

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1984

CODIGO DE CALCULO DE SISTEMAS OPTIMIZADOS DE PROTECCION
RADIOLOGICA PARA PERSONAL PROFESIONALMENTE EXPUESTO

Segado, R.

Reyes, R.

GENERALIDADES

Para alcanzar los objetivos de la protección radiológica el ICRP 26 recomienda el uso de un sistema de limitación de dosis compuesta por los siguientes requerimientos:

- a) Justificación: la introducción de dicha práctica debe producir un beneficio neto positivo (teniendo en cuenta el detrimento por radiación)
- b) Optimización: las exposiciones deben ser mantenidas "tan bajas como sea razonablemente alcanzable" (teniendo en cuenta las condiciones socio-económicas)
- c) Limitación de la dosis individual: las dosis equivalentes individuales, originadas por todas las prácticas deben ser menores que los límites de dosis correspondientes (se debe tener en cuenta que muchas prácticas actuales producen dosis equivalentes que serán recibidas en el futuro)

El análisis costo-beneficio ideal debido a la introducción de una práctica que involucra irradiación puede ser considerado como

$$B = V - (P + X + Y) \quad (1)$$

donde:

B = es el beneficio neto

V = es el beneficio bruto

P = es el costo de la producción
(excluyendo la protección)

X = es el costo para alcanzar el
nivel de protección seleccionado

Y = es el costo asignado al detrimento involucrado en la operación

Entendiendo por "detrimento" a la esperanza matemática del daño incurrido, tomando en cuenta no solamente la probabilidad de cada tipo de efecto nocivo, sino también su severidad.

El detrimento es proporcional a la dosis equivalente colectiva efectiva (en adelante dosis colectiva) comprometida, S , siempre que los niveles de dosis sean suficientemente bajos como para asegurar la prevención de los efectos no estocásticos de la radiación; por lo tanto podemos asumir que el costo del detrimento (Y) es proporcional a la dosis colectiva, tal que:

$$Y = \alpha S \quad (2)$$

donde α es una constante que representa la valorización monetaria de la unidad de dosis colectiva.

INTRODUCCION

La optimización de la protección requerirá una comparación entre costo de protección y detrimento. A los efectos de posibilitar la comparación práctica entre el costo de protección y el detrimento, se requiere que ambos sean expresados en las mismas unidades; para ello una solución es asignarle un cierto costo monetario al detrimento provocado por la unidad de dosis colectiva.

Cuando se menciona el beneficio o el detrimento se hace referencia a los recibidos por la sociedad y no los correspondientes a grupos particulares como ser los directamente involucrados en la realización de la práctica.

En general los términos de la expresión (1) dependen de múltiples variables, muchos de los cuales no son función de los niveles de radioprotección.

No obstante, a los efectos de maximizar el beneficio desde el punto de vista de la protección radiológica, lo que en lo sucesivo llamaremos "optimización de la protección", se puede expresar la ecuación del beneficio neto B en función de los parámetros de la radioprotección. En la generalidad de los casos el beneficio bruto, (V), y el costo de la producción (P), son independientes de los parámetros de la protección radiológica. En este caso, las únicas variables del parámetro de protección son el costo de la protección, X , y el costo del detrimento, Y .

Es posible definir una función $U = (X + Y)$ que llamamos "función objetivo", la que depende de los parámetros de la radioprotección y que debe ser minimizado a efectos de obtener el máximo beneficio neto B.

Cuando el parámetro de radioprotección, ω , es uno solo, (a modo de ejemplo el espesor de un cierto blindaje w), minimizar la función objetivo U , consiste en derivar ésta respecto a la variable ω , e igualarla a cero.

$$\frac{\partial U}{\partial \omega} = \frac{\partial X}{\partial \omega} + \frac{\partial Y}{\partial \omega} = 0 \quad (3)$$

La resolución de un problema particular de cálculo optimizado implica minimizar la función objetivo U , pero dentro de las condiciones de contorno impuestas por las llamadas "funciones limitantes", como por ejemplo pueden serlo la imposición de que de ninguna manera la dosis equivalente individual en las personas ocupacionalmente expuestas supere los 5 rem anuales o que el número de renovaciones de aire del recinto esté por debajo de los requeridos por condiciones de higiene.

Adicionalmente pueden existir interrelaciones entre las variables de la función objetivo llamadas "funciones restrictivas" como puede ser la condición de que la inversión aplicada en radioprotección no exceda un cierto monto.

Cuando los parámetros de radioprotección involucrados en un problema particular son dos o más como ser por ejemplo blindaje (espesor), ventilación (caudal) y más aún cuando algunos de ellos son de variación no continua ni en costo ni en nivel de protección emergente de su uso, como sería el caso de instalaciones de confinamiento, el análisis de optimización se complica notablemente.

METODOLOGIA DE CALCULO

Básicamente la metodología consiste en destinar un cierto incremento elemental de inversión al sistema de protección con el fin de seleccionar la alternativa más eficiente determinando la disminución de dosis colectiva (DIFS), y se calcula

la siguiente relación:

$$\frac{\Delta X}{DIFS} \left(\frac{\$}{\text{hombre-rem}} \right) \quad (4)$$

En caso de que la relación calculada sea menor que el costo asignado al detrimento ocasionado por la unidad de dosis colectiva α , se continúa incrementando la inversión en protección radiológica hasta que se verifique que $\Delta X/DIFS \approx \alpha$ en ese nivel de radioprotección se deja de incrementar la inversión pues a partir de allí el aumento necesario para disminuir la dosis colectiva en un hombre-rem es mayor que el costo que se asignó al detrimento provocado por la unidad de dosis colectiva.

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, el programa calcula cual 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 continúa incrementando la inversión en el parámetro que correspondiera de acuerdo al criterio de máxima eficiencia.

Posteriormente se calcula la dosis individual en el personal profesionalmente expuesto, suponiendo la existencia de las instalaciones de radioprotección calculadas anteriormente.

A continuación se compara la dosis individual con el límite de dosis individual establecido para el personal profesionalmente expuesto, y si se supera, se aplica un nuevo incremento elemental de inversión. Este ciclo se repite hasta lograr que la dosis individual en el personal resulte igual o menor que el límite prefijado (función limitante) lográndose así satisfacer este requisito de acuerdo al criterio de máxima eficiencia.

REFERENCIAS

- (1) International Commission on Radiological Protection.
"Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP - 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 Reasonable Achievable adopted by the Commission". A report of Committee 4, (in preparation).
- (3) A.J. Gonzales et al. "Ejemplo de optimización en el diseño y la operación". Presentado en el Simposio Internacional sobre el uso del sistema de limitación de dosis en las instalaciones del ciclo de combustible nuclear y en otras prácticas radiológicas. 19-23 Octubre 1981, Madrid. IAEA - SM-258/54
- (4) Beninson D. "Optimization of Radiation Protection. Proceedings of a topical seminar on the practical implications of the ICRP Recommendations (1977) and the revised IAEA basic standards for radiation protection. Application of the dose limitation system for radiation protection" Vienna, March 5-9; 1979 Vienna AIEA, 1979. Proceedings Series. IAEA-5R-36/53, p. 85-95.
- (5) Beninson, D. J. "Justification and optimization in radiation protection" Proceeding of the 5. International Congress of the International Radiation Protection Association. Jerusalem Mar. 9-14, 1980 v.3 p. 11-18.
- (6) D.F. Rudd - Ch. C. Watson. "Estrategia en Ingeniería de Proceso". Alambra 1976.


```

016  S01=R01
      S01=SV1
      IV1=IV1+1
      SV=0
      GO TO 150
017  AC1R01=AC1R1
      S01=R01
      IV1=IV1+1
      IF UN*SV1<SV1-1 GO TO 140 (IV=NM1)
      IF AC1R01<AC1R1 GO TO 140 (SV=SV1+1)
      IV=0
      SV=0
      S01=R01
      S01=NM1
      EST01=EST1
      GO TO 150
019  GO TO 320
150  AE=XE+DX1
      IF NC1=RELO1 GO TO 320
      GO TO 145

```

```

ED11  PP08  FORTRAN  A1  F  80

```

40 1211

```

      IF NC1=RELO1 GO TO 320
      GO TO 145
025  AE=RE1+1
      ALA=0
      GO TO 145
1000  STOP
      END

```

```

TOP:
      SUBROUTINE OCUP1(ACIR0,ACIR1,XE,IE1,WM,XV,W01,IV1,AL,ANCHO,ANCH,
      *O1,DX1,UE1,UE2,UE3,FRTP1,FRTP2,FRTP3,IE,A,B,FLXV,THU,CIV,ALTO,ANCH
      *O,WM,CVB,CIB,R,FT,H0,MU,FD,DSXE,DSXV,DSXB,ACIR1,SE1,W01,S01,SV1,
      *EST1)
      REAL MU
      DAN=DX1+XE
      UE3=UE3
      UE2=UE2
      IF (DAN.EQ.0) GO TO 050
      IF (DAN.EQ.UE2) GO TO 050
      IF (DAN.EQ.UE1) GO TO 070
      DSXE=0

```

```

EDIT      OCUP1      FORTRAN 41  F  80

```

```

      GO TO 070
050  ACIR1=ACIR0*FRTP3
      GO TO 080
060  ACIR1=ACIR0*FRTP2
      GO TO 090
070  ACIR1=ACIR0*FRTP1
080  SE1=R*IE*FT*H0*IAU*8760.*EXP(-MU*WM)*IE/(ACIR1*FI*FI*AU*IE/WM)
      DIFE1=SE1-SE1
      DSXE=(DX1+XE)/DIFE1
      EST1=DX1+XE
090  XB1=DX1+XB
      XV1=DX1+XV
      ALTO=ALTO
      IV1=IV1
      ANCHO=ANCHO
      CVB=CVB
      CIB=CIB
      W1=XB1/ALTO*ANCHO*(CVB+CIB)
      R1=XV1/(LA*B*FI*AV*8760.*THU+CIV)
      IB1=IB1

```

```

EDIT      OCUP1      FORTRAN 41  F  80

```

```

      IF (IB1.EQ.0) GO TO 100
      W01=W01
      W1=W01+W1
100  IF (IV1.EQ.0) GO TO 110
      Q1=Q01+Q1
110  Q01=Q01
      S01=R*IE*FT*H0*IAU*8760.*EXP(-MU*WM)*IE/(ACIR1*FI*FI*AU*IE/WM)
      SV1=R*IE*FT*H0*IAU*8760.*EXP(-MU*WM)*IE/(ACIR1*FI*FI*AU*IE/WM)
      S01=S01
      DIFB1=S01-S01
      DIFV1=S01-SV1

```

```

      DSXB=DX1/DIFB1
      DSXV=DX1/DIFV1
      RETURN

```

```

      END

```

```

EOF:

```

APENDICE I

PROGRAMA PRINCIPAL

A) Determinación de condiciones iniciales

En la inicialización se definirán algunas variables con las cuales se comenzará el cálculo.

El caudal mínimo (QM) tendrá en cuenta las condiciones de confort de los individuos, luego se calcula la inversión mínima de ventilación de la siguiente manera:

$$XV = QM \times a \times b \times FTXV \times 8760 \times TAU + (CIV \times QM) \quad (1)$$

Siendo:

a: Costo de la unidad de energía (U\$/KW-h)

b: Potencia requerida para mover una unidad de caudal (KW-h/m³)

FTXV: Factor de uso del sistema de ventilación

TAU: Vida útil de la instalación (años)

CIV: Costo de la instalación por unidad de caudal (U\$/m³/h)

También se define un espesor de blindaje mínimo (si existiera) y se calculará la inversión mínima de la siguiente manera

$$XB = Alto \times Ancho \times WM \times (CVB + CIB) \quad (2)$$

Siendo:

Alto: altura del blindaje (m)

Ancho: longitud del blindaje (m)

WM: espesor mínimo de blindaje (por condición de proceso) (m)

CVB: costo del blindaje por unidad de volumen (U\$/m³)

CIB: costo de la instalación del blindaje por unidad de volumen (U\$/m³)

A continuación se procede a calcular la dosis colectiva para esta práctica si consideramos a los parámetros mínimos como el nivel de protección investigado mediante la

siguiente expresión

$$SI = R \times TE \times FT \times HO \times TAU \times 8760 \times EXP (-MU \times WM) + \left(\frac{ACIR \ O}{QM} \times FD \times FT \times TAU \times TE \right) \quad (3)$$

Siendo:

R: relación constante entre la dosis individual media y máxima

TE: número de trabajadores expuestos

FT: factor de tiempo de ocupación

HO: es la tasa de dosis en un punto dado si no hay blindaje instalado (rem/h)

TAU: vida útil de la instalación (años)

MU: coeficiente de absorción efectivo (incluye build-up) (m^{-1})

ACIR O: tasa de emanación de una dada práctica (Ci/h)

FD: factor dosimétrico $\left(\frac{\text{rem-m}^3}{\text{Ci-año}} \right)$

B) Análisis Costo Beneficio

Con las variables calculadas en la determinación de las condiciones iniciales se llama a la subrutina ocup 1 y esta entregará al programa principal fundamentalmente las razones de comparación (DSXE, DSXV y DSXB que se refieren al nivel de confinamiento, ventilación y blindaje respectivamente) que comparadas con ALFA (valor asignado a la unidad de dosis colectiva) determinarán la factibilidad de continuar con la investigación.

Se presentan entonces cuatro alternativas que analizamos a continuación

1) Si DSXE es el menor:

Al elegir un nuevo nivel de confinamiento. se deberán inicializar nuevamente los cálculos considerando la nueva tasa de pérdida al ambiente laboral.

2) Si DSXV es el menor:

Acá se modifica fundamentalmente el caudal adoptado

3) Si DSXB es el menor:

Se adoptará el espesor de blindaje investigado.

4) Si ALFA es el menor:

En este caso se dice que el sistema ha sido "Optimizado" y corresponderá por lo tanto realizar los cálculos correspondientes al cumplimiento de límite de dosis ocupacional

C) Cumplimiento del Límite de Dosis

Para verificar el cumplimiento del límite establecido (LDOCUP) se calcula la dosis individual ocupacional (DIOCUP) mediante la siguiente expresión:

$$DIOCUP = HO \times R \times FT \times 8760 \times EXP (-MU \times W01) + \left(\frac{ACI01}{Q01} + FD \times FT \right)$$

Si DIOCUP es mayor que LDOCUP se deberá seguir invirtiendo hasta conseguir el cumplimiento del límite. Cada inversión elemental es compatible con el hecho de tomar la más eficiente de las alternativas.

APENDICE II

SUBROUTINA OCUP.1

Esta subrutina tiene por objeto obtener las razones de comparación vinculada a la protección radiológica ocupacional.

Los sistemas que se tienen en cuenta son:

- 1) Blindaje
- 2) Ventilación
- 3) Confinamiento

Pudiéndose considerar los sistemas (1) y (2) como continuos, pero el sistema (3) es netamente discontinuo, por lo tanto es necesario saber si la inversión total en investigación corresponde al costo de algún sistema de confinamiento y calcular en ese instante la razón de comparación correspondiente.

A continuación consideraremos el costo correspondiente al intervalo de investigación, que en la primera inversión en blindaje y ventilación debe considerar el costo correspondiente a la inversión mínima debida al caudal mínimo que deberá circular por razones de confort y el espesor de blindaje mínimo que puede existir por razones de proceso.

Así tendremos nuestra primera inversión de investigación como sigue:

$$\left. \begin{aligned} XB1 &= XB + DX1 \\ XV1 &= XV + DX1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Considerando ahora el costo del blindaje como

$$XB1 = \text{ALTO} \times \text{ANCHO} \times W \times [CVB + CIB]$$

y despejando XB1:

$$W = \frac{XB1}{\text{ALTO} \times \text{ANCHO} \times [CVB + CIB]} \quad (2)$$

El costo de la ventilación lo podemos expresar como:

$$XV1 = Q \times a \times b \times FTXV \times \text{TAU} \times 8760 + (Q \times CIV)$$

despejando Q

$$Q = \frac{XV1}{(a \times b \times FTXV \times TAU \times 8760) + CIV}$$

Ahora debemos saber si en las iteraciones anteriores se había invertido en blindaje y/o ventilación. En el caso de no haber invertido en estos sistemas, adoptamos como valor de investigación el que resulta del visto en (2) y (3); en caso contrario se encuentra el valor de investigación sumando el valor adaptado al incremento de la variable estudiada

$$W1 = W01 + W1$$

$$Q1 = Q01 + Q1$$

Paso seguido se hallarán las dosis colectivas correspondientes, las diferencias de dosis logrables y las razones de comparación que tienen la forma general siguiente:

$$DS \ X = \frac{\Delta X}{DIFS} \quad (\$/hombre-rem)$$

la cual constituye una de las salidas principales de esa subrutina.