

PROCEEDINGS SERIES

# THE DOSE LIMITATION SYSTEM IN THE NUCLEAR FUEL CYCLE AND IN RADIATION PROTECTION

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM  
ON THE APPLICATION OF THE DOSE LIMITATION SYSTEM  
IN NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES  
AND OTHER RADIATION PRACTICES

SPONSORED BY  
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
WORLD HEALTH ORGANIZATION  
OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY  
INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION  
AND HELD IN  
MADRID, 19–23 OCTOBER 1981

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
VIENNA, 1982

THE DOSE LIMITATION SYSTEM IN THE NUCLEAR FUEL CYCLE  
AND IN RADIATION PROTECTION

IAEA, VIENNA, 1982

STI/PUB/599

ISBN 92-0-020182-2

© IAEA, 1982

Permission to reproduce or translate the information contained in this publication may be obtained by writing to the International Atomic Energy Agency, Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria.

Printed by the IAEA in Austria  
July 1982

# EJEMPLOS DE OPTIMIZACION DE LA PROTECCION RADIOLOGICA EN EL DISEÑO Y LA EXPLOTACION

A.J. GONZALEZ, E. PALACIOS, A. CURTI,  
O. AGATIELLO, J. MAJCHRZAK  
Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Buenos Aires,  
Argentina

## Abstract-Résumé

### EXAMPLES OF RADIATION PROTECTION OPTIMIZATION IN DESIGN AND OPERATION.

The practical use of the requirement of optimization of radiological protection is presented. Application examples for designing ventilation systems and for maintenance operations of nuclear plants are given. A method is developed for the application of the optimization requirement to the design of ventilation systems in contaminated environments. Representative values of the main parameters are presented and their relevant features are discussed. A practical example shows actual results for a radioisotope production plant. Causes influencing collective doses incurred by the workers during maintenance operations are analyzed. A method is presented for the optimization of both the level of training of personnel and the apportionment of individual doses. As an example, this methodology is applied to the maintenance operations in a nuclear power plant.

### EJEMPLOS DE OPTIMIZACION DE LA PROTECCION RADIOLOGICA EN EL DISEÑO Y LA EXPLOTACION.

Se presenta el uso práctico del requerimiento de optimización de la protección radiológica y se ejemplifica su aplicación en el diseño de sistemas de ventilación y en operaciones de mantenimiento de centrales nucleares. Se desarrolla un método para la aplicación de los requerimientos de optimización al diseño de sistemas de ventilación en ambientes contaminados. Se presentan los valores representativos de los principales parámetros y se discuten sus características relevantes. Un ejemplo práctico muestra resultados reales para una planta de producción de radisótopos. En lo referente a operaciones de mantenimiento, se analizan las causas que influyen sobre la dosis colectiva incurrida por los trabajadores. Se presenta un método para la optimización del grado de entrenamiento del personal y el fraccionamiento de las dosis individuales. Como ejemplo, se aplica esta metodología a las operaciones de mantenimiento de una central nuclear.

## 1. INTRODUCCION

Se presenta aquí una metodología para optimizar la protección radiológica mediante el diseño de sistemas de ventilación de ambientes contaminados y se ejemplifica la misma optimizando los parámetros relevantes en un proyecto de

ventilación para una planta de producción de radisótopos. También se expone un procedimiento para optimizar la protección radiológica en operaciones de mantenimiento de una central nuclear de potencia y se muestran como ejemplo los resultados obtenidos para una central en explotación.

Uno de los requerimientos del sistema de limitación de dosis recomendado por la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones (CIPR) [1] es que las exposiciones a la radiación ionizante deben ser mantenidas tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta factores sociales y económicos. Este requerimiento, adoptado y puesto en ejecución por la autoridad regulatoria argentina [2,3], implica que la protección radiológica en toda práctica u operación debe ser optimizada, incrementándola hasta un nivel tal que cualquier mejora adicional resulte en un esfuerzo social mayor que la protección obtenida. Es decir que, para cumplimentar este requerimiento, la protección debe ser aumentada más allá de lo estrictamente requerido para mantener las dosis<sup>1</sup> individuales por debajo del nivel que fuera seleccionado como margen superior (dentro de los límites de dosis individuales recomendados), para la práctica u operación. El detrimento radiológico remanente deberá reducirse hasta que el costo de un incremento de protección adicional no justifique la reducción marginal de detrimento asociada al mismo.

El detrimento radiológico puede considerarse proporcional a la magnitud de dosis equivalente efectiva colectiva comprometida (que en adelante será llamada dosis colectiva comprometida),  $S$ , siempre que los niveles de dosis sean suficientemente bajos como para asegurar la prevención de efectos no estocásticos y otros efectos no sanitarios derivados de la dosis de radiación [5]. El proceso de optimización de la protección se lleva necesariamente a cabo dentro de niveles de dosis que deben estar por debajo de los márgenes superiores indicados, los que a su vez son menores a los límites de dosis individuales. Por lo tanto, bajo la limitación antedicha, los efectos no estocásticos resultan automáticamente prevenidos y es poco probable que incurran efectos no sanitarios significativos. Es decir que, en evaluaciones de optimización, se puede utilizar la modificación del nivel de  $S$  que resulta de un cambio de nivel de protección, como medida del cambio en el detrimento total incurrido por esa modificación de la protección.

La optimización de la protección requiere un balance entre niveles de costos de protección y de detrimento (o dosis colectiva comprometida) asociado. Estas magnitudes generales se expresan en unidades distintas por lo que, para llevar a cabo el balance, se requiere una normalización. Una manera de hacerlo es expresar el detrimento en términos monetarios. Para ello, se suele utilizar una constante de conversión,  $\alpha$ , que representa la valorización monetaria de la unidad de dosis colectiva (el producto  $\alpha S$  representa el valor monetario del detrimento,  $Y$ , resultante de  $S$ ).

---

<sup>1</sup> En este trabajo, el término "dosis" se utiliza con el significado de "dosis equivalente efectiva" [4].

Optimizar la protección significa, en términos matemáticos, minimizar la suma de las variables involucradas que son: el costo de la protección, y el valor del detrimento. Si  $X$  y  $S$  fueran funciones continuas del nivel de protección (caracterizado por una variable  $\omega$ ), la minimización de la función  $X + Y$  puede obtenerse derivándola respecto de la variable independiente,  $\omega$ , e igualando el resultado a cero. El nivel de protección óptimo se obtendrá para un valor de  $\omega_0$ , tal que

$$\left. \frac{dx}{d\omega} \right|_{\omega_0} = - \alpha \left. \frac{dS}{d\omega} \right|_{\omega_0} \quad (1)$$

La expresión (1) es la ecuación básica que expresa matemáticamente la condición de optimización de la protección radiológica. Esta ecuación será utilizada en los ejemplos presentados en este trabajo.

## 2. OPTIMIZACION DE LA PROTECCION RADIOLOGICA MEDIANTE LA VENTILACION DE LOS AMBIENTES CONTAMINADOS

Siempre que existe la posibilidad de contaminación proveniente de una fuente de material radiactivo, se utilizan técnicas de protección radiológica tendientes a disminuir la potencial incorporación humana del contaminante; las técnicas de protección usuales son el confinamiento de la fuente contaminante y, eventualmente, la limpieza del ambiente contaminado. El confinamiento puede ser: a) estático, interponiendo barreras físicas entre la fuente y el ambiente de trabajo (p.ej. cajas de guantes); b) dinámico, mediante una circulación de aire desde la zona no contaminada hacia las de mayor contaminación (p.ej. campanas radioquímicas); o, c) mixto, manteniendo la fuente dentro de un recinto estanco que a su vez se encuentra a depresión con el ambiente exterior. A pesar del alto nivel alcanzado por la tecnología de confinamiento del material radiactivo, no se puede impedir que una fracción (generalmente pequeña) del inventario radiactivo disponible se incorpore a los ambientes de trabajo contaminados. Cuando la actividad que pasa al ambiente es significativa, se utiliza la ventilación para limitar la concentración de material radiactivo en el ambiente y, consecuentemente, la incorporación humana de una fracción de ese material y las dosis que se incurrirían subsecuentemente.

### 2.1. Determinación del costo de la protección radiológica cuando se emplean sistemas de ventilación

Los costos de ventilación incluyen el costo de capital del propio sistema y de su instalación, y el costo esperado de la operación del sistema. En general, el costo de operación es predominante [5], especialmente si el sistema requerido no es

excesivamente grande y si no requiere grandes inversiones estructurales para su instalación. El costo crudo de operación (es decir, la suma total de los costos de operación en el tiempo sin ningún ajuste contable ni por descuento ni por composición de intereses) está formado básicamente por el costo de la energía necesaria para circular y eventualmene acondicionar el aire. Cuando el acondicionamiento no es necesario, el costo total de operación debido al movimiento del aire,  $X_m$ , es:

$$X_m = a b Q f_t T \quad (2)$$

donde  $a$  es el costo de la unidad de la energía que se utiliza para mover el aire

$b$  es la potencia que requiere el sistema para mover una unidad de caudal de aire

$Q$  es el caudal del aire que circula por el sistema de ventilación

$f_t T$  representa el tiempo de operación del sistema, siendo  $f_t$  la fracción de tiempo durante el cual opera el sistema y  $T$  su vida útil.

Cuando se trata de instalaciones que requieren acondicionamiento de aire, resultará necesario adicionar el costo de la energía necesaria para calentar o enfriar el aire que circula por el sistema. El valor del nuevo componente,  $X_a$ , resulta de la siguiente expresión:

$$X_a = a_c c \eta \tau Q f_t T \quad (3)$$

donde  $a_c$  es el costo de la unidad de energía que se utiliza para acondicionar el aire

$c$  es la potencia requerida para acondicionar una unidad de caudal de aire por unidad de diferencia de temperatura de aire (en el Cuadro I se presentan algunos valores típicos)

$\eta$  es la fracción del caudal de aire que requiere acondicionamiento

$\tau$  es la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada de aire al sistema de acondicionamiento.

Si el sistema de ventilación incluyera además una etapa de descontaminación de aire, habrá que agregar a los costos de circulación y acondicionamiento un componente relacionado con la etapa de descontaminación. El valor de este componente,  $X_d$ , puede ser expresado con la siguiente expresión:

$$X_d = \delta \epsilon Q f_t' T + X_1 \quad (4)$$

donde los nuevos parámetros son:

$\delta$  costo de cada unidad de descontaminación (p. ej., costo de una unidad filtrante)

$\epsilon$  frecuencia de reemplazo de cada unidad de descontaminación

$X_1$  costo de la instalación de descontaminación.

En algunos casos, el costo de capital del sistema de ventilación no es despreciable frente a los costos operativos. Los casos más comunes son los de

# CUADRO I. POTENCIA REQUERIDA PARA ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

| Tipo de calefactor    | Potencia requerida para calefaccionar la  |                                                                    |
|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                       | unidad de caudal                          | $\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ |
| Gas natural           | $\frac{9000 \text{ kcal}}{\text{m}^3}$    | $33 \times 10^{-5}$                                                |
| Gas envasado          | $\frac{22\,200 \text{ kcal}}{\text{m}^3}$ | $32 \times 10^{-5}$                                                |
| Resistencia eléctrica |                                           | $21 \times 10^{-5}$                                                |

instalaciones que requieren sistemas de distribución de aire complejos y de ventilación forzada de viviendas donde los caudales de aire requeridos (y el correspondiente costo operativo) suelen ser muy bajos. En esos casos hay que adicionar un nuevo componente al costo de ventilación: el costo de capital,  $X_c$ , del mismo sistema. Este costo puede representarse como una función discontinua del caudal, tal que:

$$X_c = g_{Q_i}(Q) \quad (5)$$

donde  $g_{Q_i}(Q)$  es una función de  $Q$  con discontinuidades (en general en forma de escalón) para distintos valores  $Q_i$ , cada uno de ellos representando caudales para los cuales ocurre un cambio importante en la instalación (p. ej., un cambio de ventilador o motor).

Si bien en un proceso de optimización formal debería utilizarse como costo de protección la suma de las Ecs. (2) a (5), en muchos casos prácticos el costo de operación incurrido para mover el aire es suficientemente representativo del costo de protección. En el ejemplo presentado en esta sección se ha utilizado esta simplificación.

## 2.2. Determinación de S debida a la contaminación remanente en un ambiente ventilado

La dosis colectiva comprometida  $S$  incurrida por los individuos que permanecen en un ambiente ventilado es proporcional a: a) la concentración remanente de material radiactivo (siendo ésta, a su vez, directamente proporcional a la tasa de

material radiactivo que se incorpora continuamente al ambiente por deficiencias en el confinamiento de las fuentes de material radiactivo, e inversamente proporcional al caudal de ventilación); b) la tasa de dosis por unidad de concentración remanente; c) el número de individuos expuestos a la contaminación; y, d) el tiempo de exposición

$$S = N F_d f_t' T \frac{\dot{A}}{Q} \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de individuos expuestos

$F_d$  es el factor dosimétrico promedio (es decir, la tasa de dosis por unidad de contaminación de material radiactivo)

$\dot{A}$  es la tasa de incorporación de material radiactivo al ambiente

$f_t' T$  es el tiempo promedio de exposición, siendo  $f_t'$  el factor ocupacional (que puede asumirse similar a la fracción de tiempo de operación) y  $T$  la vida útil de la instalación.

### 2.3. Optimización de los niveles de control mediante la ventilación

En las secciones precedentes se han determinado las expresiones simplificadas del costo de protección,  $X$ , y de  $S$ , como funciones continuas de  $Q$ , que, en este caso, se emplea como parámetro de protección. Derivando estas expresiones respecto de  $Q$  y reemplazando en la expresión (1), se obtiene la expresión del caudal optimizado,  $Q_0$ , para esas condiciones simplificadas

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{ab}} N F_{di} \dot{A} \quad (7)$$

En general se puede modificar la dosis colectiva comprometida  $S$  incurrida, modificando independientemente el caudal de ventilación o las condiciones de confinamiento de la fuente contaminante. Esta independencia permitiría aplicar el procedimiento de optimización por separado a ambos sistemas de control. Sin embargo, se debe destacar que para muchos casos prácticos, la optimización de la protección radiológica modificando la ventilación puede no tener sentido si previamente no se realiza un estudio similar con relación al confinamiento de la fuente contaminante dado que la efectividad de esta última técnica es generalmente mucho mayor que la primera.

### 2.4. Discusión sobre algunos de los parámetros empleados

La expresión del caudal de aire optimizado, Ec. (7), requiere el uso de varios parámetros cuya determinación puede presentar problemas. En esta subsección, se discuten algunos de esos problemas y se indican valores representativos de los citados parámetros.

CUADRO II. COSTO DE LA UNIDAD DE ENERGIA (en mill/kW · h)<sup>a</sup>

| Tipo de energía                                  | Consumo |       |      |
|--------------------------------------------------|---------|-------|------|
|                                                  | Bajo    | Medio | Alto |
| Energía eléctrica distribuida por redes          | 49      | 42    | 33   |
| Energía eléctrica generada localmente            | 66      | 62    | 59   |
| Gas natural (por redes) 9000 kcal/m <sup>3</sup> | 7,7     | 5,8   | 5,1  |

<sup>a</sup> 1 mill = 10<sup>-3</sup> dóls. = 0,1 ¢.

#### 2.4.1. Costo de la unidad de energía

El costo de la unidad de energía, *a*, es un parámetro que depende del tipo de energía que utilice el sistema de ventilación y del lugar geográfico donde se requiere su utilización [6,7]. Por otra parte, las empresas distribuidoras imponen un precio que varía en forma escalonada con el consumo. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de ventilación utilizan energía eléctrica en una cantidad que es, por lo general, pequeña frente al consumo total de la instalación nuclear donde opera el sistema. En estos casos, el costo de la unidad de energía puede ser considerado constante e independiente del consumo y, por lo tanto, del caudal de ventilación. En el Cuadro II se presentan valores medios de costo para diferentes tipos de energía, válidos para la Argentina.

#### 2.4.2. Potencia requerida para mover una unidad de caudal de aire

La potencia requerida para mover la unidad de caudal de aire, *b*, depende de la pérdida de carga de la instalación, *H<sub>v</sub>*, la cual, a su vez, es función del cuadrado de la velocidad del aire *y*, por lo tanto, del cuadrado del caudal, *Q*<sup>2</sup>. Sin embargo, cuando se proyecta una instalación de ventilación para una vida útil dada, es necesario adoptar una velocidad de diseño que minimice el costo de instalación y operación para un caudal dado, y que además mantenga los niveles de ruido en los locales de trabajo dentro de valores aceptables. En este caso, la pérdida de carga de la instalación es constante y, por lo tanto, resultan valores de *b* (mínimos), también constantes. En la Fig. 1 se presentan valores de *b* para ser utilizados en el diseño de instalaciones industriales y laboratorios, en función de la pérdida de carga total de la instalación [8,9].

Si en la instalación de ventilación se incorporaran etapas de filtros con la finalidad de descontaminar el aire, la pérdida de carga en función del tiempo ya no sería constante, aun en el caso de que el caudal *Q* no variara. Generalmente, estas

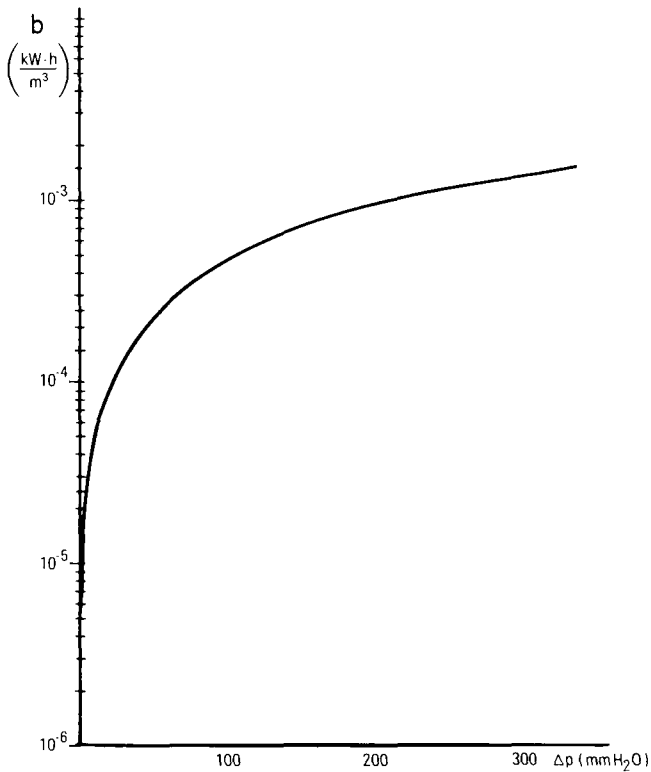


FIG.1. Potencia requerida para mover la unidad de caudal de aire en función de la pérdida de carga de la instalación  $\Delta p$ .

instalaciones se diseñan para reemplazar los filtros cuando su pérdida de carga alcanza 2 ó 4 veces la pérdida de carga inicial. En estos casos, el valor de  $b$  variará linealmente con el aumento de la pérdida de carga de toda la instalación, pudiéndose utilizar un valor de  $b$  ponderado sin introducir errores significativos en la estimación. En este caso, el valor de  $b$  deberá ser seleccionado del gráfico de la Fig.1 entrando con un valor de  $H = H_v + (\Delta p_i + \Delta p_f)/2$ , donde  $\Delta p_i$  y  $\Delta p_f$  representan la respectiva pérdida de carga inicial y final del filtro.

En el caso de instalaciones existentes donde se desee optimizar la protección radiológica mejorando la ventilación, el valor de  $b$  es fuertemente dependiente de las variaciones del caudal. En estos casos, pasar de una condición de ventilación definida por un caudal  $Q_1$  a otra definida por un caudal  $Q_2$ , significa que la pérdida de carga de la instalación se incrementa en una cantidad proporcional a  $(Q_2^2 - Q_1^2)$ ;  $b$  es directamente proporcional a la pérdida de carga y, por lo tanto, también dependerá cuadráticamente de  $Q$ . En este caso, consecuentemente,  $b$  no podrá ser considerado constante en la Ec. (2), siendo necesario recalcular el valor de  $b$  cada

vez que se modifica el caudal. Se debe destacar, además, que en estos casos de reajustes de instalaciones existentes, también es posible llegar a resultados erróneos en el proceso de optimización de la protección radiológica si no se verifica que

$$X_e \leq X_{on} + X_{cn}$$

donde  $X_e$  es el costo de protección resultante de incrementar el caudal en la instalación existente

$X_{on}$  es el costo de operación de una instalación nueva proyectada para un valor de  $b$  económico

$X_{cn}$  es el costo de la instalación nueva incluyendo el costo de desmontaje y montaje (y el costo que significa mantener la instalación parada durante la reforma).

#### 2.4.3. Tasa de incorporación de material radiactivo al ambiente

La tasa de incorporación,  $\dot{A}$ , depende del nivel de confinamiento de los sistemas (tanques, caja de guantes, bombas, etc.) que contienen material radiactivo y de la forma físico-química en que se encuentre cada nucleido. En general, puede definirse un valor de  $\dot{A}$  para cada tipo de contenedor y para cada nucleido. En la práctica, sin embargo, solo se suele contar con valores promedios medidos en locales típicos de instalaciones características. En el Cuadro III se presentan valores de la tasa de emanación medida en diversos locales de la planta de producción de radisótopos del Centro Atómico Ezeiza, Argentina. El valor de  $\dot{A}$  resulta de multiplicar esa tasa por el inventario radiactivo en cada confinamiento.

#### 2.5. Ejemplo de aplicación del procedimiento de optimización de la ventilación a una planta comercial de producción de radisótopos

El procedimiento de optimización indicado en las secciones precedentes fue aplicado al diseño del sistema de ventilación de una planta de producción de radisótopos. La respectiva evaluación del caudal optimizado se describe a continuación a título de ejemplo. El caso indicado trata de una instalación con diversos locales, cada uno de ellos potencialmente contaminado con varios radionucleidos con tasas de emanación distintas. El número de trabajadores expuestos también es diferente de un local a otro. Resulta necesario, por lo tanto, expandir la Ec. (7), resultando el valor de  $Q_0$  de aplicar la siguiente expresión generalizada:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{ab} \sum_{ij} N_j F_{d_i} \dot{A}_{ij}} \quad (8)$$

donde  $j$  e  $i$  identifican los diferentes locales y las tasas de emanación para los distintos tipos de nucleidos respectivamente.

CUADRO III. TASA DE EMANACION DE LA ACTIVIDAD CONTENIDA EN EL INTERIOR DE LA CELDA

| Tipo de instalación                                                                 | Radisótopo         | Tasa de emanación $\text{h}^{-1}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Recinto de producción                                                               | $^{197}\text{Hg}$  | $3 \times 10^{-8}$                |
| Recinto de producción de moléculas marcadas                                         | $^{131}\text{I}$   | $2 \times 10^{-10}$               |
| Caja de guantes de marcación de proteínas                                           | $^{131}\text{I}$   | $4 \times 10^{-9}$                |
| Recinto de producción                                                               | $^{51}\text{Cr}$   | $2 \times 10^{-7}$                |
| Recinto de producción                                                               | $^{198}\text{Au}$  | $5 \times 10^{-7}$                |
| Caja de guantes de producción de $\text{PO}_4\text{Cr}$ marcado con $^{32}\text{P}$ | $^{32}\text{P}$    | $3 \times 10^{-7}$                |
| Celda de fraccionamiento                                                            | $^{99}\text{Tc}^m$ | $7 \times 10^{-6}$                |
| Celda de producción de generadores                                                  | $^{113}\text{Sn}$  | $3 \times 10^{-9}$                |
| Recinto de producción                                                               | $^{99}\text{Mo}$   | $1 \times 10^{-8}$                |
| Recinto de producción                                                               | $^{99}\text{Tc}^m$ | $2 \times 10^{-8}$                |
| Recinto de producción                                                               | $^{131}\text{I}$   | $2 \times 10^{-10}$               |
| Caja de guantes para fraccionamiento                                                | $^{32}\text{P}$    | $4 \times 10^{-5}$                |
| Recinto de fraccionamiento                                                          | $^{131}\text{I}$   | $5 \times 10^{-9}$                |

Los valores de  $N_i$  y  $\dot{A}_i$  se estimaron a partir de los datos obtenidos de la planta de producción de radisótopos del Centro Atómico Ezeiza. El factor dosimétrico,  $F_{d,p}$ , se evaluó para cada uno de los radionucleidos involucrados, teniendo en cuenta datos de la bibliografía [10,11,4]. El valor que resulta para la sumatoria  $\sum_j N_j F_{d,i} \dot{A}_{ij}$  es  $2,8 \times 10^4 \text{ Sv} \cdot \text{hombre} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-2}$ . Se adoptó un costo de la unidad de energía de 33 mill/kW·h (1 mill =  $10^{-3}$  dóls. = 0,1 ¢). La potencia requerida para mover la unidad de caudal se estimó en  $b = 2,2 \times 10^{-4} \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ . Adoptando un valor de  $\alpha = 10^4 \text{ dóls./Sv} \cdot \text{hombre}$ , el valor de  $Q_0$  que resulta para este ejemplo es  $710 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 3. OPTIMIZACION DE LA PROTECCION RADIOLOGICA EN LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO DE CENTRALES NUCLEARES

Las dosis recibidas por el personal de mantenimiento de una central nuclear dependen de diversos factores, algunos asociados a la fuente de radiación y otros a la forma en que se llevan a cabo las operaciones en la instalación. Entre los

factores asociados a la fuente están las variaciones en el tiempo de las tasas de dosis en las zonas donde se lleven a cabo tareas de mantenimiento y la frecuencia de las paradas que requieren tareas de mantenimiento en el reactor, además de los parámetros clásicos asociados a la protección instalada (p.ej., espesores de blindajes, caudal de ventilación, etc). La *planificación de las tareas de mantenimiento*, el *grado de entrenamiento del personal* y el *fraccionamiento de las dosis del personal especializado* son, por otra parte, algunos de los factores que dependen de la forma como se encaran las operaciones en la central. La optimización de la protección mediante el diseño de parámetros asociados al campo de radiación o contaminación ha sido discutida y ejemplificada en la bibliografía [5,12,13,14] y en este mismo trabajo (véase el capítulo 2). La optimización de los parámetros relacionados directamente con la operación presenta características particulares y será discutida y ejemplificada en esta sección.

### 3.1. Planificación de las tareas de mantenimiento

Dentro de las operaciones de mantenimiento, las que más contribuyen a la dosis colectiva comprometida son aquellas que se realizan cerca del circuito primario del reactor donde las tasas de dosis son relativamente altas. La planificación de estas operaciones, minimizando las horas-hombre necesarias para llevar a cabo la reparación, resulta fundamental para reducir la exposición resultante en los trabajadores. Esta planificación debe ser llevada a cabo conjuntamente por los responsables del mantenimiento y de la radioprotección, antes de iniciar cualquier operación de mantenimiento. La falta de planificación o la planificación ineficiente conducen a incrementar la dosis colectiva sin que los costos de protección se reduzcan significativamente por ese motivo. Un simple proceso intuitivo de optimización indica que la planificación previa es una actividad mandatoria para cumplir con el requerimiento de mantener las dosis tan bajas como resulte razonable, dado que resulta obvio que el detrimento adicional resultante de esta mala práctica no es justificable.

### 3.2. Grado de entrenamiento del personal

Dentro del esquema usual de funcionamiento de las centrales nucleares ocurren paradas programadas y otras no programadas o imprevistas. Estas paradas implican tareas de mantenimiento más o menos importantes y son aprovechadas para realizar exámenes preventivos de diversos componentes del reactor. En general, durante estos períodos se incrementa el personal necesario, a veces de manera imprevista. Por ello, las entidades responsables de la operación de las centrales suelen recurrir a la contratación temporal de trabajadores para hacer frente a las necesidades del momento. Este personal, por no estar debidamente familiarizado con la instalación,

necesita un tiempo para la realización de una tarea dada que suele ser mayor que el que necesitaría un trabajador entrenado para llevar a cabo la misma tarea, incurriendo una dosis proporcionalmente mayor.

Por lo tanto, si se desea reducir la dosis colectiva comprometida adicional debida a la falta de entrenamiento del personal contratado, habrá que incrementar el plantel estable y entrenado de la central y, consecuentemente, los costos de operación. Podría asociarse este costo de capacitación a un verdadero costo de protección dado que, en último término, sólo sirve para disminuir la dosis del personal. Parece razonable, entonces, que el grado de entrenamiento del personal se establezca de manera que la inversión asociada a la disponibilidad de una fracción mayor de personal entrenado se compense con la reducción de la dosis colectiva comprometida que se logra con esa inversión. Cuando este balance se alcance, la protección radiológica de la operación estaría optimizada con referencia al grado de entrenamiento del personal.

Las horas·hombre necesarias para realizar las operaciones de mantenimiento de la central, en función del grado de entrenamiento, resulta:

$$h = \left[ \dot{h}_e e + \dot{h}_c (1-e) \right] T = \left[ \dot{h}_c - (\dot{h}_c - \dot{h}_e) e \right] T \quad (9)$$

donde  $\dot{h}_e$  es la tasa de horas·hombre que se necesitaría si todo el personal fuera entrenado

$\dot{h}_c$  es la tasa de horas·hombre que se necesitaría si todo el personal fuera contratado

$e$  es la fracción de personal entrenado.

La dosis colectiva incurrida durante  $h$  horas·hombre de mantenimiento es:

$$S = \dot{H} h \quad (10)$$

donde  $\dot{H}$  es la tasa de dosis promedio en los lugares donde se llevan a cabo las operaciones de mantenimiento.

El costo de protección en función del grado de entrenamiento se puede expresar como:

$$X = C_e e h + C_c (1-e) h \quad (11)$$

donde  $C_e$  es el costo de la hora·hombre neta de mantenimiento realizada por personal entrenado y,

$C_c$  es el costo de la hora·hombre neta de mantenimiento realizada por personal contratado.

Reemplazando la Ec. (9) en la (10) y (11), derivando las expresiones resultantes respecto de  $e$  y aplicando la expresión (1), se obtiene el valor de  $e_0$  que optimiza la fracción de personal entrenado dentro del plantel de mantenimiento de una central.

$$e_o = \frac{\dot{h}_c (C_e - C_c) - (C_c + \alpha \dot{H}) (\dot{h}_c - \dot{h}_e)}{2 (C_e - C_c) (\dot{h}_c - \dot{h}_e)} \quad (12)$$

### 3.3. Fraccionamiento de las dosis individuales

Una práctica frecuente en las operaciones de reparación y mantenimiento de una central es fraccionar las dosis del personal de mantenimiento altamente especializado para disminuir la posibilidad de que se supere el límite individual de dosis anual, ya que esto provocaría la no disponibilidad de ese personal en futuras intervenciones. Este personal es reemplazado por otros especialistas altamente competentes en sus respectivos oficios quienes, sin embargo, por no estar familiarizados con la central, realizan las tareas en un tiempo mayor que el que se pediría al personal entrenado. Asimismo, el fraccionamiento de la dosis individual aumenta la dosis improductiva que recibe el trabajador entrante y saliente al acercarse y retirarse del lugar de trabajo respectivamente, más la que resulta de permanecer en el lugar recibiendo las recomendaciones de práctica para continuar la labor.

El número de horas hombre de personal especializado,  $h_a$ , en función de la fracción de personal altamente capacitado,  $d$ , resulta:

$$h_a = \left[ \dot{h}_{ac} d + \dot{h}_{ne} (1-d) \right] T = \left[ \dot{h}_{ne} - \dot{h}_{ac} \right] d \left] T \quad (13)$$

donde  $\dot{h}_{ac}$  es la tasa de horas hombre que se necesitaría si todo el personal especializado fuera altamente capacitado

$\dot{h}_{ne}$  es la tasa de horas hombre que se necesitaría si todo el personal especializado estuviera entrenado.

La dosis colectiva debida al fraccionamiento de las dosis individuales del personal altamente capacitado se puede expresar de la misma forma que en la subsección 3.2 más un término representativo de la dosis improductiva incurrida cada vez que se fracciona la dosis.

$$S_a = \dot{H} h_a + Bk d \frac{h_a}{t} \quad (14)$$

donde  $B$  es la dosis improductiva promedio cada vez que se fracciona la dosis individual

$k$  es el número de veces promedio que se fracciona la dosis a un mismo individuo

$\frac{h_a}{t}$  es el número de personas especializadas que intervienen en las operaciones de mantenimiento.

El costo de protección  $X_a$ , expresado como una función de  $d$ , es:

$$X_a = C_{ac} d h_a + C_{ne} (1-d) h_a \quad (15)$$

donde  $C_{ac}$  es el costo de la hora·hombre neta de mantenimiento realizada por el personal especializado altamente capacitado

$C_{ne}$  es el costo de la hora·hombre neta de mantenimiento realizada por el personal especializado no entrenado.

Reemplazando el valor de  $h_a$  dado por la Ec. (13) en las Ecs. (14) y (15), derivando las expresiones resultantes respecto de  $d$  y procediendo como en el caso anterior, se obtiene el valor de  $d_o$  que optimiza la fracción de personal altamente capacitado a quien se le fracciona la dosis individual.

$$d_o = \frac{h_{ne} \Delta C_a - C_{ne} \Delta h_a - \alpha (H \Delta h_a - \frac{Bk}{t} h_{ne})}{2 \Delta h_a \Delta C_a + 2 \frac{Bk}{t} \Delta h_a}$$

donde  $\Delta C_a = C_{ac} - C_{ne}$  y  $\Delta h_a = h_{ne} - h_{ac}$

La expresión anterior se puede reducir sin introducir diferencias significativas. La ecuación que resulta es:

$$d_o = \frac{h_{ne} \Delta C_a - C_{ne} \Delta h_a}{2 \Delta h_a \Delta C_a} \quad (16)$$

### 3.4. Aplicación del procedimiento de optimización del grado de entrenamiento del personal y del fraccionamiento de las dosis del personal altamente capacitado en la Central Nuclear Atucha (C.N.A.)

La mayor parte de la dosis colectiva incurrida en los trabajadores de una central nuclear la recibe el personal que lleva a cabo tareas de reparación y mantenimiento [15]. En el Cuadro IV se presentan los porcentajes de la dosis colectiva ocupacional recibida por el personal de la C.N.A. (Argentina) en el período 1977–1980, de acuerdo con el tipo de tarea que realiza [16].

Con la información obtenida en los siete años de funcionamiento de la C.N.A. [17] se ha tratado de cuantificar los parámetros utilizados en la metodología descrita en las subsecciones 3.2 y 3.3. En la Fig. 2 se presenta la función que relaciona las horas·hombre anuales empleadas en las tareas de mantenimiento y reparación, en áreas controladas de la C.N.A., con la fracción de personal entrenado que intervino en cada año, normalizada para 80 intervenciones-año de mantenimiento. De la Fig. 2 surge que  $h_e = 1500$  horas·hombre·a<sup>-1</sup>, y  $h_c = 4500$  horas·hombre·a<sup>-1</sup>.

CUADRO IV. PORCENTAJE DE LA DOSIS COLECTIVA DEBIDA A IRRADIACION OCUPACIONAL SEGUN EL TIPO DE TAREAS REALIZADAS EN LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA

| Año  | Operación<br>% | Radioprotección<br>% | Mantenimiento<br>% |
|------|----------------|----------------------|--------------------|
| 1977 | 29             | 11                   | 60                 |
| 1978 | 28             | 20                   | 52                 |
| 1979 | 24             | 18                   | 58                 |
| 1980 | 24             | 14                   | 62                 |

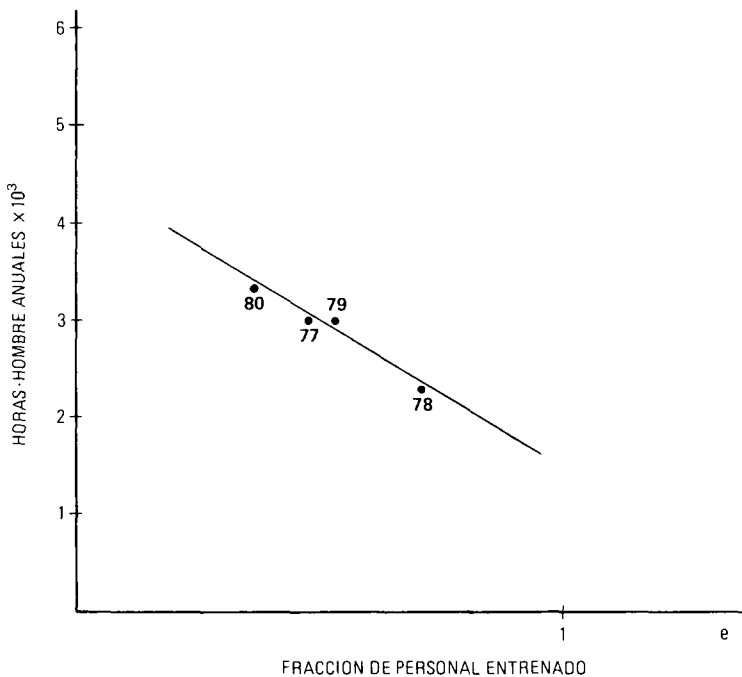


FIG.2. Horas-hombre anuales empleadas en tareas de mantenimiento y reparación en la central nuclear de Atucha en función del grado de entrenamiento del personal (normalizado para 80 tareas-año).

Adoptando valores promedio para la C.N.A. tales como  $\dot{H} = 2 \text{ mSv/h}$ ;  $C_e$  500 dólares./hora·hombre neta de mantenimiento y  $C_c$  150 dólares./hora·hombre, la fracción de personal entrenado dentro del plantel de mantenimiento de la C.N.A. debería situarse en torno de 0,5. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que estos parámetros y la función  $h = f(a)$  fueron estimados a partir de datos que no siempre reflejaban los objetivos de este análisis y, por lo tanto, los resultados obtenidos son orientativos. Para un análisis de optimización es necesario dimensionar la experiencia para obtener la información en forma adecuada y realista.

Procediendo en forma análoga que en el caso anterior, se estimaron los valores promedios para evaluar la fracción de personal altamente capacitado a quien se le fracciona la dosis. La función  $h_a = f(d)$  fue obtenida suponiendo que este personal realiza el 30% de las horas·hombre anuales debidas al mantenimiento y reparación:  $h_{ac} = 450 \text{ horas·hombre·a}^{-1}$ , y  $h_{ne} = 1350 \text{ horas·hombre·a}^{-1}$ . Asimismo se estimó  $k = 10 \text{ a}^{-1}$ ;  $B = 1 \text{ mSv}$ ;  $H = 2 \text{ mSv/h}$ ;  $C_{ac} = 900 \text{ dólares./hora·hombre}$  y  $C_{ne} = 330 \text{ dólares./hora·hombre}$ . El valor de  $d_o$  que resulte de aplicar la Ec.(16) es 0,4.

## REFERENCIAS

- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26, Pergamon Press, Oxford (1977).
- [2] COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, "Exposición Ocupacional", Norma CALIN 3.1.1, CNEA, Buenos Aires (1980).
- [3] COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, "Limitación de Efluentes Radiactivos", Normas CALIN 3.1.2, CNEA, Buenos Aires (1980).
- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Statement and Recommendations of the 1980 Brighton Meeting of the ICRP, Ann. ICRP.
- [5] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Optimization of Radiation Protection. Principles and Methods for the Application of the Requirements of the Dose Limitation System that Exposures be kept as low as Reasonably Achievable adopted by the Commission, A report of Committee 4 (in preparation).
- [6] SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA, Planillas de Facturación, Div. Facturación, Buenos Aires (1981).
- [7] NAVARRO, R., (Gas del Estado), Comunicación personal.
- [8] CRANE Co., Flow of Fluids through Valves, Fitting and Pipes, Metric edition, SI Units, Crane Co., New York (1977).
- [9] PERRY, R.H., CHITTON, C.H., Chemical Engineers' Handbook, 5th ed., McGraw Hill, Kogakusha (1973).
- [10] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, Publication 30, Pergamon Press, Oxford (1979).
- [11] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, Normas Básicas de Seguridad en Materia de Protección Radiológica, Edición de 1982, Colección Seguridad N° 9 (en preparación).

- [12] BENINSON, D., "Optimization of radiation protection", Application of the Dose Limitation System for Radiation Protection: Practical Implications (Proc. Seminar Vienna, 1979), OIEA, Viena (1979) 85.
- [13] HARRISON, N.T., The Consequences of a Radiation in the Administratively Applied Maximum Annual Dose Equivalent Level for an Individual in a Group of Occupationally Exposed Workers, National Radiological Protection Board, NRPB-R98, Harwell (1980).
- [14] BENINSON, D., "Justification and optimization in radiation protection", Proceedings of the 5th International Congress of the International Radiation Protection Association, Jerusalem, Mar.9-14, 1980, Vol.3, pp. 11-18.
- [15] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex D, Radioactive Contamination due to Nuclear Power Production, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1977 Report to the General Assembly, with annexes, United Nations Sales Publication E.77, IX, New York (1977).
- [16] PALACIOS, E., CAMPOS, J.M., CURTI, A., Dosis Debidas a la Exposición Ocupacional en la Comisión Nacional de Energía Atómica en el período 1977-1980, Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA NT 11/81, Buenos Aires (1981).
- [17] CENTRAL NUCLEAR ATUCHA, Informe mensual de operación, Período 1974-1980.

## DISCUSSION

J.L. ROUYER: I think that in many facilities the parameter ventilation rate is perhaps not the most important for protection against contamination, since doses result often from accidental releases, for which arrangements for air flow in the room and the performance of the warning system are very important. Optimization on the basis of the ventilation rate alone will therefore be incomplete and perhaps costly.

E. PALACIOS: You are right. Optimization of radiological protection requires simultaneous analysis of all protection systems which could reduce the collective dose and hence the associated detriment. However, when the levels of protection achieved by the shielding and containment systems are optimized, as in the example given in the paper, the optimization of the ventilation rate is a necessary condition for ensuring that the doses received by the workers are kept as low as possible.

H. BONKA: I am somewhat surprised at your courage in Argentina in taking decisions after a cost-benefit analysis. In his presentation, Mr. Beninson\* referred to a decision on  $^{14}\text{C}$  retention by heavy-water reactors, but in your case you are talking about ventilation systems. Who made the cost estimates for your cost-benefit analysis? Was it the company which built the facility? And what would you think of your decision if other countries emitted the same radionuclides? Your country is spending money to retain the radionuclides, e.g.  $^{14}\text{C}$ , while others do not.

---

\* See paper IAEA-SM-258/53 in these Proceedings.

D. BENINSON: Perhaps I can answer those questions. Our decisions are based both on optimization and on 'upper bounds' of dose and collective dose assigned by the Argentine regulatory authority to generic practices or sources. For the optimization requirement the applicant has to submit alternatives with his cost estimates, and the values have to be sufficiently supported to the satisfaction of the regulatory authority. Usually, the applicant and the designers and suppliers co-operate in assembling the information to be submitted to and discussed with the regulatory authority. As for your last point, we believe it is desirable that a similar approach be widely adopted, because the regional and global components of the collective dose commitment can only be restricted by control at each source releasing radioactive materials to the environment. General application of the principles mentioned would prevent undesirable situations like those existing in the case of some non-radioactive pollutants.