

Estimación automatizada de inventarios radiológicos de instalaciones nucleares en desmantelamiento

A. Felipe, S. Gutiérrez, E. Salas y N. Martín

La planificación e implementación de la estrategia de desmantelamiento de un reactor nuclear requiere del conocimiento del inventario radiológico: contaminación y activación neutrónica, generada durante la operación de la planta y remanente tras la parada de la misma. La estimación del inventario radiológico de todos los componentes y de la estructura civil de la instalación puede ser obtenida mediante modelos matemáticos basados en criterios estadísticos. Se ha desarrollado una aplicación informática con el objeto de estimar, de una forma automatizada (excepto la activación neutrónica), el inventario radiológico para el Desmantelamiento de la Instalación. En dicha herramienta, se han incluido las funciones estadísticas necesarias para la estimación de la tendencia central y su variabilidad, como la media, mediana, varianza, intervalos de confianza,...

Los datos de partida necesarios por la herramienta son el Inventario Físico así como los resultados e informes de las muestras tomadas y medidas realizadas en el Programa de Caracterización de la Instalación. Con esta información, la aplicación informática es capaz de estimar el inventario radiológico, ya que incluye todos los procesos necesarios para la estimación automatizada.

The planning and implementation of decommissioning strategies for nuclear reactors require knowledge of radiological inventory: contamination and neutronic activation, which have arisen during operation and remain at shutdown. Estimation of the radiological inventory for all the components and civil structure of the plant could be obtained with mathematical models with statistical approach.

It has been developed a computer application with the aim to estimate the Radiological Inventory, in an automatic way (neutronic activation is not included in this tool), for the Dismantling of Nuclear Facilities. In these computer applications has been included the statistical functions needed for the estimation of the central tendency and variability, e.g. mean, median, variance, confidence intervals, variance coefficients, ...

The input data needed by the computer application is the Physical Inventory and the sampling and analysis results and reports developed according with the Characterisation Program of the Nuclear Facility (neutronic activation is an input data). With this information, the computer application is able to estimate the radiological inventory due to the fact that it includes the procedures for the automatic estimations.

ANDRÉS FELIPE MARTÍNEZ es doctor en Ciencias Físicas y Master en Energía Nuclear. Actualmente está desarrollando funciones de coordinación de actividades de Innovación en el departamento de Generación Nuclear de IBERDROLA INGENIERÍA y CONSTRUCCIÓN.

SUSANA GUTIÉRREZ es ingeniero industrial especializado en Tecnologías Energéticas. Ha participado en el desarrollo de los criterios y metodología necesarios para el cálculo de inventarios radiológicos de suelos y terrenos y en el desarrollo de una herramienta informática para la estimación automatizada de inventarios radiológicos y gestión de materiales en instalaciones nucleares.

EVA SALAS es licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza. Se incorporó a la sección de gestión de residuos y desmantelamiento de Iberdrola Ingeniería y Construcción en 2000, donde en la actualidad participa en proyectos de caracterización radiológica y en proyectos internacionales dentro del programa TACIS de la UE.

NIEVES MARTÍN PALOMO es licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Madrid. En 2006 se incorporó a ENRESA como jefa del Proyecto de Desmantelamiento y Clausura de la central nuclear José Cabrera.

INTRODUCCIÓN

La planificación e implementación de la estrategia de desmantelamiento de un reactor nuclear requiere del conocimiento del inventario radiológico de la instalación, es decir contaminación y activación neutrónica, generada durante la operación de la planta y remanente tras la parada de la misma. La estimación del inventario radiológico de todos los componentes y de la estructura civil de la instalación puede ser obtenida mediante modelos matemáticos basados en criterios estadísticos, de tal forma que partiendo de un conjunto de medidas previamente planificadas se obtiene el inventario radiológico de la instalación.

IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN ha desarrollado para ENRESA una aplicación informática con objeto de estimar, de una forma automatizada el inventario radiológico de la instalación a ser desmantelada, así como las corrientes de materiales y bultos generados. En dicha herramienta, se han incluido las funciones estadísticas necesarias para la estimación de la tendencia central y su variabilidad, como la media, mediana, varianza, intervalos de confianza.

DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

Para efectuar una estimación del inventario radiológico es necesario disponer de un conjunto de medidas que se han tomado

de acuerdo a un Programa de Caracterización. Partiendo de dichas medidas y del inventario físico de la instalación debe ser posible estimar el inventario radiológico de la instalación a ser desmantelada.

Con el objetivo de efectuar una caracterización radiológica con alto grado de detalle sería necesario definir una campaña de caracterización con un gran número de medidas, lo cual implicaría un alto coste económico. Por tanto, el número de medidas a efectuar debe ser optimizado, de tal forma, que partiendo de un número limitado se infiera la caracterización radiológica para toda la instalación.

El proceso de estimar el inventario radiológico para toda la instalación a

partir de las medidas efectuadas en las campañas de caracterización radiológica es un proceso que se ha implementado en una herramienta informática, la cual, partiendo básicamente del inventario físico y de las medidas radiológicas, almacenados en una base de datos, es capaz de efectuar la estimación de todo el inventario radiológico.

DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida necesarios para la herramienta son los siguientes:

- **Inventario Físico**, el cual debe constar de los siguientes elementos
 - Componentes eléctricos y mecánicos.
 - Principales Componentes (Vasija, presionador, generador de vapor, ...).
 - Sistemas de ventilación y aire acondicionado.
 - Estructura civil (paramentos).

Para cada uno de los anteriores elementos se debe incluir la siguiente información

- Nombre e identificación.
- Tipo: Componentes (válvulas, bombas, ..); estructura civil o paramentos (suelo, pared, techo, ..).
- Localización (edificio, cota, cubículo) - sistema al que pertenece.
- Material.
- Masa / superficie externa e interna.
- **Clasificación geográfica.** Zona, área, cota, edificio. Cada elemento del inventario físico deberá tener una relación directa con esta clasificación.
- **Clasificación por sistemas.** Todos los componentes deberán estar asociados a un sistema. Será recomendable disponer de una sub-división funcional de estos sistemas para poder definir Unidades de Vigilancia que no sean sistemas enteros sino partes de los mismos, de modo que cada una de estas subdivisiones implique un cambio significativo en los procesos radiactivos.

des de Vigilancia que no sean sistemas enteros sino partes de los mismos, de modo que cada una de estas subdivisiones implique un cambio significativo en los procesos radiactivos.

- **Información de las datos radiológicos**
 - Plan de caracterización radiológica
 - Resultados de las medidas efectuadas en la caracterización radiológica:
 - Tipo de muestra (frotis, escarificado, tasa de dosis, ..).
 - Valor de contaminación (total y por radionucleido), LID y error asociado.
 - Informe de las medidas efectuadas.
 - Estimación de valores de activación neutrálica y de contaminación interna.
- **Identificación de las Unidades de Vigilancia (UV).** Se deberá definir el ámbito geográfico de las UV, tanto para contaminación externa como para contaminación interna. Se deberá determinar también la clasificación radiológica inicial de cada UV.

ESTIMACIÓN DEL INVENTARIO RADIOLÓGICO

Los procesos definidos e introducidos en la herramienta informática, partiendo de los datos de partida (básicamente serán el inventario físico y las medidas y estimaciones radiológicas) serán capaces de estimar tanto los niveles específicos (por radionucleido) de concentración de actividad másica (Bq/g) como de actividad superficial (Bq/cm²) para los componentes y paramentos situados en zonas impactadas radiológicamente. Los procesos más importantes, incluidos en la aplicación informática, necesarios para la estimación del inventario radiológico, se describen brevemente a continuación:

sarios para la estimación del inventario radiológico, se describen brevemente a continuación:

• **Proceso 1: Tratamiento de medidas.** Identificación de medidas que superan el umbral de decisión, en función del LID y error asociado a cada valor de la medida. De esta forma se determinan que medidas cumplen los que denominamos Condiciones de Detección, de forma que serán identificadas las medidas acordes con dicha condición aunque en ningún caso dichas medidas serán invalidadas para el proceso de estimación de inventario radiológico. En cualquier proceso de estimación, se podrá conocer el porcentaje de datos usados que superan la condición de detección.

• **Proceso 2: Chequeo de inventario físico.** Este proceso tiene como propósito detectar valores nulos o ceros en el inventario físico que serán empleados para determinar la actividad total (básicamente masas y superficies), y que podrían alterar el valor real del inventario radiológico.

• **Proceso 3: Identificación de Unidades de Vigilancia (UV).** Asignación de cada elemento del inventario físico, así como de cada una de las medidas de caracterización radiológica, a la unidad de vigilancia correspondiente. Existen dos clasificaciones de Unidades de Vigilancia:

- Para el caso de la contaminación interna la definición de UV no se corresponde con un espacio físico sino que está asociada a sistemas, o subsistemas, por los que circula el mismo tipo de fluido. Para la estimación de contaminación másica de componentes contaminados internamente la UV a emplear será la de sistemas, ya que la contaminación interna, de existir, se espera sea superior a la externa.
- Para la estimación de contaminación superficial externa de componentes y paramentos, así como de másica de paramentos, las UV serán las mismas y estarán asociadas a zonas geográficas de la instalación.

La herramienta estimará valores de contaminación a nivel de Unidad de Vigilancia. En caso de que una UV no disponga del número mínimo de medidas establecido por el usuario (si bien se recomienda que en ningún caso sea inferior a 5, Ref. 1, 2) para una correcta caracterización radiológica, la herramienta ampliará automáticamente el ámbito geográfico de dicha UV hacia otras UV contiguas y con la misma clasificación radiológica. Este proceso de ampliación geográfica de UV sólo se aplica para la contaminación externa y en ningún caso para la estimación de contaminación interna por ser éste un dato de partida.



Figura 1. Ventana principal de la aplicación.

• **Proceso 4: Estimación y aplicación de los Factores de Correlación.** El número de medidas para las que se disponga de valores de contaminación para radionucleidos emisores alfa - beta será reducido. Por tanto, para la estimación de estos radionucleidos (típicamente radionucleidos de difícil medida) es necesario establecer una correlación entre los valores de concentración de dichos radionucleidos de difícil medida con otros radionucleidos de fácil medida (básicamente serán Co-60 y Cs-137) con los que guarden relación en la forma de generarse en la instalación. Estas correlaciones se establecerán teniendo en cuenta los mecanismos de producción y el comportamiento físico químico de los distintos radionucleidos. Para ello los radionucleidos se agrupan en productos de corrosión/activación, productos de fisión y actínidos.

La herramienta efectuará en primer lugar una estimación de los diversos factores de correlación (las correlaciones entre radionucleidos son definidas por el usuario) para posteriormente aplicar dichos factores a las medidas de las que no se disponga de valores para los radionucleidos de difícil medida.

Como se puede ver en la figura 2, los Factores de Correlación se aplicarán tanto para completar medidas de frotis externo como de otros tipos de muestras escarificadas, muestras físicas y espectrometría γ "in situ", etc.. Los subíndices que se utilizan en la figura son los siguientes:

- $\alpha_{sd,i}$: Contaminación superficial desprendible de isótopo i con emisión principal alfa.
- $\alpha_{st,i}$: Contaminación superficial total de isótopo i con emisión principal alfa.
- $\alpha_{m,i}$: Contaminación másica de isótopo i con emisión principal alfa.

• **Proceso 5: Estimación de la contaminación superficial total (Bq/cm²).** Las medidas de frotis dan como resultado la actividad que ha sido capaz de llevarse dicho frotis (actividad desprendible), que no representa la actividad real que hay en la superficie objeto de la muestra (que debe ser la actividad "fija" más la "desprendible"). En este proceso se estima para cada uno de los frotis la actividad total (fija más desprendible).

• **Proceso 6: Estimación de Contaminación Superficial (Bq/cm²).** Con los valores de las medidas tratadas según se describe en los procesos anteriores, se selecciona el mejor estimador estadístico, en función del Coeficiente de Variación (CV) muestral:

- Si $CV > 1$, el mejor estimador de la unidad de vigilancia estará basado en la mediana de las medidas de la unidad de vigilancia. En caso de que se cumpla esta situación, para dicha unidad de vigilancia sería necesario

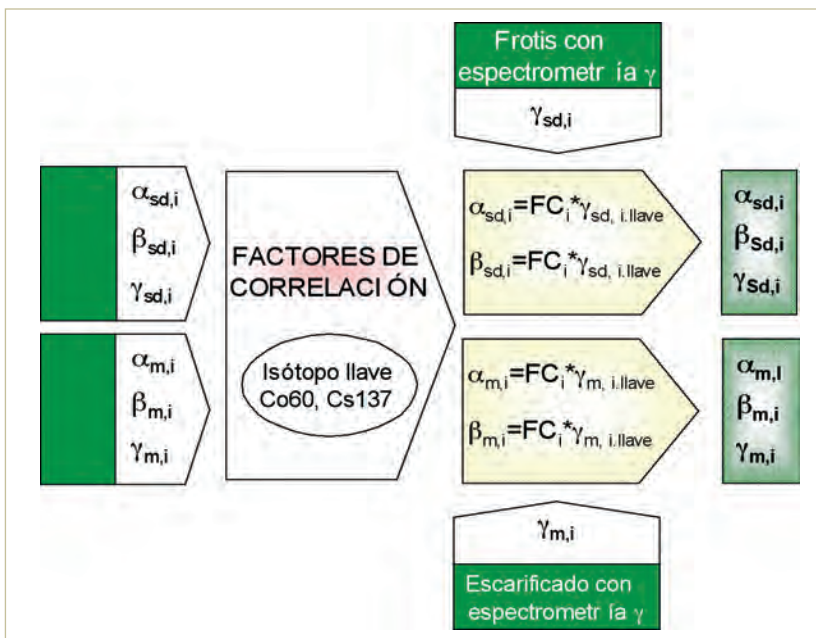


Figura 2: Esquema del proceso de estimación de contaminación α , β de frotis y escarificado/muestras físicas.

efectuar una caracterización más detallada.

- Si $CV \leq 1$, el mejor estimador de la unidad de vigilancia estará basado en la media de todas las medidas de la unidad de vigilancia.

La contaminación superficial externa de componentes y paramentos se evalúa de forma conjunta ya que se considera la aproximación de que el fenómeno físico principal por el que se contaminan es el mismo: deposición de la contaminación ambiental. Tal como se ha indicado anteriormente, se considera que debe existir al menos un número mínimo de 5 medidas (si bien el usuario puede cambiar este valor). En caso de que no exista este número mínimo de medidas se ampliará el ámbito geográfico con UV contiguas y de la misma clasificación radiológica.

La contaminación superficial interna se evalúa de forma independiente, a partir de tasas de dosis en contacto y frotis internos utilizando códigos de cálculo tipo MicroShield, y lógicamente sólo aplica a componentes por los que pasa un fluido radiactivo por su interior.

• **Proceso 7: Estimación de la Contaminación Másica (Bq/g).** Para el caso de los paramentos, el proceso a seguir es el mismo que el indicado en el Proceso de Estimación de Contaminación Superficial por UV, utilizando en este caso los datos de escarificados en lugar de los datos de contaminación superficial total. Para el caso de los componentes, dependerá de si estos presentan contaminación interna o no para determinar la contaminación másica. Además, en caso de que para componentes no se disponga de medidas de contaminación

másica, se estimará dicha contaminación másica a partir de la contaminación superficial multiplicada por un factor geométrico dado por la relación entre superficie y masa.

• **Proceso 8: Estimación de la profundidad de penetración.** Para la determinación del inventario de paramentos, se considera que los paramentos estarán contaminados solamente hasta una determinada profundidad en la que ha penetrado la contaminación. Para estimar el grado de profundidad de la contaminación en los paramentos se utilizarán las medidas de testigos analizados por tramos disponibles, y en su defecto, se considerará un valor teórico determinado por el valor asignado en los datos de partida, donde para cada paramento se establece un valor de profundidad de la penetración.

• **Proceso 9: Inventario Radiológico Total (Bq).** La determinación del inventario radiológico total se estima mediante el sumatorio del producto de la actividad superficial por la superficie contaminada y la actividad másica por la masa del componente. Los valores de activación neutrónica y contaminación interna (introducidos en la herramienta como un dato de partida) se acumulan al total de actividad determinada por contaminación externa superficial o másica para establecer la contaminación total, como puede verse en la figura 2.

Estimación de Corrientes de Materiales

Los materiales asociados a cada componente del inventario físico de la instalación deberán estar asociados (definido

Inventario Radiológico

Resultados de actividad total (Bq):

COMPONENTES	Sin decaer	Decaído
Superficial Externa	3,48E+10	2,99E+10
Superficial Interna	1,38E+12	1,01E+12
Total Superficial	1,40E+12	1,04E+12
Máscara	2,84E+11	1,93E+11
Activación Neutrónica	4,36E+16	4,36E+16
Total (Superficial + Activación)	4,36E+16	4,36E+16

PARÁMETROS:

	Sin decaer	Decaído
Superficial	5,71E+10	4,33E+10
Máscara	5,89E+11	5,29E+11
Activación Neutrónica	1,34E+14	1,34E+14
Total (Máscara + Activación)	1,34E+14	1,34E+14

Tiempo de decaimiento a aplicar (años):

Superficial y máscara: 3 Actualizar

Activación: 0 Actualizar

Exportación de Inventario Radiológico a tablas "InventarioComponentes" e "InventarioParametros":

Exportar a Base de datos: D:\ENRESA\Datos\ResultadosInventario.mdb

Volcado Inventario Radiológico

Tiempo de decaimiento a aplicar (años) en exportación:

Superficial y máscara: 0 Activación: 0

Figura 3: Pantalla para la estimación del inventario radiológico.

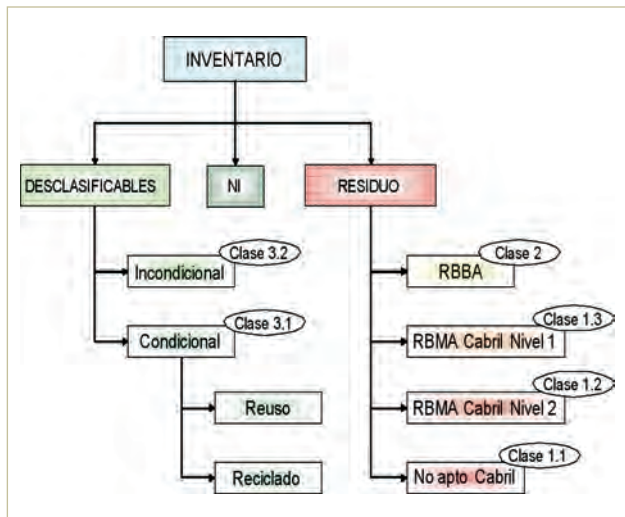


Figura 4: Clasificación de materiales.

por el usuario en la herramienta) a uno de los siguientes tipos de materiales, que definen las corrientes de materiales:

- Hormigón
- Acero
- Metales no férricos
- Cables
- Aislamientos
- Otros

Los materiales serán clasificados en función de su nivel radiológico (Ref. 3, 4, 5) según la figura 4. Para cada una de las corrientes de materiales la herramienta estima tanto la masa como la actividad asociada, ya que la herramienta asigna de forma individualizada cada elemento del inventario a una corriente de materiales.

Estimación de Bultos

Los diferentes tipos de contenedores previstos para el acopio de materiales incluidos en la herramienta son: Bidón de 220L, CMD, CMT, Ce-2a, Ce-2b, Big-Bag, contenedor HI-STORM. En la figura 5 se muestra la asociación que por defecto tiene implementada la he-

rramienta. El número de bultos necesarios para alojar todos los residuos son estimados por la herramienta.

CONCLUSIONES

La herramienta informática desarrollada permite la estimación de inventarios radiológicos, corrientes de materiales y bultos a partir de los resultados de las campañas de caracterización de una forma rápida y ágil.

El trabajo realizado ha sido utilizado por ENRESA para la estimación del inventario radiológico de la C.N. José Cabrera. Información que se ha utilizado como dato de partida para la documentación de licencia que se ha presentado al Consejo de Seguridad Nuclear.

Actualmente y como resultado del interés mostrado por los expertos internacionales en los congresos en los que se ha presentado, se está estudiando en EPRI la posibilidad de generalizar esta aplicación y desarrollar una más genérica que permita su uso en cualquier instalación en fase de desmantelamiento.

REFERENCIAS

1. NUREG-1757 Vol 2 Rev 1 Characterization survey and determination of radiological criteria. US NRC, September 2003.
2. NUREG-1575. Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM). US NRC, August 2000.
3. EUROPEAN COMMISSION RP122. Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption. Radiation Protection N° 122, 2000.
4. EUROPEAN COMMISSION RP89. Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection N° 89, 1998.
5. EUROPEAN COMMISSION RP113. Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Buildings and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations. Radiation Protection No 113, 2000. ■

Gestión de Materiales

Visualización de resultados:

Clasif. Rad. sin decaer: Contenedor, Descontenedor, Bultos

Options Visualización: Descont. Comp. ☐ No ☒ SI ☐ CE-2a ☐ CE-2b ☐ Descontenedor ☐ No ☒ SI ☐ CE-2a ☐ CE-2b

Exportar Vista actual

COMPONENTES	Acero	Metales no férricos	Cables	Aislamientos	Otros
Clase 3.2 (Desclasificable Incond.)	3,66E+05	5,25E+07	2,93E+04	3,17E+07	1,25E+04
Clase 3.1 (Desclasificable Cond.)	2,93E+05	7,64E+08	4,84E+03	4,69E+07	0,00E+00
Clase 2 (RBBA)	1,27E+06	5,10E+11	1,74E+04	7,60E+09	0,00E+00
Clase 1.2 y Clase 1.3 (RBMA)	3,47E+05	2,69E+14	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Clase 1.1 (No apto)	5,39E+04	4,33E+16	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
No clasificado	2,34E+06	0,00E+00	2,23E+08	0,00E+00	0,00E+00
TOTAL	4,70E+06	4,35E+16	2,79E+08	1,32E+10	1,06E+04

PARÁMETROS:

	Acero	Metales no férricos	Cables	Aislamientos	Otros
Clase 3.2 (Desclasificable Incond.)	3,67E+05	0,00E+00	7,72E+07	4,49E+10	0,00E+00
Clase 3.1 (Desclasificable Cond.)	5,19E+05	0,00E+00	1,95E+08	1,28E+04	0,00E+00
Clase 2 (RBBA)	5,09E+05	1,79E+09	1,34E+08	2,42E+11	0,00E+00
Clase 1.2 y Clase 1.3 (RBMA)	3,61E+04	2,88E+13	8,82E+04	5,50E+13	0,00E+00
Clase 1.1 (No apto)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
No clasificado	1,41E+05	0,00E+00	2,34E+08	0,00E+00	0,00E+00
TOTAL	7,34E+05	1,79E+09	9,90E+07	5,90E+13	2,77E+08

Figura 5: Pantallas de la aplicación para la estimación de bultos.