

# Control de procesos mediante tecnologías de diagnóstico isotópico

*Celso Vargas*<sup>1</sup>  
*Oscar Chaverri*<sup>2</sup>  
*Bruno Chiné*<sup>3</sup>  
*Mario Conejo*<sup>4</sup>

## Palabras clave

Radiaciones ionisantes, aplicaciones industriales, usos pacíficos.

## Introducción

La cooperación con el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) ha sido fundamental en nuestra institución para promover el uso pacífico de la tecnología nuclear, especialmente en las aplicaciones industriales. Este año se cumplen 17 años de cooperación permanente entre dicho organismo y la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Desde el 2003 y hasta el 2005, ha estado en desarrollo un proyecto de dotación de capacidad, orientado a la formación de profesionales y equipamiento para la utilización de dos importantes tecnologías de diagnóstico isotópico. La primera de ellas, la tecnología de trazadores, explota las propiedades únicas que presentan

distintos isótopos radiactivos como fuentes abiertas. La segunda, conocida como escaneo o perfilaje gamma, utiliza fuente selladas, de la misma naturaleza que las anteriores, para obtener perfiles en diferentes procesos y determinar así su condición interna y funcionamiento.

Ambas tecnologías utilizan isótopos de muy baja actividad y energía, lo que hace que su utilización sea bastante segura desde el punto de vista del personal, ocupacionalmente expuesto, y del ambiente. Los sistemas de detección con los que actualmente se cuenta tienen una gran versatilidad y sensibilidad que pueden detectar trazas o cuentas del orden de partes por millón. Esto permite la utilización de cantidades muy pequeñas del isótopo, lo cual hace aún más fácil y segura su manipulación.

El objetivo de este artículo es presentar ambas tecnologías, sus beneficios y, por supuesto, promover su utilización en el país. En la primera sección, introducimos

- 
- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [celvargas@itcr.ac.cr](mailto:celvargas@itcr.ac.cr).
  - 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [ochaverri@itcr.ac.cr](mailto:ochaverri@itcr.ac.cr).
  - 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [bchine@itcr.ac.cr](mailto:bchine@itcr.ac.cr).
  - 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [mconejo@itcr.ac.cr](mailto:mconejo@itcr.ac.cr).

la tecnología de trazadores y, en la segunda, el perfilaje gamma.

## Tecnología de trazadores

Cada año se realizan a escala mundial miles de ensayos con trazadores en

campos tan diversos como la industria química, la industria del papel y pulpa de celulosa, la industria del petróleo, la industria del cemento, la industria metalúrgica, la industria de la energía, la industria mineral, la industria automovilística y la ingeniería sanitario-ambiental. Son ampliamente utilizados en procesos y fases como los siguientes: detección y localización de fugas no determinables mediante inspección directa, control de procesos, incluyendo, distribución de tiempos de residencia de materiales en distintas etapas de un proceso, optimización de mezclas, balances de masa; distribución de flujos de recirculación y volúmenes muertos; medición de gases y flujo de líquidos. En las figuras N.º 1 y 2 se muestran algunos de los procesos indicados anteriormente.

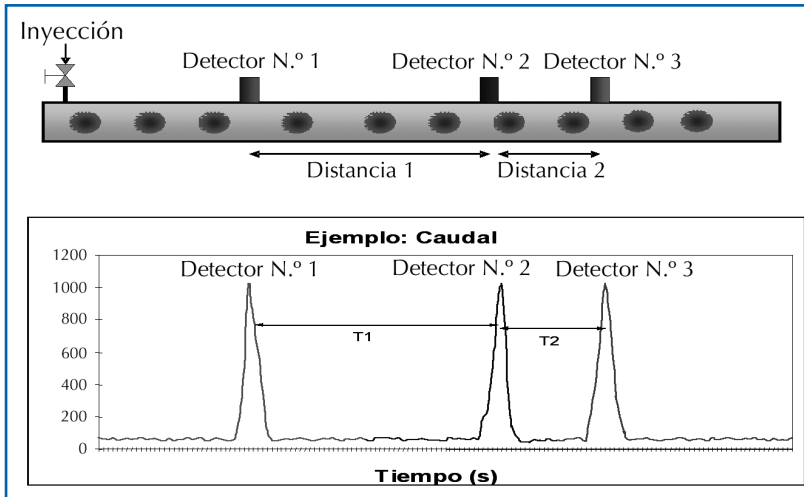


Figura N.º 1. Ejemplo de una determinación de caudal en tuberías.

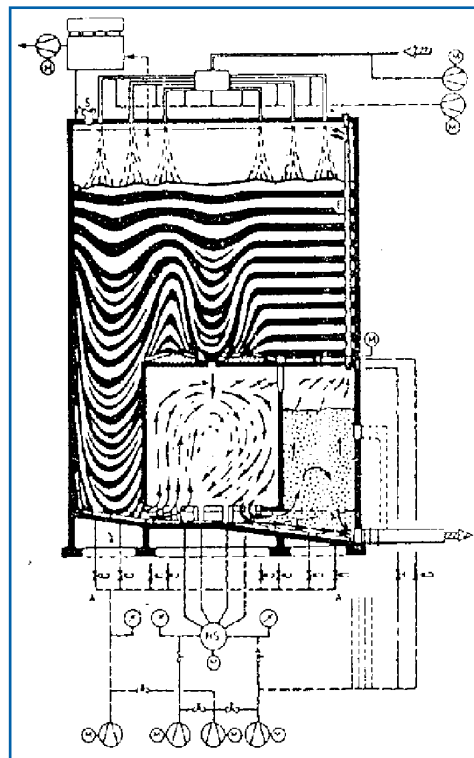


Figura N.º 2. Determinación de la eficiencia de un mezclador.

## Concepto de trazador

Un trazador es un elemento que se incorpora a un sistema; es decir, en un espacio en el que se encuentra una población determinada, con el propósito de obtener información sobre el comportamiento de esa población dentro del sistema. Por población se entiende un conjunto de elementos que interactúan dentro del sistema en cuestión. Dado que interesan los usos industriales, un sistema puede ser un proceso, una fase, un flujo, etc., y la población puede contener elementos líquidos, sólidos o gaseosos, o una mezcla de ellos. El método de los trazadores es, por tanto, esencialmente un medio de marcar.

Un trazador para que sea adecuado al sistema por marcar, debe cumplir con varias características, las principales son las siguientes:

- debe comportarse de manera similar al material marcado. En algunos casos, se exige que se comporte de manera idéntica.
- debe poderse detectar a muy bajas concentraciones.

- c) debe poderse detectar de manera inequívoca. Esto significa que en muchos casos el trazador no puede ser uno de los elementos del sistema (conocido como *background*), pues alteraría la información sobre este.
- d) el trazador que se utilice no debe alterar el sistema. Es decir, el trazador debe ser químicamente compatible con la población por marcar.

Ahora bien, los trazadores pueden clasificarse en tres grandes categorías: Estables (es decir, no radiactivos), activables (estables, pero que puede convertirse en radiactivos) y los trazadores propiamente radiactivos.

Los isótopos radiactivos constituyen la mejor opción para utilizarlos como trazadores. Nuestro país no cuenta con reactores y otra infraestructura para la producción de isótopos radiactivos, sino que se deben importar. En algunos casos, el trazador tiene un periodo de semidesintegración muy corto, lo que hace que la realización de ensayos presente algunos problemas. Sin embargo, este no es un problema grave.

En la selección del trazador es muy importante atender a los siguientes aspectos:

- a) **El período de semidesintegración del isótopo.** La vida media de un isótopo es fundamental en todas las aplicaciones con trazadores. Debe seleccionarse con sumo cuidado, dependiendo del proceso o etapa por investigar. En aquellos casos en los que la duración del proceso sea bastante corto, debe utilizarse un isótopo con vida media igualmente corta. Es importante, además, que se considere el tiempo requerido para la preparación del ensayo, la inyección del trazador, la toma de muestras y el análisis de estas.
- b) **La actividad específica del trazador.** Es igualmente importante

conocer la actividad del material radiactivo por utilizar, así como hacer las estimaciones correspondientes al resultado de la dilución del material dentro de la población total.

- c) **El tipo de radiación.** El tipo de radiación juega un papel fundamental en los trazadores. Los isótopos emisores de rayos alfa, casi no tienen aplicaciones como trazadores, lo mismo se aplica para los isótopos que emiten radiación beta, debido, principalmente, a su poca capacidad de detección. En este sentido, es adecuado seleccionar uno que emita radiación gamma. Sin embargo, en algunos casos se pueden considerar emisores de otro tipo de radiación, aunque esta sea una de las últimas opciones.
- d) **Energía de la radiación.** La selección del isótopo, y por consiguiente de la energía por utilizar, depende de varios factores: de las características del sistema por investigar, de la población presente en este, de los blindajes, recursos de protección radiológica disponibles y de los instrumentos de detección disponibles.
- e) **Tipo de trazador: químico o físico.** La selección de un trazador químico dependerá enteramente de las características del sistema por investigar. Sin embargo, en muchos casos puede utilizarse uno que sea físicamente compatible con la población del sistema. En el cuadro de la página siguiente se incluyen los isótopos más frecuentemente utilizados en las aplicaciones industriales.

En resumen, los radiosótopos utilizados como trazadores presentan una serie de ventajas, entre las que se incluyen su alta sensibilidad a la detección, una gran diversidad de isótopos disponibles para las distintas aplicaciones, pueden

Cuadro N.º 1. Radiotrazadores más frecuentemente utilizados en la industria.

Isótopo	Vida Media	Radiación y energía (MeV)	Forma química	Trazado de Fase
Tritio (Hidrógeno-3)	12,6 años	$\beta$ :0,018 (100%)	Agua tritiada	Acuosa
Sodio-24	15 horas	$\gamma$ :1,37 (100 %) 2,75 (100 %)	Carbonato de sodio	Acuosa
Bromo-82	36 horas	$\gamma$ : 0,55 (70 %) 1,32 (27 %)	Bromuro Amonio, p-dubromobenceno, dibromofenil	Acuosa Orgánico Orgánico
Lantano-140	40 horas	$\gamma$ :1,16 (95 %) 0,92 (10 %) 0,82 (27 %) 2,54 (4 %)	Cloruro de Lantano	Sólido absorbido
Oro-198	2,7 días	$\gamma$ :0,41(99 %)	Ácido Cloroaúrico	Sólido absorbido
Mercurio-197	2,7 días	$\gamma$ :0,077 (19 %)	Mercurio metal	Mercurio
Mercurio-203	46,6 días	$\gamma$ :0,28 (86 %)	Mercurio metal	Mercurio
Yodo-131	8,04 días	$\gamma$ :0,36 (80 %) 0,64 (9 %)	Yoduro de Potasio o Yoduro Iodobenceno	Acuosa Orgánico
Molibdeno-99	67 horas	$\gamma$ :0,184 (4.5 %) 0,74 (10 %) 0,78 (4 %)	Molibdato de sodio	Acuosa
Tecnecio-99m	6,02 horas	$\gamma$ :0,14 (90 %)	Pertecnato de Sodio	Acuosa
Escandio-46	84 días	$\gamma$ :0,89 (100 %) 1,84 (100 %)	Óxido de Escandio	Sólido (partículas)
Kriptón-85	10,6 años	$\gamma$ :0,51 (0.7 %)	Kriptón	Gases
Kriptón-79	35 horas	$\gamma$ :0,51 (15 %)	Kriptón	Gases
Argón-41	110 minutos	$\gamma$ :1,29 (99 %)	Argón	Gases

Fuente: Griffith (2000).

ser utilizados para marcaje químico o físico; la detección puede realizarse in situ, y una gran ventaja no mencionada anteriormente, es que la detección es independiente de factores como temperatura, presión, etc.

### Metodología de aplicación

De acuerdo con lo propuesto en IAEA (1990), la metodología de los trazadores se compone de tres partes principales: la preparación del experimento, la implementación de este, y el análisis de los resultados. Cada una de estas etapas es compleja en el sentido de

que requiere tomar en consideración diferentes aspectos; los principales son analizados a continuación de manera breve.

### Preparación del experimento

En la preparación del experimento, son fundamentales las siguientes etapas:

- Análisis del problema y la selección de la técnica de trazador.** En esta etapa se toma en consideración aspectos económicos relacionados con el problema en análisis, así una evaluación de las alternativas al uso de trazadores radiactivos. Siempre

que existan alternativas y que presenten ventajas desde el punto de vista económico, ambiental y humano.

- b) **Selección del trazador.** La selección del trazador requiere una serie de consideraciones como: elementos presentes en el sistema en análisis (esto se hace con el propósito de utilizar un isótopo que no esté presente en el sistema en aquellos casos en los que esto es posible), tipo de trazador por utilizar y cuando el proceso presenta más de un medio (líquido, sólido o gaseoso) es importante decidir cuál es el medio más adecuado para hacer el experimento, o si se requiere considerar todos los medios en cuyo caso, hay que seleccionar los respectivos trazadores
- c) **Selección del o los puntos de inyección, medición, y técnicas de adquisición y evaluación de la información.** Desde este concepto se quiere indicar si la inyección será de manera instantánea o continua o cualquier otra modalidad que se desee. Cuando el tiempo de inyección es menor o igual al 3% del tiempo total que dura el material en el sistema, se puede considerar como inyección instantánea.
- d) **Evaluación y optimización de las actividades.** Dos aspectos principales deben ser utilizados como marco para la selección del trazador y la optimización de las actividades. El primero de ellos se refiere a la sensibilidad de los instrumentos de detección por utilizar. Este primer criterio establece la cota inferior o mínima posible, es decir, la actividad del isótopo trazador debe ser suficiente para permitir un rango de detección confiable. Finalmente, lo anterior debe establecerse a partir de una adecuada comprensión del proceso

por medir. Sin esta comprensión, las posibilidades de error son muy altas.

- e) **Consideraciones de protección radiológica.** Desde el punto de vista de los trabajadores y del público, la protección radiológica adquiere la pauta principal por tener en cuenta durante cualquier ensayo por trazadores.

### *Implementación de la prueba*

En el proceso de implementación, es fundamental tomar en consideración varios elementos o etapas, cada uno de los cuales son complejos. Por limitaciones de espacio, se hará referencia únicamente a aspectos generales. Son tres las etapas principales que tienen que ser tomadas en consideración:

- a) **Preparación del material trazador.** Una vez seleccionado el trazador, se debe proceder a su preparación, y conocer los distintos métodos aplicables para la preparación en materiales sólidos, en sistemas acuosos, en materiales orgánicos o en materiales gaseosos, así como las restricciones, dependiendo de la población que compone el sistema.
- b) **Sistemas de manejo del material trazador, inyección y muestreo.** De especial interés aquí es tomar en consideración las regulaciones internacionales establecidas para el transporte de materiales radiactivos, aspectos relacionados con la identificación del vehículo, características del vehículo, ubicación del material. Es importante conocer las regulaciones nacionales en relación con estos aspectos, y hacer una lista de los requisitos, de manera que se garantice que se cumplan todos los requisitos relevantes. De igual importancia son las consideraciones sobre los equipos para el manejo e inyección del material radiactivo.

c) **Detección de la radiación y medición.**

El proceso de detección-medición contempla las siguientes fases: detección de la radiación, procesamiento de las señales, adquisición de datos, almacenamiento, presentación de los datos y evaluación.

**Evaluación de los datos**

En relación con la evaluación de los datos, los siguientes pasos son necesarios:

1. Estimar el tiempo de decaimiento del material radiactivo utilizado como trazador.
2. Eliminar la radiación del *background*; es decir, de los materiales radiactivos presentes en el sistema. Es necesario restar a los datos esta información con el propósito de obtener resultados precisos.
3. Establecer los márgenes de error permitidos, utilizando técnicas estadísticas estándar.
4. Transformar los conteos de radiación en actividad específica, y compararla con los modelos o situaciones ideales descritas, y normalizar los resultados.

**Ejemplo de aplicación de trazadores**

Una de las aplicaciones de radiotrazadores es para determinar la dispersión de líquidos o gases en reservorios geológicos y cuya estructura está formada por lechos porosos. Los campos que emplean este tipo de pruebas incluyen, entre otros, la exploración y dinámica de los pozos petroleros e investigaciones en geotermia. Es indispensable la utilización de modelos matemáticos que permitan describir y eventualmente predecir la dinámica interna de dichos medios. Uno de los modelos más utilizados es el de simulación de procesos de dispersión. Para efectos de este documento nos limitaremos a presentar las características generales de un modelo de dispersión para poner de manifiesto su aplicación.

**Modelo**

El modelo considerado describe el flujo unidimensional, no estacionario, de un trazador en un medio poroso homogéneo de longitud  $L$ . Si  $x \in [0, L]$  es la coordenada espacial y  $t \in [0, T]$  la coordenada temporal, la ecuación de transporte convectiva-dispersiva en la dirección  $x$  es :

$$J(x,t) = -D\partial C(x,t)/\partial x + Cu(x,t) \quad (1)$$

donde  $J(x,t)$  es el flujo de masa de trazador a través de un área  $A$  transversal al eje  $x$  (sección de la capa),  $C(x,t)$  es la concentración del trazador,  $D$  es el coeficiente de dispersión constante y  $u$  es la velocidad *convectiva* constante.

En el caso de una inyección de trazador en  $x = 0$  como pulso de corta duración  $\tau$ , comparado al tiempo total  $T$  del problema, las condiciones iniciales y de borde elegidas, son las siguientes:

$$C(x, t = 0) = 0 \quad (2)$$

$$J(x = 0, 0 < t \leq \tau) = C_0 u \quad (3)$$

$$J(x = 0, t > \tau) = 0 \quad (4)$$

$$\partial C(x = L, t) / \partial x = 0 \quad (5)$$

La condición (2) tipo Dirichlet y (5) tipo Neumann expresan, respectivamente, que la concentración inicial de trazador es nula en el reservorio y que en el borde de salida la concentración del trazador presenta un valor espacial constante. En cambio, las condiciones de borde (3) y (4) fijan, respectivamente, el valor inicial y final del flujo de masa del trazador en el borde donde se realiza la inyección. El valor de concentración inicial de trazador

$C_o$  en  $x = 0$  (figura 3), constante durante la etapa de inyección y variable en los tiempos sucesivos, esta en relación con la masa  $m$  de trazador inyectada mediante la expresión siguiente:

$$C_o = m / \tau u A \quad (6)$$

con una tasa de inyección  $m / \tau$  constante durante el intervalo  $[0, \tau]$ .

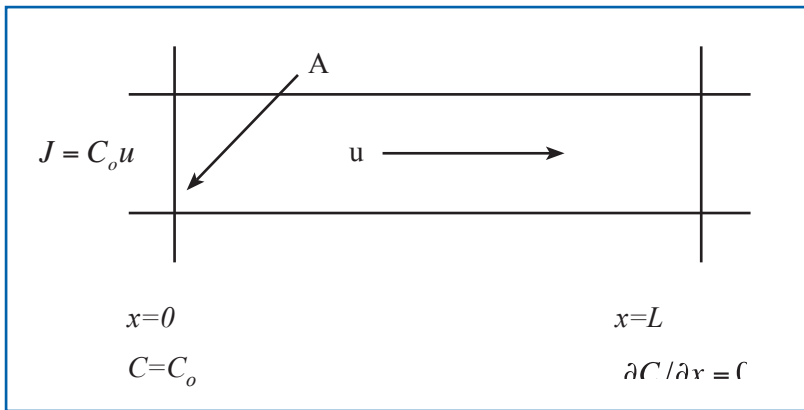


Figura N.º 3. Geometría del modelo, condiciones iniciales y de borde.

Sucesivamente, a partir de la ecuación de conservación de la masa:

$$\partial C(x,t) / \partial t + \partial j(x,t) / \partial x = 0 \quad (7)$$

y de la expresión (1), se obtiene la ecuación de transporte no estacionaria en términos de la variable dependiente  $C$ :

$$\partial C(x,t) / \partial t - D \partial^2 C(x,t) / \partial x^2 + u \partial C(x,t) / \partial x = 0 \quad (8)$$

Finalmente, siempre a partir de (1), se derivan las condiciones de borde (3) y (4) en términos de la misma variable  $C$ :  $t > \tau$

$$-D \partial C(x,t) / \partial x + \mu C(x,t) = C_o u, \quad 0 < t \leq \tau \quad (9)$$

$$-D \partial C(x,t) / \partial x + \mu C(x,t) = 0 \quad 0 < t \leq \tau \quad (10)$$

La ecuación (8) y las condiciones iniciales y de borde (2), (5), (9) y (10) representan el modelo de flujo del trazador.

La investigación demuestra que la condición de borde más favorable es aquella que establece inicialmente el valor del flujo del trazador en el punto de inyección y que, después de la etapa de inyección, se iguala a cero. Los resultados numéricos de la simulación del flujo de trazador reproducen, al variar el número de Peclet, algunos perfiles de concentración obtenidos de manera experimental. Finalmente, se demuestra que el modelo satisface la conservación de la masa en la región de flujo, inclusive en los tiempos inmediatamente sucesivos a la etapa de inyección.

### Tecnología de perfilaje gamma

El perfilaje gamma, como se ha indicado, es la utilización de fuentes isotópicas o fuentes selladas para el diagnóstico de diferentes situaciones que se presentan en distintas plantas. Fue introducida hace ya casi cincuenta años. Durante estos años, esta tecnología se ha impuesto como una de las líderes a escala mundial y que permite a las empresas: ahorrar dinero, mejorar la eficiencia en distintos procesos, reducir los tiempos de parada, planificar reemplazos, mostrar cuando una columna, por ejemplo, puede seguir funcionando o debe pararse, etc.

El rango de aplicaciones es bastante amplio e incluye entre otros, la determinación de la integridad de columnas de destilación, de tanques, de intercambiadores de calor, condensadores, válvulas; determinación de depósitos, niveles de líquidos y malfuncionamiento y otras anomalías en plantas.

El perfilaje gamma utiliza una fuente emisora de radiación gamma y un detector para medir la cantidad de radiación emitida por la fuente. Funciona según el siguiente principio: Dada una actividad

registrada  $I_0$ , sin ningún material interpuesto, determina la actividad  $I$  que se obtiene de interponer un determinado material entre la fuente y el detector.

En este sentido, la nueva actividad  $I = I_0 -$  la energía atenuada por el material interpuesto.

Este material puede ser expresado en términos de tres valores fundamentales: su coeficiente de absorción  $\mu$  (específico para cada material), la densidad del material,  $\rho$  y el grosor del material  $x$ ; es decir, la distancia que debe atravesar la radiación cuando es transmitida.

Este material atenúa de manera exponencial la radiación, en vista de lo cual podemos expresar lo anterior de la siguiente manera:

$$I = I_0 \exp(-\mu\rho x) \quad (11)$$

Así pues, el perfilaje gamma utiliza este como su principio fundamental. Ecuación que comparte con los otros sistemas de control nucleónico. En este sentido, el perfilaje gamma es un tipo particular de sistemas de control nucleónico.

Ahora bien, conociendo cualesquiera dos factores de los indicados (densidad, grosor o coeficiente de absorción), se puede determinar el tercero. Específicamente, los sistemas de control nucleónico requieren que se den los valores de dos de estos parámetros. El perfilaje gamma puede determinar densidades (diferencia entre gases y material sólido o líquido por ejemplo), grosores (diferencias de grosor en las paredes de una columna o tanque) o, finalmente, homogeneización en un determinado material. Dos fuentes isotópicas son ampliamente utilizadas en perfilajes: Co-60 (cobalto 60) y Cs-137 (Cesio-137). El perfilaje consiste, esencialmente, en recorrer una columna o similar, de manera simultánea la fuente y el detector a pequeños intervalos de espacio y durante determinado tiempo

hasta completar el área de interés. En lo que sigue, nos centraremos en una estas aplicaciones: el diagnóstico de columnas.

### Diagnóstico de columnas

Una de las aplicaciones típicas de este tipo de tecnología es la evaluación de la condición de columnas. Estas se agrupan en tres grandes categorías: las columnas con platos particionales; es decir, aquellas en las que algunos de los platos están cortados al centro; aquellos en los que los platos no están divididos, y finalmente, aquellas columnas en las que ciertos materiales están organizados por capas. Estos últimos son conocidos como de “lecho empacado”. Para cada uno de los tipos de columnas, deben estar diferentes arreglos para realizar el perfilaje. Son tres los arreglos principales:

- a) de una única pasada (para columnas con platos no hendidos)
- b) de doble pasada (para columnas con platos hendidos)
- c) de malla (para columnas de lecho empacado)

### Columnas de destilación

Es usual que las columnas de destilación no presenten platos hendidos. Para finalizar esta presentación queremos puntualizar algunos de las causas de malfuncionamiento que pueden detectarse con perfilaje gamma. La ilustración (figura N.º 4) pone de manifiesto una de estas columnas típicas que encontramos en la industria petroquímica.

Un perfilaje gamma para una columna sin platos hendidos se presenta a continuación con su respectivo arreglo.

Los principales problemas que presenta este tipo de columnas son los siguientes:





Figura N.º 4. Ejemplo típico de una columna de destilación.

- a) caída de platos. Como se trata de muchos platos (normalmente entre 20 y 60), resulta muy difícil determinar cuáles platos se han caído. El perfilaje gamma es ideal para realizar este trabajo. La figura 6 ilustra un perfilaje en el que un plato se ha caído.
- b) Inundaciones. Son causadas principalmente por bloqueos en las caídas de los platos debidos a la presencia de materiales que normalmente acompañan los procesos de separación. En este caso, el resultado es que la separación de fases (líquido-vapor, por ejemplo) no se realiza de la manera óptima. Este malfuncionamiento puede ser detectado mediante perfilaje gamma.
- c) Arrastre. Este fenómeno se debe a las limitaciones en la capacidad hidráulica de los materiales. Cuando se rebasa esa capacidad, los procesos de separación no se llevan a cabo de manera eficiente. De igual manera, el perfilaje gamma es adecuado para determinarlo.

Otros problemas como lluvia (relacionada con una deficiencia entre flujos y reflujos) y la presencia excesiva de espuma, son igualmente detectados.

Como se puede observar es una tecnología que presenta muchas ventajas. Desde el punto de vista económico, los ahorros se encuentran en una relación 20: 1. Adicionalmente, dado que usa fuentes pequeñas puede ser utilizada sin ningún riesgo, siempre que se adopten las medidas de seguridad y protección establecidas por la normativa internacional, como en todos los campos laborales.

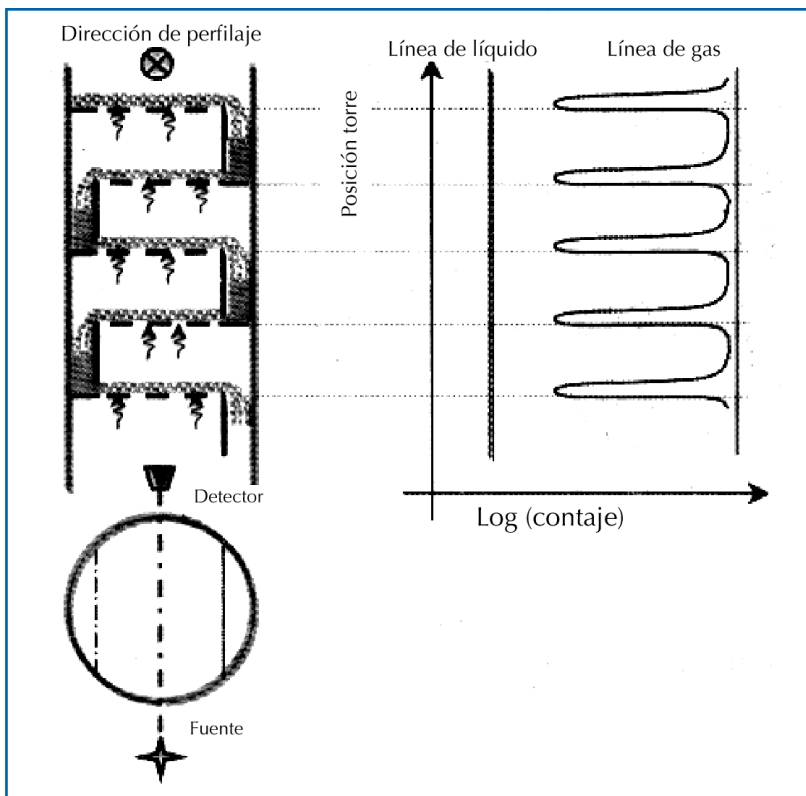


Figura N.º 5. Estructura de una columna sin hendiduras, el perfilaje y el arreglo.

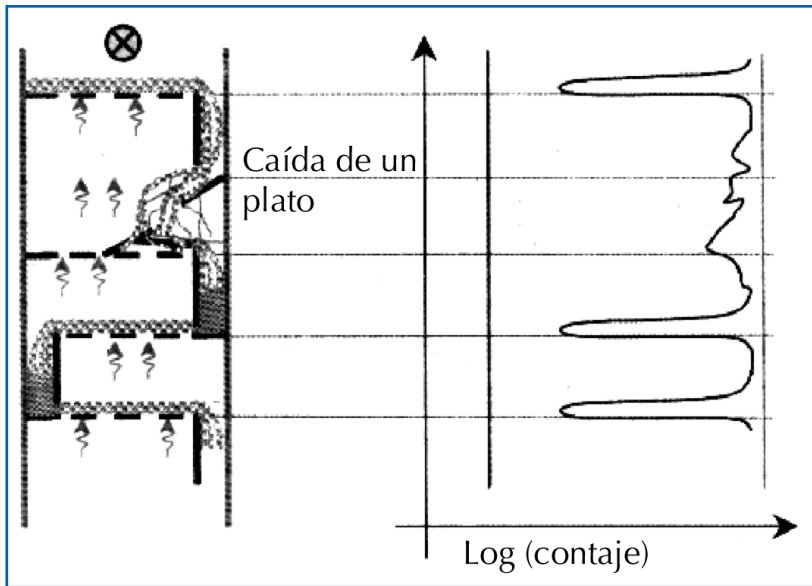


Figura N.º 6. Columna con un plato caído y su respectivo perfilaje.

### Bibliografía

Ahmed, J. (1994) "El radón en el medio humano: Evaluación de la situación". *Boletín del OIEA*, N.º 2, 1994.

Armbruster, P. (1998) "La síntesis de los elementos superpesados". *Investigación y Ciencia*, Noviembre, 1998.

Griffith, J. (2000) *Manual de tecnología de trazadores*. La Habana, Cuba.

Hills (1998) *Practical Guidebook for Radioisotope-based Technology in Industry*. IAEA, Vienna.

IAEA (1990) *Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry*. Vienna.

\_\_\_\_\_ (1996) *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Vienna.

IAEA (1998) *Practical Guidebook for Radioisotope-based Technology in industry*. Vienna.

Johansen and Jackson (2004) *Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements*. John Wiley and sons Ltd. England.

Maggio y otros (2000) *Aplicaciones industriales de radiotrazadores y fuentes selladas de radiación*. IAEA, Vienna.

Wahlström, B. (1998) *Radiation, Health and Society*. International Atomic Energy