c_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Resolviendo convenientemente estas ecuaciones, se obtiene la ecuación Inhour para las raíces aceptables de la ecuación que pueden obtenerse a partir de datos experimentales con un error aceptable, ec. (3).

$$\left. \begin{aligned} \$ &= \pm \frac{\Lambda^*}{T} + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{(1 \pm \lambda_i T)} \\ \$ &= -\Lambda^* \alpha - \sum_{i=1}^m \frac{b_i \alpha}{(\lambda_i - \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## Métodos de Estimación de la Reactividad

**Método del período asintótico:** Donde T de la ecuación Inhour se obtiene midiendo el tiempo de duplicación de n(t), llamado t<sub>2</sub>.

$$T = \frac{t_2}{\ln 2}$$

este método puede aplicarse con instrumental propio del reactor y un cronómetro.

**Método del reactímetro digital:** Consiste en determinar  $\rho_p(t_k) = \rho_k$  a partir de los valores  $n(t_k)$ , proporcionado por una cámara externa basada en el MRP y que con la ayuda de una tarjeta conversora en una PC, y con el programa FERCIN1, resuelve las ecuaciones del MRP estimando  $\rho_p(t_k)$ , que es la información requerida.

**Método Rod-Drop basados en MRP y CEM:** Consiste en estimar la efectividad  $\rho_0$  de las barras de control empleando el MRP, que considera para este caso tanto la evolución instantánea como retardada, lo que da lugar a un cambio en la función de forma por lo cual la evolución de la densidad neutrónica no será la misma en cualquier punto del reactor. Las estimaciones de  $\rho_0$ , que son:  $\rho_{op}$ ,  $\rho_{od}$ ,  $\rho_{oi}$ ; están basadas en el MRP por lo cual la evolución temporal de la función de forma es la misma, en consecuencia solo estarían afectados por los efectos espaciales los cuales deben corregirse por otros factores que tengan en cuenta el cambio en la función de forma. Para ello se aplica el método Rod - Drop m, que se basa en un modelo cinético espacial modal, luego  $\rho_{om}$ , se obtiene ajustando los datos experimentales  $C_N(t_k)$  para la evolución retardada, con una función  $F(t)$  que se obtiene del modelo. El efecto espacial resulta de comparar  $\rho_{op}$  y  $\rho_{om}$ .

## 2. Método Experimental

### Método del período asintótico:

Esta metodología es conocida y consiste en llevar al reactor a un estado supercrítico moderado a partir de una posición de equilibrio o crítico a baja potencia, de tal modo, que durante la evolución de población neutrónica se pueda tomar nota del tiempo del doblaje en diversos intervalos de su evolución, la tasa de cuentas es tomada directamente de la cámara de ionización N° 4 perteneciente a la instrumentación del reactor y la cual se encuentra alejada del núcleo en dirección del conducto tangencial, tal como se observa en la foto de la fig.1.

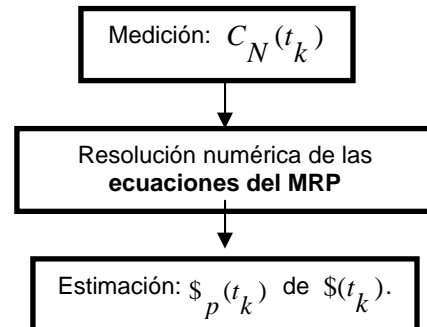


Figura 1. Ubicación de CIC4, en conf. 24.

La información obtenida es procesada para obtener los valores de reactividad de cada una de las barras de control del reactor. Este método también sigue el Modelo del Reactor Puntual (MRP), en cinética inversa.

### Método del reactímetro digital:

Para esta experiencia se ha empleado todo un equipo e instrumental alterno al reactor, para cumplir con la siguiente metodología para el Reactímetro Digital:



Los equipos utilizados consiste en:

- Detector (CIC).
- SMS (Sistema de Medición de Señales).
- PC - TCAD (Pc Pentium I con tarjeta de adquisición de datos PCL-818H).

Tal como se observan en la fig. 2.



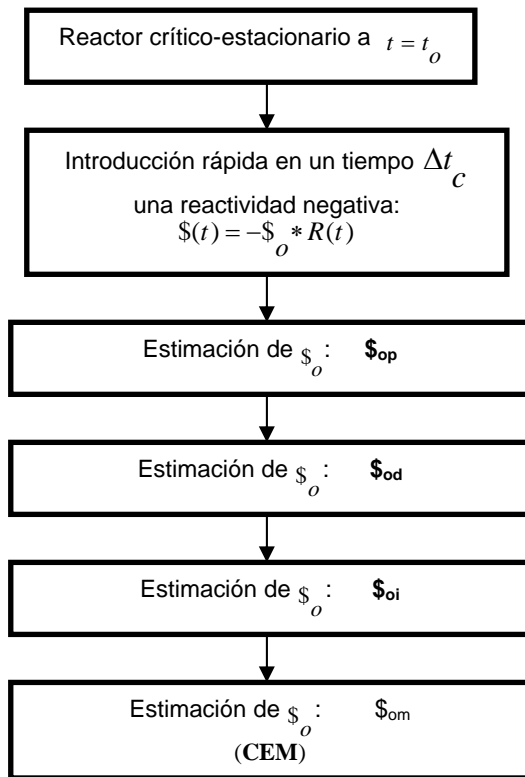
Figura 2. Detector - SMS - PC \_TCAD.

El Software empleado por el método del reactímetro digital es el FERCIN 1, que permite realizar la calibración simultánea de dos barras de control por el método de compensación. Las señales de entrada básicas son la tasa de cuentas y las posiciones de barras, que en nuestro caso fueron las barras BC1 y BC2.

### Método Rod - Drop:

Para esta experiencia se ha empleado todo el equipo e instrumentos mencionados para el método del reactímetro digital, adicionando un detector y una cadena de

medición al sistema, las pruebas de efectividad de barras se realizaron para BC1 y para todo el Banco de Barras. La metodología de la experiencia es la que se muestra a continuación:



Para BC1 se realizaron 4 pruebas, donde CIC1 se mantuvo siempre en la posición C1, mientras que CIC2 se ubico en la posición G1, B4 e I9, respectivamente, esta ultima posición se realizo 2 veces debido a no considerar el nivel de potencia requerida en la experiencia, la cual fue subsanada luego. El caso del Bco. de Barras se realizo en una única oportunidad, teniendo la disposición de las cámaras CIC1 en C1 y CIC2 en I9, tal como se muestra en el esquema resumen de la Fig. 3.

|       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| TN    | NG  | CIC | NG  | NG  | NG  | CIC | NG  | NG  | ○   |
| RABIT |     | 001 | 004 | 027 | 012 | 002 | 011 |     |     |
| NG    | NB  | NN  | NN  | NN  | NN  | NN  | NB  | NG  | ⊖   |
| 005   | 001 | 028 | 024 | 020 | 007 | 025 | 002 |     |     |
| NG    | NB  | NN  | NC  | NN  | NC  | NN  | NB  | NG  | CF  |
|       |     | 003 | 006 | 005 | 001 | 003 | 017 | 004 | 003 |
| NG    | CIC | NN  | NN  | NN  | NN  | NN  | PI  | NG  | ⊖   |
| 007   | 002 | 008 | 015 | 004 | 003 | 012 | 005 | 009 |     |
| NG    | NB  | NN  | NN  | PI  | NN  | NN  | NB  | NG  | ⊖   |
| 006   | 009 | 011 | 014 | 004 | 010 | 002 | 010 | 014 |     |
| NG    | NB  | NN  | NC  | NN  | NC  | NN  | NB  | NG  | ⊖   |
|       |     | 005 | 022 | 004 | 009 | 001 | 027 | 006 |     |
| NG    | NB  | NN  | NN  | NC  | NN  | NN  | NB  | NG  | ⊖   |
|       |     | 007 | 023 | 019 | 007 | 016 | 026 | 008 |     |
| NG    | NG  | NG  | NG  | NG  | NG  | BCF | NG  | NG  | ⊖   |
|       |     | 010 | 008 |     | 028 |     | 023 |     |     |
| PI    | NG  | NG  | ⊖   | NG  | NG  | NG  | NG  | CIC | ⊖   |
| 006   |     |     |     |     |     |     |     | 002 |     |
| ⊖     | ⊖   | ⊖   | ⊖   | ⊖   | ⊖   | ⊖   | ⊖   | CF  | ⊖   |
|       |     |     |     |     |     |     |     | 001 |     |

CONDUCTO TANGENCIAL

**Figura 3.** Disposición de CIC1 y CIC2 para las experiencias de Rod – Drop.

Se aclara que la barra de control BC1 se encuentra en la posición F3 alojado por el combustible NC003, la idea es observar la respuesta a diversas posiciones de la cámara CIC2.

**Procedimiento para obtener la Reactividad del Banco de Barras y el FSR (Factor de Seguridad de Reactividad)**

1. De la calibración de barras realizada con el FERCIN 1 (Método del Reactímetro Digital), se determina la reactividad en exceso a partir del valor de reactividad de las barras que quedan insertadas en el núcleo,  $\rho_{exc}$ .
2. Se determina la Reactividad de extinción a partir de la experiencia del Rod – Drop, el dato que se toma es el promedio de  $\rho_{om}^{(ext)}$  de las dos cámaras CIC1 y CIC2.dando  $\rho_{ext}$
3. Se determina la Reactividad del Banco de Barras, como:

$$\rho_{Bco} = \rho_{exc} + \rho_{ext}$$

4. El FSR es:

$$FSR = \frac{\rho_{Bco}}{\rho_{exc}}$$

y según normas este valor debe ser mayor o igual a 1.5.

**3. Resultados**

A continuación se presentan los resultados de las experiencias realizadas:

Por el método de reactímetro digital, empleando FERCIN 1.

**Tabla 1.** Calibración de BC1 y BC2 por Método del Reactímetro digital.

| Barra | 1ra Experienc (\$) | 2da Experienc (\$) | 3ra Experienc (\$) |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| BC1   | 3.81±0.001         | 3.7±0.001          | 3.65±0.001         |
| BC2   | 3.61±0.001         | 3.6±0.001          | 3.4±0.001          |

Por el Método del Período Asintótico, empleando la instrumentación del Reactor, obtuvimos los siguientes resultados de la calibración de BC1 y BC2.

**Tabla 2.** Calibración de BC1 y BC2 por Método de Período Asintótico.

| Barra | Única<br>Experiencia<br>(\$) |
|-------|------------------------------|
| BC1   | 3.4 ± 0.0016                 |
| BC2   | 3.15 ± 0.0016                |

Para el cálculo de errores se empleó sólo el experimental, proveniente del parámetro directo para obtener la reactividad, que es el tiempo de doblaje, dado que se toman tres tiempos de doblaje, el error de la medición es:

$$\sigma_{\bar{t}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^3 (\bar{t} - t_j)^2}{2}} \quad \sigma_{\bar{t}} = 2.3$$

Por teoría de errores se tiene la siguiente expresión para el cálculo de error de la reactividad:

$$\sigma_{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial T} * \frac{\partial T}{\partial \bar{t}} * \sigma_{\bar{t}}$$

Donde:

$$\rho = \frac{l}{\beta(l+T)} + \frac{T}{(l+T)} \left[ \sum_{i=1}^6 \frac{b_i}{(1+\lambda_i T)} \right]$$

y;

$$T = \frac{t}{\ln 2}$$

El error sistemático que acompaña al error experimental para el cálculo del error de reactividad será discutido en el punto 4.

Por el Método de Rod – Drop y empleando el programa FERCIN2 se obtuvieron los siguientes resultados para BC1:

**Tabla 3.** Resultados de Rod-Drop para Scram BC1.

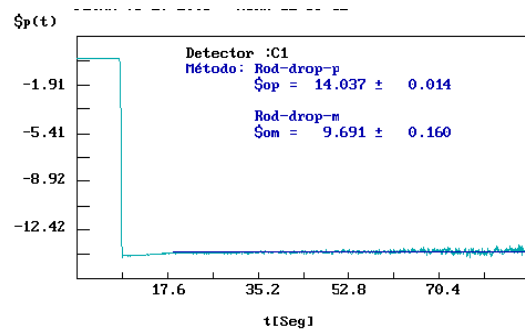
| Estimac.<br>de $\rho$ en<br>CEM y<br>MRP | Exp 1           |                 | Exp 2           |                 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | CIC 1<br>C1     | CIC2<br>G1      | CIC 1<br>C1     | CIC2<br>B4      |
| $\$_{om}$                                | 4.153 ± 0.019   | 4.144 ± 0.016   | 4.342 ± 0.019   | 4.209 ± 0.016   |
| $\$_{oi}$                                | 4.89            | 6.03            | 4.89            | 4.47            |
| $\$_{od}$                                | 5.06            | 6.48            | 5.01            | 4.53            |
| $\$_{op}$                                | 4.8448 ± 0.0048 | 5.8856 ± 0.0073 | 4.8597 ± 0.0049 | 4.4573 ± 0.0049 |
| Efecto<br>Espacial                       | 16.65 ± 0.54    | 42.01 ± 0.58    | 11.91 ± 0.50    | 5.91 ± 0.41     |

**Tabla 4.** Resultados de Rod-Drop para Scram BC1.

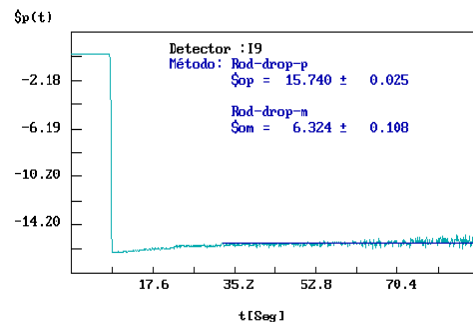
| Estimac.<br>de $\rho$ en<br>CEM y<br>MRP | Exp 3           |                 | Exp 4           |                 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | CIC 1<br>C1     | CIC2<br>I9      | CIC 1<br>C1     | CIC2<br>I9      |
| $\$_{om}$                                | 4.378 ± 0.025   | 4.298 ± 0.016   | 4.451 ± 0.016   | 4.344 ± 0.015   |
| $\$_{oi}$                                | 4.89            | 4.39            | 4.91            | 4.39            |
| $\$_{od}$                                | 5.00            | 4.41            | 5.01            | 4.39            |
| $\$_{op}$                                | 4.8630 ± 0.0049 | 4.3866 ± 0.0044 | 4.8630 ± 0.0049 | 4.3813 ± 0.0044 |
| Efecto<br>Espacial                       | 11.08 ± 0.64    | 2.06 ± 0.40     | 9.71 ± 0.40     | 0.87 ± 0.37     |

**Tabla 5.** Resultados de Rod-Drop para Scram Total.

| Estimación<br>de $\rho$ en<br>CEM y MRP | SCRAM TOTAL      |                  |
|---|------------------|------------------|
|   | CIC 1<br>C1      | CIC2<br>I9       |
| $\$_{om}$                               | 9.691 ± 0.019    | 6.324 ± 0.108    |
| $\$_{oi}$                               | 14.16            | 16.17            |
| $\$_{od}$                               | 14.61            | 17.71            |
| $\$_{op}$                               | 14.0367 ± 0.0140 | 15.7404 ± 0.0248 |
| Efecto<br>Espacial                      | 44.84 ± 2.39     | 148.91 ± 4.27    |



**Figura 4.** Rod – Drop de Bco. de Barras visto con CIC1 en C1.



**Figura 5.** Rod – Drop de Bco. de Barras visto con CIC2 en I9.

Por re-cálculo con FERCIN4 y ESTADIST se obtienen nuevos valores para el CEM y

MRP. FERCIN4 es un programa de ajuste para los datos obtenidos por FERCIN2.

**Tabla 6.** Resultados de Rod-Drop para Scram Total corregida con FERCIN4 y ESTADIST.

| Estimación de $\rho$ en CEM y MRP | SCRAM TOTAL     |                 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                   | CIC 1<br>C1     | CIC2<br>I9      |
| $\$_{om}$                         | 9.72 ± 0.048    | 6.685 ± 0.040   |
| $\$_{op}$                         | 14.048 ± 0.0005 | 15.802 ± 0.009  |
| Efecto Espacial                   | 44.048 ± 0.713  | 122.122 ± 1.345 |

Con la información obtenida de la aproximación a crítico previo a las experiencias se obtuvo la siguiente posición de barras: BS1:BS2:BS3=100%, BC1=57.1% extraída, BC2= 0% extraída. De la calibración de barra se tomaron los valores respectivos a BC1 y BC2 y se obtuvo \$ 5.21, que sería la reactividad en exceso del núcleo.

$$\$_{exc} = 5.21 \pm 0.007 \text{ dólares}$$

La reactividad de extinción se toma de los datos de Rod – Drop del Banco de Barras (corregido),

$$\$_{ext} = 9.72 \pm 0.048 \text{ dólares}$$

La reactividad del Bco. de Barras es:

$$\$_{Bco} = \$_{exc} + \$_{ext}$$

$$\$_{Bco} = 14.93 \pm 0.004 \text{ dólares}$$

Por último el factor de seguridad de reactividad será:

$$FSR = 2.86 \pm 0.001$$

#### 4. Discusión

Como se podrá observar de las experiencias de Calibración de Barras: Período Asintótico y Reactímetro Digital; este último método de calibración es más confiable, debido a que el proceso es directo, tanto en el control de posición de barras como de la información del cambio en la tasa de cuentas de neutrones. Considerando que el Método del reactímetro digital tiene también sus errores sistemáticos; sin embargo, estos son menores que los del método del período asintótico, donde no se consideran la toma de datos visual por parte del operador tanto en el cronómetro como en el medidor de corriente de cámara ( $\phi M4$ ), como también

por la temperatura u otros fenómenos externos. Es por esta razón que si consideramos el método del R.D. como válido, tenemos que existe un error sistemático de un 6.8% para BC1 y de 7.35% para BC2, en el método del P.A., por lo tanto los valores de reactividad serían  $\$_{BC1} = 3.4 \pm 0.068$  y  $\$_{BC2} = 3.15 \pm 0.073$  respectivamente.

En el método de Rod – Drop, la efectividad de las barras expresada en dólares es mayor que el de una calibración normal, debido a que se considera tanto la evolución instantánea como retardada, como se explicó anteriormente, además es una medición de reactividad de toda la barra, y no por tramos como en los casos anteriores, es por esta razón que se hizo la prueba con BC1, que calibrada por Rod-Drop nos da  $\$_{opBC1} = 4.863$  mientras que por R.D., se obtiene un valor de  $\$_{pBC1} = 3.65$ , si consideramos el efecto cinético espacial modal este valor resulta  $\$_{omBC1} = 4.451$ , con el cual se puede determinar el efecto espacial como:

$$E.E. = \frac{\$_{opBC1} - \$_{omBC1}}{\$_{omBC1}} * 100 = 9.71$$

Siempre el método de Rod-Drop dará un mayor valor de reactividad de la barra a estudiar. Sin embargo, este método se emplea mejor para determinar la efectividad del banco de barras, que sería la reactividad de extinción dado por  $\$_{omBco}$ .

Teniendo la reactividad de exceso del núcleo y la reactividad de extinción se calcula la reactividad del banco de barras, y luego el factor de seguridad de reactividad, que en nuestro caso es de 2.86, cumpliendo con las normas que establecen que este valor debe ser igual o superior a 1.5.

Una manera de verificar si estos resultados son confiables en el tiempo se realiza una comparación de reactividad de la misma configuración N° 24, pero de una fecha cercana al inicio del ciclo, en donde la reactividad en exceso debió ser mayor.

|            | Oct 2002 |       | Mzo 2003 |       |
|------------|----------|-------|----------|-------|
|            | pcm      | \$    | pcm      | \$    |
| $\$_{Bco}$ | 15020.85 | 19.26 | 11645.4  | 14.93 |
| $\$_{ext}$ | 10105.35 | 12.95 | 7581.6   | 9.72  |
| $\$_{exc}$ | 4915.50  | 6.30  | 4063.8   | 5.21  |
| FSR        | 3.056    | 3.056 | 2.87     | 2.87  |

Se observa coherencia en los resultados, la reactividad en exceso disminuye por el

quemado de combustible, la reactividad de extinción va acorde con el quemado y es por esa razón que el FSR también disminuye, pero manteniéndose en los límites.

## 5. Conclusiones

Se ha podido verificar que el empleo, tanto del FERCIN1 como FERCIN2, son más confiables y eficientes para la determinación de la efectividad de las barras de control, que el método del período asintótico. El tiempo de ejecución de las experiencias es menor y los resultados de calibración son inmediatos, quedando registrados en archivos creados por el mismo programa.

Los valores encontrados son confiables dado que han sido contrastados con otros datos. Se puede afirmar que tanto el sistema de medición de señales, su sistema de adquisición de datos y los programas FERCIN1 y FERCIN2 han sido validados satisfactoriamente y con márgenes de incertidumbres por debajo del 5%.

## Bibliografía

1. Gómez, A. Manual de usuario. Documento Técnico CNEA, CNEA.C.RCN.MUS.021, Bs. As. Argentina, 1998.
2. Gómez, A. Medición de reactividad en el reactor RA-3. CNEA.C.RCN.INT.113, Bs. As. Argentina, 2002.
3. Gómez, A. Mediciones de parámetros neutrónicos del reactor RA-3 durante la puesta en marcha en mayo del año 2000. CNEA.C.RCN.ITE.136, Bs. As. Argentina, 2002.
4. Castro, J. Experiencias de calibración de barras empleando FERCIN 1 y 2. Informe interno CASE, Lima, Perú, 2003.