

LA FUENTE FRÍA DE NEUTRONES DISEÑADA PARA EL LINAC DEL CAB

Torres L., Granada R.
División de Neutrones y Reactores, Centro Atómico Bariloche

E-mail: torresl @cab.cnea.gov.ar, granada@cab.cnea.gov.ar

Se presenta la optimización en el diseño de la fuente fría de neutrones para la fuente pulsada basada en el LINAC del Centro Atómico Bariloche. Dicha fuente consta de un premoderador slab de polietileno a temperatura ambiente y un moderador de mesitileno a temperatura de nitrógeno líquido. El moderador considerado es cilíndrico de un espesor interior total de 4,8cm y de 20cm de diámetro y consiste en un sistema de cuatro piezas optimizadas, desde el punto de vista de la intensidad del flujo neutrónico producido y de la respuesta temporal del pulso emergente.

El moderador modular diseñado permite obtener: un espesor variable, espectro subtérmico a 90K con opción de espectro térmico a 300K, versatilidad en el tipo de material moderador, una refrigeración más homogénea con un sistema de enfriamiento sencillo (un crióstato tipo termo) y de bajo costo.

La fuente fría optimizada brinda un factor de ganancia 12 aproximadamente, en el flujo de neutrones con longitudes de onda mayores a 7 Angstrom respecto a la fuente térmica actualmente empleada.

Objetivos

Obtener las dimensiones óptimas del moderador cilíndrico modular para lograr el mayor flujo de neutrones posible con el menor tiempo medio de emisión.

La filosofía de diseño para la fuente fría consiste en obtener:

- el mayor flujo de neutrones posible
- el menor tiempo medio de emisión
- una fuente sencilla
- un sistema de refrigeración simple
- bajo costo.

Procedimientos

1. Teniendo en cuenta el diseño realizado para moderadores cilíndricos, se modeló el moderador modular con cuatro módulos.
2. Para obtener un mayor flujo neutrónico y un moderador de menor tamaño a 89K, se agregó un premoderador de polietileno a 300K. Se realizaron los cálculos variando el tipo de acoplamiento y las dimensiones del moderador.
3. Se compararon los resultados para obtener las dimensiones que proporcionen el mayor flujo neutrónico con una respuesta temporal satisfactoria.
4. Se diseñó un crióstato refrigerado con nitrógeno líquido para enfriar el moderador.

Resultados

Para todos los cálculos se realizaron las siguientes consideraciones:

- Se simplificó la fuente y no se modelaron los electrones incidiendo sobre el blanco. En su lugar se consideró una fuente distribuida en un cilindro de las mismas dimensiones del blanco de 6,8cm de diámetro y de 4,3cm de ancho, monoenergética, de 2MeV e isotrópica, simplificando así, el espectro de neutrones incidente sobre el moderador.
- La fuente se colocó centrada, a una distancia aproximada de 7cm, en forma perpendicular al moderador.
- Se consideraron en las simulaciones los materiales estructurales zircaloy4, los materiales moderadores mesitileno y polietileno y otros relevantes como el Cd.
- Los espectros neutrónicos fueron calculados para energías desde 0 a 2MeV.
- Los pulsos neutrónicos fueron calculados en cuatro grupos energéticos, desde 0 a 4meV, de 4meV a 14meV, de 14meV hasta 0,2eV, de 0,2eV hasta 2,2 KeV y de 2,2KeV a 2MeV.

Debido a que el espesor del moderador elegido varía dependiendo si está acoplado o desacoplado con el premoderador, y considerando que podrían usarse también otros materiales moderadores aparte de mesitileno para la fuente fría, se pensó en una estructura modular para el moderador.

El utilizar una estructura modular también presenta ventajas desde el punto de vista térmico, ya que cada moderador es de menor espesor y esto permite una mejor refrigeración y una distribución de temperaturas más uniforme en todo el volumen.

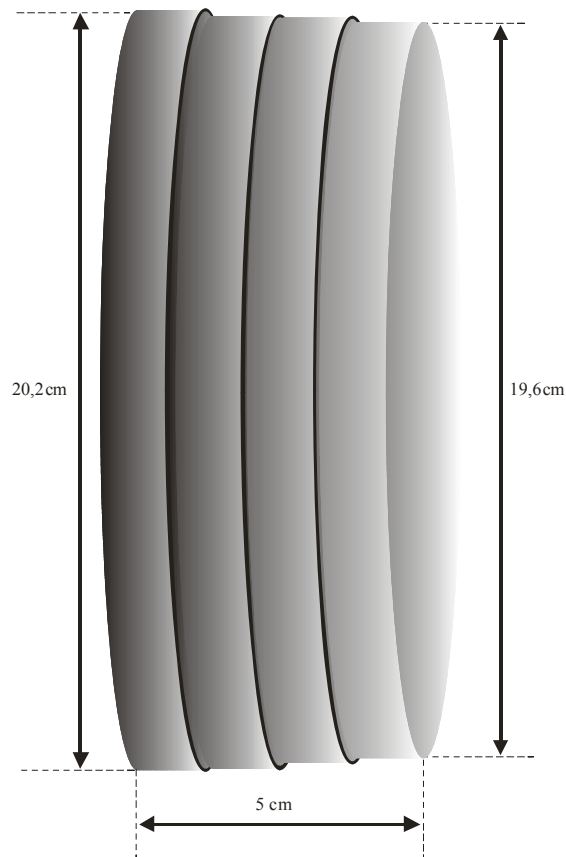


Fig. 1: Esquema del conjunto moderadores cilíndricos encastrados.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se diseñó una estructura que consiste básicamente en cuatro cilindros que se encastran unos a otros y cuyo espesor interior total es de 4,8cm. Cada cilindro tiene un espesor fijo interior de 1,2cm y el diámetro interior varía según el módulo, siendo de 20cm, 19,8cm, 19,6cm y 19,4cm.

A 0,9cm del borde exterior cada módulo lleva un orificio en forma de cono, por donde se incorpora el material moderador, que luego se sella con indio y con un tornillo fino. Los tres primeros moderadores llevan una extensión de 3mm de la carcasa para poder encastrarse al siguiente módulo.

En todos los módulos el material estructural es zircaloy 4 de 1mm de espesor, aunque podría utilizarse espesores menores, ya que existen comercialmente espesores inferiores, siendo el mínimo 0,51mm. Este material se seleccionó debido a sus excelentes propiedades mecánicas, térmicas y neutrónicas, posee una baja absorción térmica de neutrones y buena fluencia, tiene excelente resistencia a la corrosión y a los cambios bruscos de temperatura.

Cada módulo es independiente de los otros, pudiéndose rellenar con el material que se desee o dejarlo vacío, esto permite utilizar distintos materiales moderadores e incluso realizar un moderador con varios materiales a la vez.

En la Fig. 2 se muestra un esquema general de la geometría de la fuente con el premoderador, el moderador y la lámina de cadmio para desacoplarlos.

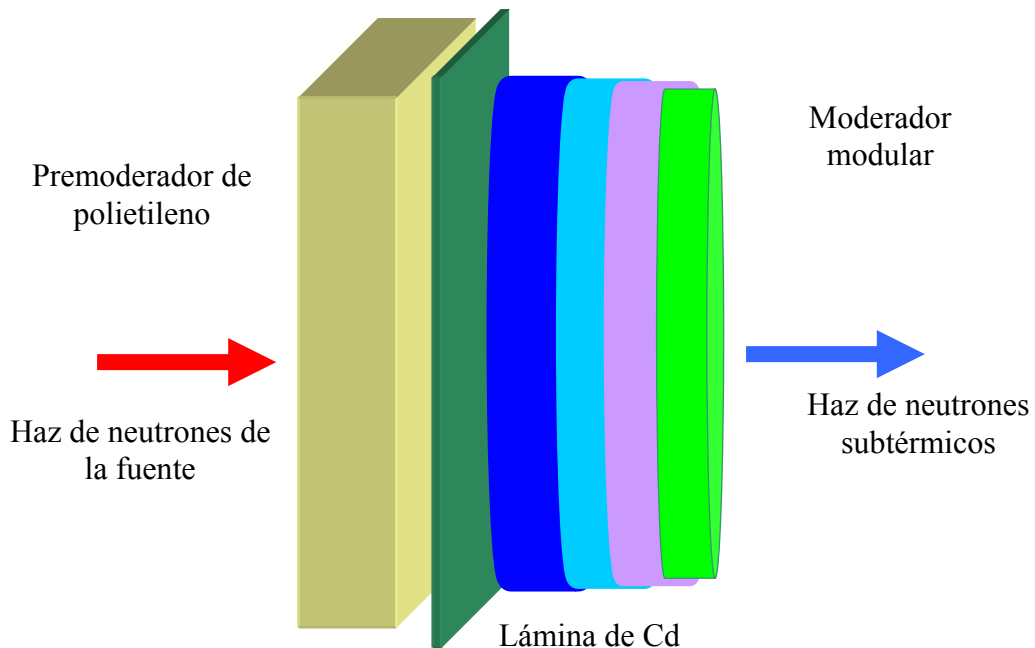


Fig. 2: Esquema del conjunto premoderador – moderador de la fuente fría de neutrones.

Para analizar del comportamiento del moderador modular se compararon las intensidades del flujo neutrónico y las constantes de decaimiento, obtenidas para las posibles opciones de llenado (1 módulo, 2 módulos, 3 módulos y 4 módulos) tanto en el conjunto acoplado como desacoplado, considerando el flujo integrado para energías a partir de 0 a 0,1eV y pulsos en el rango de energías de 4meV a 14meV obtenidos para cada uno de ellos a 89K.

En la Fig. 3 se grafica la densidad de flujo obtenida para el conjunto premoderador *slab* - moderador modular comparado con los cálculos realizados para el moderador actual del LINAC. Se presentan las principales configuraciones consideradas en la elección del moderador a bajas temperaturas, 2,4cm (2 módulos) y 1,2cm (1 módulo) acoplados con el premoderador y 4,8cm (4 módulos) desacoplados con cadmio junto con el *slab* de polietileno a temperatura ambiente.

En la tabla 1 se detallan los valores del flujo integrado para energías de 0 a 0,1eV calculados para los casos a bajas temperaturas y para energías de 0 a 0,33eV para el caso de temperatura ambiente, este rango se amplía para considerar toda la región térmica del espectro obtenido con el moderador de polietileno.

Moderador	Flujo Integrado	Error
2,4cm acoplado	11,3	±0,2
4,8cm desacoplado	7,4	±0,1
Slab de polietileno a 300K	10,73	±0,2

Tabla 1: Flujo integrado calculado para la geometría definitiva de la fuente fría de neutrones comparada con el moderador actual del LINAC.

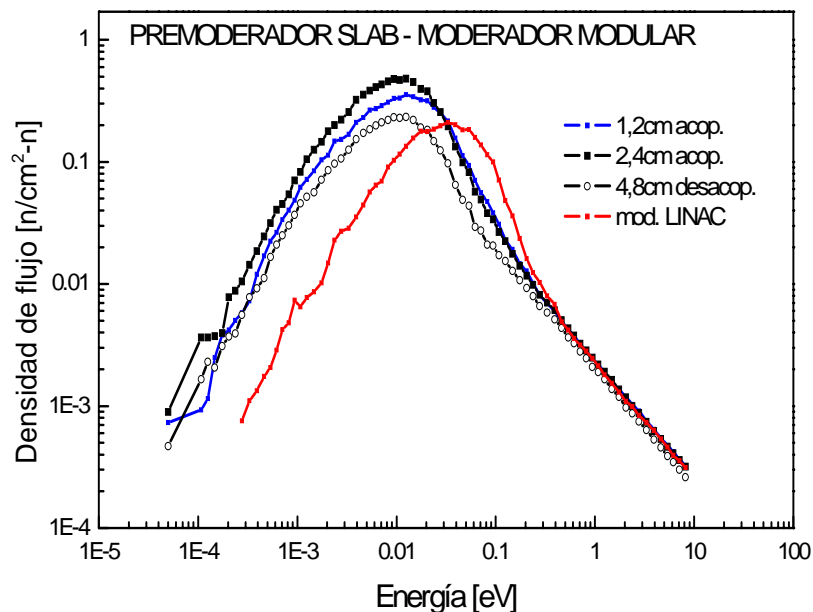


Fig. 3: Densidad de flujo calculada a 89K, por partícula de fuente para moderadores cilíndricos modulares, con premoderador tipo *slab* de 3,5cm de ancho comparada con la densidad de flujo a 300K del moderador actual del LINAC.

Como puede apreciarse del gráfico anterior, el espectro del moderador actual del LINAC tiene su máximo en alrededor de 28meV, con la utilización de la fuente fría se lograría desplazar dicho espectro a energías inferiores con un máximo aproximadamente en 10meV, con intensidades similares. Se puede destacar también, que con un solo módulo lleno de mesitileno a 89K se obtiene un espectro subtérmico pero con un máximo desplazado a 12,5meV.

En la Fig. 4 se muestra el factor de ganancia de neutrones de bajas energías que se obtiene con distintas configuraciones de premoderador - moderador de mesitileno a 89K frente al *slab* de polietileno a 300K, para neutrones de energías menores a 20meV se observa que el flujo se incrementa, en promedio, un factor 13 para el conjunto acoplado optimizado.

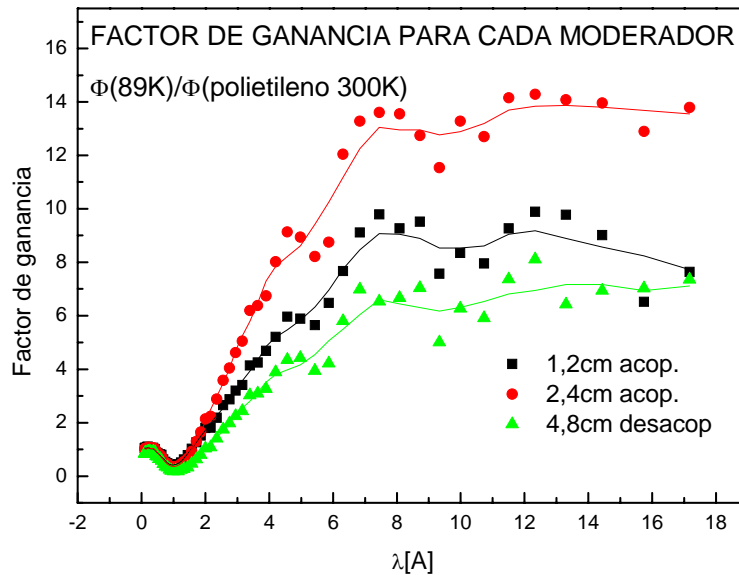


Fig. 4: Factor de ganancia obtenido a partir de la relación entre la densidad de flujo calculada a para distintos conjuntos premoderador - moderador a 89K comparado con el moderador actual del LINAC a 300K.

En la Fig. 5 se muestran los pulsos neutrónicos obtenidos para el conjunto premoderador *slab* - moderador modular comparado con el *slab* de polietileno a temperatura ambiente. Se grafican los conjuntos acoplados con uno y dos módulos llenos y desacoplado con 4 módulos llenos a bajas temperaturas.

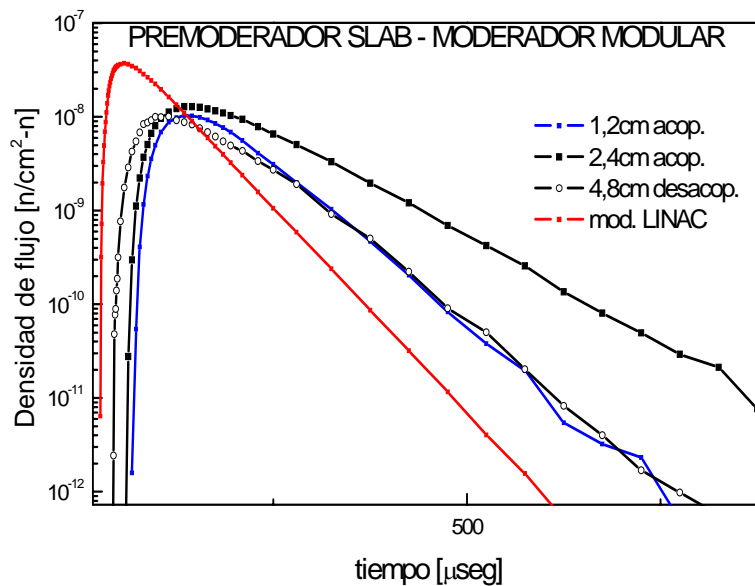


Fig. 5: Pulso neutrónico calculado a 89K, por partícula de fuente para moderadores cilíndricos modulares, con premoderador tipo *slab* de 3,5cm de ancho comparado con el pulso del *slab* de polietileno a 300K.

En la tabla 2 se presentan los valores de las constantes α de decaimiento calculados para cada caso considerado comparado con el valor de α calculado con MCNP y teórico, del moderador de polietileno a temperatura ambiente.

Moderador	α [μ seg.]	Error
2,4cm acoplado	98,9	$\pm 2,1$
4,8cm desacoplado	61,3	$\pm 1,7$
Slab de polietileno a 300K (calculado)	52,1	$\pm 1,5$
Slab de polietileno a 300K (teórico)	50,45	$\pm 0,7$

Tabla 2: Constante de decaimiento calculados para la geometría definitiva de la fuente fría de neutrones comparada con la constante del moderador actual del LINAC

De la tabla anterior puede apreciarse que el hecho de utilizar la fuente fría empeora la respuesta temporal con respecto al moderador actual en el caso desacoplado alrededor del 17%, y aumenta considerablemente el tiempo medio de emisión en el caso acoplado.

En la Fig. 6 se grafica una comparación de las intensidades del flujo integrado obtenidas, con los distintos módulos y con el mismo premoderador, comparadas con la intensidad calculada para el moderador actual de polietileno a temperatura ambiente para el rango de energía de 0 a 0,33eV.

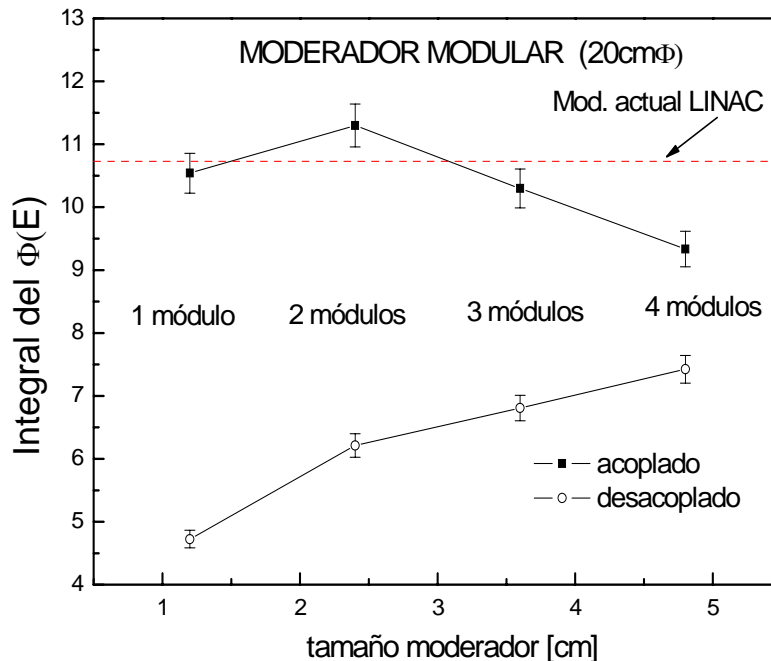


Fig. 6: Flujo integrado obtenido para cada conjunto premoderador slab - moderador en función del ancho de cada módulo a 89K comparado con el slab de polietileno utilizado en el acelerador a temperatura ambiente.

En el gráfico de flujo integrado se puede apreciar que la intensidad en el caso de los moderadores acoplados es similar a la obtenida con el moderador actual, pero en el

caso desacoplado optimizado, la intensidad cae aproximadamente un 40% con respecto a la que produce el *slab* a temperatura ambiente.

En la Fig. 7 se presenta una comparación de las constantes de decaimiento para las configuraciones anteriores a 89K comparada con la constante α calculada para el *slab* de polietileno a 300K (un punto de cada curva del moderador modular corresponde a lo volcado en la Tabla 12.2).

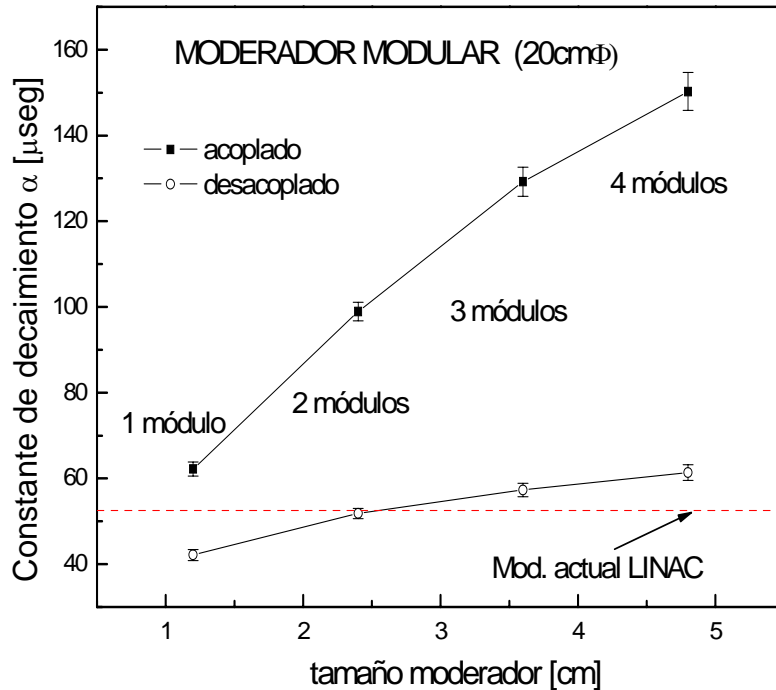


Fig. 7: Valores de α para cada conjunto premoderador - moderador en función del ancho de cada módulo a 89K con y sin acoplamiento comparado con el slab de polietileno utilizado en el acelerador a 300K.

Por otra parte, considerando la respuesta temporal, los conjuntos desacoplados tienen valores α similares a los valores del *slab* de polietileno, pero para el conjunto acoplado optimizado presenta constantes α que duplican aproximadamente el valor de dicho *slab*.

Este problema planteado podría solucionarse utilizando un solo módulo con mesitileno, teniendo en cuenta que la intensidad de neutrones es similar a la de la fuente actual pero con el máximo del espectro desplazado alrededor de 12,5meV y que la constante α es aproximadamente un 15% superior.

En la Fig. 8 se ilustra la relación entre el flujo integrado y la constante de decaimiento calculada para cada opción de llenado con acoplamiento y desacoplados con la lámina de Cd.

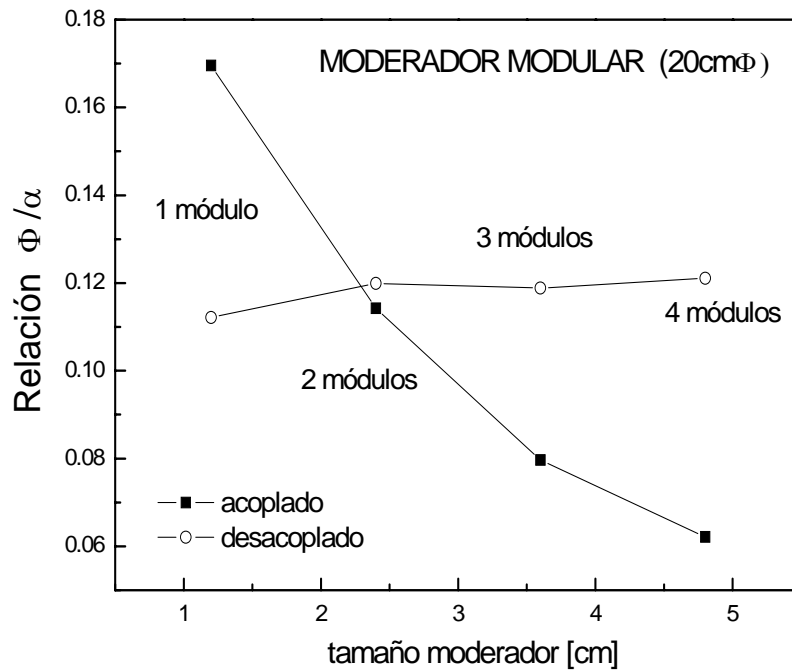


Fig. 8: Relación entre Φ y α para cada conjunto premoderador - moderador en función del ancho de cada módulo a 89K con y sin acoplamiento.

Del gráfico anterior se puede decir, que en el caso de un solo módulo lleno acoplado se obtiene la mejor relación entre intensidad y respuesta temporal, lo que implica que en ese caso en particular, no sería necesario desacoplarlo para mejorar el tiempo medio de emisión, mientras que para las otras opciones de llenado la relación es mejor para el caso desacoplado.

Del análisis anterior podemos destacar dos puntos de funcionamiento muy importantes para la fuente fría de neutrones (ver Fig. 12.18 y 12.19):

- El primer punto corresponde a un espesor del moderador de 2,4cm (2 módulos llenos) acoplado en el cual se obtiene la máxima intensidad de flujo, aunque en esta configuración el tiempo medio de emisión es elevado.
- El segundo punto es el que corresponde a un módulo lleno en el caso acoplado, con esta configuración se obtienen una intensidad y un tiempo medio de emisión comparables al moderador actual, lo que indica que es un punto de funcionamiento muy adecuado para los requerimientos habituales de uso del acelerador. Cabe aclarar que en este caso el espectro tiene su máximo alrededor de los 12,5meV.

Estudio del Moderador Cilíndrico a temperatura ambiente

Considerando que para poder instalar la fuente fría de neutrones sería necesario desplazar la fuente térmica actual (blanco, moderador y blindajes), es importante analizar el comportamiento de las configuraciones estudiadas a temperatura ambiente. Esta opción permitiría obtener espectros térmicos aún con la fuente fría instalada.

Se analizaron los conjuntos premoderador (prisma de 20cm x 20cm x 3,5cm de polietileno) – moderador modular con uno y dos módulos llenos tanto para el caso desacoplado como acoplado.

En las Fig. 9 y Fig. 10 se grafican las densidades de flujo y las constantes de decaimiento, respectivamente, calculadas para las distintas configuraciones premoderador – moderador de mesitileno a 300K, comparadas con el moderador *slab* de polietileno (21cm x 21cm x 4cm) utilizado normalmente en el acelerador a temperatura ambiente.

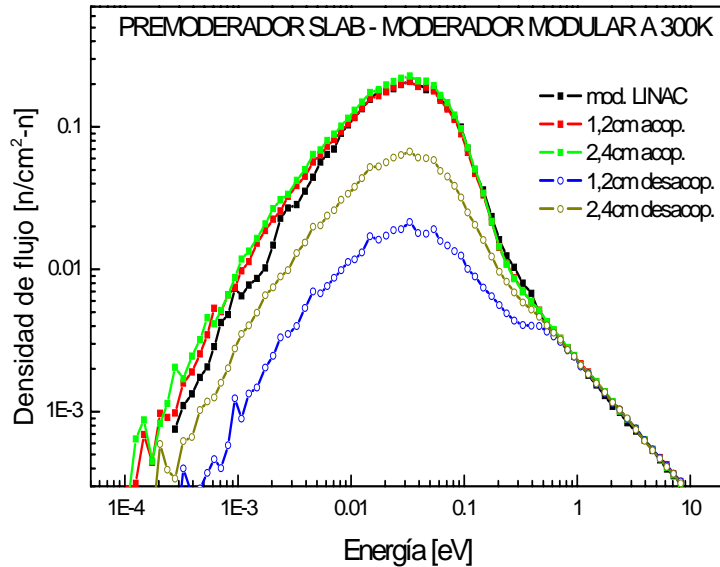


Fig. 10: Densidad de flujo calculada a 300K, por partícula de fuente para moderadores cilíndricos modulares, con premoderador tipo slab de 3,5cm de ancho comparada con la densidad de flujo a 300K del moderador actual del LINAC.

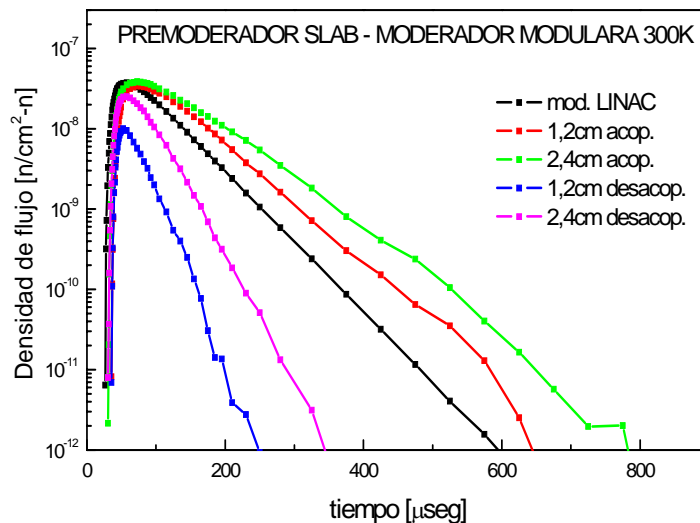


Fig. 10: Pulsos neutrónicos calculados a 300K, por partícula de fuente, para moderadores cilíndricos modulares, con premoderador tipo slab de 3,5cm de ancho comparado con el pulso del slab de polietileno a 300K.

En la Tabla 3 se presenta una comparación del flujo integrado y de las constantes de decaimiento obtenidas para las distintas opciones estudiadas, con el *slab* de polietileno a temperatura ambiente.

Moderador a 300K	Flujo integrado	α [μseg.]
Slab de polietileno	10,73 \pm 0,2	52,1 \pm 1,5
Premoderador – Moderador 1,2cm acop.	10,57 \pm 0,2	60,5 \pm 1,5
Premoderador – Moderador 2,4cm acop.	11,17 \pm 0,2	69,7 \pm 1,5
Premoderador – Moderador 1,2cm desacop.	4,09 \pm 0,1	18,1 \pm 1,1
Premoderador – Moderador 2,4cm desacop.	5,83 \pm 0,1	29,8 \pm 1,1

Del análisis anterior se puede decir que la fuente fría de neutrones puede ser utilizada a temperatura ambiente en el caso acoplado, (sin refrigerante en el crióstato) para obtener una fuente térmica con un flujo similar al *slab* de polietileno y con un deterioro en la respuesta temporal de un 15% para el caso de 1 módulo y de un 30% para 2 módulos.

Para los conjuntos desacoplados, el comportamiento es similar a un moderador tipo *sandwich*, mejorando considerablemente la respuesta temporal, en perjuicio de la intensidad del flujo.

Conclusiones

En síntesis, el moderador modular planteado permite obtener:

- espesor variable
- espectro subtérmico a 90K con opción de espectro térmico a 300K
- refrigeración simple
- versatilidad en el tipo de material moderador

El hecho que el moderador sea flexible implica que la fuente fría pueda utilizar distintos materiales moderadores, (uno por vez o varios al mismo tiempo), con distintos espesores con el mismo sistema de enfriamiento.

Finalmente teniendo en cuenta los criterios de diseño generales planteados para la fuente fría de neutrones, la estructura del moderador es un punto crítico que determina las características del sistema de refrigeración. Un moderador simple y de fácil refrigeración permite un sistema de enfriamiento de menor complejidad y por lo tanto de bajo costo.