

## **HERRAMIENTAS AVANZADAS DE MODELAMIENTO RADIOLÓGICO PARA FINES DE LICENCIAMIENTO DE INSTALACIONES RADIOACTIVAS**

**C.F. Cárdenas, L. Mariangel,**

Comisión Chilena de Energía Nuclear.

### **RESUMEN**

A continuación se presenta el status de las nuevas herramientas de modelamiento utilizadas en la fase de licenciamiento realizado en instalaciones radioactivas de 1<sup>era</sup> categoría por parte del departamento de Seguridad Nuclear y Radiológica (DSNR) de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), donde debido al ingreso de nuevas tecnologías al país y el aumento en los requerimientos internacionales de protección radiológica, se han debido fortalecer las competencias técnicas y las herramientas de cálculo empleadas para la verificación de diseños radiológicos presentados por parte del explotador.

Las nuevas herramientas de modelamiento en el DSNR corresponden a Mercurad, que realiza cálculo para fuentes radioactivas y generadores de radiación en aplicaciones médicas e industriales, herramientas que consideran el método de volúmenes finitos tales como Ansys en aplicaciones de corte nuclear y desarrollos elaborados por profesionales del DSNR.

Como resultado de la incorporación de estas herramientas se han podido distinguir falencias en diseños radiológicos, además de poder predecir valores instantáneos en puntos de interés radiológico en diseños complejos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La utilización de tecnologías basadas en el uso de radiaciones ionizantes ha crecido notablemente en Chile en la última década, lo que ha generado beneficios para los usuarios finales de tales tecnologías y al mismo tiempo desafíos para las autoridades responsables de su autorización y control<sup>1</sup>. Este incremento en el uso de instalaciones o prácticas radiactivas se ha expandido a diversos ámbitos, destacando mayoritariamente las áreas de medicina, industria y defensa civil, donde su uso ha contribuido a:

- Ampliar el espectro de tecnologías utilizadas en el tratamiento del cáncer, con la reciente introducción de dos equipos Gamma Knife, un LIAC y varios equipos de braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR) entre otros;
- Optimizar procesos productivos, a través de la incorporación de aceleradores de partículas a la industria manufacturera y sector minero;
- Fortalecer el control del tráfico transfronterizo, a través de la adquisición y puesta en servicio de 9 sistemas de inspección no intrusiva de carga, cuyo principio de detección se basa en el uso de los Rayos X de alta energía;

---

<sup>1</sup> Chile posee dos autoridades regulatorias en materia de radiaciones ionizantes, Comisión Chilena de Energía Nuclear y Servicio de Salud, cuyos ámbitos de competencia comprenden instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría e instalaciones de 2<sup>da</sup> y 3<sup>era</sup> categoría, respectivamente.

El presente trabajo se centra en las instalaciones radiactivas sujetas al control de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en adelante Comisión, específicamente en la descripción de las herramientas de cálculo utilizadas por dicha entidad con el propósito de evaluar la seguridad radiológica de instalaciones radioactivas de 1<sup>era</sup> categoría que involucran la utilización de fuentes, generadores de radiación, e instalaciones donde se producen y/o manipulan fuentes radiactivas no selladas.

## 2. MARCO LEGAL APLICABLE A INSTALACIONES RADIATIVAS.

En Chile el uso de la energía nuclear y las radiaciones ionizantes se sustenta en La Ley de Seguridad Nuclear, Ley N°18.302/1984 y cuatro instrumentos jurídicos que permiten su aplicación práctica:

- Reglamento de Protección Radiológica de Instalaciones Radiactivas, D.S.N° 3/1985;
- Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines, D.S.N° 133/1984;
- Reglamento para el transporte seguro de material radiactivo, D.S.N°12/1985;
- Reglamento de protección física de las instalaciones y de los materiales nuclear, D.S.N° 87/1984;

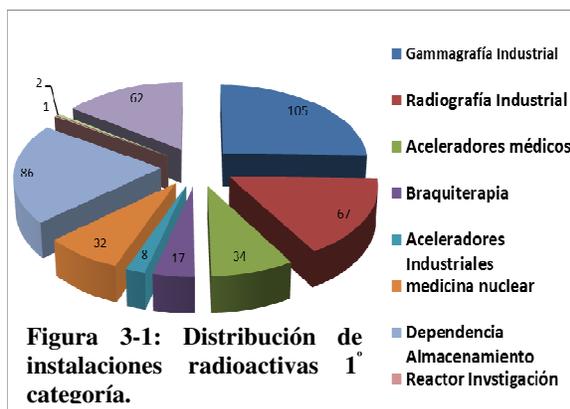
En materia de radiaciones ionizantes, el D.S.N° 133/1984 establece tres tipos de categoría de instalaciones radiactivas, 1<sup>era</sup>, 2<sup>da</sup> y 3<sup>era</sup>, cuyo control y supervisión es ejercido por dos entidades gubernamentales, Servicio de Salud y la Comisión Chilena de Energía Nuclear, según lo dispuesto en dicho reglamento y la Ley N° 18.302.

La Comisión Chilena de Energía Nuclear es responsable de llevar a cabo labores de evaluación y fiscalización de instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría, contemplando prácticas tales como: radioterapia, laboratorios de alta radiotoxicidad, plantas de irradiación e instalaciones de gammagrafía y radiografía industrial, entre otras.

## 3. INFRAESTRUCTURA REGULATORIA PARA EL CONTROL DE INSTALACIONES RADIATIVAS DE 1<sup>o</sup> CATEGORÍA

Chile posee aproximadamente 400 instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría, considerando instalaciones de gammagrafía y radiografía industrial, aceleradores industriales de partículas, instalaciones médicas, servicios de teleterapia y medicina nuclear, instalaciones destinadas al tratamiento y disposición de desechos radiactivos, laboratorios de producción de radioisótopos, plantas de irradiación multipropósito, entre otras.

La Figura 3-1 indica las tipologías de instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría y su número. El control y supervisión de las instalaciones radiactivas antes descritas es realizado por la Comisión, a través del DSNR, el cual, anualmente realiza en promedio 50 licenciamientos y 250 inspecciones.



#### **4. METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LICENCIAMIENTO DE INSTALACIONES RADIOACTIVAS DE 1<sup>era</sup> CATEGORÍA**

A continuación se presenta una descripción de las metodologías de cálculo utilizadas, incluidas los criterios de evaluación adoptadas, en el licenciamiento de algunos tipos de instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría.

##### **4.1. Enfoques metodológicos para el desarrollo de evaluaciones de seguridad.**

Históricamente los procesos evaluativos llevados a cabo por DSNR, han evolucionado de acuerdo a las nuevas directrices entregadas en materia de protección radiológica por la Comisión Internacional de Protección Radiológica y el Organismo Internacional de Energía Atómica. Lo anterior ha inducido a incorporar dentro de los enfoques evaluativos, nuevas directrices y requisitos técnicos que buscan minimizar las dosis de radiación en los trabajadores expuestos y miembros del público, dentro de los cuales el país avanza hacia utilizar los siguientes criterios:

- i. Adopción de restricciones de dosis por práctica, con el objeto de minimizar las dosis de radiación en las personas.
- ii. Establecimiento de límites de diseño a nuevas instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría, según los valores propuestos en la norma NCRP 151; 5 [mSv] por año, para trabajadores expuestos y 1 [mSv] por año, para miembros del público.
- iii. Caracterización radiológica de las instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría en función de los valores instantáneos de la tasa de equivalente de dosis ambiental,  $H^*(10)$ , en puntos de interés radiológico.
- iv. Incorporación de evaluación de sistemas de seguridad y enclavamiento en el diseño de cada instalación que minimicen exposiciones potenciales.

Las exigencias anteriores constituyen los puntos de partida de todo licenciamiento que realiza la Comisión, el cual, incluye tanto metodologías para el cálculo de las magnitudes de protección radiológica como validaciones experimentales a través de la medición de magnitudes operacionales.

##### **4.2. Nuevas herramientas de cálculo utilizadas en licenciamiento**

Actualmente, los licenciamientos de instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría incorporan el uso de tres tipos de herramientas de cálculo:

- Mercurad: Herramienta de análisis de blindaje gamma, desarrollado por Camberra, la cual, se basa en el método de integración kernel puntual para un rango de energías entre 15KeV y 10MeV. Permite representar geometrías multi-fuente utilizando cálculo de build-up multicapa.
- ANSYS: Herramienta computacional que utiliza el método de volúmenes finitos para la solución de problemas de termo-fluidos entre otros, utilizado en aplicaciones industriales, aeronáuticas y nucleares. Permite el modelamiento de aplicaciones tales como análisis termo-hidráulicos de elementos combustibles.
- Herramientas propias desarrolladas por DSNR: Se han desarrollado herramientas específicas para la evaluación de instalaciones de radioterapia, tales como LINAC-DSNR que sistematiza el cálculo de blindaje de búnker de radioterapia aplicando la metodología presentada en NCRP 151, además de otras herramientas desarrolladas para cálculo de blindaje de instalaciones asociadas a fuentes de gammagrafía industrial.

## 5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE CÁLCULO EN LICENCIAMIENTO

A continuación se presentan algunos ejemplos de análisis realizados por DSNR para fines de licenciamiento de instalaciones radiactivas de 1<sup>era</sup> categoría, con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos citados en el punto 4.1 del presente documento.

### 5.1. Celdas de Producción y Fraccionamiento de Radioisótopos.

El diseño propuesto para las nuevas celdas de producción y fraccionamiento de radioisótopos, fue evaluado utilizando la herramienta computacional Mercurad, a través del cual, se replicó el diseño de las celdas propuestos en los planos de detalle de dicha instalación y utilizó un inventario de actividad para  $I^{131}$  y  $Tc^{99m}$  obtenido a partir de balances de materia. De esta forma, se determinó a través del software los valores instantáneos de la magnitud  $H^*(10)$  tanto en condiciones normales de operación como en caso de emergencia a los cuales estaría expuesto un operador de la instalación. La Figura 5.1 muestra una representación esquemática del diseño de la celda de producción de radioisótopos a través de la herramienta citada.

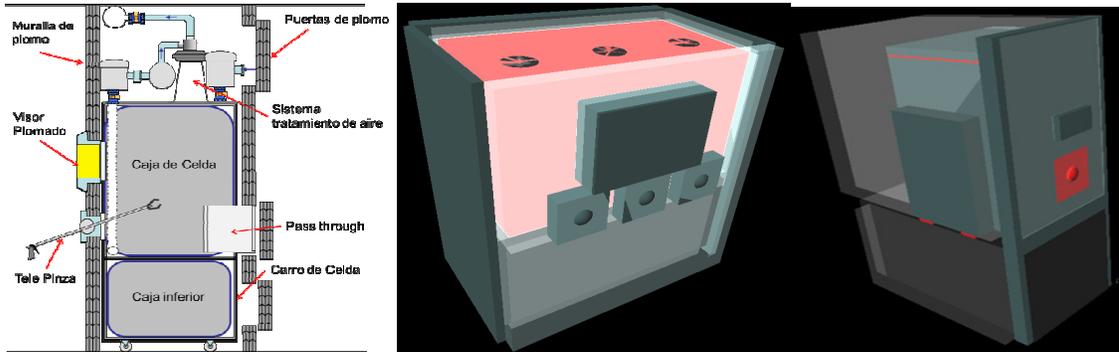


Figura 5.1: Modelamiento número de celda de producción de radioisótopos.

### 5.2. Dependencia de almacenamiento de desechos radiactivos.

Para el modelamiento de una dependencia de almacenamiento de desechos radiactivos proyectada para los siguientes años en la Comisión, se definió un modelo de contenedor de desechos radiactivos con valores de  $H^*(10)$  equivalentes a los límites de diseño, cuya distribución inicial fue evaluada a través de la herramienta computacional Mercurad. La Figura 5.2 muestra la representación gráfica de los modelos radio equivalentes realizados para el tipo de contenedor replicado y su distribución espacial proyectada al interior de la dependencia, respectivamente.

Como resultado del análisis realizado, se determinó restricciones de permanencia en zonas de tránsito de operadores y tiempos máximos de operación por actividad desarrollada al interior de la dependencia alcanzando a modelar simultáneamente el efecto de más de 250 contenedores.

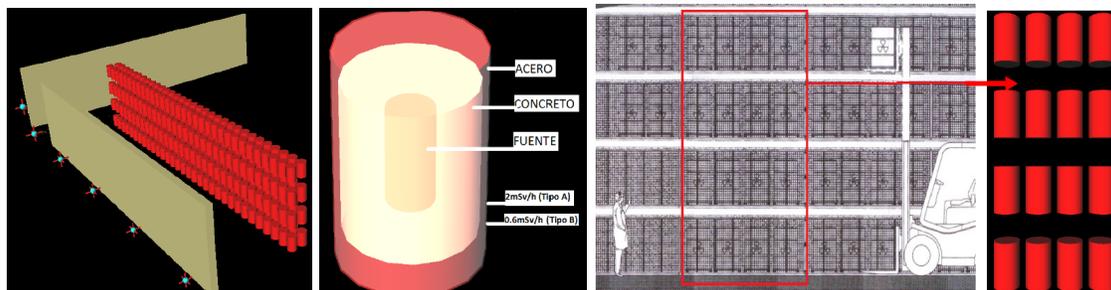


Figura 5.2 Modelamiento numérico de múltiple contenedores y modelo unitario simplificado.

### 5.3. Cálculos utilizando método de volúmenes finitos en aplicaciones nucleares.

La herramienta ANSYS-CFX fue utilizada para evaluar el diseño termo-hidráulico del Reactor Nuclear de Investigación, RECH-1, para las condiciones actuales de operación y escenarios de emergencia propuestos. Adicionalmente, se realizó un análisis dinámico de la respuesta del sistema de ventilación ante situaciones de emergencia que implicaran riesgos radiológicos en las personas. Las Figuras 5.3.1 y 5.3.2 muestran la representación gráfica de los elementos combustibles del RECH-1 y el modelamiento numérico del sistema de respuesta ante emergencias derivadas del sistema de ventilación.

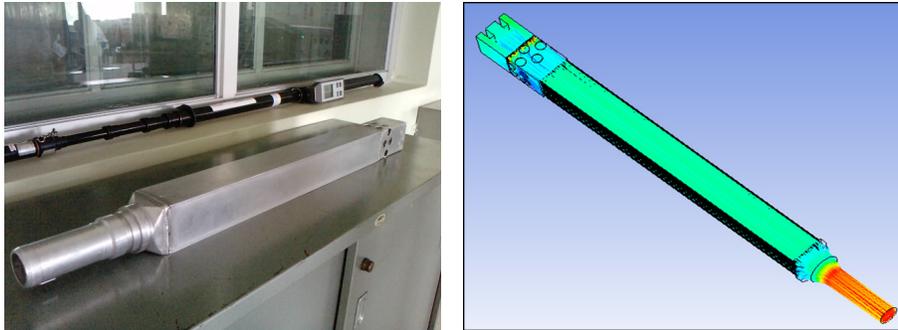


Figura 5.3.1. Modelamiento numérico de elemento combustible del RECH-1.

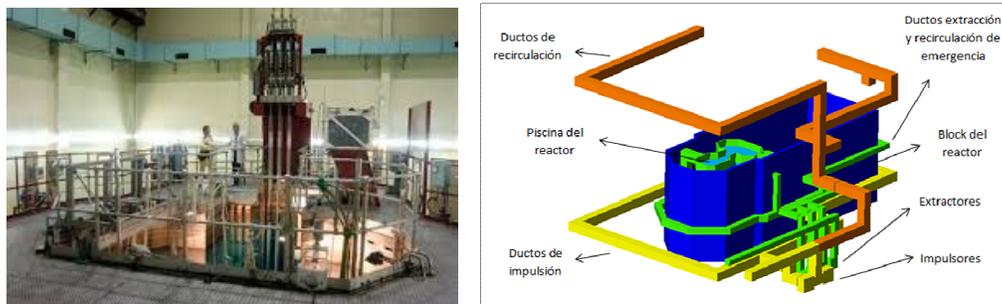


Figura 5.3.2 Modelamiento numérico de sistema de repuesta de emergencia del sistema de ventilación.

### 5.4. Salas de Hospitalización en Medicina Nuclear y Braquiterapia de baja tasa de dosis

Una aplicación recurrente en el licenciamiento de instalaciones radioactivas corresponde a las salas de hospitalización para braquiterapia de baja tasa de dosis y medicina nuclear, incluida la evaluación de salas aledañas con ocupación de público.

Esta aplicación ha tenido gran impacto para la evaluación de los valores instantáneos de  $H^*(10)$  registrados en salas contiguas a las salas de hospitalización de pacientes tratados con fuentes radiactivas, los cuales han dado origen a nuevas exigencias tales como: incorporación de blindaje adicional o reducción de factor de ocupación. La Figura 5.4 muestra una representación gráfica del modelamiento realizado en una sala de hospitalización.

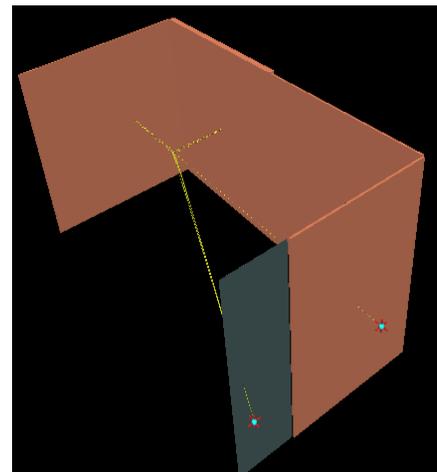


Figura 5.4: Modelamiento numérico de sala contigua a servicio de medicina nuclear

## 5.5. Planta de Irradiación Multipropósito

Las plantas de irradiación multipropósito, en adelante PIM, constituyen instalaciones cuyo diseño y operación ha sido evaluada a través del uso de la herramienta computacional Mercurad. La Figura 5.5 muestra un modelo radio-equivalente construido para emular el acceso a una PIM.

Un eventual aumento de actividad en la PIM podría también ser evaluado a través del diseño de un volumen radio-equivalente, con el fin de determinar el campo de radiación gamma existente en puntos de alta ocupación de operadores y miembros de público.

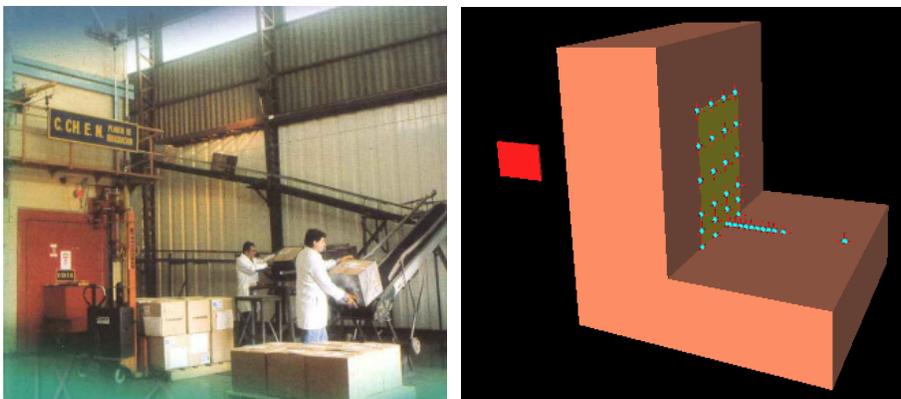


Figura 5.5: Modelamiento numérico de puerta exterior de una planta de irradiación multipropósito.

## 5.6. Generadores de Radiación Industriales de alta energía

Una de las aplicaciones de mayor aumento en Chile en los últimos 5 años corresponde a los sistemas de inspección no intrusiva de carga, los cuales se basan en el uso de Rayos X generados por un acelerador de partículas que forma parte de los elementos que componen dichos sistemas. Estos sistemas han sido evaluado a través de dos herramientas: LINAC-DSNR y Mercurad. La Figura 5.6 muestra el tipo de sistemas de inspección de carga licenciados a nivel nacional.



Figura 5.6: Sistemas de inspección de carga autorizados a nivel nacional.

Los cálculos efectuados por ambas herramientas han permitido caracterizar radiológicamente los valores instantáneos de  $H^*(10)$ , permitiendo la verificación de las zonas de control y supervisión declaradas por los fabricantes de dichas tecnologías. Adicionalmente, las mediciones radiológicas realizadas han permitido comprobar los valores teóricos de  $H^*(10)$  obtenidos por Mercurad en diversos puntos de interés radiológico.

## 6. CONCLUSIONES

- El uso de herramientas de cálculo, tales como Mercurad, LINAC–DSNR, permite tener una aproximación de los valores instantáneos de tasa  $H^*(10)$  que se registrarían durante la puesta en servicio y operación de las instalaciones radiactivas, habiendo a la fecha sido validadas a través de mediciones radiológicas efectuadas por la Comisión.
- La caracterización del campo de radiación, a través de simulaciones numéricas de término fuente-receptor, permite validar los diseños radiológicos propuestos para las instalaciones y prever posibles falencias en estos, previas a su funcionamiento. Esto permite evitar o, en su defecto, minimizar exposiciones potenciales en trabajadores expuestos y miembros del público.
- Para aquellas instalaciones ya en operación que requieren ser sometidas a un relicenciamiento, el modelo radio-equivalente puede ser elaborado a partir de mediciones radiológicas realizadas para las condiciones actuales de operación, obteniendo un modelo validado que permita verificar modificaciones al diseño original.
- A la fecha se han podido predecir campos de radiación para aplicaciones tradicionales y nuevas aplicaciones como los descritos en el punto 5, siendo un desafío para futuros proyectos la modelación de equipos tales como LIAC, Ciber Knife, Gamma Knife y aplicaciones nucleares.

## 4. REFERENCIAS

1. “Determinación de Tasa de Dosis Equivalente Ambiental  $H^*(10)$  en Nueva Instalación de Almacenamiento de Desechos Radiactivos Sólidos, CEN Lo Aguirre”, Ciro Cárdenas, 2012.
2. “Análisis y Modelamiento Termohidráulico del elemento combustible del RECH-1 de CCHEN”, Jimmy Angelo, Ciro Cárdenas; 2012.
3. “Análisis de Seguridad en Sistema de Ventilación del RECH-1”, Pedro Bahamondez, Ciro Cárdenas, 2012.
4. Informe de Seguridad DSNR Nuevo Laboratorio Producción Radioisótopos CCHEN; Lorena Mariangel, Ciro Cárdenas, 2014.
5. La Ley de Seguridad Nuclear, Ley N°18.302 de 1984.
6. Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines, D.S.N°133/1984.
7. Reglamento para el transporte seguro de material radiactivo, D.S.N°12/1985.
8. Reglamento de protección física de las instalaciones y de los materiales nuclear, D.S.N°87/1984.

Contacto: [ciro.cardenas@gmail.com](mailto:ciro.cardenas@gmail.com), [cfcardenas@cchen.cl](mailto:cfcardenas@cchen.cl)