

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

CODIGO DE CALCULO PARA OPTIMIZAR LA PROTECCION RADIOLOGICA

Logo

R. SEGADO*, F. LOPEZ LIZANA**,

R. REYES* I. Scar

*Comisión Nacional de Energía Atómica,

Buenos Aires, Argentina

**Comisión Chilena de Energía Nuclear,

Santiago, Chile

Abstract-Resumen

CALCULATION CODE FOR THE OPTIMIZATION OF RADIOLOGICAL PROTECTION.

A computer program is presented for the optimization of radiological protection in design. The program takes into account various dependent protection techniques, as follows: radiation shielding, confinement of contamination sources, ventilation of contaminated environments and decontamination of effluents. The necessary constraining functions in relation to both cost of and detriment from the radiological protection techniques used are discussed. For a given differential increment in the protection cost, the program determines the most effective technique for limiting the detriment, applying the incremental cost to each one of the available techniques and adopting the one showing a maximum reduction of the collective dose commitment. The process is repeated until the ratio between the marginal increase in the cost of protection and the marginal reduction of the collective dose commitment reaches a prefixed value. The resulting set of protection parameters is considered to be the optimum. Finally, the program allows one to verify whether the individual dose limits are exceeded at the optimized protection level, and, if they are, shows how one can comply with the limits at the lowest cost.

CODIGO DE CALCULO PARA OPTIMIZAR LA PROTECCION RADIOLOGICA.

Se presenta un programa de computación para la optimización de la protección radiológica en el diseño. El mismo tiene en cuenta distintas técnicas de protección dependientes entre sí, tales como blindajes a la radiación, confinamiento de fuentes de material radiactivo contaminante, ventilación de ambientes contaminados y descontaminación de efluentes. Se analizan las funciones limitantes necesarias para las técnicas de protección radiológica en relación con el costo de las mismas y con el detrimento resultante de su uso. El programa determina la técnica más efectiva para limitar el detrimento cuando se aplica un incremento diferencial de costo a cada una de las técnicas disponibles, adoptando aquella que permite la máxima reducción de la dosis colectiva comprometida. El proceso se repite hasta que la relación entre el aumento marginal del costo de protección y la reducción marginal del compromiso de la dosis colectiva alcanza un valor prefijado. El conjunto de parámetros de protección resultante se considera como el óptimo. Por último, el programa permite verificar si, al nivel de la protección radiológica, se exceden los límites de dosis individual y, si así fuera, se indica como cumplir con los límites al menor costo.

1. INTRODUCCION

Se presenta un programa de cálculo para optimizar la protección radiológica en el diseño de instalaciones nucleares mediante el uso de blindajes, confinamiento de las fuentes contaminantes, ventilación de los ambientes contaminados y descontaminación de los efluentes.

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 las radiaciones ionizantes deben ser mantenidas “tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta factores sociales y económicos”. Este requerimiento implica que la protección radiológica aplicada a toda práctica u operación debe ser optimizada de manera que se incremente la protección hasta un nivel tal que cualquier incremento adicional implicará un esfuerzo social mayor que la disminución del detrimento obtenido. En los niveles de dosis a los que se lleva a cabo la optimización, la magnitud dosis equivalente efectiva colectiva comprometida (en adelante dosis colectiva comprometida, S) provee una medida adecuada del detrimento; por otra parte, el costo de la protección da una medida del esfuerzo social involucrado por la protección. El balance apropiado entre los cambios incrementales de dosis colectivas y costo de protección permite identificar la protección óptima. Dado que estas dos magnitudes se expresan en unidades distintas, se suele normalizar el detrimento en unidades monetarias multiplicando la dosis colectiva comprometida por una constante de conversión; a este producto se lo suele denominar costo del detrimento. La constante de conversión se la suele representar con la letra griega α y su unidad es una unidad monetaria por unidad de dosis colectiva.

La optimización posibilita maximizar el beneficio neto logrado por la realización de la práctica u operación, debiendo considerarse el beneficio recibido por la sociedad y no el que corresponde a un grupo particular de individuos. El nivel de protección optimizado debe ser en todos los casos suficiente como para garantizar el cumplimiento de los límites de dosis apropiados.

En algunos casos prácticos, los sistemas de protección que controlan la dosis ocupacional y en la población son dependientes entre sí, en el sentido que el control en uno de ellos tiene influencia sobre la dosis colectiva debida a los otros [2, 3]. Por otra parte, el objetivo de la optimización es disminuir la dosis colectiva comprometida tanto como sea posible sin imponer, a priori, sobre qué grupo de personas se va a realizar tal reducción. Por lo tanto, la optimización de la protección radiológica debe realizarse analizando simultáneamente los diferentes sistemas considerados y la incidencia de cada uno de ellos en la reducción de la dosis colectiva comprometida.

En el diseño de los sistemas de protección se deben tener en cuenta diversos tipos de variables. Hay variables que son dependientes del nivel de protección requerido, y resultan caracterizadas por parámetros de control de la exposición,

tales como el espesor del blindaje, el caudal de la ventilación, la eficiencia de la filtración, el grado de estanqueidad, etc. Otras variables pueden considerarse independientes, dado que quedan definidas automáticamente: por ejemplo: las propiedades físicas de los materiales blindantes, la temperatura del aire a ventilar. El diseñador, por otra parte, tendrá que tener en cuenta magnitudes que definen una condición de diseño, tales como la tensión de alimentación de los motores de un sistema de ventilación, y variables externas tales como aspectos ambientales relevantes para el sistema de protección. Por último, en el proceso de diseño se debería tener en cuenta que algunas variables pueden cambiar después de la construcción del sistema, por ejemplo la actividad de la fuente de exposición. Si bien teóricamente, el proceso de optimización debiera aplicarse al conjunto total de las variables involucradas, el mismo se puede simplificar sin afectar significativamente a los resultados, si sólo se consideran los parámetros de control de la exposición. El programa de cálculo que se presenta se limita a encontrar un conjunto óptimo de parámetros de control.

Los parámetros de control, a su vez, pueden ser independientes o dependientes entre sí en el sentido indicado previamente. El espesor de los blindajes puede considerarse independiente de los restantes parámetros de protección, pues su eventual modificación no cambia el nivel de exposición debido a la contaminación. El caudal de ventilación y el factor de retención de los sistemas de filtración generalmente asociados a la ventilación son, en cambio, variables fuertemente interdependientes, pues una alteración en el dimensionamiento de cualquiera de ellos redundará en una variación tanto en el costo como en el nivel de protección debido a la otra.

La optimización de la protección radiológica, dentro del marco de referencia de las recomendaciones de la CIPR, implica minimizar la suma de los costos de protección X , y del detrimento Y . Ambos costos dependen del nivel de protección y por lo tanto del valor de los parámetros de control de la exposición. Los costos de protección y detrimento están vinculados por el valor de esos parámetros mediante funciones que constriñen el proceso de optimización. Estas funciones provienen de leyes de la física, de la economía, etc. y se las suele denominar funciones vinculantes.

El proceso de optimización también debe llevarse a cabo dentro de limitaciones específicas. Una de ellas es que las dosis individuales no pueden superar bajo ninguna circunstancia límites apropiados que deben ser necesariamente menores a los límites de dosis individuales establecidos por las normas de protección radiológica. Otra limitación no automática, ni deseable, pero real, es que el costo de todos los sistemas de protección no puede superar los recursos disponibles para la protección radiológica. Esta última limitación no suele ser considerada en evaluaciones de protección radiológica.

Para la mayoría de los sistemas de protección, el cambio en los niveles de protección sólo se puede obtener con incrementos finitos. En estos casos X y S

toman valores discretos y no pueden ser variados continuamente con el nivel de protección. En estos casos discretos, la decisión de pasar de un nivel de protección I a otro nivel II, más costoso y eficiente, debe ser tomada si [4, 5]:

$$\frac{\Delta X}{\Delta S} = \frac{X_{II} - X_I}{S_{II} - S_I} \leq -\alpha$$

bajo la condición que

$$\dot{H}_m \leq DL$$

donde $\dot{H}_m$ es la tasa de dosis individual máxima

DL representa a los límites de dosis individuales.

En la práctica, la exposición total debida a una práctica u operación con radiaciones ionizantes, puede estar compuesta por una serie de contribuciones parciales. Cada una de estas contribuciones puede, a su vez, estar controlada por sistemas distintos de protección. Por ejemplo, como consecuencia de la operación de un laboratorio donde se trabaja con fuentes radiactivas no selladas, los trabajadores se exponen a la irradiación directa y al material radiactivo disperso en el ambiente y el público al material radiactivo arrastrado por el sistema de ventilación. La irradiación puede ser controlada por blindajes, la contaminación puede serlo mejorando la tasa de pérdida del sellado de las fuentes, ventilando el ambiente o incorporando unidades de descontaminación en la línea de efluentes de la ventilación, etc. Cada una de estas contribuciones puede estar controlada por sistemas distintos de protección.

El proceso de optimización resulta matemáticamente complejo cuando se tratan casos con diversos sistemas de protección, dependientes entre sí, y que comprometen a diversos grupos de personas. Una manera de simplificar la aplicación del método de optimización es hacer uso de programas de cómputos. El objeto del presente trabajo es presentar un código de cálculo para el diseño optimizado de sistemas de protección radiológica.

2. PARAMETROS DE CONTROL DEL NIVEL DE PROTECCION

Los sistemas de protección que han sido considerados para el desarrollo del código de cálculo son los siguientes: blindajes, ventilación, confinamiento y descontaminación.

Los blindajes están destinados exclusivamente a disminuir la tasa de dosis a que se encuentran expuestos los trabajadores y, en menor medida, el público. Los restantes sistemas se orientan preferentemente a reducir la contaminación interna y la dosis colectiva comprometida resultante de la misma. La ventila-

ción está destinada a controlar la concentración de material radiactivo en los ambientes de trabajo y no tiene incidencia directa sobre la dosis incurrida por el público. Los sistemas de descontaminación de efluentes, en cambio, se destinan exclusivamente para disminuir la dosis colectiva de la población. Los sistemas de confinamiento tales como cajas de guantes o recintos estancos permiten disminuir la tasa de emanación tanto hacia los locales de trabajo como al ambiente exterior, disminuyendo consecuentemente la dosis colectiva en ambos grupos.

Los parámetros de protección que intervienen en el proceso de diseño de los sistemas indicados son el espesor del blindaje, ω , el caudal de ventilación, Q , los factores de retención, i , de los sistemas de confinamiento y la eficiencia, η , de las unidades de descontaminación. El cambio de ω y Q permiten ajustar los niveles de protección en forma más o menos continua. Los factores i , en cambio, varían por incrementos finitos, de acuerdo a las alternativas de retención analizadas.

El ω es la única variable de protección que puede considerarse independiente. Las variaciones de i , por otra parte, modifican el Q requerido y el número de unidades de descontaminación. Las variaciones en el número de unidades de descontaminación resultante de la emisión optimizada por otra parte, inciden en el costo de operación del sistema de ventilación.

3. DETERMINACION DE LAS FUNCIONES VINCULANTES

3.1. Blindaje

El costo del blindaje es proporcional al volumen del material empleado más un costo inicial que contemple las necesidades estructurales del conjunto. La expresión utilizada para determinar el costo del blindaje en el código de cálculo presentado es:

$$X_B = l a \omega C_B + X_0$$

donde l es el perímetro medio del blindaje

a es la altura del blindaje

C_B es el costo de la unidad de volumen del material blindante

X_0 es el costo inicial (independiente del espesor).

Se puede suponer que existe una relación constante entre las dosis individuales máxima y promedio [2]. Por lo tanto, la optimización de ω implicará cambios en las tasas de dosis pero no en la distribución de éstas. Además,

admitiendo que existe una relación del tipo exponencial entre S y ω , S puede determinarse por la siguiente expresión:

$$S = N f_t \rho T \dot{H} e^{-\Gamma \omega}$$

donde N es el número de individuos expuestos

f_t es el factor de ocupación

ρ es la relación constante entre tasa de dosis máxima y promedio

T es la vida útil de la instalación

$\dot{H}$ es la tasa de dosis equivalente efectiva máxima en la cual puede incurrir un individuo ubicado en contacto con la superficie exterior del blindaje

Γ es el coeficiente de atenuación efectiva.

3.2. Ventilación

Los costos de ventilación incluyen los costos del propio sistema, los costos de operación y los costos de instalación [2, 3, 6, 7]. En general, los costos de operación son predominantes, especialmente si las instalaciones no son excesivamente grandes y si no requieren grandes inversiones estructurales para su instalación. El costo de un sistema de ventilación incluye el costo de la energía necesaria para hacer circular el aire y, eventualmente, el costo para acondicionarlo. El costo de la ventilación durante la vida útil de la instalación que será utilizado en el código, resulta de la siguiente expresión:

$$X = (a_v b_v + a_c e \eta \Delta t) f_t Q T$$

donde a_v es el costo de la unidad de energía utilizada para mover el aire

a_c es el costo de la unidad de energía utilizada para acondicionar el aire

b_v es la potencia requerida para mover una unidad de caudal de aire

e es la potencia requerida para acondicionar la unidad de caudal en 1°C

η es la fracción del caudal de aire que se acondiciona

Δt es el incremento de la temperatura del aire por acondicionamiento.

La dosis S incurrida por los individuos que permanecen en un ambiente de trabajo ventilado es proporcional a la tasa de radiactividad que se incorpora continuamente al ambiente por deficiencia de confinamiento de las fuentes de material radiactivo e inversamente proporcional al Q . La función respectiva es:

$$S_v = N f_t F_d \frac{\dot{A}}{Q} T$$

donde F_d es el factor dosimétrico promedio

$\dot{A}$ es la tasa de pérdida de material radiactivo que se incorpora al ambiente de trabajo.

3.3. Confinamiento

Las condiciones de confinamiento varían por escalones discretos que corresponden a las diferentes alternativas analizadas en cada caso particular. Los costos de cada una de las alternativas propuestas deben incluir el costo del sistema propiamente dicho, el costo de instalación y el costo de operación durante la vida útil de la instalación. El costo de operación puede ser significativo cuando la unidad de confinamiento incluye sistemas de extracción y purificación del aire. En este caso, además del costo de la energía necesaria para mantener el sistema en depresión, X_u , es necesario acrecentar el costo del confinamiento, adicionando el costo de las unidades de recambio (X_r) que se deseen reemplazar durante la vida útil de la instalación. El valor de protección resulta $X_c = X_u + X_r$.

Las unidades de confinamiento actúan reduciendo la emanación de material radiactivo a los ambientes de trabajo y al ambiente. La dosis S debe calcularse como la suma de las dosis incurridas por los trabajadores y por el público. La expresión de S resulta:

$$S_c = N f_t F_d \frac{\dot{A}}{Q} i_1 T + i_2 \dot{A} f_d T$$

donde F_d es el factor dosimétrico promedio en el ambiente contaminado expresado como tasa de dosis por unidad de concentración de material radiactivo

f_d es el factor dosimétrico que relaciona dosis colectiva comprometida en la población con la unidad de actividad liberada

i_1 es el factor de retención de la unidad estanca hacia el ambiente de trabajo

i_2 es el factor de retención de la unidad estanca hacia el exterior.

3.4. Descontaminación de efluentes gaseosos

Las unidades de descontaminación pueden ser utilizadas tanto para limpiar el aire que recircula en un ambiente de trabajo como para disminuir la inyección de un contaminante a la atmósfera. Dentro de la industria nuclear, los sistemas de descontaminación de aire se utilizan en la mayoría de los casos prácticos para disminuir las descargas de material radiactivo al ambiente.

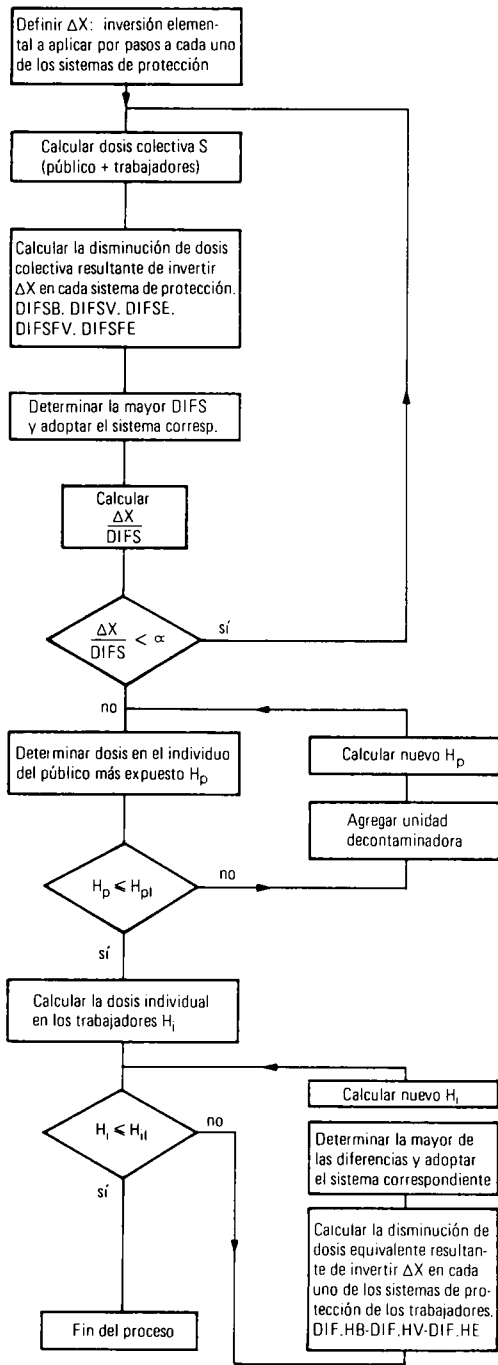


FIG.1. Diagrama de flujo simplificado.

El costo de la protección en sistemas de descontaminación de efluentes incluye el costo de la instalación más el costo de reposición de las unidades filtrantes colmatadas durante la vida útil de la instalación. La expresión del costo de protección en este caso es:

$$X_0 = X_i + C_d n_d \Omega f_t T$$

donde X_i es el costo de la instalación de descontaminación

C_d es el costo de la unidad de filtrado

n_d es el número de unidades de filtrado en serie

Ω es la frecuencia de reemplazo de las unidades de filtrado.

4. METODOLOGIA DE CALCULO

El cálculo puede dividirse en tres etapas; una etapa de optimización, una etapa de verificación y cumplimiento de los límites de dosis en el público, y otra de verificación y cumplimiento de los límites de dosis en los trabajadores (Fig.1).

El código procede inicialmente a adoptar un elemento incremental de inversión ΔX y a calcular, teniendo en cuenta las funciones vinculantes discutidas, la reducción en la dosis colectiva, DIFS, que resulta de la aplicación de ese elemento de inversión en cada uno de los sistemas de protección. El código elige automáticamente aquel sistema que posibilita una mayor disminución de la dosis colectiva o sea el mejor desde el punto de vista de su efectividad en costo y determina la relación:

$$\frac{\Delta X}{\text{DIFS}}$$

El código compara el valor de dicha relación con el valor monetario, α , asignado a la unidad de dosis colectiva. Si resulta menor, se vuelve a aplicar un nuevo incremento de inversión ΔX y se procede en la forma ya descrita hasta lograr que la relación $\Delta X/\text{DIFS}$ se aproxime tanto como sea posible a α .

Una vez llevada a cabo la aproximación anterior queda concluida la etapa de optimización. A posteriori, el código inicia la segunda etapa que consiste en comprobar si la dosis en los individuos del público más expuestos no supera los valores límites establecidos. En caso de que tal condición no se verifique, continúa acrecentando la inversión en elementos finitos ΔX en aquellos sistemas que impliquen la disminución de dosis en el público de acuerdo al criterio de máxima eficiencia hasta lograr el cumplimiento de los límites de dosis correspondientes.

En la última etapa de la realización del cálculo se verifica el cumplimiento de los límites de dosis para los trabajadores, es decir que la dosis individual efectiva equivalente en los trabajadores no supere el máximo previsto para el personal profesionalmente expuesto, caso contrario procede igual que en la etapa anterior pero atendiendo sólo aquellos sistemas de protección que limitan las dosis en los trabajadores, seleccionándolos nuevamente de acuerdo al criterio de máxima eficiencia.

Se debe destacar que mientras que los niveles de protección logrados con los sistemas de ventilación y blindajes varían en forma continua con los parámetros de protección, los sistemas de confinamiento y descontaminación, en cambio, hacen que varíen los niveles de protección en forma escalonada de acuerdo al número de unidades que se colocan en serie.

Al iniciarse el proceso de cálculo, los incrementos de inversión ΔX recaen en los sistemas de protección que varían en forma continua tal como los sistemas de ventilación y blindajes. Cuando el producto del número de incrementos n_i por el costo de cada uno de ellos, ΔX alcanza el valor de una unidad de confinamiento (o de descontaminación) el programa calcula cuál sería la reducción de la dosis colectiva si la inversión $n_i \Delta X$ se realizara en el sistema de confinamiento. Si esta reducción es mayor que la obtenida por los demás sistemas adoptados hasta ese momento, se decide la inversión en confinamiento volviendo al punto inicial los demás parámetros de protección. En caso contrario, el procedimiento anterior continúa hasta que el nuevo valor, $n_i \Delta X$, alcanza el costo de una unidad de descontaminación o de otra alternativa de confinamiento.

5. USO DEL PROGRAMA

Para la utilización del programa deben ingresarse en primer término los parámetros independientes de los sistemas de protección analizados, tal como número de trabajadores, vida útil de la instalación, valor asignado a la unidad de dosis colectiva, incremento diferencial monetario de inversión en los sistemas de protección, etc. A continuación se ingresan los parámetros relacionados con los distintos sistemas de protección, que son: a) *para blindajes*, las dimensiones, el costo de instalación, el coeficiente de atenuación efectivo, etc.; b) *para los sistemas de ventilación*, el caudal mínimo, la potencia requerida para mover la unidad de caudal, el costo de la unidad de energía, factor de utilización, etc.; c) *para los sistemas de confinamiento*, el costo de las distintas alternativas y los factores de retención de cada una de ellas; d) *para las unidades de descontaminación*, el factor que relaciona la dosis colectiva comprometida por unidad de actividad eliminada al ambiente, el costo de la unidad de descontaminación, la eficiencia de retención, etc.

Finalmente, se obtienen como resultados de la utilización del programa los parámetros que optimizan la protección; es decir, el valor del caudal de aire, el espesor de blindaje, el número de etapas de descontaminación y las alternativas de confinamiento adoptadas. Además, determina el valor que deben adoptar los parámetros citados en el caso que no se cumplan los límites de dosis individual en el público y trabajadores. La Fig.1 presenta el diagrama lógico del programa. (El listado de instrucciones del programa será suministrado a quienes lo requieran.)

REFERENCIAS

- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26, Pergamon Press, Oxford (1977).
- [2] 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).
- [3] GONZALEZ, A.J., et al., "Ejemplos de optimización en el diseño y la explotación", The Dose Limitation System in the Nuclear Fuel Cycle and in Radiation Protection (Actas Simp. Int. Madrid, 1981), OIEA, Viena (1982). (En este volumen.)
- [4] BENINSON, D., "Optimization of Radiation Protection", Application of the Dose Limitation System for Radiation Protection (Proc. Seminar Vienna, 1979), IAEA, Vienna (1979) 85.
- [5] 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.
- [6] CRANE Co., Flow of fluids through valves, fittings and pipes, Metric edition, SI. Units, Crane Co., New York (1977).
- [7] PERRY, R.H., CHITTON, C.H., Chemical Engineers' Handbook, 5th Ed., McGraw-Hill, Kogakusha, Japan (1973).

DISCUSSION

D. BENINSON: How does the calculation method described by you compare with the simple system-by-system calculation?

R. SEGADO: In cases where several protection systems are involved, and especially if these systems are not independent, i.e. when the variation in one system influences the cost and reduction of collective dose due to another, the optimization calculation should be performed for all the protection systems involved simultaneously. This is the basic reason why such a code is useful.