

TÉRMINO FUENTE PARA REACTORES EXPERIMENTALES

Viatela Y.¹

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica

RESUMEN

Es importante poder determinar la liberación de material radiactivo desde cualquier instalación nuclear con la mayor precisión posible, debido al impacto radiológico que implica. Diferentes parámetros resultas relevantes en situaciones accidentales. En particular en este trabajo se estudian la variación de la velocidad de deposición para yodos y aerosoles, y el caudal de extracción. Se tomaron las dimensiones y el caudal del reactor PARR-1 (MTR, 10 MW), y se usó el inventario radiactivo del reactor SAFARI (MTR, 20 MW). Como es de esperar, a mayor velocidad de deposición, más rápido se alcanza un equilibrio en la actividad liberada. Sin embargo, en la actualidad este no es un parámetro que se encuentre determinado unívocamente, por lo tanto se debe prestar particular atención al impacto en los resultados del análisis frente a variaciones paramétricas del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

Se encuentran diferentes reportes de accidentes e incidentes de reactores de investigación, con diferentes variedades de escenarios, igualmente se tiene una extensa cantidad en estado de puesta en marcha o parada, algunos en estado de cambio de potencia y consecuentemente, cambio de núcleo.

Uno de los parámetros relevantes para el cálculo de consecuencias es la evaluación del término fuente, es decir cuánto material radiactivo será librado desde el confinamiento, como será su transporte, que barreras ingenieriles existen para mitigar sus efectos. Por lo tanto desde los primeros trabajos en esta temática tales como el WASH1400 y el NUREG1150, para reactores de potencia, en adelante, se han llegado a diferentes conclusiones, tomando como relevantes las siguientes, las cuales se sugieren aplicar a reactores de investigación [1]:

- El inventario del término fuente puede ser calculado razonablemente usando métodos analíticos.
- Generalmente el término fuente tiende a estar sobreestimado.
- Para los términos fuente de una facilidad específica; generalizar los valores de un reactor a otro no es recomendable; cada reactor de investigación debe ser considerado individualmente de acuerdo a su diseño y características de mitigación.
- La magnitud de la liberación depende del rendimiento característico del reactor de investigación, en particular el desempeño del confinamiento.

¹viatelay@cab.cnea.gov.ar

- Las incertezas pueden ser significativas en la predicción de la liberación del término fuente desde el edificio, y la importancia de estas varía con el tiempo y modo de falla del confinamiento.
- Suposiciones realistas usualmente llevan a menores y más bajos términos fuente en casos de consecuencias severas, para reactores de investigación.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS REACTORES

En este trabajo se tomó como referencia el inventario radioactivo del reactor SAFARI [1], los datos de edificio, caudal y filtros del sistema de ventilación, son los correspondientes al Pakistan Research Reactor 1 (PARR-1) [2]. Se decidió de esta manera, ya que el primero es un reactor de una potencia mayor que el segundo, siendo esta una tendencia mundial, en particular para reactores de producción de radiofármacos.

El SAFARI, es un reactor de investigación tipo pileta abierta, con una potencia de 20 MW. La configuración estándar del núcleo corresponde a 16 elementos combustibles tipo MTR, con placas de U-Si y aluminio, con uranio enriquecido al 19.7%. Un tanque reflector que contiene agua pesada alrededor del núcleo. La operación del ciclo combustible es de 33 días, seguido de 2 días por recambio [1]. El inventario correspondiente se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Inventario radioactivo del reactor SAFARI

Isotopo	Inventario (Bq)	λ (s ⁻¹)	Isotopo	Inventario (Bq)	λ (s ⁻¹)
Kr-83m	3.29 10 ¹⁵	1.05 10 ⁻⁰⁴	I-129	9.10 10 ⁰⁷	1.40 10 ⁻¹⁵
Kr-85	5.72 10 ¹³	2.05 10 ⁻⁰⁹	I-131	1.83 10 ¹⁶	1.00 10 ⁻⁰⁶
Kr-85m	8.14 10 ¹⁵	4.30 10 ⁻⁰⁵	I-132	2.75 10 ⁰⁰	8.39 10 ⁻⁰⁵
Kr-87	1.58 10 ¹⁶	1.51 10 ⁻⁰⁴	I-133	4.20 10 ¹⁶	9.26 10 ⁻⁰⁶
Kr-88	2.23 10 ¹⁶	6.78 10 ⁻⁰⁵	I-134	4.72 10 ¹⁷	2.20 10 ⁻⁰⁴
Kr-89	2.90 10 ¹⁶	3.67 10 ⁻⁰³	I-135	3.95 10 ¹⁶	2.93 10 ⁻⁰⁵
Kr-90	2.94 10 ¹⁶	2.14 10 ⁻⁰²	I-136	1.88 10 ¹⁶	8.31 10 ⁻⁰³
Xe-131m	2.05 10 ¹⁴	6.72 10 ⁻⁰⁷	Ba-140	4.08 10 ¹⁶	6.29 10 ⁻⁰⁷
Xe-133	4.32 10 ¹⁶	1.53 10 ⁻⁰⁶	Sr-89	2.74 10 ¹⁶	1.59 10 ⁻⁰⁷
Xe-133m	1.25 10 ¹⁵	3.66 10 ⁻⁰⁶	Sr-90	4.53 10 ¹⁴	7.61 10 ⁻¹⁰
Xe-135	3.34 10 ¹⁵	2.11 10 ⁻⁰⁵	Sr-91	3.68 10 ¹⁶	2.00 10 ⁻⁰⁵
Xe-135m	7.13 10 ¹⁵	7.56 10 ⁻⁰⁴	Br-83	3.30 10 ¹⁵	8.02 10 ⁻⁰⁵
Xe-138	3.83 10 ¹⁶	8.20 10 ⁻⁰⁴	Te-125m	3.10 10 ¹²	1.40 10 ⁻⁰⁷
Xe-139	3.20 10 ¹⁶	1.75 10 ⁻⁰²	Te-127m	7.65 10 ¹³	7.36 10 ⁻⁰⁸
Cs-134	3.60 10 ¹⁴	1.06 10 ⁻⁰⁸	Te-129m	5.78 10 ¹⁴	2.39 10 ⁻⁰⁷
Cs-136	1.15 10 ¹⁴	6.15 10 ⁻⁰⁷	Te-131m	2.28 10 ¹⁵	6.42 10 ⁻⁰⁶
Cs-137	5.63 10 ¹⁴	7.42 10 ⁻¹⁰	Te-131	1.58 10 ¹⁶	4.62 10 ⁻⁰⁴
Te-132	2.70 10 ¹⁶	2.50 10 ⁻⁰⁶	Te-134	4.19 10 ¹⁶	2.76 10 ⁻⁰⁴
Te-133m	1.90 10 ¹⁶	2.09 10 ⁻⁰⁴	Te-135	2.03 10 ¹⁶	3.65 10 ⁻⁰²
			Ru-103	1.88 10 ¹⁶	2.04 10 ⁻⁰⁷

El PARR-1 es un reactor tipo pileta abierta, con una potencia de 9MW, enriquecimiento del 19.99%. El volumen de su confinamiento es de 15000m³ con un área superficial de 8577 m². Su sistema de ventilación normal tiene un caudal de 25000 m³h⁻¹, mientras que el sistema de emergencia es de 2100 m³h⁻¹. El caudal de fuga a través de las penetraciones del confinamiento es 266 m³h⁻¹ [2].

Para este trabajo se asume la existencia de un filtro HEPA y uno de carbón activado, los cuales sirven para reducir la cantidad de material liberado. Los filtros HEPA tienen una eficiencia mínima de 99.9%, correspondiente para detener aerosoles de 0.3µm. En el caso del filtro de carbón activado, el cual es útil para retener yodo, las eficiencias son de 90% [1,2,3].

3. FUNCIONAMIENTO DEL CONFINAMIENTO

La retención y liberación de material radioactivo en el confinamiento es muy importante, ya que de esta manera se puede lograr una reducción en el término fuente.

La tasa de liberación del confinamiento va a depender de la secuencia accidental y de los mecanismos de liberación. Una vez sucedido el accidente, la cantidad de material radioactivo liberada del confinamiento al medio ambiente dependerá del caudal de fuga del sistema de ventilación, decaimiento radioactivo, velocidad de deposición y eficiencia de los filtros.

Tomando hipótesis conservativas, la variación temporal de la actividad liberada desde el confinamiento al medio ambiente estará dada por la siguiente expresión [1],

$$q(t) = q_0 \frac{F(1 - \eta_v)}{\xi} \left(1 - e^{-\xi t} \right) \quad (1)$$

Donde ξ

$$\xi = \left(\lambda + \frac{F}{V} + v \frac{S}{V} + \frac{f}{V} \eta \right) \quad (2)$$

$q(t)$ es la concentración en aire de un dado radionucleido al tiempo t después de la liberación (Bq m⁻³).

q_0 es la concentración inicial en el confinamiento al momento de la liberación (Bq m⁻³).

λ es la constante de decaimiento radioactivo (s⁻¹),

F es el caudal de salida, ya sea el sistema de ventilación normal, emergencia y fuga (m³ s⁻¹).

V es el volumen del confinamiento (m³).

S es la superficie afectada (m²).

v es la velocidad de deposición (m s⁻¹).

f es el caudal de recirculación (m³ s⁻¹).

η_v es la eficiencia de los filtros, particulado y carbón activado, del sistema de ventilación de emergencia.

Los dos primeros términos de la ecuación (2), son aplicables para gases nobles, ya que se asume que estos no se depositan en las superficies, ni son afectados por los filtros del sistema de ventilación. El resto de los términos son relevantes para yodo y el resto de los isotopos.

4. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se utilizó la herramienta Visual Basic de Excel. El inventario radioactivo utilizado corresponde al reactor SAFARI [1], se asume como secuencia accidental que se libera todo el material radioactivo del núcleo y este no está cubierto, es decir no se usan factores de retención. Lo que se mostrará es la variación de la actividad para diferentes velocidades de deposición. Para el modelado numérico de la ecuación (2), se realizan las siguientes suposiciones para el cálculo de término fuente:

- Se asume que la liberación es instantánea en el confinamiento.
- De manera conservativa, la recirculación f es ignorada.
- Los precursores son ignorados.
- Se asume que las superficies son de concreto, no hay otra pintura. Esto es relevante para el yodo únicamente.
- La velocidad de deposición varía con la rugosidad de la pared, y el tamaño de partícula.
- El caudal de fuga a través de las penetraciones del confinamiento es $266 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

4.1. Grupo de gases nobles

La concentración de los gases nobles dependerá únicamente del decaimiento radioactivo. Dado que los filtros no afectan su naturaleza, la concentración de estos será mayor en el ambiente para el caso de sistema de ventilación de emergencia. Los resultados de las figuras 1 y 2 corresponden al caudal de ventilación normal, $2100 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

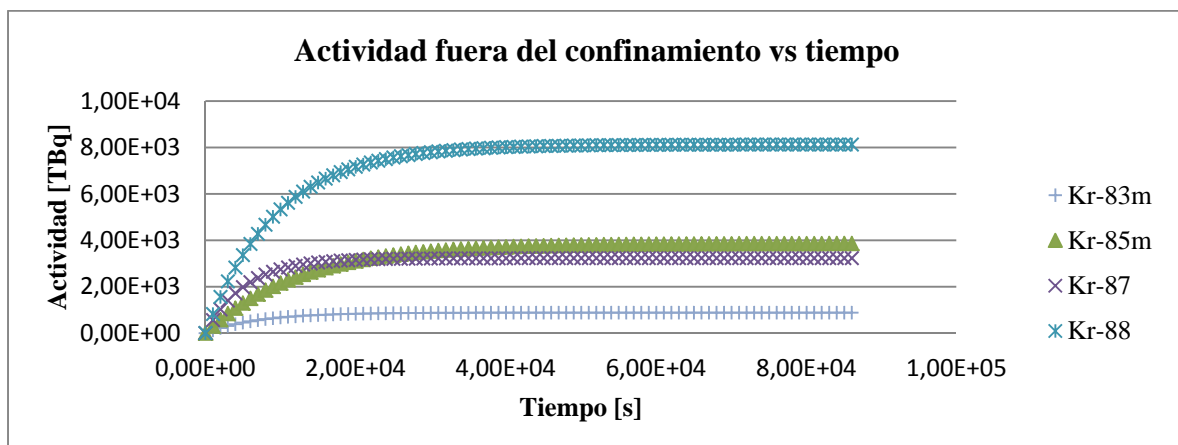


Figura 1. Variación temporal de la actividad para el kriptón

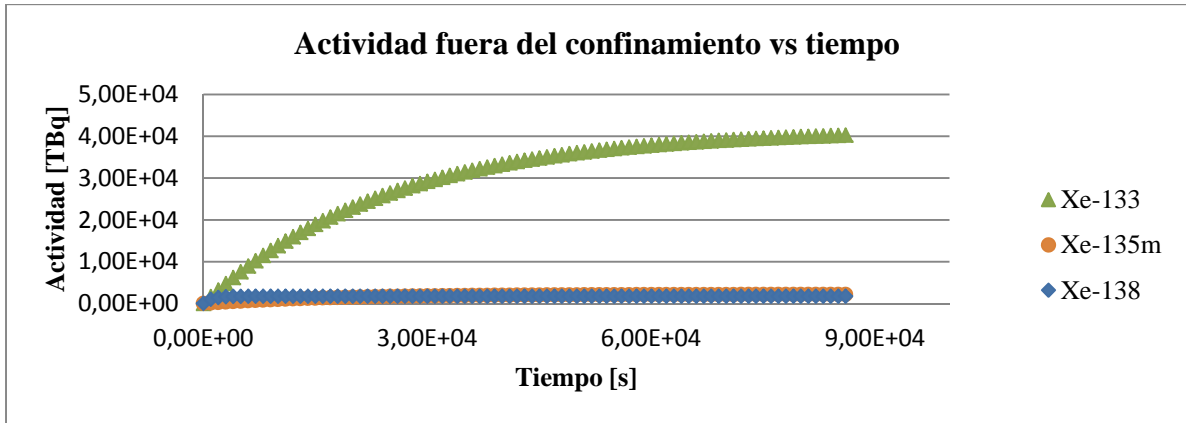


Figura 2. Variación de la actividad para el xenón

Como se puede observar para el caso del grupo del kriptón, al cabo de 8 h se obtiene un equilibrio, el isótopo relevante radiológicamente es el Kr-88, en el caso del xenón, el equilibrio se logra casi al cabo de 1 día de liberación, para este grupo el radiológicamente relevante es el Xe-133.

4.2. Grupo de yodos

Este grupo es relevante radiológicamente por sus consecuencias a corto plazo. Para este grupo se muestran dos resultados diferentes, uno correspondiente al sistema de ventilación de emergencia, y el otro para el caudal de fuga a través de las penetraciones del confinamiento, figuras 3 y 4. En el primero se asume que la eficiencia, η_v , es 90% para filtros de carbón activado. Las velocidades de deposición del yodo depende de la superficie, las que se utilizaron fueron 0.3 cm s^{-1} y $5,1 \cdot 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$ [4] correspondientes a superficies de concreto.

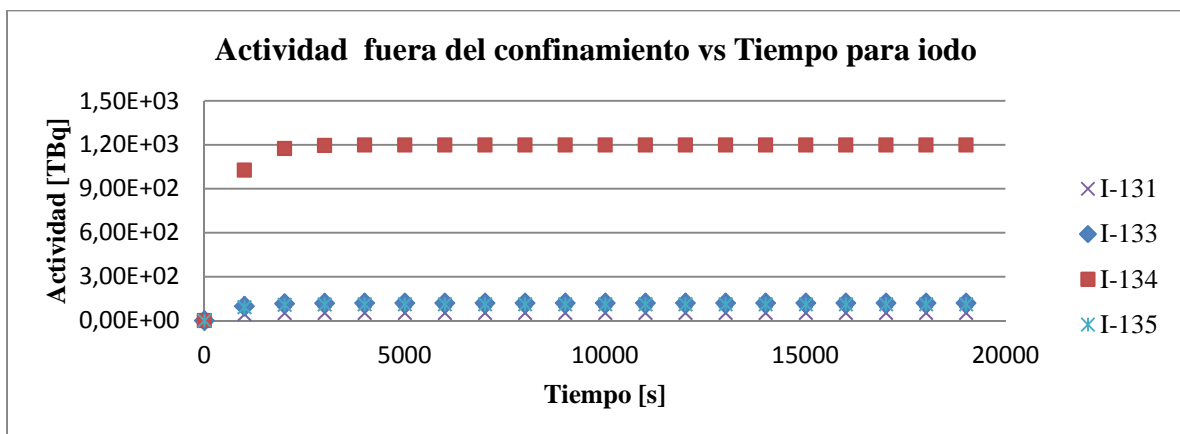


Figura 3. Actividad en el ambiente correspondiente a una velocidad de deposición de 0.3 cm s^{-1}

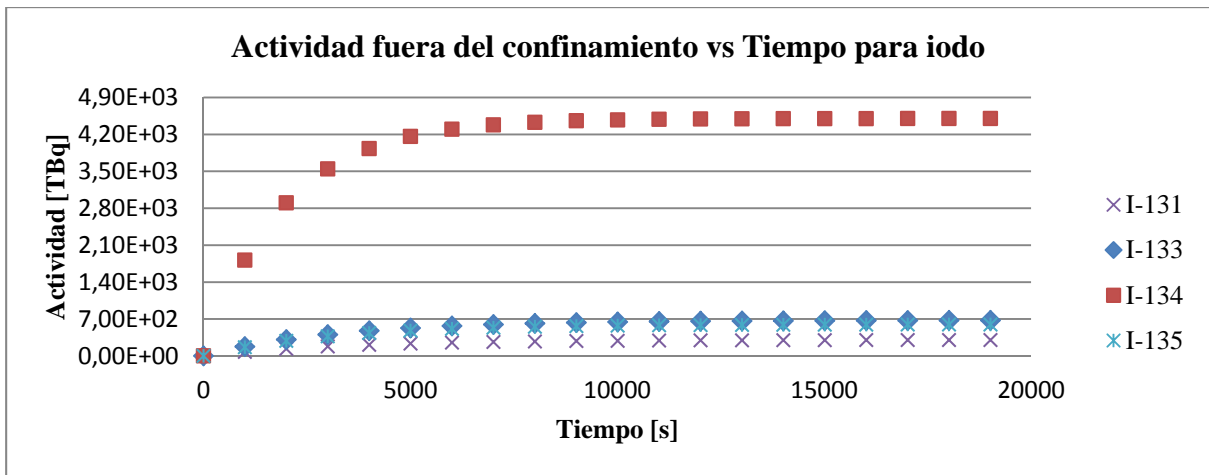


Figura 4. Actividad en el ambiente correspondiente a una velocidad de deposición de $5.1 \cdot 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$

Para el caso de ventilación de emergencia los resultados se muestran en las figuras 5 y 6.

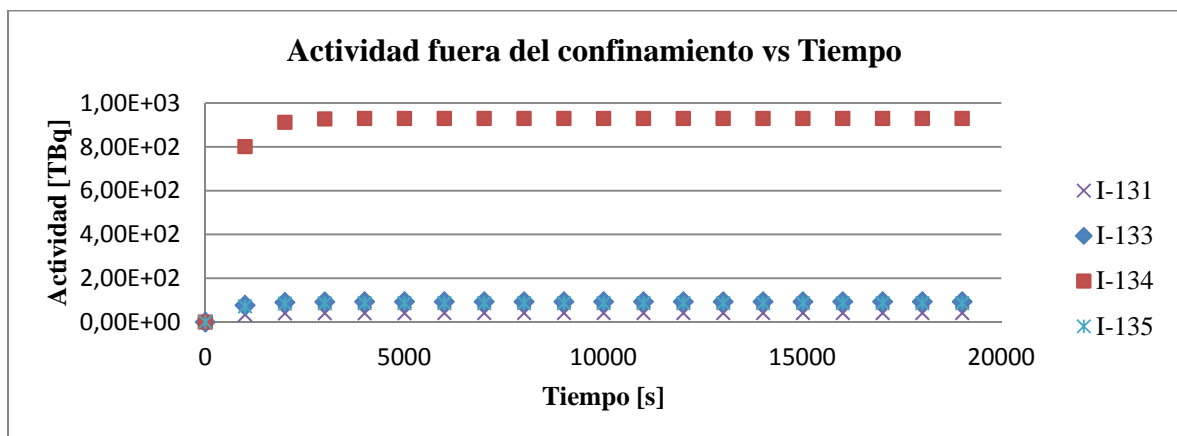


Figura 5. Actividad en el ambiente correspondiente a una velocidad de deposición de 0.3 cm s^{-1}

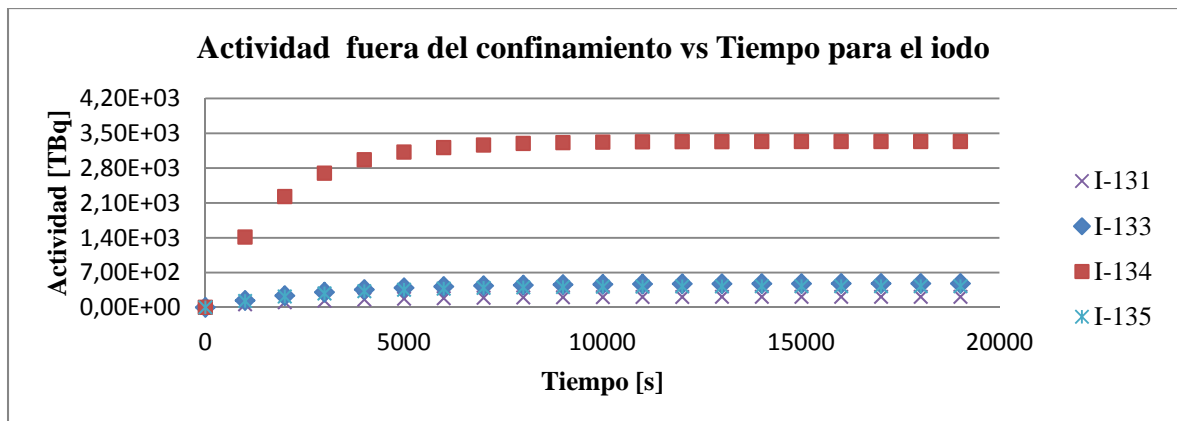


Figura 6. Actividad en el ambiente correspondiente a una velocidad de deposición de $5.1 \cdot 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$

Como se puede observar, a mayor caudal de extracción, se tendrá mayor actividad liberada, sin embargo la velocidad de deposición es una variable importante, ya que a mayor velocidad de deposición, más rápidamente se logra un equilibrio de la actividad liberada.

4.3. Grupo de aerosoles

La actividad de este grupo dependerá de la velocidad de deposición, la cual corresponde a datos obtenidos del trabajo realizado por Piskunov [5], donde se muestran resultados a partir de datos empíricos y modelos matemáticos correspondientes a diferentes superficies. Los valores utilizados para este trabajo corresponden a partículas de 2 μm de diámetro. En las figuras 7 y 8 se observan los valores de actividad al ambiente para velocidad de deposición de $1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ para superficie lisa y vertical, tanto para el caso de fuga de las paredes del confinamiento ($\eta_v=0$), como para caudal del sistema de emergencia ($\eta_v=99.97$).

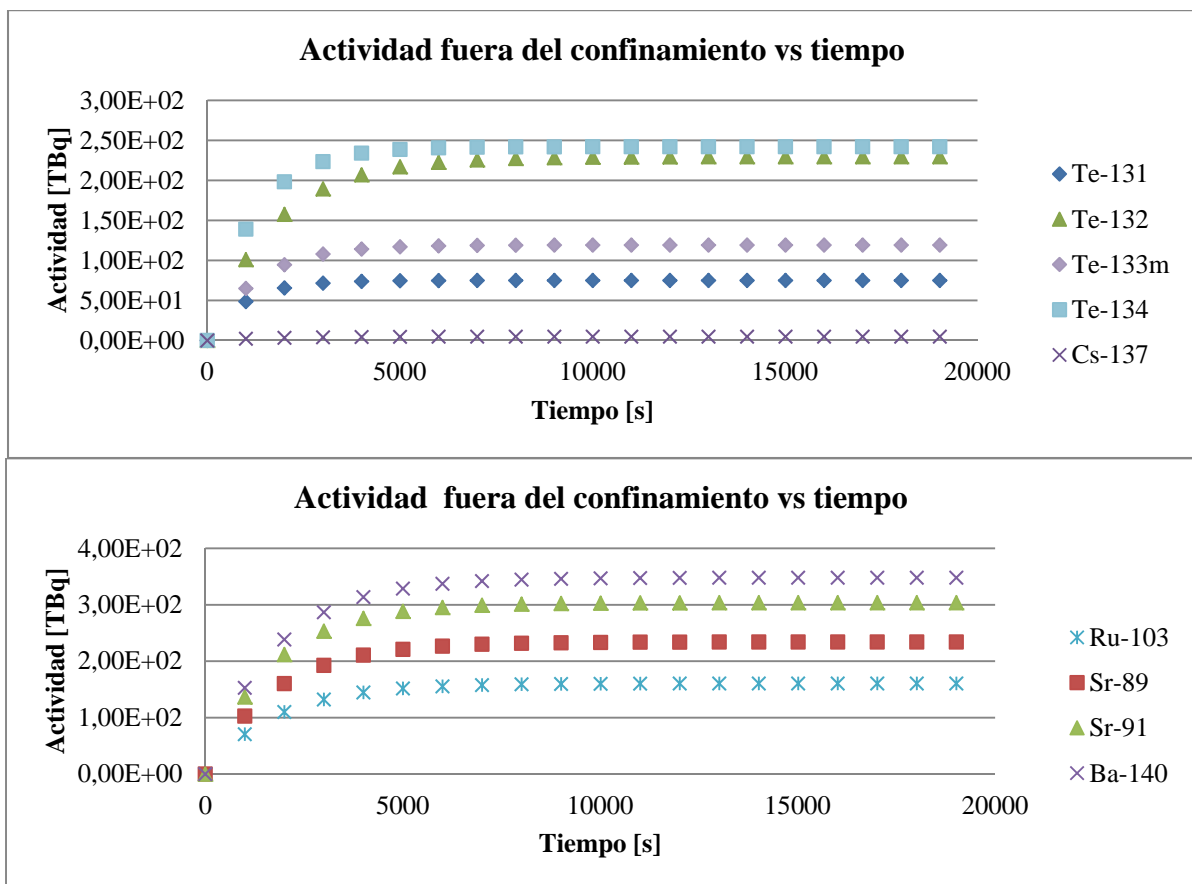


Figura 7. Variación de la actividad en el ambiente a lo largo del tiempo, con caudal de fuga por las penetraciones confinamiento.

En el caso del sistema de ventilación de emergencia,

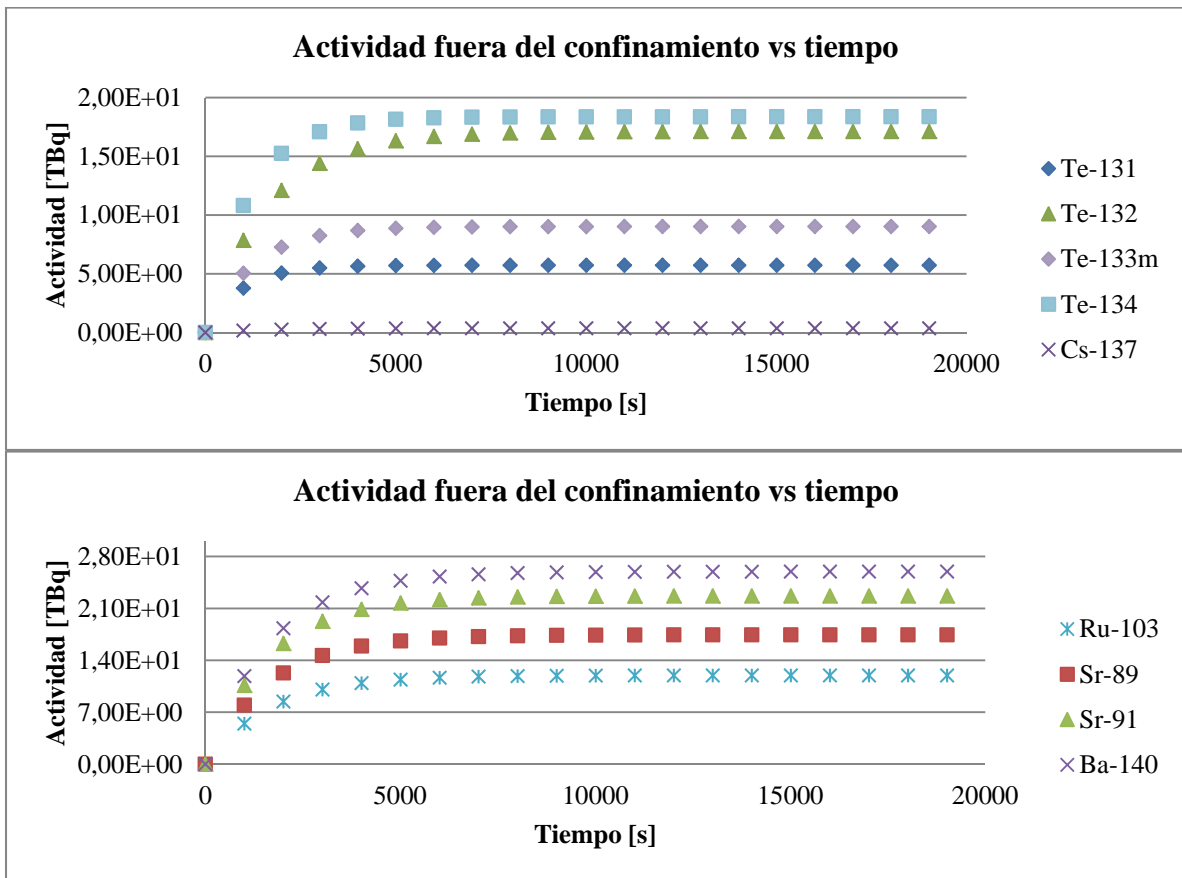


Figura 8. Variación de la actividad en el tiempo. Caso correspondiente al sistema de ventilación de emergencia.

De igual manera Piskunov [5] muestra resultados de velocidades de deposición correspondientes a datos semiempíricos, en las figuras 9 y 10 se pueden observar los resultados. Para este caso de igual manera se asume que el diámetro de la partícula es $2 \mu\text{m}$, siendo su velocidad de deposición $9 \cdot 10^{-5} \text{m s}^{-1}$.

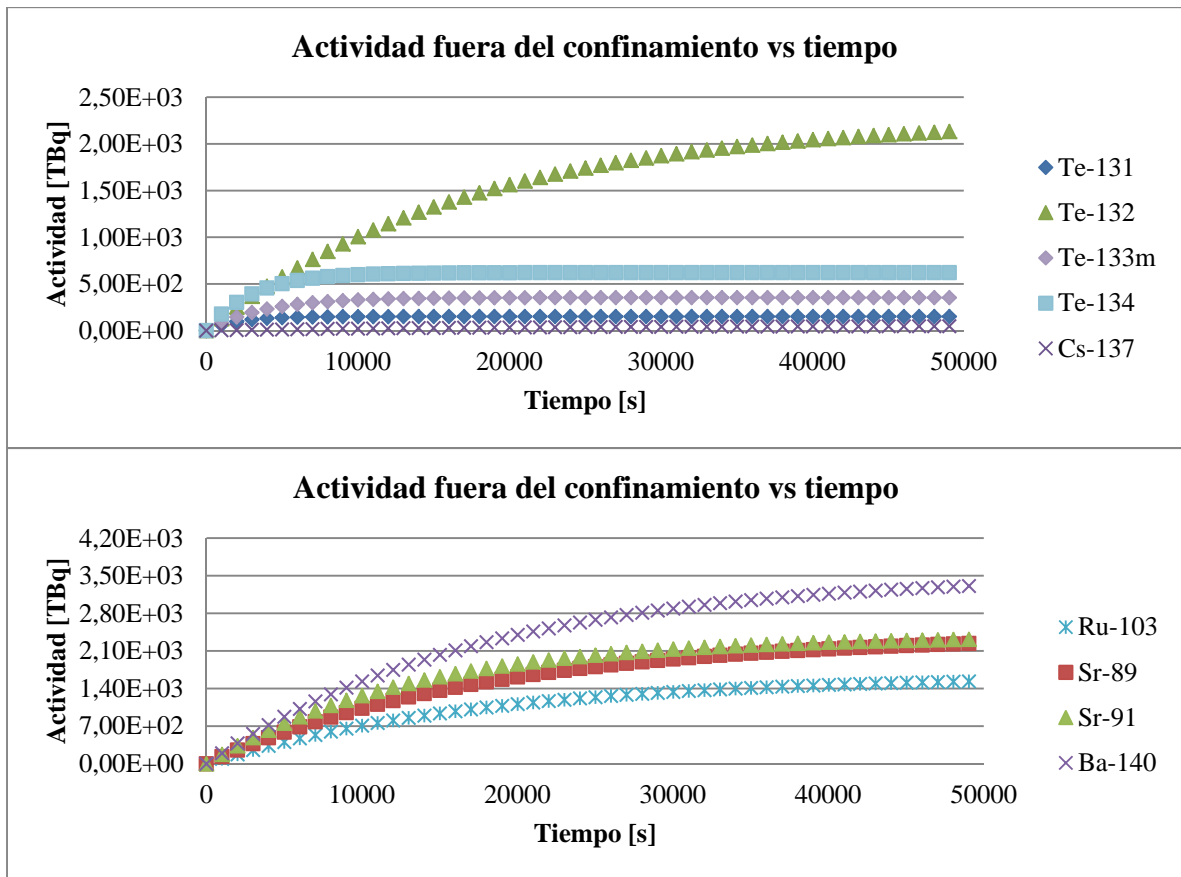
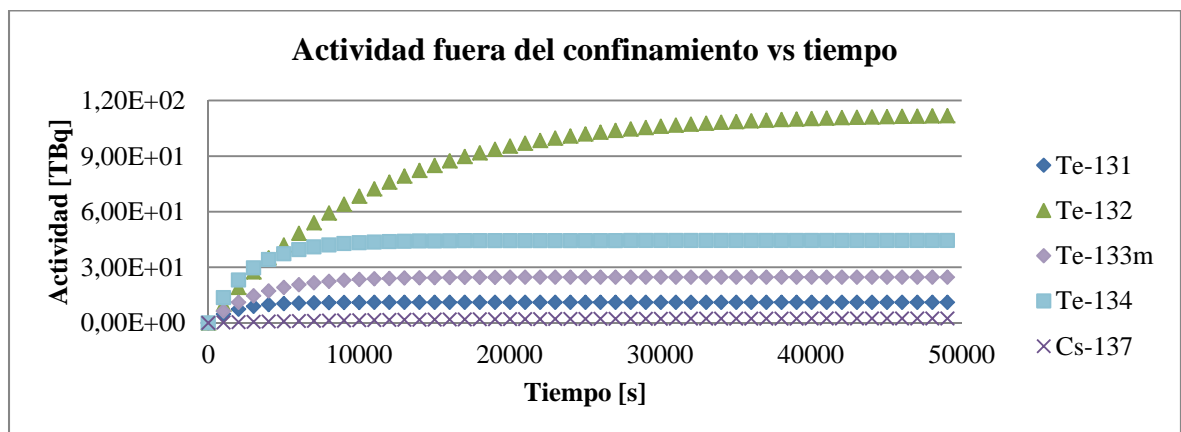


Figura 9. Variación de la actividad en el tiempo para fuga por las penetraciones del confinamiento.

En caso del sistema de ventilación de emergencia los datos se reflejan en la figura 10.



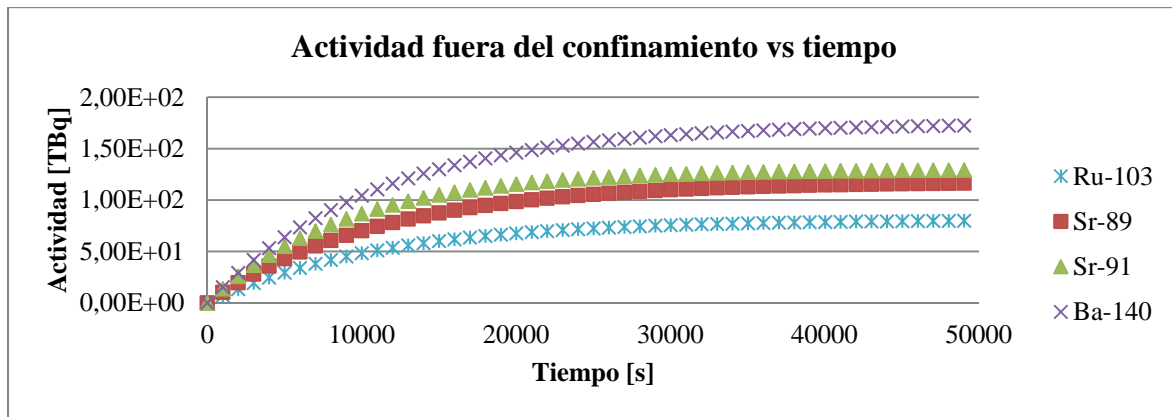


Figura 10. Variación de la actividad en el tiempo para el caso de acción del sistema de ventilación de emergencia.

5. CONCLUSIONES

Como se puede observar para el caso de yodos y aerosoles, la velocidad de deposición es una variable importante y fue lo que se reflejó en este estudio. En las figuras solo se mostraron los datos que son relevantes, los isótopos que no se encuentran graficados, es porque sus valores son demasiado bajos. A continuación se resaltan las conclusiones de este trabajo:

- Para los gases nobles, el equilibrio para el caso del Kr-88 se logra a las 12 horas, siendo este el más relevante tanto en magnitud como radiológicamente. En el caso del Xe-133, el equilibrio se logra recién al final de 24 h. Generalmente se recomienda que el caudal del sistema de ventilación de emergencia sea uno o dos órdenes de magnitud por debajo del sistema de ventilación normal. Es determinante el diseño del sistema de extracción de emergencia, en particular para este grupo y su impacto radiológico a corto plazo.
- Para el grupo de los yodos, se observa que a mayor velocidad de deposición, más rápidamente se logra el equilibrio, por otro lado la variación de este parámetro genera variaciones de casi un orden de magnitud en la actividad fuera del confinamiento, en particular en el sistema de ventilación de emergencia. El isótopo dominante para este grupo es el I-134, sin embargo este tiene una vida media corta, 52.5m. Seguido está el I-133, el cual tiene una vida media de 20.8 h, además es relevante radiológicamente, de igual manera el I-131.
- En el caso de los aerosoles, es importante tener un criterio para tomar un valor de velocidad de deposición, que depende del tamaño de partícula, ya que la velocidad de deposición depende fuertemente de este parámetro. Generalmente en la bibliografía se recomiendan valores de 2 a 3 μm . Se observan apreciables cambios en el valor de la actividad para diferentes caudales de extracción, y velocidad de deposición, siendo notable en el Te-132.

6. AGRADECIMIENTOS

La autora agradece por su motivación, cooperación y hacer posible este trabajo al Dr. Valentín Lolich (IB-IAEA) Dr. Benji Steynberg (NECSA-SAFARI 1). Siendo igual de importante el apoyo de mi familia, a quienes no puedo dejar de mencionar.

7. REFERENCIAS

1. International Atomic Energy Agency. “Derivation of the Source Term and Analysis of the Radiological Consequences of Research Reactor Accidents” Safety Reports Series, N°53, IAEA, Viena (2008).
2. Sana Ullahb, Saeed Ehsan Awana, Nasir M. Mirzaa, Sikander M. Mirzaa, “Source term evaluation for the upgraded LEU Pakistan Research Reactor-1 under severe accidents”, *Nuclear Engineering and Design*, **Vol 240**, pp. 3740–3750 (2010).
3. Khurram Mehboob , Cao Xinrong and Majid Ali, “Modeling and Simulation of Release of Radiation in Flow Blockage Accident for Two Loops PWR”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, pp 2895-2903 (2012).
4. ORNL-NSIC-4, “Behavior Of Iodine In Reactor Containment Systems”, Oak Ridge National Laboratory (1965)
5. V.N. Piskunov, “Parameterization of aerosol dry deposition velocities onto smooth and rough surfaces”, *Aerosol Science*, **Vol 40**, pp 664-679 (2009).
6. “National Nuclear Data Center” <http://www.nndc.bnl.gov/chart/> (2013).