

DISEÑO DEL TISF PARA ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE GASTADO EN LA CN DE KOEBERG (SUDÁFRICA)



JAVIER ALONSO SANZ

Responsable del Departamento de Ingeniería Nuclear
INGECID S.L.



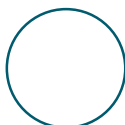
SILVIA SUÁREZ GÓMEZ

Responsable del Departamento de Diseño y Análisis Estructural
INGECID S.L.



SARA PÉREZ AVELLEIRA

Departamento de Ingeniería Nuclear
INGECID S.L.



DIEGO RODRÍGUEZ SÁEZ

Responsable de Servicios de Diseño y Análisis Estructural
INGECID S.L.

INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear de Koeberg, situada en la costa occidental de Sudáfrica, constituye un elemento estratégico dentro del sistema energético del país al ser la única instalación nuclear en operación en todo el continente africano. Desde su puesta en marcha, Koeberg ha desempeñado un papel fundamental en la diversificación de la matriz energética sudafricana, proporcionando una fuente estable de electricidad y contribuyendo a la reducción de emisiones asociadas a la generación térmica convencional.

El combustible irradiado en Koeberg se almacena inicialmente en las piscinas de combustible. No obstante, su capacidad es limitada y, a medida que la central continúa operando, es necesario transferir periódicamente el combustible a sistemas de almacenamiento en seco para evitar que las piscinas alcancen su límite operativo.

Actualmente, Koeberg dispone de un Edificio de Almacenamiento de Contenedores (CSB) integrado dentro de la Instalación Transitoria de Almacenamiento

Provisional (TISF). Este edificio cuenta con capacidad para 16 contenedores, de los cuales 15 ya están ocupados, lo que evidencia la inminente necesidad de habilitar espacio adicional para mantener la continuidad del programa de gestión del combustible.

Esta situación se ve agravada por el hecho de que Sudáfrica no dispone todavía de un repositorio nacional para el almacenamiento definitivo o de larga duración de estos materiales. Aunque el Instituto Nacional de Gestión de Residuos Radiactivos (NRWDI) ha proyectado la construcción de una instalación centralizada, su puesta en servicio no se prevé antes de 2030, lo que obliga a la central a implementar soluciones intermedias que garanticen la seguridad operativa durante este periodo transitorio.

En este contexto, la central identificó la necesidad de desarrollar una solución temporal, segura y operativamente viable, que permitiera seguir trasladando el combustible gastado desde las piscinas hasta que el repositorio centralizado esté disponible.



Figura 1. Emplazamiento de la CN Koeberg (Sudáfrica).

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LAS DOSIS

El diseño conceptual inicial de la Instalación Transitoria de Almacenamiento Provisional (TISF) contemplaba la construcción de una losa de apoyo destinada a albergar hasta 14 contenedores HI-STAR 100 en disposición horizontal dentro del área disponible. Antes de avanzar hacia fases posteriores de ingeniería, resultaba imprescindible realizar una evaluación radiológica preliminar que permitiera determinar si esta configuración cumplía los límites de dosis establecidos por la normativa sudafricana aplicable, en particular los requisitos definidos en KAA 637 [1], que fija un límite de $0,5 \mu\text{Sv/h}$ en el perímetro de la TISF y en los Puntos de Control de Acceso (ACP).

Para realizar esta evaluación, se llevaron a cabo numerosos análisis y cálculos, evaluando diferentes posiciones dentro del área disponible para una losa, utilizando para ello el código de cálculo Montecarlo MAVRIC, incluido en el paquete SCALE 6.2.4. [2].

Con el fin de explorar el espacio de diseño disponible, se analizaron siete configuraciones preliminares, cada una de ellas orientada a evaluar un aspecto específico del comportamiento radiológico del conjunto:

Contenedores cerca del edificio CSB:

Este primer caso evaluó la posibilidad de almacenar los 14 contenedores en una matriz de 7×2 colocados en posición horizontal y situados en las proximidades del edificio CSB. El objetivo era determinar si la propia estructura del edificio proporcionaba un blindaje suficiente para cumplir los límites regulatorios sin necesidad de elementos adicionales. Los resultados mostraron que, aunque el edificio contribuía parcialmente a la atenuación, las tasas de dosis en el perímetro de la TISF superaban los valores permitidos.

Contenedores cerca del edificio CSB con muro:

En este escenario, se añadió un muro perimetral de hormigón en el perímetro de la TISF, con el fin de evaluar si un blindaje adicional relativamente sencillo podía reducir las tasas de dosis a niveles aceptables. A pesar de la mejora observada, las simulaciones indicaron que el muro no proporcionaba la atenuación necesaria.

Contenedores cerca de la valla con muro:

En este caso se trasladaron los contenedores hacia la valla perimetral, manteniendo un muro de hormigón de menor tamaño. El objetivo era analizar si la proximidad del muro a los contenedores modificaba de forma favorable

la distribución de las tasas de dosis. Los resultados mostraron que, aunque la geometría cambiaba la distribución de las dosis, el blindaje seguía siendo insuficiente.

Contenedores cerca del edificio CSB con muro y techo:

Se evaluó la incorporación de un techo sobre los contenedores, con el propósito de reducir la contribución por la radiación dispersa o skyshine. Los resultados mostraron que la presencia del techo proporcionaba una reducción significativa en las tasas de dosis.

Contenedores cerca del edificio CSB con muro (espacio vacío):

En este caso se sustituyó el aire del modelo del caso (2) por vacío, con el objetivo de analizar específicamente la contribución por skyshine y evaluando cómo la dispersión en el aire afectaba a las tasas de dosis en el perímetro de la TISF. Los resultados confirmaron que la dispersión atmosférica constituía un componente significativo de la tasa de dosis total, lo que reforzaba la necesidad de un blindaje más robusto.

Contenedores cerca de la valla con muro (posición vertical):

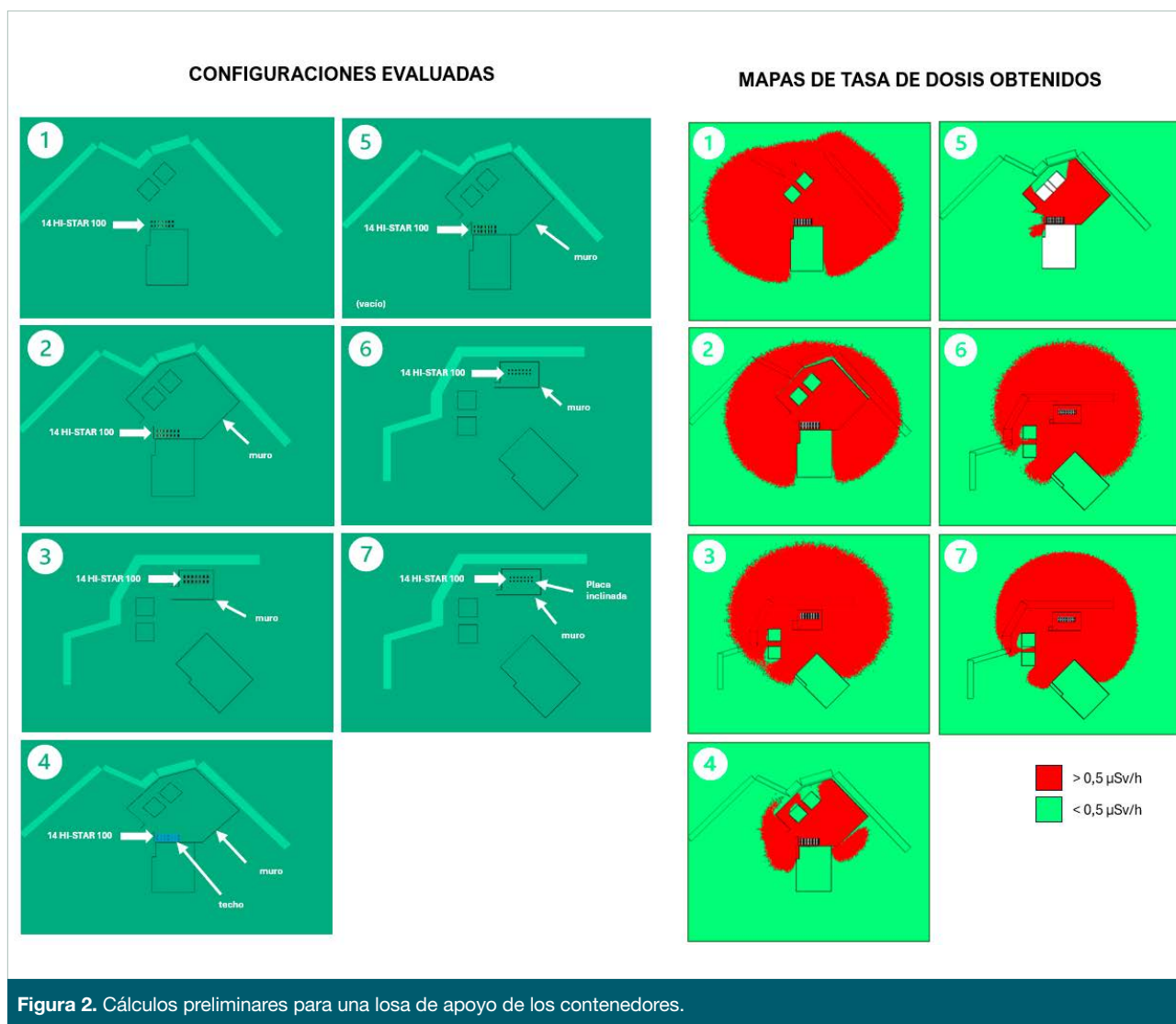
Se evaluó la viabilidad de almacenar los contenedores en posición vertical, lo que modifica sustancialmente la geometría de emisión y la interacción con el blindaje. Este caso era equivalente al caso (3) pero con los contenedores colocados en posición vertical. Aunque esta configuración presentaba algunas ventajas, las tasas de dosis seguían superando los límites establecidos.

Contenedores cerca de la valla con muro (posición vertical con placa inclinada):

Finalmente, se analizó la incorporación de una placa inclinada sobre los contenedores en posición vertical, con el objetivo de desviar parte de la radiación dispersa. Aunque la placa proporcionó cierta mejora, el efecto no fue suficiente para cumplir los requisitos regulatorios.

En la **Figura 2** se presentan imágenes de los escenarios evaluados y los mapas de tasa de dosis obtenidos en cada uno de ellos.

La conclusión principal derivada de esta fase preliminar fue clara: era necesario proporcionar blindaje adicional para cumplir con los requisitos de dosis.



SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución desarrollada para el almacenamiento de los 14 contenedores HI-STAR 100 en el emplazamiento de Koeberg consistió una TISF con un Área de Almacenamiento formado por una losa de hormigón armado junto con siete Módulos Auxiliares de Blindaje (ASMs), dentro de los cuales se almacenarían los contenedores.

Los ASM fueron diseñados para proporcionar blindaje adicional y garantizar que se cumplieran los límites de dosis establecidos por el National Nuclear Regulator (NNR) en la zona controlada, concebidos como una solución intermedia entre el almacenamiento completamente abierto y la construcción de un edificio cerrado. Esta solución posibilita la construcción modular del área de almacenamiento, asegurando que la fecha objetivo de carga de los primeros contenedores pueda cumplirse, y reduciendo las dosis operacionales al personal.

Cada módulo puede albergar dos contenedores HI-STAR 100 cargados y cuenta con una compuerta que permite realizar operaciones de Protección Radiológica, inspección y mantenimiento dentro del módulo (ver Figura 3). Asimismo, cada ASM cuenta con entradas y salidas de ventilación que aseguran la circulación natural del aire, y se ha previsto la instalación de iluminación interior, lo que permite realizar inspecciones visuales y tareas de mantenimiento en condiciones seguras y con una visibilidad adecuada.

Además de estos elementos, la TISF diseñada está compuesta por elementos adicionales que permiten optimizar los procedimientos de carga y descarga de los contenedores y de otros transportes desde las piscinas de combustible:

- Plataformas de aproximación (Approach Aprons): áreas de hormigón armado frente a las plataformas que permiten el manejo seguro de los contenedores desde los transportadores hasta los ASMs.
- Círculo de maniobra (Turning Circle): garantiza la maniobrabilidad de los equipos de transporte de

contenedores, generadores de vapor, etc.

- Establecimiento de Rutas de transporte (Haul Route): asegura que los HI-STAR 100 puedan trasladarse desde los edificios de los reactores hasta la TISF sin exceder las cargas previamente calificadas en viales y áreas internas de la planta.

La evaluación de esta solución requirió la participación de múltiples disciplinas de ingeniería, cada una aportando análisis específicos (ver Figura 4) para garantizar la seguridad radiológica, la eficiencia operativa y el cumplimiento de normas nacionales e internacionales:

- Cálculos de blindaje: para verificar el cumplimiento de los límites de dosis en condiciones normales y de accidente según la normativa nacional e internacional.
- Cálculos sísmicos: para evaluar la estabilidad de los HI-STAR 100, las interacciones entre contenedores y con los ASM, así como la susceptibilidad del suelo a licuefacción y determinar asientos y factores de seguridad para el diseño estructural de la losa y los ASM.
- Cálculos estructurales: para garantizar que la capacidad de los muros y losas, anclajes y elementos de elevación cumplen con la normativa aplicable y con los criterios de aceptación establecidos.
- Análisis de caída lateral: para evaluar el comportamiento del contenedor HI-STAR 100 cargado sobre la plataforma de la TISF en el escenario de caída lateral, verificando que las desaceleraciones del cuerpo rígido no superen lo establecido como referencia de diseño.
- Análisis térmico: para asegurar que los ASM no afecten negativamente el desempeño térmico de los contenedores HI-STAR 100, manteniendo sus temperaturas por debajo de los valores del caso límite del Estudio de Seguridad del contenedor.
- Cálculos de diseño de las rampas de acceso: para verificar que el diseño de la rampa de aproximación de hormigón armado cumple con la normativa y soporta las combinaciones de carga correspondientes.

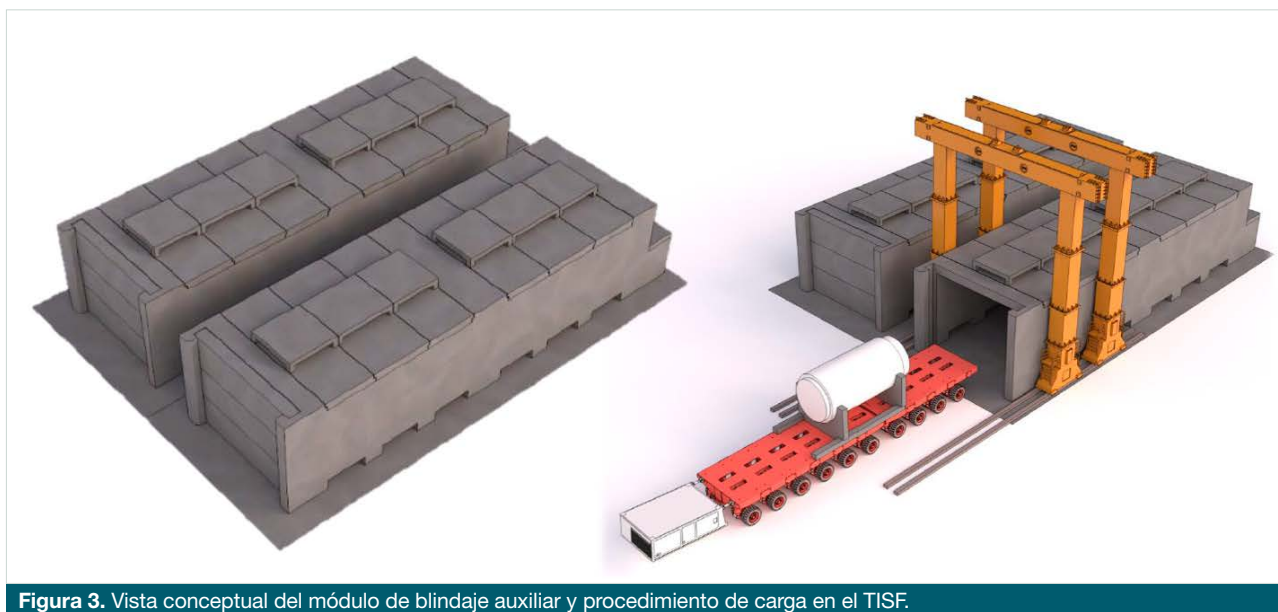


Figura 3. Vista conceptual del módulo de blindaje auxiliar y procedimiento de carga en el TISF.

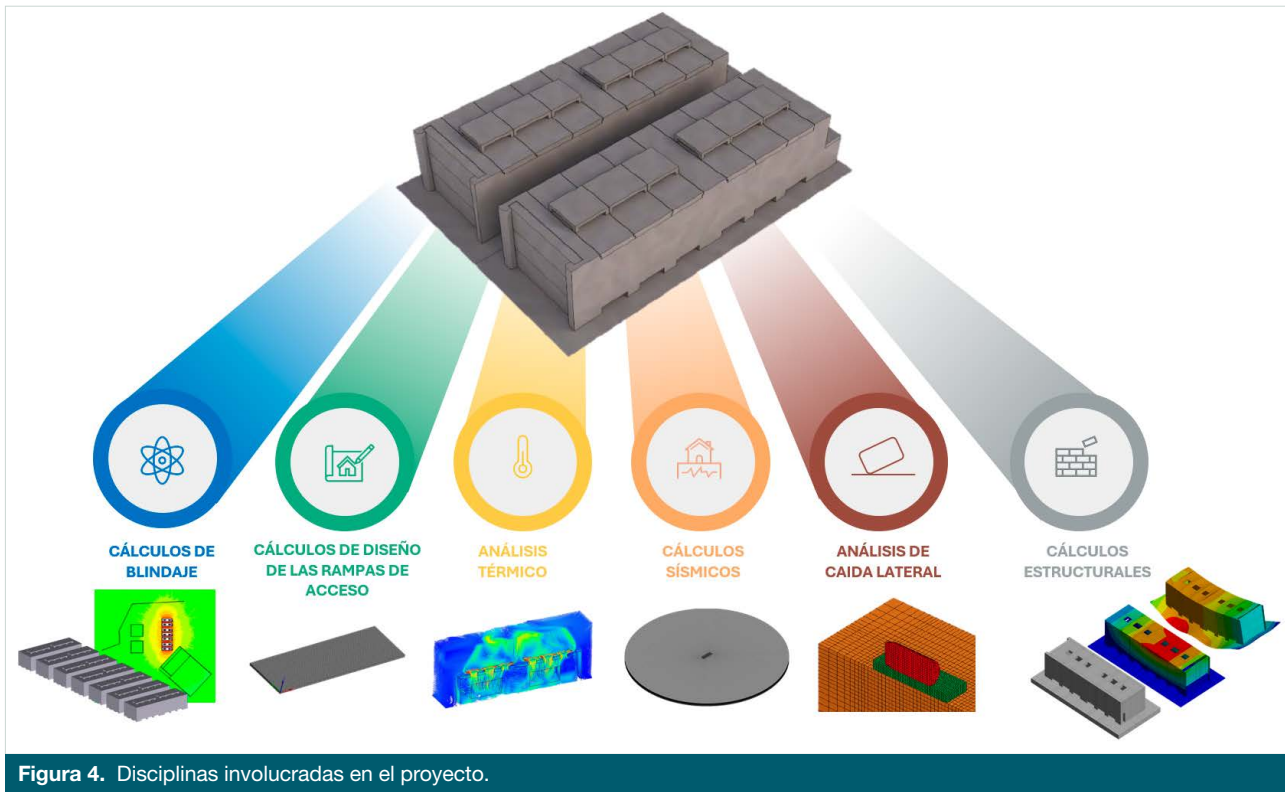


Figura 4. Disciplinas involucradas en el proyecto.

BENEFICIOS OPERATIVOS Y RADIOLÓGICOS DE LA SOLUCIÓN

La solución desarrollada para la TISF de la central de Koeberg proporciona un sistema de almacenamiento temporal seguro, eficiente y modular para los contenedores de combustible gastado, cumpliendo con los criterios radiológicos, estructurales, térmicos y operativos establecidos por la normativa vigente. Además, su diseño mantiene la flexibilidad necesaria para futuras ampliaciones o ajustes, en función de las necesidades operativas de la central y de la disponibilidad del repositorio nacional.

La incorporación de los Módulos Auxiliares de Blindaje (ASMs) aporta una serie de beneficios clave:

- Descongestión de las piscinas de combustible gastado, evitando que se alcance su capacidad límite garantizando la operación de los reactores y reduciendo el riesgo de un cierre prematuro de la central.
- Construcción modular, que garantiza que se cumpla el calendario de paradas programadas de Koeberg hasta su cese definitivo, actualmente previsto para julio de 2027.
- Blindaje conforme a los principios ALARA, asegurando que las dosis en el límite de la TISF se mantengan dentro de los valores establecidos por la normativa aplicable.
- Reducción de las dosis ocupacionales, ya que el blindaje adicional de los ASMs protege al personal durante las operaciones alrededor de los contenedores, evitando la necesidad de trabajar en edificios con niveles de radiación más elevados.
- Protección frente a accidentes de diseño, actuando como barrera ante fenómenos externos como tsunamis, vientos de tornado o proyectiles generados por estos eventos.

- Protección frente al ambiente altamente corrosivo de la central, preservando la integridad de los contenedores HI-STAR 100 durante su periodo de almacenamiento.

LICENCIAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN

Tras completarse el diseño detallado de la TISF, el proyecto avanzó hacia su licenciamiento ante el regulador sudafricano. El National Nuclear Regulator (NNR) evaluó la documentación presentada y autorizó la construcción de la instalación, confirmando que la solución propuesta cumplía los requisitos aplicables.

Con la licencia concedida, se iniciaron las obras de la TISF, comenzando por la ejecución de la losa de hormigón armado y las áreas auxiliares previstas. Posteriormente, se inició la construcción de los primeros ASMs, siguiendo la secuencia modular establecida para garantizar su disponibilidad en los plazos operativos requeridos.

En la actualidad, la infraestructura principal de la TISF se encuentra ejecutada y los primeros ASMs están ya construidos o en fase final de montaje, permitiendo a la central disponer de la capacidad necesaria para continuar con su programa de gestión del combustible gastado.

CONCLUSIONES

El proyecto de la Instalación Transitoria de Almacenamiento Provisional (TISF) en la Central Nuclear de Koeberg constituyó una solución integral y técnicamente robusta para garantizar la continuidad del programa de gestión del combustible gastado durante el periodo previo a la disponibilidad del repositorio centralizado previsto por el NRWDI, en un contexto marcado por la limitada capacidad de las piscinas de almacenamiento de combustible gastado.

La incorporación de los Módulos Auxiliares de Blindaje

(ASMs), concebidos como una solución intermedia entre el almacenamiento abierto y un edificio completamente cerrado, resultó fundamental para cumplir simultáneamente con los requisitos radiológicos, estructurales, térmicos y operativos establecidos por la normativa nacional e internacional. Estos módulos permitieron aplicar de forma efectiva los principios ALARA, reduciendo la exposición ocupacional durante las operaciones y asegurando que los límites de dosis en el perímetro de la TISF se mantuvieran dentro de los valores regulados. Todo ello garantizando la estabilidad estructural y el comportamiento térmico adecuado de los contenedores HI-STAR 100 tanto en condiciones normales como en escenarios de accidente.

En conjunto, la solución desarrollada permitirá cumplir los plazos de carga de contenedores previstos en función de las necesidades operativas, ofreciendo la flexibilidad necesaria para futuras ampliaciones de la TISF y asegurar la operación continuada de la central hasta la disponibilidad del repositorio nacional.

REFERENCIAS

- [1] ESKOM, «KAA-637, Access Control to Radiological Controlled Zones».
- [2] ORNL, «ORNL/TM-2005/39, SCALE Code System, Version 6.2.4.» 2020. ■