

ASPECTOS DE SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE LA FACIRI

O. Novara, A. Coppo, M. Ratner, O. Beuter, C. Bastida, V. Rojas Luppi, M. Flores

Comisión Nacional de Energía Atómica

RESUMEN

Recientemente, la CNEA puso en marcha la Facilidad de Almacenamiento de Combustibles Irradiados de Reactores de Investigación (FACIRI) para almacenar interinamente bajo agua los combustibles gastados definitivamente descargados del reactor. Para que el almacenamiento sea seguro, se debe mantener la subcriticidad, contener el material radiactivo y proveer protección a la radiación.

Los cálculos de subcriticidad se efectuaron suponiendo la capacidad colmada en condiciones hipotéticas adversas, por ejemplo, suponiendo que los combustibles mantenían la carga inicial de U-235. El valor máximo de K_{ef} fue 0,72.

La instalación está preparada para mantener el agua de las piletas con alto nivel de pureza. Con ello, se minimiza los procesos de corrosión y se logra mantener íntegro el envainado del elemento combustible. Además, las fosas de las piletas están recubiertas con dos camisas de acero inoxidable que confieren sendas barreras de contención adicionales.

El confinamiento dinámico se obtiene mediante dos sistemas de ventilación: la ventilación general, que mantiene la depresión de aire de los locales respecto del exterior, y la extracción de piletas, ejercida en la cámara de aire entre el espejo de agua y las tapas de las piletas asegurando la retención inmediata de partículas activas en un hipotético escenario de liberación.

El blindaje biológico está provisto por la estructura de hormigón en la que se encuentran embutidas las piletas y por la columna 3,5 m de agua entre las canastas de almacenamiento y la superficie. Considerando la capacidad de almacenamiento colmada, cálculos conservativos dieron valores de 30 $\mu\text{Sv/h}$ en el borde de la piletas.

El combustible ingresa en un contenedor blindado que se maniobra para descargar aquél en la piletas. Hasta ahora, esta operación es la única que ha aportado a la dosis. Sin embargo, el ingreso de los primeros veinte combustibles representó una dosis colectiva $H^*(10)$ de solo 548 μSv .

1. INTRODUCCIÓN

La Facilidad de Almacenamiento de Combustibles Irradiados de Reactores de Investigación (FACIRI) es una instalación de almacenamiento interino en húmedo de combustibles gastados que han sido descargados de los reactores operados por CNEA en forma definitiva.

La FACIRI se encuentra en el Edificio LAPEP (Laboratorio Para Ensayos de Posirradiación), situado dentro del Centro Atómico Ezeiza, y comprende el sistema de piletas, así como los locales y componentes asociados al funcionamiento de aquellas, que estuvieron originalmente diseñado para transferir a las celdas de hormigón los combustibles gastados provenientes de la central nuclear Atucha I y del reactor de investigación y producción de radioisótopos RA-3, como inicio de la línea de reprocesamiento del ex proyecto Laboratorio de Procesos Radioquímicos (LPR).

Para cumplir con el objetivo almacenar en forma interina y centralizada los combustibles gastados de los reactores de investigación argentinos, el diseño de la FACIRI debe promover que el manejo del combustible en la instalación sea segura, es decir, que sean recibidos,

manipulados, almacenados, inspeccionados y retirados sin riesgo para la salud y la seguridad de los operadores y del público, y la del medio ambiente. Para ello, los objetivos de seguridad nuclear y radiológica que la instalación debe alcanzar son: mantener la subcriticidad, contener el material radiactivo y proveer protección a la radiación, aspectos que han sido considerados en los estadios más tempranos del diseño de la instalación y cuya descripción es el objeto de este trabajo.

La capacidad de la FACIRI está determinada por la profundidad de la pileta de almacenamiento (16 m) y por su pequeña superficie (aproximadamente 5 m²), por lo tanto, el concepto de almacenamiento se basó en el diseño de canastas que se apilan una sobre otra dentro de la fosa formando columnas de canastas, sustentadas éstas a su vez por una estructura soporte (Figura 1). La pileta aloja dos de estas columnas, una con diez canastas y la segunda con nueve. La geometría de las canastas es cilíndrica y cada una de ellas tiene capacidad de almacenar 32 elementos combustibles, por lo que, considerando las dos columnas de canastas, el número total de posiciones de almacenamiento asciende a 608. En dichas posiciones, los combustibles se almacenan erguidos y en pleno contacto con el agua.

La pileta de almacenamiento está comunicada con una pileta auxiliar más pequeña, de 8 m de profundidad, que sirve para efectuar la descarga del elemento combustible desde el contenedor blindado de transferencia con que ha sido trasladado hasta la instalación. Dicha pileta auxiliar sirve además para efectuar diversas operaciones complementarias bajo agua con los combustibles (encapsulado, inspección visual, espectrometrías gamma, etc.).

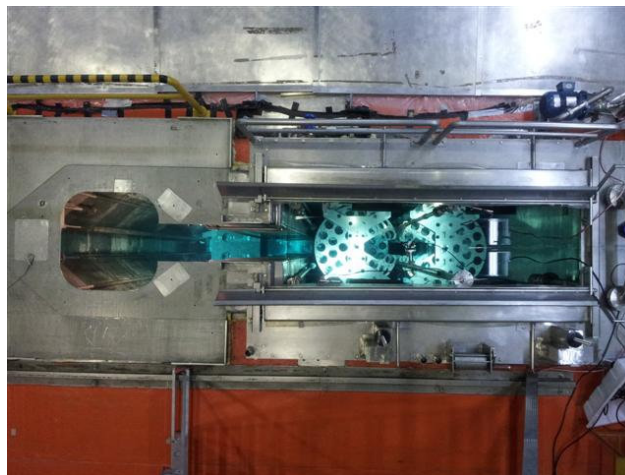


Figura 1: Vista en planta de las piletas de la FACIRI. A la izquierda se ubica la pileta auxiliar, mientras que a la derecha se aprecian las canastas superiores de las columnas de canastas sumergidas en la pileta de almacenamiento.

El agua de las piletas es agua desmineralizada y la instalación cuenta con un sistema de tratamiento que permite mantener la calidad de la misma en los niveles adecuados para preservar la integridad de los combustibles gastados durante su almacenamiento. Además, el agua de las piletas aporta sustancialmente al blindaje biológico de la instalación y posibilitaría, si fuese necesario, la remoción del calor generado por los combustibles.

Se destacan dos aspectos fundamentales en el diseño de las canastas, el primero es que cada canasta de la columna puede girar sobre su eje en forma independiente. Además, analizando cualquier plano de corte transversal de su volumen cilíndrico, se observa que un sector de un 1/6 está libre (las canastas tienen una “abertura”). Ambas características posibilitan generar un canal de acceso a niveles inferiores de la columna en la medida que las canastas que se encuentren por encima se giren hasta alinear convenientemente las aberturas de cada una de ellas, permitiendo que el combustible descienda, sujetado con la correspondiente herramienta, por el canal generado hasta la posición seleccionada (Figura 2).

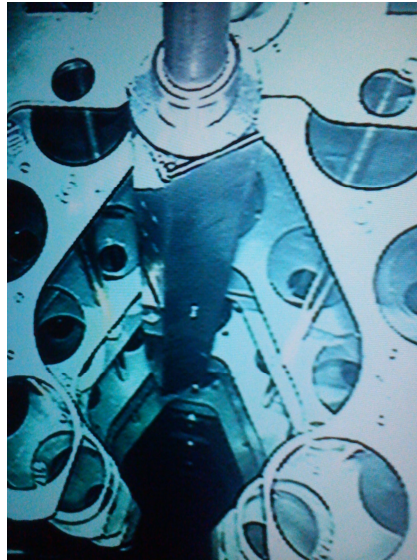


Figura 2: Descenso de un combustible por el acceso generado cuando las canastas tienen sus aberturas alineadas.

2. EVALUACION DE LA SEGURIDAD NUCLEAR

Hay tres tipos distintos de canastas según el tipo de combustible a almacenar: i) canastas para elementos combustibles tipo MTR normales o estándar, ii) canastas para elementos combustibles tipo MTR de control y iii) canastas para cápsulas que alojen diversos tipos de elementos combustibles (por ej. combustibles MTR fallados o combustibles tipo barra como las del reactor RA-1).

La subcriticidad del conjunto de combustibles almacenados está asegurada por la distancia relativa de las posiciones de almacenamiento en una misma canasta y en canastas adyacentes, tanto de la misma columna como de la otra. Las distancias más cercanas son las de dos posiciones contiguas en la canasta. Cuando tales posiciones son ocupadas por sendos combustibles MTR, éstos están separados entre sí por una distancia igual a la diagonal de la sección de corte de dichos combustibles. Aunque la propiedad de giro de las canastas puede modular levemente la posición relativa entre combustibles de distintas canastas, el alejamiento siempre resulta suficiente como para que su efecto en la reactividad sea despreciable.

Otros márgenes de seguridad están dados por las siguientes condiciones fundamentales que subyacen en los cálculos de reactividad:

- Ocupación total de la capacidad de almacenamiento
- Combustibles sin irradiar
- Ausencia de todo tipo de absorbedor neutrónico, tanto en el agua de piletas como en los componentes estructurales que separan los combustibles (por diseño).

La distribución de los distintos tipos de combustibles en el arreglo ordenado está prefijada por la posición relativa en las columnas del tipo de canasta a que corresponden. Respecto del material fisionable considerado, todos los tipos de combustibles factibles de almacenarse en la FACIRI tienen uranio de bajo enriquecimiento (aprox. 19,75 % de U-235) y, a partir de las dos primeras condiciones citadas, la masa total de U-235 del conjunto de combustibles considerado en la evaluación asciende a 212,2 kg.

2.1. Resultado de la evaluación en condiciones normales de almacenamiento

Se probaron varios programas de cálculo durante la evaluación. En más de un caso, a los efectos de validar el uso del código por el calculista designado y en una determinada computadora, dicho profesional realizó un cálculo testigo en base a recomendaciones del Comité de Ciencia Nuclear (NSC). En la Tabla 1 se presenta el valor de Kef obtenido para las condiciones normales de almacenamiento.

Tabla 1: Resultado de la evaluación de reactividad del conjunto ordenado de 608 combustibles sin irradiar. El código utilizado fue MCNP 5

Kef	Desv. Est.	Valor de Kef con 99% de confianza
0,716	0,0025	comprendido entre 0,7093 y 0,7227

2.2. Análisis de sensibilidad

Como medida de la sensibilidad del Kef calculado a la variación de material fisionable en la instalación, se presentan los resultados de cálculos para arreglos similares, en los que la cantidad de combustibles, y por ende de uranio, es superior e inferior respectivamente.

Para el cálculo con mayor carga de uranio también se consideró que la capacidad instalada estaba totalmente ocupada, pero tratándose de dos columnas con once canastas cada una y con 31 combustibles en cada canasta. Entonces el inventario asumido fue 682 combustibles tipo MTR almacenados sin irradiar con una carga total de U-235 de aproximadamente 220,2 kg. En la Tabla 2 se presenta el valor de Kef obtenido para las condiciones de mayor carga de uranio.

Tabla 2: Resultado de la evaluación de reactividad del conjunto ordenado de 682 combustibles sin irradiar. El código utilizado fue KENO VI

Kef	Kef con nivel de confianza del 99%
0,73	comprendido entre 0,7250 y 0,7395

Para el cálculo con menor carga de uranio también se consideró que la capacidad instalada estaba totalmente ocupada, pero tratándose de dos columnas con nueve canastas cada una y con 30 combustibles en cada canasta (excepto las del fondo con capacidad para 36 unidades). Entonces el inventario asumido fue 552 combustibles tipo MTR almacenados sin irradiar con una carga total de U-235 de aproximadamente 201,2 kg. En la Tabla 3 se presentan los valores de Kef obtenidos para las condiciones de menor carga de uranio

Tabla 3: Resultado de la evaluación de reactividad del conjunto ordenado de 552 combustibles sin irradiar.

KENO VI		MCNP 4b		MONK 6.3	
Kef	Desv. Est.	Kef	Desv. Est.	Kef	Desv. Est.
0,651	0,005	0,688	0,003	0,673	0,005

A partir de la comparación de los resultados de Kef presentados en las tablas precedentes, se concluye que el conjunto de combustibles ordenados por la geometría propia del sistema de almacenamiento bajo agua de la FACIRI que la reactividad es escasamente sensible a la variación de la carga de material fisionable, manteniéndose el Kef en valores aceptables en los tres casos.

3. CONTENCION DEL MATERIAL RADIOACTIVO

Si bien la vaina de aluminio que recubre el material radiactivo del elemento combustible puede mantener su integridad durante largo tiempo en condiciones adecuadas de almacenamiento en vía húmeda, hay varios motivos para considerar la rotura o traspaso de dicha vaina, es decir la pérdida de la primera barrera de contención. Entonces, la instalación debe estar preparada para contener la actividad en un hipotético escenario de liberación, a los efectos de minimizar el impacto en el medioambiente así como para proteger de la contaminación interna y externa a los operadores.

3.1. Contención de la actividad liberada en el agua de piletas

Las barreras de ingeniería que dispone la FACIRI para contener el material activo proveniente de los combustibles almacenados buscan asegurar que no haya migración a las napas subterráneas de radionucleídos dispersos en el agua como consecuencia de alguna

eventual falla en los combustibles almacenados. Se identifican los siguientes niveles de contención:

- Vaina de aluminio (“cladding”) del combustible: Las bases de un adecuado almacenamiento por tiempo prolongado que evite el deterioro de los combustibles gastados debido a aparición de mecanismos de corrosión son: i) el continuo control del agua de la pileta para mantenerla en las condiciones químicas preestablecidas, ii) una circulación adecuada que minimice las zonas muertas y el depósito de partículas sólidas sobre la superficie de los combustibles, y iii) evitar el contacto del aluminio con otras aleaciones, como ser el acero inoxidable (evitar el par galvánico). Estas acciones están contempladas en el diseño y la operación de la instalación. Las variables a controlar para mantener la calidad del agua son, entre otras, el pH, la conductividad, la concentración de iones cloruro y sulfato, etc. La experiencia internacional está basada en estos principios con resultados satisfactorios. Para aquellos combustibles de los que se sospeche o haya evidencia de que están fallados y que por lo tanto, la probabilidad de liberación de contaminación sea mayor, se los almacena encapsulados.
- Sistema de tratamiento del agua de piletas: Aparte de proveer protección a la radiación, el agua de piletas funciona como contención dinámica, ya que se pueden aislar en forma segura los radionucleidos presentes en el agua mediante el sistema de purificación existente.
- Camisa de acero inoxidable interna: Es la vasija que contiene el agua de piletas y se trata de una barrera de ingeniería construida a los efectos de aumentar sustancialmente el margen de seguridad de la pileta, en lo que a estanqueidad y contención se refiere.
- Camisa de acero inoxidable externa: Esta es la camisa de acero inoxidable original, que forra la estructura de hormigón de las fosas. El espacio existente entre el doble encamisado sirve para efectuar la evaluación de alguna eventual pérdida de las barreras de confinamiento. En esta camisa funciona un sistema para la detección y extracción de agua que pudiera aparecer por diversas razones, como ser, fugas de agua a través de la camisa interior, ingreso de agua a través de la camisa exterior o simple presencia de agua proveniente de la condensación ambiental. El muestreo y análisis de esta agua contribuye a determinar el origen de la misma y tomar las acciones correctivas necesarias.
- Estructura de hormigón armado: Las piletas están montadas sobre una estructura de hormigón armado, con concreto de alta densidad. Además, se le aplicaron revestimientos hidrófugos reforzados con resinas epoxi. El sector con mínimo espesor alrededor de la pileta es 0,60, mientras que del lado de operación tiene 1 m.

La migración de radioisótopos a los acuíferos subterráneos que atraviesan el terreno sobre donde está la instalación sería consecuencia de una cadena sucesiva de eventos, desde rotura de vainas sumada a fallas de las barreras de ingeniería diseñadas en la pileta, muy acotados temporalmente, mediando un alto grado de descuido en los controles y procedimientos previstos en la instalación, por lo que se entiende que hay muy baja probabilidad de que este escenario tenga lugar.

3.2. Confinamiento dinámico de la instalación

La FACIRI cuenta con un sistema de ventilación general de sus locales y el de extracción específica de la pileta de almacenamiento como barreras de diseño que protegen a los operadores de potenciales incorporaciones. Asimismo, retienen la actividad liberada de los combustibles almacenados evitando que se esparzan en el medioambiente.

El sistema de ventilación general, conformada por un sistema mixto de inyección-extracción, garantiza que existan las renovaciones de aire requeridas en todos los ambientes del área controlada de la instalación y que posibles partículas de material radiactivo sean retenidas en el sistema de filtros y prefiltros evitando así la descarga al medioambiente. A través de mediciones diferidas de actividad en muestras de aire de chimenea se controla que no haya descarga al ambiente o que la misma esté dentro de los límites permitidos.

La extracción localizada en la boca de la pileta de almacenamiento, la cual funciona como una suerte de campana para la cámara de aire entre el espejo de agua y la tapa de la pileta, permite arrastrar inmediatamente la liberación de actividad proveniente de la fuente almacenada bajo agua. Este sistema cuenta con un monitoreo “en línea” permanente que, cuando detecta valores de actividad alfa/beta por encima de un umbral determinado, dispara alarmas de aviso que se complementan con acciones establecidas para los operadores en caso de ocurrencia del evento. Para asegurar que esta línea de extracción sobre pileta funcione permanentemente, sus sopladores, bancos de filtros y bombas de muestreo están duplicados para permitir la salida de servicio de una línea, poniendo en marcha la de respaldo.

Entonces, mientras que la ventilación general funciona cuando hay personal operando la instalación, la ventilación sobre piletas funciona en forma permanente, mitigando en todo momento los efectos de posibles apariciones de aerosoles o gases activos.

4. BLINDAJE BIOLÓGICO ESTRUCTURAL

El blindaje radiológico está provisto por la estructura de hormigón que sustenta las piletas y por el agua que ocupa las mismas. Dentro de las piletas, se establece un nivel de agua tal que haya una columna de agua $15 \pm 0,5$ m. De este modo se asegura una columna mínima de agua por encima de las canastas superiores de 3,5 m.

Para evaluar la capacidad del blindaje estructural, se procedió a calcular el término fuente de un modo conservativo, considerando la capacidad colmada como en la evaluación de seguridad por criticidad, pero suponiendo esta vez que todos los combustibles fueron irradiados en forma continua en el reactor RA-3 a 8,5 MW térmicos hasta alcanzar un quemado de 55% en masa de U-235. Además, se consideró que todos los combustibles tenían 3 años de decaimiento luego de finalizado su servicio en el reactor. El cálculo comprendió tres etapas: i) cálculo de las bibliotecas de secciones eficaces, empleando el módulo SAS2H del programa SCALE 4.4a para calcular el espectro del flujo neutrónico necesario para preparar las secciones eficaces propias de cada tipo de elemento combustible involucradas durante su quemado, basándose en el análisis de transporte de neutrones; ii) cálculo de la actividad y energías gamma de los EECC, empleando el código ORIGEN-ARP del citado programa; iii) cálculo de las tasas de dosis, empleando el código de cálculo MCNP 5.

Se establecieron un conjunto de puntos físicos en la pileta y alrededor de ella en donde calcular la tasa de dosis en situaciones correspondientes tanto a condiciones normales de operación como a incidentes operacionales y accidentes, ya que se tomaron diversos niveles de vaciamiento de la pileta (Figura 3). De este modo, los puntos calculados representan las zonas relevantes del mapa radiológico de la instalación, considerándose que los niveles de agua en la pileta entre -1 y $-1,5$ m (se asigna 0 m al nivel del piso) corresponden a situaciones normales de operación, el punto con $-2,5$ m corresponde a una situación de intervención (incidente) y con los puntos con niveles de agua $-5,5$ m y la pileta vacía se exponen los casos de accidente.

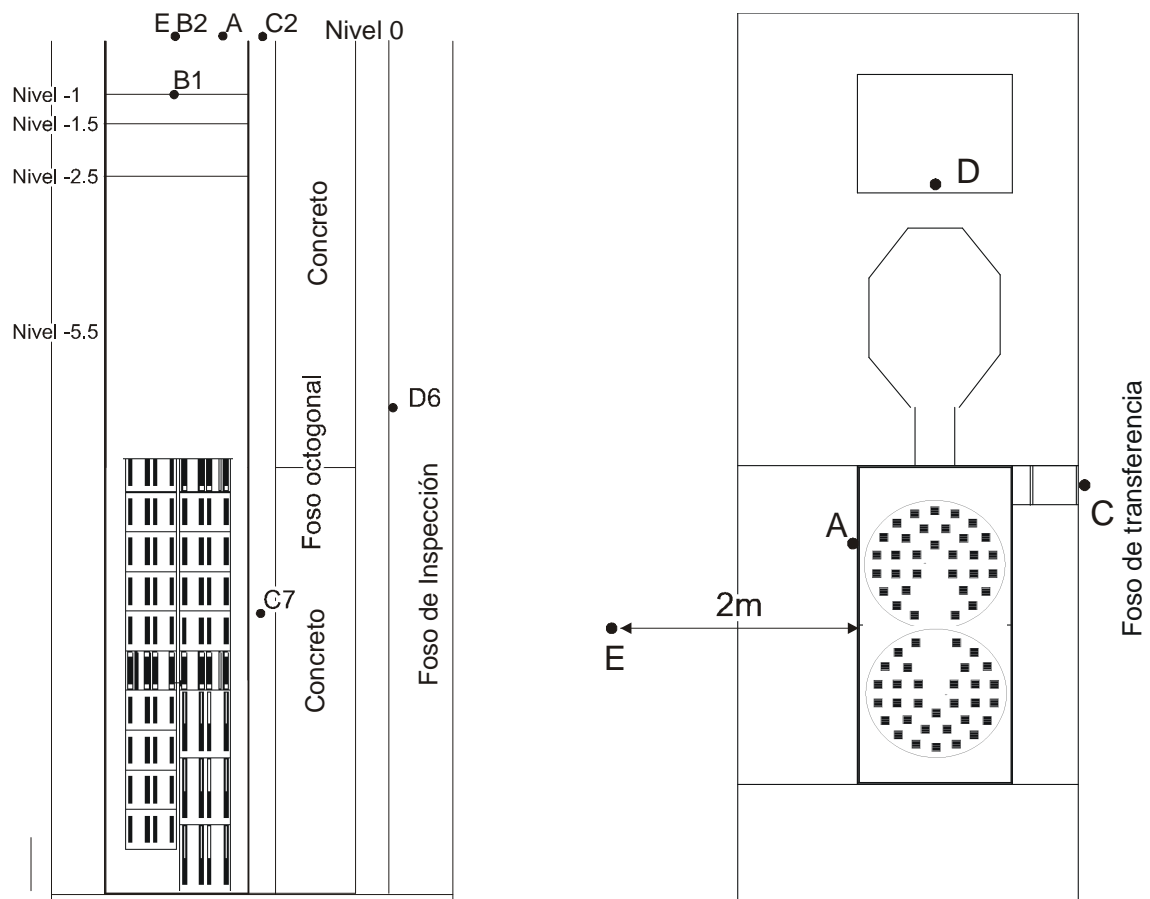


Fig. 3: Corte transversal y vista en planta de la pileta de almacenamiento y octógono, con la ubicación de los puntos a calcular tasa de dosis

En condiciones normales de almacenamiento, el único valor de tasa de dosis de cierta relevancia corresponde al punto A (borde de la pileta, al nivel del piso) que, en las condiciones establecidas para el cálculo, alcanzó los $30 \mu\text{Sv/h}$. Este valor, pequeño en sí pero mucho mayor que el resto de los valores hallados para condiciones normales, se explica por la colimación producida por el doble encamisado, cuyo espacio está mayoritariamente ocupado por aire. En caso de un accidente que conlleve al vaciamiento completo de la pileta, la tasa de dosis a 2 m del perímetro de la pileta desde la entrada al recinto (punto E) llega a $17,3 \text{ mSv/h}$.

5. BLINDAJE DE TRANSFERENCIA DE COMBUSTIBLES

Se diseñó y construyó un sistema de transferencia de elementos combustibles irradiados con gran capacidad de blindaje que se ajusta funcionalmente al diseño de la FACIRI, con el objeto de descargar aquellos en la pileta auxiliar para luego ser transferidos bajo agua a la posición de almacenamiento. El sistema de transferencia, que permite trasladar un elemento combustible por vez, consiste básicamente en un contenedor blindado montado sobre un carro para el desplazamiento en las instalaciones remitentes. Además, para desplazar el conjunto carro – contenedor por las vías de tránsito del centro atómico, se utiliza un trailer con lanza de arrastre para poder efectuar la tracción de todo el conjunto con un vehículo de fuerza.

La forma del contenedor se muestra en la Figura 4. Se trata de un cilindro de acero con su eje central hueco cuyo diámetro y altura permite alojar un combustible tipo MTR normal ó de control (de mayor longitud que el primero) en posición vertical. El máximo espesor del cilindro coincide con la posición de la zona activa del elemento combustible y es de 28,0 cm. El peso del contenedor oscila las 4,5 t y para su manejo en la FACIRI, cuenta con piezas de agarre desde las cuales se engancha una percha de izaje especialmente diseñada con la que se posibilita el desplazamiento con el auxilio del puente grúa de la instalación.

El combustible se introduce o eventualmente se retira por el extremo inferior del contenedor mediante el uso de pastecas especialmente diseñadas para agarrar en forma segura tanto un combustible normal como alternativamente, uno de control. En la zona inferior del contenedor se ubica una compuerta que aísla el canal de alojamiento del combustible formada por dos bloques de acero cuyas superficies de contacto encajan formando un laberinto. La pasteca (y por ende el combustible) cuelga de un cable de acero que se enrolla o desenrolla con un malacate ubicado en el exterior del contenedor, posibilitando así el ascenso ó descenso del combustible. Dicho malacate es de accionamiento manual, pero debido a que ello implica gran proximidad del operador al blindaje, se adicionó un mecanismo de comando remoto del malacate, brindando así mayor seguridad en las operaciones de carga / descarga.

Para proceder a la descarga del combustible en la pileta auxiliar de la instalación sin exponerlo al ambiente en el lapso en que se lo descende, se apoya el contenedor sobre un dispositivo que previamente ha sido montado en la boca de la citada pileta (Figura 5) y cuya pieza principal es un blindaje cilíndrico forrado en acero inoxidable. Una vez instalado el dispositivo, el extremo inferior del cilindro queda sumergido en el agua, asegurándose así el blindaje biológico en todo el recorrido de descarga del combustible. Para mayor seguridad, las superficies de contacto del contenedor y el blindaje inferior encastran entre sí con escalones concéntricos, de modo que al apoyarse una con otra generan un laberinto que minimiza la fuga de radiación.

Durante la etapa de diseño, se efectuaron los cálculos de blindaje del contenedor, y una vez construido el mismo, se corroboró la capacidad del blindaje mediante un relevamiento de tasas de dosis del contenedor cargado con un elemento combustible irradiado en el RA-3 en las condiciones habituales y con tres años de decaimiento. En contacto, la máxima tasa de dosis equivalente ambiental ($H^*_{(10)}$) alcanzó los 118 $\mu\text{Sv/h}$, mientras que el promedio del conjunto de las mediciones fue 25 $\mu\text{Sv/h}$. Además, el valor medido para la posición del operador más cercano fue 18 $\mu\text{Sv/h}$.



Figura 4: Contenedor de combustibles irradiados desplazándose hacia la zona de piletas en la FACIRI



Figura 5: Inserción del blindaje inferior en el octógono para prolongar el canal blindado de descarga del combustible.

Por razones que escapan al contexto de este trabajo, el sistema descrito aún no ha entrado en operación. Para el inicio de la puesta en marcha de la FACIRI, se utilizó el contenedor históricamente usado en el centro atómico para los traslados de combustibles irradiados, el cual es conceptualmente similar, pero más rudimentario y con menor capacidad de blindaje.

Los valores de tasa de dosis recabados durante la recepción de los primeros combustibles ingresados a la instalación, correspondientes a la zona de mayor aproximación de los operadores, fueron de $400 \mu\text{Sv/h}$ en promedio. De este modo, la recepción y manejo de dicho blindaje es la única operación que ha aportado a la dosis en la operación de la instalación hasta ahora. Sin embargo, el ingreso de los primeros veinte combustibles representó una dosis colectiva de sólo $548 \mu\text{Sv}$, medida a partir de los registros de los dosímetros electrónicos personales ($\text{Hp}_{(10)}$).

6. CONCLUSIONES

Los aspectos de seguridad han sido considerados en los estadios más tempranos del diseño de la instalación FACIRI. Como ejemplo, se puede citar las sucesivas actualizaciones de la evaluación de seguridad nuclear que acompañaron al proceso de ingeniería de detalle de las canastas y componentes asociados. A partir de dichas evaluaciones, se contó con información para efectuar el análisis de sensibilidad descrito en este trabajo.

Las instalaciones preexistentes que fueron aprovechadas para implementar la FACIRI perseguían el mismo propósito, habiéndose corroborado que la estructura de hormigón armado y el nivel de agua de piletas por sobre el material almacenado son suficientes para proveer el blindaje biológico necesario.

Un estricto control de la pureza del agua de piletas de la instalación es central para lograr la contención de la actividad. Las mejoras y actualizaciones introducidas en el sistema de tratamiento de agua permiten mantener la integridad del combustible bajo agua por largos periodos. Adicionalmente, el doble encamisado y el sistema de extracción de las piletas representan novedosas barreras adicionales de contención para este tipo de instalaciones.