

DISEÑO DE UN FILTRO DE NEUTRONES DINAMICO BASADO EN AGUA PESADA PARA LA SINTONIZACION DEL HAZ DE BNCT DEL RA6

*Longhino, J.M.

longhino@cab.cnea.gov.ar, GIN – CAB – CNEA

Resumen:

En este trabajo se presenta la evaluación por cálculo de transporte de radiaciones del desempeño de un filtro moderador de neutrones basado en el uso de agua pesada, para su posible implementación en la instalación de BNCT del reactor RA6.

Introducción:

El haz terapéutico de BNCT hace uso del núcleo RA6 como fuente de neutrones de fisión, y de dos etapas de filtrado de espectros de radiación bien diferenciadas; los filtros interno y externo. Por diseño, el filtro interno es apropiado para la moderación de los neutrones de fuente hasta energías epitérmicas, conteniendo absorbente de cadmio para minimizar la componente térmica al exterior. El filtro interno consiste en un elemento sellado, inmerso en el agua de la pileta del reactor, y en contacto con el tanque de la pileta. Coaxial con la dirección del núcleo-filtro interno, se posiciona el filtro externo. Debido a su accesibilidad desde la sala de tratamiento, el filtro externo fue concebido y diseñado como el complemento requerido para la optimización del espectro neutrónico y blindaje de contaminaciones del haz epitérmico bruto, provisto por el filtro interno. Originalmente, el mismo debía ser modular, modificable en función de las necesidades de irradiación de la instalación.

En vista de su utilización en el marco del protocolo terapéutico de melanoma en extremidades, la composición y geometría originales del filtro externo corresponden por diseño a una configuración adecuada para obtener alta intensidad de flujo térmico a profundidades iguales o menores a 1cm en materiales hidrogenados, mientras se minimizan las contaminaciones directas del haz, así como la radiación dispersada y transmitida fuera del haz a través de los blindajes. Cumpliendo esta finalidad, el filtro externo consta de una combinación de materiales sólidos (teflón y acrílico) que provee el haz B2, en uso para la terapia BNCT en su modalidad actual. Los componentes finales del haz (blindaje gamma de Bismuto, colimador y blindajes internos de Plomo, remate de Plomo) resultan ser de compleja colocación y remoción. Por este motivo, se arribó a una configuración en que resulta impráctica la posibilidad de posterior modificación del haz mediante cambio de filtros externos. Adicionalmente, el espacio disponible es insuficiente para la colocación de filtros sólidos móviles mecánicamente.

Dado que se mantiene el interés en la capacidad de modular tanto la intensidad de los campos radiantes presentes, como de modificar la distribución espectral de los mismos, se introduce el concepto de filtro líquido, el cual puede ser modificado remotamente mediante el vaciado/llenado de volúmenes interpuestos al haz, sin movimiento de componentes físicos.

En este trabajo se evalúa computacionalmente el desempeño de un diseño de filtro líquido en los principales parámetros terapéuticos resultantes, a los fines de un posterior análisis de utilidad de las configuraciones obtenidas, y de factibilidad de su implementación posterior.

Objetivos: Modelar y calcular configuraciones de filtrado para el Haz de BNCT, incluyendo la geometría de un filtro líquido, donde el material filtrante es Agua pesada, separada en tres cámaras de llenado/vaciado independiente. Evaluación de performance de las configuraciones del filtro. Alcance de su aplicabilidad.

Materiales y Métodos:

Todo el cálculo de neutrones, fotones y dosimetría computacional de nivel macroscópico asociada se realiza mediante cálculo en el código de transporte estocástico MCNP5, v1.60 [1]. Se utiliza un modelo de cálculo [2] integrando núcleo + filtro interno de BNCT+ filtro externo y puerto (+modelo de fantoma), para criticidad KCODE. Se utilizaron bibliotecas puntuales de la evaluación ENDF/B V y VI, distribuidas junto al código de transporte, con excepción de bibliotecas in-house [3] para Uranio y Plutonio, las cuales contienen los fotones de decaimiento de productos de fisión. En el modelo de núcleo se encuentra actualizadas las composiciones de combustibles y absorbentes por el quemado (Burnup) hasta diciembre de 2015, con posiciones de barras de control consistentes con dicho quemado, y similares a las presentes en operaciones actuales del reactor.

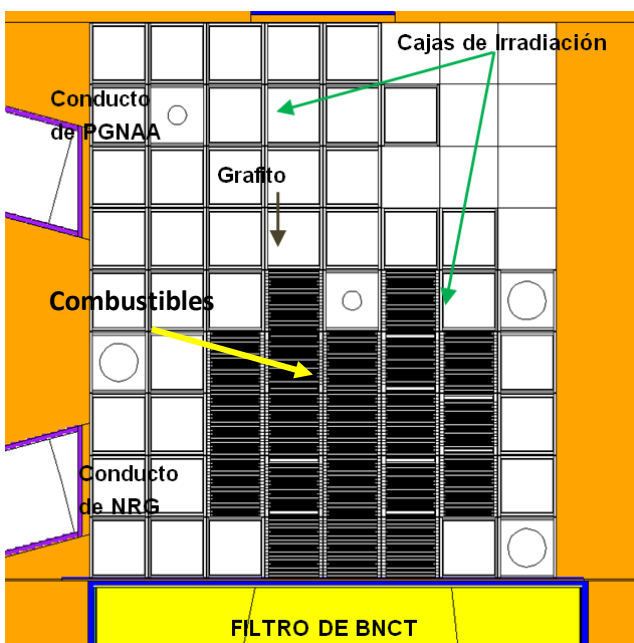


Figura 1: Corte transversal del modelo MCNP del núcleo 15 del RA-6.

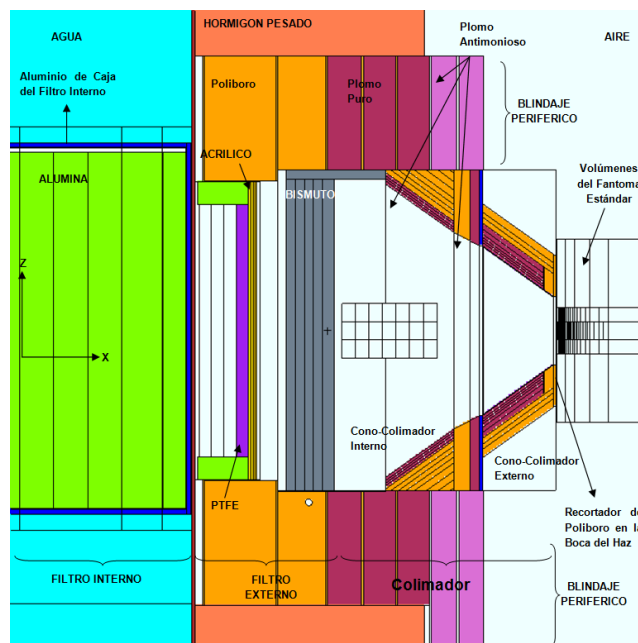


Figura 2: Corte Sagital del Filtro externo, Puerto del Haz B2 y Blindajes periféricos del modelo de MCNP, mostrando los filtros sólidos actualmente ubicados.

Filtro Externo Dinámico

El concepto de diseño se basa en la utilización de un espesor variable Agua pesada (D₂O) como moderador de neutrones, suficiente para un alto nivel de termalización en su máxima cantidad, o completamente vaciado para el aprovechamiento de las características del epitérmico bruto. Esto se logra mediante un recipiente con cámaras estancas aptas para su llenado independiente, proveyendo un espesor variable de moderador según la

configuración de llenado seleccionada. Este recipiente debe conformar las dimensiones disponibles en la cavidad del filtro externo, sin excluir el Bismuto de filtrado gamma. El material del recipiente debe tener una baja sección eficaz de interacción a neutrones, mientras asegura suficiente rigidez para la portabilidad y productos de activación de corta vida media, desde el punto de vista de la radioprotección del personal. A partir de estos requisitos, el material seleccionado es Aluminio 6061, en espesores no mayores a 2mm para los componentes de paso respecto del haz. Se libera a diseño mecánico los espesores laterales, irrelevantes al desempeño del Haz. Se modela el agua pesada como se utiliza en reactores de potencia, con hasta 5ppm de Boro natural, 26ppm de Li natural y 0.15% en peso de agua liviana.

Se decide una configuración de cámaras internas inundables tal que se puedan seleccionar espesores de D₂O variables entre 0 y 14cm cada 2cm: 3 cámaras de 2, 4 y 8cm de espesor. De esta forma se configuran 8 casos de cálculo:

Tabla 1: Casos de cálculo, considerando las distintas posibilidades de llenado del filtro externo dinámico.

Caso	Llenado de Cámaras			Espesor de moderador
	Cámara 2cm	Cámara 4cm	Cámara 8cm	
A	-	-	-	0cm
B	Si	-	-	2cm
C	-	Sí	-	4cm
D	Sí	Sí	-	6cm
E	-	-	Sí	8cm
F	Sí	-	Sí	10cm
G	-	Sí	Sí	12cm
H	Sí	Sí	Sí	14cm

En cuanto al área lateral del volumen llenado por moderador, la misma debe responder a dos criterios: minimizar la masa de D₂O utilizada (por costos) y maximizar el área de fuente de neutrones, presentada a la etapa de colimación final. En función de esto criterios, se indicarán secciones laterales del área de llenado apropiadas para el espacio disponible en la cavidad del haz. Considerando el espacio aumentado de la cavidad del filtro externo, se plantea la alternativa de desplazar este filtro hasta el ras del remate del plano de la pared del puerto. Esto impacta simultáneamente en la intensidad ahorrada por la disminución de fugas por divergencia del haz, y en la relación J/ϕ en la boca del haz. Ubicando al recipiente del filtro líquido, la sección de paso del haz –descontando 2.5cm de marco lateral estructural- corresponde a 65x65cm², resultando en un volumen máximo de llenado de moderador de 59.15 litros.

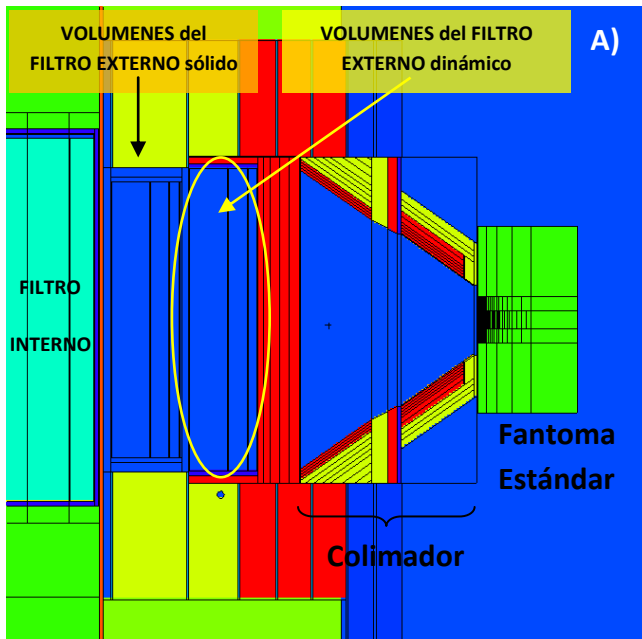
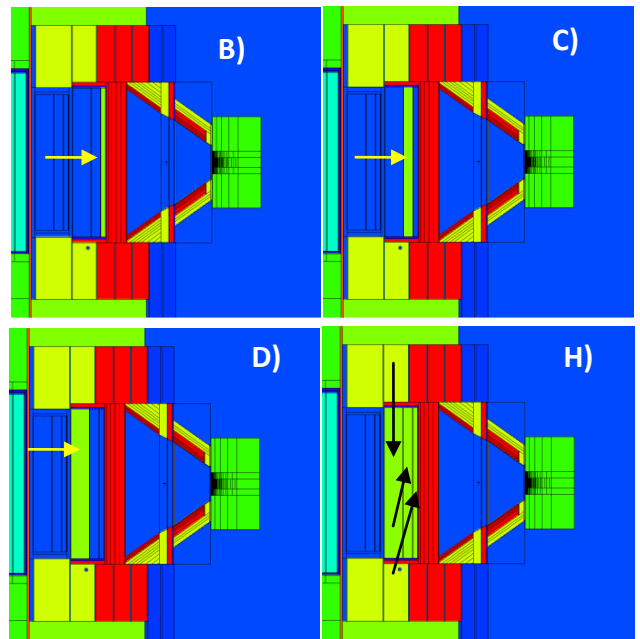


Figura 3: Modelo MCNP de puerto de haz modificado, donde se vacían las celdas correspondientes al anterior filtro externo sólido, se desplazan las celdas correspondientes al filtro gamma de Bismuto hasta el ras del cono colimador interno, y se agregan los volúmenes del nuevo filtro externo dinámico. La figura corresponde a la captura del graficador de geometría del modelo para la configuración A), con todas las cámaras estancas vacías.



Figuras 4 a 7: capturas del graficador de geometría del modelo para las configuraciones B), C), D) y H), con las cámaras estancas llenas de D_2O (flechas) interponiendo al haz un espesor de moderador de 2, 4, 8 y 14cm respectivamente en cada caso.

Aunque usualmente en la evaluación por cálculo se consideran dos geometrías de irradiación (Libre en aire y Fantoma Estándar), dado que la segunda corresponde al comportamiento simulado en medios hidrogenados en una configuración estándar habitual en radioterapia y radioprotección. Por este motivo, se selecciona la configuración Fantoma estándar para la obtención de parámetros relevantes a la posible utilización del haz modificado por el filtrado dinámico de espectros en procedimientos terapéuticos.

Los parámetros de irradiación relevantes se obtienen en función de la profundidad sobre el eje central del sistema Haz-Fantoma. Los parámetros de obtención directa desde el cálculo de transporte de radiaciones son las densidades de flujo de neutrones y fotones en función de la energía de los mismos. Sin embargo, los flujos *per se* no resultan de mayor utilidad fuera de la comparación entre haces, sino que se requieren las dosis depositadas por las distintas componentes de radiación en el medio significativo. Por ello, en este trabajo se reportarán:

- Flujo de neutrones térmicos en función de la profundidad en Fantoma,
- Dosis integrada de fotones en músculo ICRU [5] en función de la profundidad, mediante la utilización de coeficientes de absorción de energía.
- Dosis integrada de neutrones no-térmicos en músculo ICRU [4] en función de la profundidad, mediante utilización de Factores de Kerma.
- Dosis física en musculo ICRU “sano” y “tumoral”, incluyendo componentes de captura térmica en ^{14}N y en 10ppm de ^{10}B (tejido “sano”) y en 30ppm de ^{10}B (tejido “tumoral”), mediante la utilización de Factores de Kerma.

Resultados:

A continuación, se presentan en forma de gráficos los resultados obtenidos para un conjunto de configuraciones de llenado de cámaras estancas del filtro interno dinámico. Estas configuraciones fueron seleccionadas de entre las listadas en Tabla, en función de su desempeño comparativo respecto al Haz actualmente implementado. En todos los casos, se incluirán los resultados correspondientes de la configuración actual (Haz B2, "REF") a modo de referencia y para comparación de desempeño del filtro líquido evaluado.

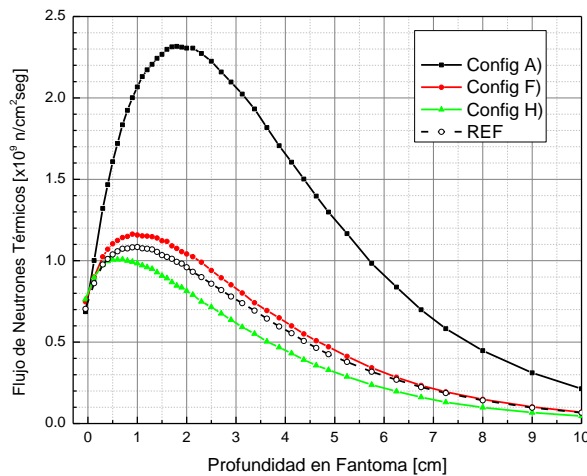


Figura 8: Distribución en profundidad del fantoma del flujo de neutrones térmicos sobre el eje central del haz, para las configuraciones de filtro dinámico seleccionadas y la configuración de referencia. Se observa que en único caso el máximo flujo térmico es menos intenso que el caso de referencia. También se observa el desplazamiento de la posición del máximo indicando la diferencia espectral del haz bajo los distintos filtrados.

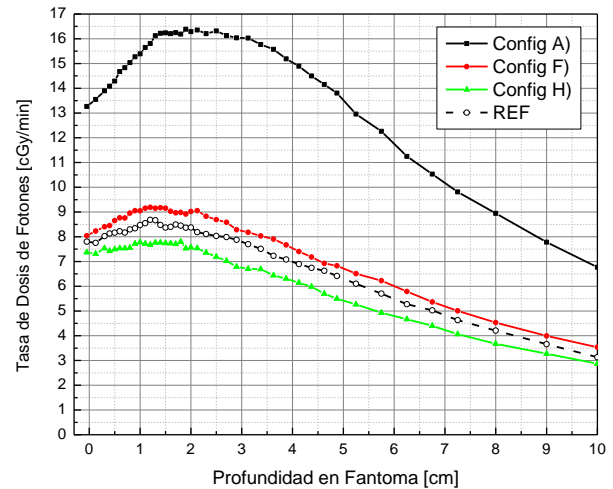


Figura 9: Distribución en profundidad del fantoma de la tasa de dosis gamma sobre el eje central del haz, para las configuraciones de filtro dinámico seleccionadas y la configuración de referencia. Se observan grandes similitudes en la distribución de intensidades, indicando que el mayor porcentaje de dosis se debe a los fotones inducidos por capturas del flujo térmico en el agua del fantoma.

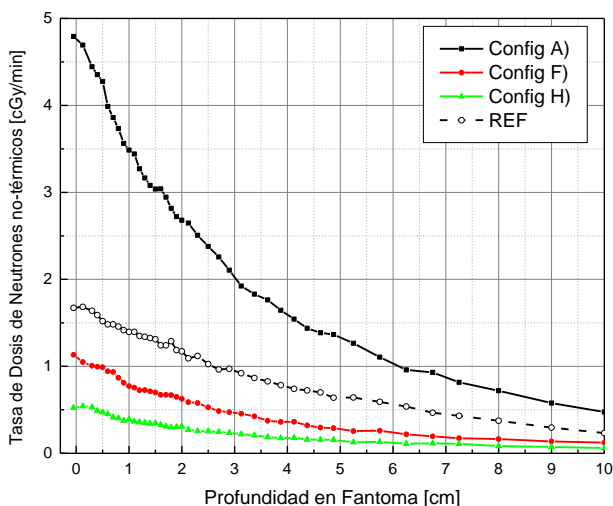


Figura 10: Distribución en profundidad del fantoma de la tasa de dosis de neutrones no-térmicos sobre el eje central del haz, para las configuraciones de filtro dinámico seleccionadas y la configuración de referencia. Se observa que en un único caso las dosis son mayores que en el caso de referencia, llegando a triplicarse la misma en superficie.

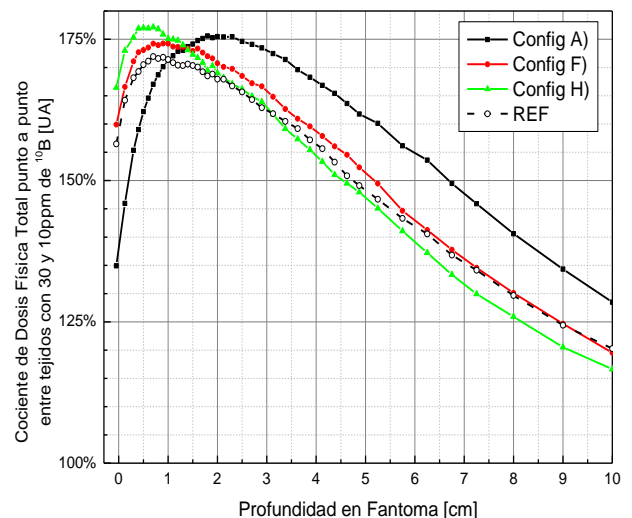


Figura 11: Distribución en profundidad del fantoma del cociente de Dosis Absorbidas Totales (Tumor/Tej.Sano) punto a punto sobre el eje central del haz, para las configuraciones de filtro dinámico seleccionadas y la configuración de referencia. Se observa que, punto a punto, todas las configuraciones de filtro dinámico resultan en dosis a tumor en máximo de entre 2 y 3% superiores al haz actual, filtro externo fijo. Además, la posición de deposición del máximo se desplaza en forma consistente con lo observado para el flujo térmico.

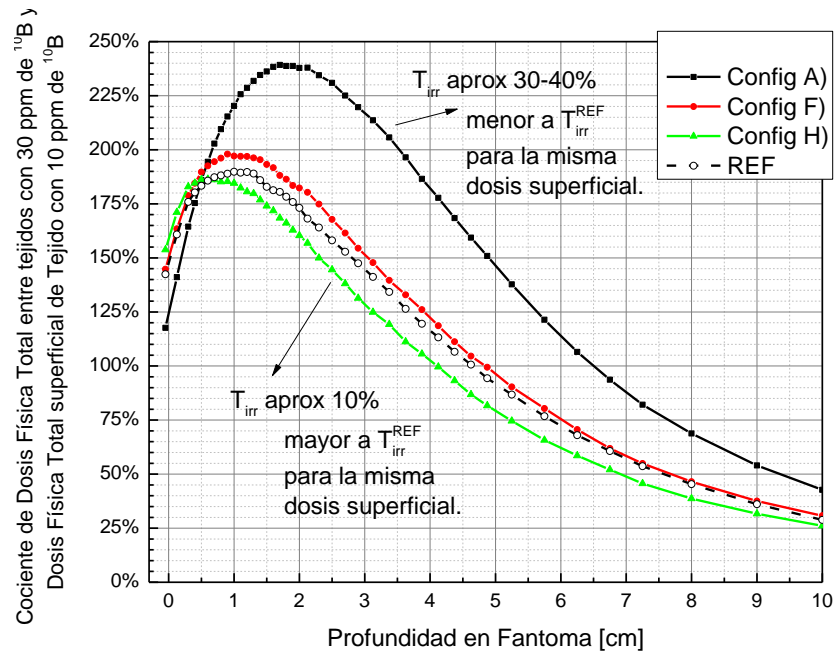


Figura 12: Distribución en profundidad del fantoma del cociente de Dosis Absorbida Total en tumor, respecto a la Dosis Absorbida total a 0.12cm de profundidad (Consistentemente con suponer a piel como el órgano de riesgo).

Tabla 2: Variación relativa de algunos parámetros de interés en irradiaciones calculadas para distintas configuraciones de filtro externo respecto a su valor calculado en la configuración presente ("REF") del Haz B2; donde se evalúan los resultados integrados tales que la dosis física superficial en tejido con 10ppm de ^{10}B ("Tejido sano" evaluado a 1.2mm de profundidad) sea constante e igual a 10Gy.

Configuración	T_{irr}	Dosis 30ppm 1.2mm	Dosis 30ppm 10mm	Dosis 30ppm 15mm	Dosis 30ppm 20mm	Dosis 30ppm 25mm
REF (calc)	63.4 min	16.4 Gy	19.4 Gy	18.7 Gy	17.7 Gy	16.1 Gy
Config A)	-38%	-11%	18%	30%	39%	48%
Config F)	-1%	2%	4%	5%	5%	6%
Config H)	9%	5%	-4%	-6%	-8%	-9%

Análisis y Conclusiones:

De los datos mostrados, se encuentra que la configuración H (la más térmica posible) ofrece una distribución de flujo térmico con máximo posicionado en forma más superficial, y 10% menor a la configuración de referencia. En conjunción con menores Tasas de dosis de fotones y neutrones no-térmicos, esta configuración se caracterizaría por mayores tiempos de irradiación para obtener las mismas dosis totales que el haz actual ("REF"). El análisis de las figuras 11 y 12 indican que sólo se podría obtener ventaja terapéutica con esta configuración, si resultara crítico proteger profundidades mayores a 1cm, mientras se trata la superficie a irradiar.

La configuración A (epitérmica) induce la formación de un máximo de flujo térmico a 2cm de profundidad del material hidrogenado, con una intensidad máxima 110% superior a la presente en la actualidad en el Haz B2 ("REF"). Simultáneamente, se observa una disminución en el flujo térmico superficial (bajas profundidades) e incrementos en las tasas de Dosis contaminantes de 200% en neutrones no-térmicos y 80% en fotones. Como efecto global se observa que, manteniendo la Dosis total a tejido superficial, se puede depositar

una dosis a tumor hasta 50% superior a profundidad, hasta 10% inferior en superficie, todo en 2/3 del tiempo de irradiación que se requiere para alcanzar la tolerancia (10Gy en el ejemplo de la Tabla 2) de tejido superficial. Esto muestra importantes ventajas en el tratamiento de tumores a profundidades mayores de 10mm, siempre que el órgano de riego sea el tejido superficial.

Finalmente, la Configuración F muestra figuras de mérito muy similares a las presentadas a nivel de cálculo en el Haz actual. Se podría considerar a la configuración F como “reemplazo directo” de la configuración actual, siempre que los parámetros de fuga y dispersión de radiaciones fuera del haz –no evaluados en este trabajo- resulten aceptables desde la perspectiva de la protección radiológica del paciente.

Se concluye que la introducción de un dispositivo de filtrado de radiaciones basado en el cambio del espesor de moderación en Agua Pesada es una alternativa válida para la sintonización de los espectros de radiación presentes en el Haz de BNCT del RA6, con particular impacto en el posible tratamiento de tumores ubicados a más de 10mm de profundidad. Adicionalmente, es posible retornar a una configuración de haz básicamente equivalente a la actual, desde el punto de vista de sus efectos radiológicos estimados en el medio de referencia.

REFERENCIAS

- [1]. X-5 Montecarlo Team “MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5” LA-CP-03-0245. April 24, 2003 (Revised 10/3/05). Volumen II
- [2]. J. M. Longhino, “Modelo de cálculo neutrónico de la Facilidad Hipertérmica B2 de BNCT del RA-6 con Núcleo 15”, Informe Técnico CNEA-CAB 47-008-2011.
- [3]. IT-47/RA-10/0120-3-005-0, “Generación de bibliotecas ACE con producción de fotones retardados de fisión en 235-U, 238-U y 239-Pu”, Bazzana S. y Marquez A., Septiembre 2014.
- [4]. ICRU Report 63. “Nuclear Data for Neutron and Proton Radiotherapy and for Radiation Protection”. *International Commission on Radiation Units and Measurements (Bethesda, MD)*. ISBN 0-913394-62-9.
- [5]. ICRU Report 44, “Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement”, *International Commission on Radiation Units and Measurements (Bethesda, MD)*. 1989.