

## **Dispositivo de posicionamiento de muestras biológicas para su irradiación en un canal radial de un reactor nuclear**

**Maritza Rodríguez - Gual, Felix Mas - Milián, Airton Deppman, Paulo Rogerio Pinto - Coelho**

Recibido el 4 de junio de 2010; aceptado el 30 de agosto de 2010

### **Resumen**

Por la demanda de un dispositivo experimental para el posicionamiento de las muestras biológicas para su irradiación en un canal radial de un reactor nuclear de investigaciones en funcionamiento, se construyó y se puso en marcha un dispositivo para la colocación y retirada de las muestras en la posición de irradiación de dicho canal. Se efectuaron las valoraciones económicas comparando con otro tipo de dispositivo con las mismas funciones. Este trabajo formó parte de un proyecto internacional entre Cuba y Brasil que abarcó el estudio de los daños inducidos por diferentes tipos de radiación ionizante en moléculas de ADN. La solución propuesta es comprobada experimentalmente, lo que demuestra la validez práctica del dispositivo. Como resultado del trabajo, el dispositivo experimental para la irradiación de las muestras biológicas se encuentra instalado y funcionando ya por 5 años en el canal radial # 3 (BH#3) del reactor nuclear de investigaciones brasileño IEA-R1 de acuerdo a los requisitos solicitados. El dispositivo construido incrementó los tipos de estudios que pueden ser realizados en el reactor. Su aplicación práctica en el campo de la radiobiología y la dosimetría es inmediata.

**Palabras claves:** reactor nuclear de investigaciones, dispositivo para posicionamiento de muestras, canal radial, tecnología apropiada.

## **Biological samples positioning device for irradiations on a radial channel at the nuclear research reactor**

### **Abstract**

For the demand of an experimental device for biological samples positioning system for irradiations on a radial channel at the nuclear research reactor in operation was constructed and started up a device for the place and remove of the biological samples from the irradiation channels without interrupting the operation of the reactor. The economical valuations are effected comparing with another type of device with the same functions. This work formed part of an international project between Cuba and Brazil that undertook the study of the induced damages by various types of ionizing radiation in DNA molecules. Was experimentally tested the proposed solution, which demonstrates the practical validity of the device. As a result of the work, the experimental device for biological samples irradiations are installed and operating in the radial beam hole #3(BH#3) for more than five years at the IEA-R1 Brazilian research reactor according to the solicited requirements the device. The designed device increases considerably the type of studies can be conducted in this reactor. Its practical application in research taking place in that facility, in the field of radiobiology and dosimetry, and so on is immediate.

**Key words:** research nuclear reactor, sample positioning device, radial channel, appropriate technology.

## 1. Introducción.

En el año 1997[1], un grupo de investigadores propuso la idea de utilizar uno de los canales de irradiación, el canal radial #3(BH#3) disponible en el reactor nuclear de investigaciones IEA-R1 del *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares* (IPEN), para desarrollar estudios de Terapia por Captura Neutrónica en el Boro. Sin embargo, esta investigación demandaba la irradiación "in vitro" o "in vivo" de muestras biológicas con el reactor en operación.

El canal de irradiación #3 es un tubo de aluminio que tiene 2,6m de longitud y 20,32 cm de diámetro interno, el cual se extiende desde una de las caras del núcleo del reactor hasta fuera de la pared de la piscina del reactor. La cavidad cilíndrica donde se coloca la muestra para la irradiación tiene un diámetro de 12,8 cm y un largo de 30 cm.

En dicho canal radial, la irradiación de las muestras estaba limitada a una sesión semanal, por lo que no existía posibilidad de variar el tiempo de irradiación, lo que imposibilitaba la realización del estudio planteado. Por otro lado, la falta de un dispositivo que permitiera la inserción y retirada de las muestras biológicas con el reactor en funcionamiento, limitaba también el uso de dicho canal. Ante todas estas dificultades surge la necesidad de construir y poner en funcionamiento el sistema experimental que se muestra en el trabajo.

## 2. Materiales y métodos

Primeramente para decidir qué tipo de tecnología (mecánica, neumática, automática, etc) aplicar, son varios los factores que se tuvieron en cuenta. Entre los cuales se incluye:

1. ¿Cuál es la necesidad?
2. ¿Cuál es el presupuesto?
3. ¿Cuál es la mejor opción técnica?

Y el diseño seleccionado debe cumplir con los siguientes requerimientos:

1. Que pueda ser manufacturado completamente con los medios y experiencia tecnológica de la institución,
2. De construcción rápida,
3. De fácil ensamblaje,
4. De fácil reparación,
5. De bajo costo de mantenimiento

Y por último, el dispositivo ingenieril debe cumplir con las siguientes funciones:

1. Transportar las muestras desde y hacia la posición de irradiación en el momento apropiado sin necesidad de detener el funcionamiento del reactor,
2. Permitir la observación desde la sala de experimentos del proceso de irradiación,
3. Pueda ser usado por no menos de 10 años.

La selección de los materiales de construcción fue realizada en base a los siguientes requerimientos:

1. los problemas de activación,
2. estabilidad térmica frente a la temperatura de trabajo,
3. resistencia a la corrosión,
4. no tóxico,
5. resistencia estructural,
6. los aspectos económicos(precios),
7. maniobrabilidad,
8. disponibilidad en el mercado nacional

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente planteado, varias soluciones pueden ser propuestas para la construcción del sistema de posicionamiento de las muestras biológicas para su irradiación en el canal radial #3 del reactor nuclear de investigaciones IEA-R1.

La mayoría de los reactores nucleares de investigación en el mundo están equipados con sistemas de transporte de muestras de tipo neumáticos, conocidos también en inglés como sistemas "rabbit" [2-5]. Dichos sistemas transportan los recipientes que contienen las muestras desde el laboratorio de procesos analíticos hasta el núcleo del reactor por canales verticales para su irradiación sin necesidad de detener el funcionamiento del reactor para su irradiación.

Las ventajas de los sistemas de guía neumático se relacionan a continuación [3]:

- Es un procedimiento rápido que permite analizar más de 30 elementos simultáneamente.
- Se mantiene la operación normal del reactor sin necesidad de detener el funcionamiento del reactor para la realización de las distintas operaciones.

Y como desventajas:

- El peso de la muestra es limitado (gramos, miligramos y microgramos) en muchos casos.
- Inversión costosa. Se necesita invertir en compresor de aire, conductos de aire a presión, contenedor de aire comprimido, filtros de aire, sistemas de controles, entre otras cosas.
- Elevado costo de mantenimiento
- Elevado costo de operación
- Irradiaciones de períodos cortos de tiempo

Otros sistemas de posicionamiento de muestras son utilizados en las columnas térmicas de los reactores nucleares, pero los mismos son muy simples como por ejemplo los citados por Esposito y otros [6]. Estos se basan en el acercamiento de las muestras a la posición de irradiación con esteras y raíles. Existen otros muy complejos como los automatizados [7-8]. Para el canal radial #3 se necesitaba un sistema intermedio entre ambos, que cumpliera con los requerimientos necesarios para la realización de los experimentos y con las medidas de seguridad y de protección radiológica para el personal en este reactor en específico.

De los dispositivos experimentales existentes en los reactores nucleares en otras partes del mundo, ninguno cumple los requerimientos impuestos para los objetivos planteados, incluyendo el sistema neumático. Por tal motivo, fue un reto la elaboración de un dispositivo apropiado para solucionar el problema.

Fueron seleccionados dos materiales como variante para la construcción de dicho sistema experimental: el aluminio(Al) y el acero inoxidable 371. En la Tabla No.1 se muestra una comparación de las propiedades de ambos materiales.

**Tabla No.1.** Comparación de las propiedades del aluminio con el acero 371.

Propiedad		Aluminio	Acero 371
1	Esfuerzo(N/mm <sup>2</sup> )	250	400
2	Elasticidad E, Módulo de Young(MPa)	70.000	210.000
3	Densidad(g/cm <sup>3</sup> )	2,7	7,8
4	Punto de fusión(°C)	660	1500
5	Rango de temperatura de trabajo(°C)	-250 a 150	-5 0 a 500
6	Conductibilidad eléctrica(m/Ohm mm) <sup>2</sup>	29	7
7	Conductividad térmica(W/m °C)	200	76
8	Coefficiente de expansión lineal x 10-6/°C	24	12
9	No-magnético	Sí	No
10	Tóxico	No	No
11	Resistente a la corrosión	Sí	Sí
12	Mecanizado	Fácil	Fácil
13	Maleable	Sí	Sí
14	Costo	Barato	Caro

La limitación fundamental para la utilización del acero inoxidable 371 es su alto costo, por tal motivo no fue escogido para la construcción del dispositivo experimental.

Fue seleccionado el aluminio como material para la construcción del dispositivo por poseer las siguientes características físicas:

- Es un metal ligero, pesa menos que el acero
- Resistente a la corrosión y no requiere ningún tipo de pintura de protección.
- Disponibilidad en el mercado nacional brasileño.
- Barato
- Alta resistencia cuando es aleado con otros metales o templado. Algunas aleaciones de aluminio pueden ser más resistentes que el acero normal.

- No es tóxico, de hecho, se utiliza en utensilios de cocina y en recipientes o envolturas, para el transporte de alimentos y bebidas.

Y las características mecánicas siguientes:

- Facilidad de mecanización.
- Fácil maniobrabilidad
- Muy maleable. Puede moldearse, con todas las técnicas habituales de tratamiento, con más facilidad que la mayoría de otros metales. Es un material que forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas. Esto lo hace muy versátil.
- Material soldable

Características químicas

- Debido a que se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina  $Al_2O_3$ ) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad.

Además, el producto resultante de la activación neutrónica es de corta vida (2,24 min).

El dispositivo debe satisfacer los siguientes requisitos:

- Permitir la colocación y extracción de las muestras en el canal de irradiación sin necesidad de detener la operación del reactor,
- la observación desde la sala de experimentos del proceso de colocación, y
- la irradiación por períodos largos de tiempo.

Fue un reto la elaboración del dispositivo ingenieril que permitiera la realización de experimentos radiobiológicos, sin tener que esperar detener la operación del reactor y por períodos largos de tiempo, que funcionara de forma segura y que cumpliera con los requerimientos de la investigación. Ahí radica la importancia y lo novedoso del tema.

### 3. Resultados y discusión

El dispositivo construido consta de tres partes:

1. un sistema de posicionamiento de la muestra
2. un sistema de transporte
3. un sistema de monitoreo

A continuación se detalla cada uno de los sistemas.

El sistema de posicionamiento de la muestra no es más que un brazo mecánico constituido de una garra fija a unos cojinetes de rodamiento, un sistema de roldada, un raíl de aluminio de tipo U sobre el cual se mueve el rodamiento y un interruptor mecánico. El sistema de roldada que posee una roldada y un cable de acero flexible con forro asegurado en el raíl de aluminio. El cable de acero flexible realiza dos funciones: la apertura y cierre de la garra y la traslación de la misma. El interruptor mecánico posee una manigueta, un marco, un cable de acero flexible y muelles. La manigueta se desliza a lo largo del cuadro o marco, hacia arriba y hacia abajo, además, tiene dos muelles en cada extremo de la manigueta para ejercer la fuerza de cierre de la garra. Al halar la manigueta, se acciona el cable que está conectada en el medio del tubo, este opera la garra de manera remota al otro extremo del cable. Los muelles son los encargados de retornar la manigueta a su posición inicial y de esta forma hacen cerrar la garra. El raíl de Aluminio tiene 10 m de largo y tiene una inclinación de 25 grados. El raíl tiene dos topes físicos que fueron instalados al final del desplazamiento para su seguridad. El raíl está soportado por una estructura metálica compuesta por 4 angulares.

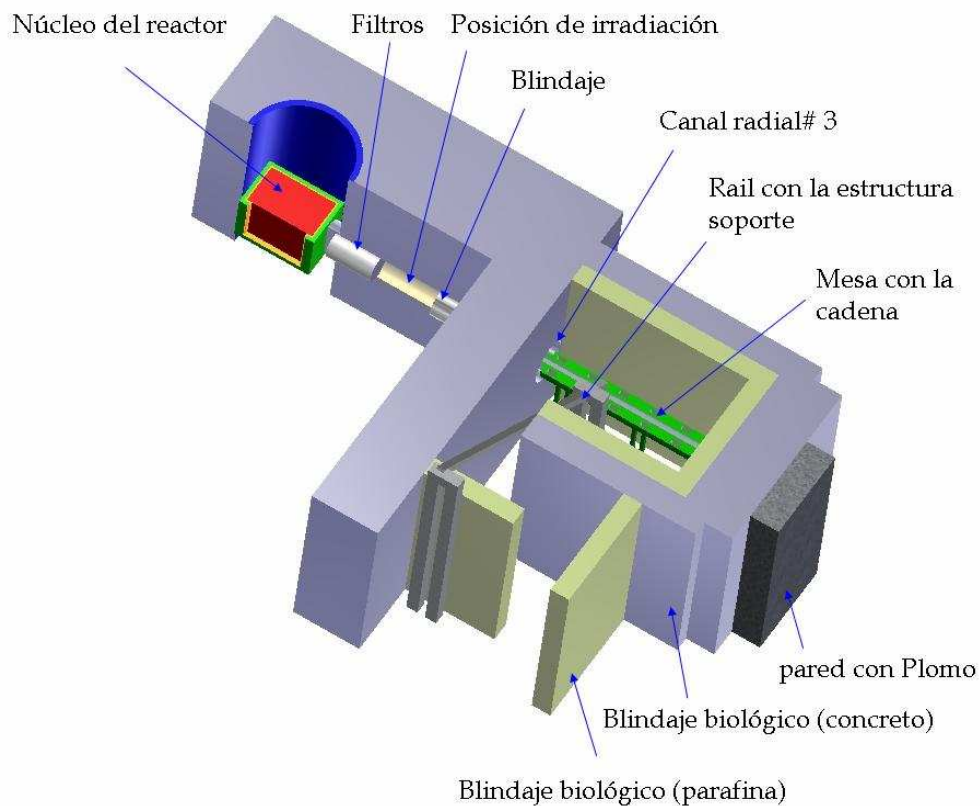
El sistema de posicionamiento de la muestra está compuesto además, por soporte del porta muestra y el porta muestra. Como las muestras utilizadas en la irradiación se encuentran dentro de un tubo de polipropileno (Eppendorf, 0,5 ml), de pequeñas dimensiones, fue necesario la construcción de un soporte para colocar el porta muestra. El porta muestra transporta el tubo de polipropileno que es el que contiene a la molécula de ADN y tiene la forma de canasta con un asa. Está compuesta por dos placas que forman un ángulo de 20° y una placa superior con 13 orificios, en donde se coloca el tubo de polipropileno. El material de la canasta es acrílico. El soporte del porta muestra también está construido de acrílico y esta compuesto por 2 placas que también forman un ángulo de 20° fijadas a dos discos huecos. El porta muestra se fija en una posición de tal forma que el centro del disco hueco coincida con el centro del haz de neutrones.

El sistema de transporte está constituido por el mando propio y una mesa con una cadena que permiten que salga y entre el portador de la muestra de la cavidad interior del canal de irradiación del reactor nuclear, y un motor eléctrico que es el que comunica la potencia para el movimiento del transportador de cadena en dos sentidos (con posibilidad de inversión de marcha). El motor está conectado directamente a la cadena. El semi-tubo metálico (aluminio) es el portador de la muestra, tiene dos uñas o agarre que lo acopla al transportador de cadena, una por un lado y otra por el otro lado. Lo que detiene el movimiento de la cadena son dos *micro-switchs* en cada extremo. El mando tiene 2 botones, cuando se presiona el botón "IN" la mesa con la cadena permite que entre el semi-tubo con la muestra a la cavidad interior del reactor. Cuando se presiona el botón "OUT" la mesa con la cadena opera en modo inverso permitiendo que salga el semi-tubo con la muestra de la cavidad interior del reactor. El semi-tubo metálico contiene los filtros, el soporte con el porta muestra y el blindaje del canal de irradiación. La mesa con la cadena es colocada en frente al canal de irradiación. Este sistema fue construido totalmente en los talleres del IPEN.

El sistema de monitoreo está compuesto por 3 pequeñas cámaras de video fijadas en el interior de la instalación experimental. Las cámaras de video están conectadas por cables a un monitor de video situado en el exterior de la misma (detrás del blindaje biológico). Con este sistema es posible visualizar remotamente la colocación y retirada de las muestras en la posición de irradiación. La señal de video es transmitida en tiempo real.

Para suministrar la energía eléctrica y permitir el funcionamiento de las cámaras de video, monitor, el mando y el motor eléctrico el sistema posee una fuente de alimentación interna.

Externamente a la instalación experimental hay construido un blindaje biológico para proveer un apropiado aislamiento entre dicha instalación y la sala del reactor y además, para satisfacer las normas básicas de seguridad que permitan la protección radiológica del personal que realiza los experimentos y sus alrededores dentro de la sala del reactor. Dicho blindaje biológico está compuesto de cajas de parafina y bloques de concreto macizo, paredes de plomo y parafina borada. Una representación esquemática de una vista en 3D de la instalación experimental se muestra en la Figura No.1. En las Figuras 2 y 3 se muestran fotos de la sala de experimentos y del dispositivo.



**Figura 1.** Representación esquemática en 3D de la instalación experimental y su blindaje biológico.



Figura 2. Vista real de la sala de experimentos con su blindaje.



Figura 3. Vistas del dispositivo para el posicionamiento de las muestras biológicas con el reactor en operación.

La construcción del brazo mecánico, del soporte y del porta muestra, fue realizada en los talleres del Instituto de Física de la Universidad de São Paulo (IF-USP).

En la decisión para construir el dispositivo se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Es un prototipo
- Se emplea en una instalación única
- Necesidad de abaratar los costos de inversión en la investigación

Por tales premisas se decidió no utilizar un sistema de guía neumático por los inconvenientes antes enunciados.

El criterio de mantenimiento empleado para el dispositivo es el de sustitución, es decir, hasta el deterioro de una de las partes fundamentales del mismo.

### Valoración económica del costo de los materiales empleados

En la Tabla 2 se muestra el costo de los materiales empleados en la fabricación del dispositivo.

**Tabla No.2.** Costo de los materiales empleados en la fabricación del dispositivo.

Piezas		Cantidad	Materiales	Costo de Materiales
1	Angulares perforados	4	Al	700
2	Rail tipo U	1	Al	
3	Roldana plástica	1	plástico	
4	Cables Flexibles	15 m	Acero	
5	Forro de cables	10 m	Acero	
6	Muelles		Acero	
7	Planchas metálicas para la garra		Al	
8	Varillas de la manigueta (d=1cm)	3	Bronce	
9	Tornillos		Acero	
10	Tuercas		Acero	
11	Arandelas	6	Acero	
12	Rodamientos			
13	Cámaras de video	3		960
14	Selector de imagen	1		340
15	Monitor de video	1		450
	Total(Reales)			R \$ 2 450
	Total(USD)			USD \$ 980

### Características del dispositivo construido:

1. Es un diseño original.
2. Fácil maniobrabilidad y sencillez en la ejecución de las operaciones.
3. Bajo costo de montaje.
4. Bajo costo de implementación.
5. Bajo costo de los materiales empleados (no supera los USD \$ 1000).
6. Permite la irradiación de muestras por períodos largos de tiempo (horas, días) con el reactor en operación.
7. Alta productividad de irradiación de las muestras.
8. Permite el trabajo a distancia de forma segura.
9. Soporta cargas de hasta 500 g.

#### 10. Posibilidades de control del tiempo de irradiación.

Durante la operación del sistema experimental construido, desde la salida del semi-tubo metálico de la cavidad interior del reactor hasta la colocación de las muestras en la posición de irradiación, se sigue una serie de pasos para asegurar la protección radiológica del personal para dar cumplimiento a la norma obligatoria de seguridad y protección radiológica ISO-9001:2000 para la "Operación del reactor y servicios de irradiación". La implementación de todos estos pasos significó la aprobación de la operación del sistema experimental construido.

La aplicación práctica del dispositivo en investigaciones que se desarrollan en esa instalación en el campo de la radiobiología, la dosimetría, etc. es inmediata. Ahí radica su alto valor funcional.

#### **Aplicación del dispositivo**

Para demostrar la aplicabilidad del dispositivo, se realizó un número determinado de experimentos, en los cuales mostró un buen desempeño; entre ellos:

1. El estudio del daño inducido por la radiación mixta de neutrones térmicos y gamma en moléculas de ADN, en presencia y ausencia de captador de radicales libres, Glicerine [9].
2. Medición de las tasas de dosis en la posición de irradiación con detectores termoluminiscentes [10].
3. Medición del flujo neutrónico con láminas de activación [11].

#### **Impacto del dispositivo**

El nuevo dispositivo propició que se desarrollaran nuevas líneas de investigación:

1. Validación de dosímetros de gel termoluminiscente [12].
2. Experimentos de caracterización del flujo [13].

El valor práctico de este trabajo viene dado porque:

- Se logra por primera vez utilizar el canal radial #3 del reactor IEA-R1 para la irradiación directa de muestras biológicas por períodos de tiempo largos.
- No se detiene el funcionamiento del reactor, por lo que no se interrumpe la producción de isótopos, pilar económico y social de este reactor.

El aporte económico de este trabajo viene dado por el:

- Ahorro por concepto de compra de *know-how* para la construcción o adquisición del dispositivo.
- Ahorro de tiempo y dinero por concepto de construcción rápida y fácil.
- Ahorro de tiempo y dinero por concepto de implementación.
- Ahorro de energía eléctrica.

El aporte social viene dado por:

- El dispositivo experimental desarrollado permitió el estudio del daño inducido por la radiación en moléculas de ADN.
- Experiencia adquirida en el trabajo experimental en infraestructura tecnológica de punta inexistente en el país (reactores nucleares)
- Se fortaleció la colaboración científica internacional.
- Se amplían las posibilidades de irradiación del reactor nuclear IEA-R1 en su conjunto.

#### **Aspecto novedoso**

Se logró un dispositivo mecánico propio para la manipulación remota de muestras biológicas en un canal radial de un reactor nuclear de investigaciones con el objetivo de llevar a cabo las irradiaciones por períodos largos de tiempo y sin necesidad de interrumpir la operación del reactor nuclear. El brazo mecánico construido es convencional, pero según la bibliografía consultada no se había utilizado con anterioridad en un reactor nuclear.



#### 4. Conclusiones.

- Queda demostrada la validez práctica y utilidad del dispositivo en cuanto a su multipropósito y realización de experimentos radiobiológicos y dosimétricos.
- Demostró que es posible la construcción de dicho dispositivo en los reactores nucleares de investigación con los requerimientos necesarios para la irradiación de las muestras biológicas por períodos largos de tiempo, durante la operación continua del reactor y de forma segura.
- Puede ser manufacturado completamente con los medios, tecnología y experiencia disponible en los talleres de la institución a un costo bajo.

#### Agradecimientos

El colectivo de autores agradece el apoyo financiero recibido por el Programa de Doctorado Cooperativo entre el Instituto de Física Teórica de Trieste (ICTP) y el Consejo Latinoamericano de Física (CLAF), que permitió realizar este trabajo. Este trabajo fue financiado por la Fundação de Amparo á Pesquisa do Estado de São Paulo, a través del Proyecto Internacional FAPESP # 097555-0, 2002-2006, titulado "Interação de radiação com o DNA"

#### 5. Referencias.

1. **COELHO, P. R. P.; CAMILLO, M. A. P., et al** "Design of a Facility for NCT Research in the IEA-R1 Reactor", In: Borje Larsson; John Crawford; Regin Weinreich. (Org.), *Advances in Neutron Capture Therapy*, Amsterdam: Elsevier Science, 1997, vol. 1, p. 367-369.
2. **JANG, S. Y.** *Advanced neutron irradiation system using Texas A&M University Nuclear Science Center Reactor*. Thesis, Ph. D., 2004.
3. **Chung Y.-S.; Kim S.-H., et al** "New pneumatic transfer systems for neutron activation analysis at the HANARO research reactor", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, vol.278, n<sup>o</sup>. 3,p.707-712.
4. **Burgette, E., N., Blue, T., et al** "Neutron spectral measurement of the Ohio state research reactor pneumatic tube", *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 2009, vol. 282, n<sup>o</sup> 1, p.187-19.
5. **Palmer, A. J.** "Hydraulic Shuttle Irradiation System (HSIS) Recently Installed in the Advanced Test Reactor (ATR)", 2010 *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'10)* ANS Annual Meeting Imbedded Topical San Diego, CA, June 13 – 17.
6. **Esposito, J., Rosi, G., et al** "The new hybrid thermal neutron facility at Tapiro reactor for BNCT radiobiological experiments", *Radiation Protection Dosimetry*, 2007, vol. 126, n<sup>o</sup> . 1-4, p. 69-73.
7. **ISMAIL, S. S.,** "A New Automated Sample Transfer System for Instrumental Neutron Activation Analysis", *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, 2010, Article ID 389374, p 8, <http://www.hindawi.com/journals/jammc/2010/389374.htm>
8. **LI, X., Henkelmann, R. et al** "An automated fast transfer system at the research reactor Munich", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 522, n<sup>o</sup> 3, 21 April 2004, p. 470-476.
9. **Rodríguez Gual Maritza., Deppman A. et al** "Single and double-strand breaks produced by mixed thermal neutrons-gamma radiation in aqueous solutions of plasmid DNA", *Fifth International Symposium on Nuclear and Related Techniques(NURT)*, 3-7 april, 2006, Havana, Cuba, CD-rom, ISBN 959-7136-42-2.
10. **Nascimento, J.F. y Coelho, P.R.P.:** "Utilização de Dosímetros Termoluminiscentes do Tipo TLD-600 e 700 Calibrados para uso em Pesquisas de BNCT", 2006, Relatório FAPESP.
11. **Muniz, R. O.R.:** "Medidas de Fluxo de Nêutrons em Instalação para Estudos em BNCT", 2006, Relatório CNPq.
12. **Mangueira, T. F., Silva, C. F. et al** "Gamma/Neutron Dose Evaluation Using Fricke Gel and Alanine Gel Dosimeters to be applied in Boron Neutron Capture Therapy", *Applied Radiation and Isotopes*, April-May 2010, vol. 68, núm. 4-5, p. 791-794.
13. **Coelho, P. R. P., Muniz, R. O. R. et al** "Radiation field characterization of the NCT research facility at IEA-R1", *13th International Congress on Neutron Capture Therapy*, 2-7 November, 2008, Florence, ENEA - Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment, vol. 1, p. 553-555.

**Maritza Rodríguez - Gual<sup>1</sup>, Felix Mas – Milián<sup>2</sup>, Airton Deppman<sup>2</sup>, Paulo Rogerio Pinto - Coelho<sup>3</sup>**

1. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, InSTEC.

Ave. Salvador Allende y Luaces, Quinta de Los Molinos, Plaza de la Revolución, AP 6163,

La Habana, Cuba

Teléfono: +(537) 8789857, Fax: +(537) 2041188

E-mail: [mrqual@instec.cu](mailto:mrqual@instec.cu)

2. Instituto de Física, Universidad de São Paulo, IF-USP.

Rua do Matao, trav R., no 187, Cidade Universitaria, Butanta, CEP: 05508-900,

São Paulo, Brasil

E-mail: [felix\\_mas\\_milian@yahoo.com](mailto:felix_mas_milian@yahoo.com), [deppman@if.usp.br](mailto:deppman@if.usp.br)

3. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP.

Ave. Professor Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo, Brasil

E-mail: [prcoelho@ipen.br](mailto:prcoelho@ipen.br)