



PLANTAS DE IRRADIACION

Junio 2009



PLANTAS DE IRRADIACION

CONTENIDO

Introducción

Procesos industriales de Irradiación

Ejemplos típicos de productos irradiados y sus dosis/efectos.

Crecimiento industrial de plantas de irradiación

Proceso de irradiación

Fuentes de irradiación

Plantas de irradiación

Principios de diseño

Diseño de fuentes y capacidad instalada

Dosis y dosis suministrada.

Irradiadores típicos (categorías)

Irradiadores panorámicos

Criterios de selección

Seguridad y radioprotección

Dosimetría personal y de rutina

Proyectos de plantas

Costos

Aspectos regulatorios

Cronogramas



INTRODUCCION

El uso de radiaciones ionizantes como modificador de propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales irradiados, es bien conocido desde hace más de 50 años. Tanto es así, que se ha transformado en una tecnología única en algunos casos y que desplazó a otras alternativas de procesamiento por sus costos, impacto ambiental, seguridad y eficiencia.

Actualmente las principales aplicaciones industriales son la esterilización de producto biomédicos, cosméticos y farmacéuticos, materiales para embalajes en la industria alimenticia, irradiación de alimentos y productos agrícolas, para su desinfección, inhibición de la brotación, prolongación de la vida útil, control de plagas y aspectos fitosanitarios y cuarentenarios entre otros.

En el campo de los materiales, la modificación de propiedades físicas de polímeros, “crosslinking”, curado de tintas y desarrollo de materiales inteligentes.

El tratamiento como se verá más adelante, consiste en someter a los productos a un campo intenso de radiaciones ionizantes, donde la variable del proceso es el tiempo de exposición y por ende la *dosis de radiación* absorbida por el producto.

La tabla 1 lista algunas de las aplicaciones mencionadas, sus efectos y el rango típico de dosis. En determinados productos los valores de dosis están reglamentados o sugeridos por autoridades sanitarias oficiales nacionales y/o internacionales.

TABLA1 : Rangos típicos de dosis y efectos del tratamiento		
Producto	Efecto buscado	Dosis típica (KGy)
Papa, cebolla, ajo	Inhibición de la brotación post cosecha	0,05 - 0,15
Frutillas, arándanos y frutas finas.	Extender la vida útil retardando la maduración	1 - 4
Control de plagas	Esterilización de insectos	0,1 – 0,5
Carnes, pollo, pescados	Retardo de descomposición, eliminación de patógenos	1 - 7
Aromáticas y especias	Disminución o eliminación de microorganismos e insectos	1 – 30
Biomédicos y farmacéuticos	Esterilización	15 – 30
Materiales poliméricos	Crosslinking	1 – 250
	Grafting	0,2 - 30

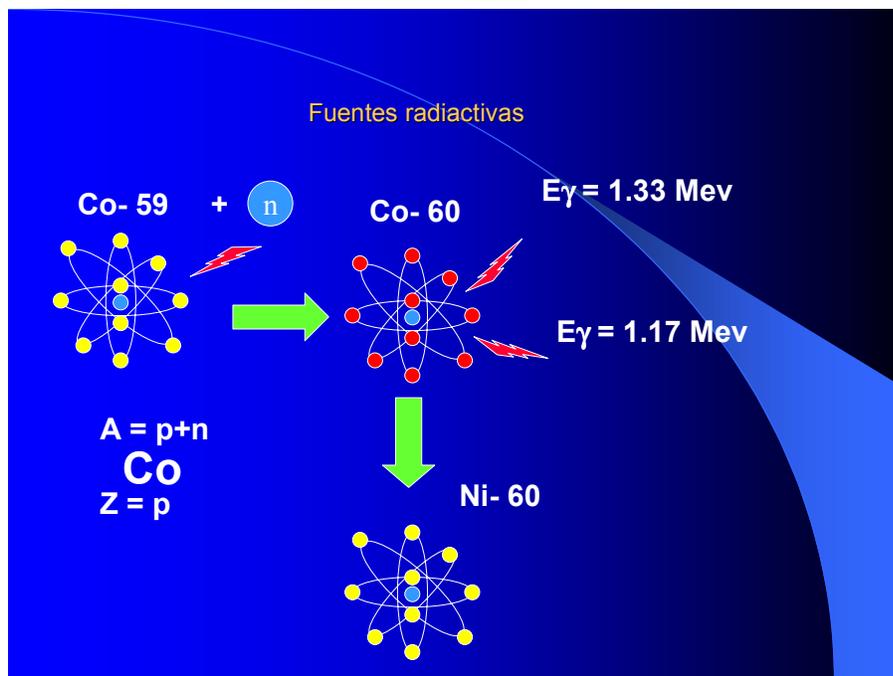
La creciente investigación en el uso y aplicación de las radiaciones ha impulsado a este tipo de industria a extenderse mundialmente mostrando un crecimiento sostenido



de esta tecnología, existiendo con más de 200 plantas de uso industrial alrededor del mundo.

La materia prima de una planta de irradiación es un isótopo radiactivo del cobalto natural denominado Co-60.

En su proceso de desintegración radioactiva cada átomo de Co-60 emite energía en forma de radiación electromagnética (radiación gamma) que al interactuar con los materiales sometidos al tratamiento provoca modificaciones conocidas, predecibles y controlables.

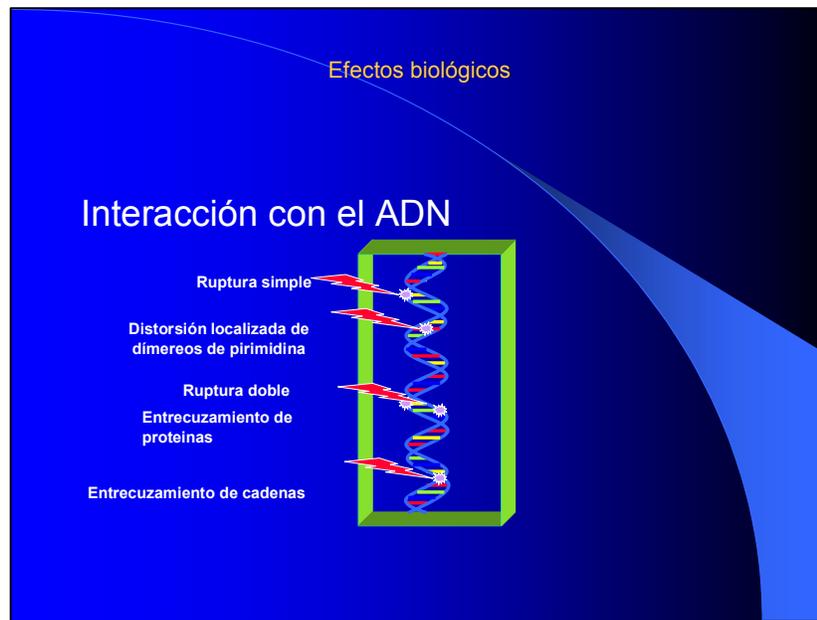


El efecto biológico de la interacción de la radiación con el medio, resulta en rupturas de la estructura del ADN del núcleo celular en diferentes partes.

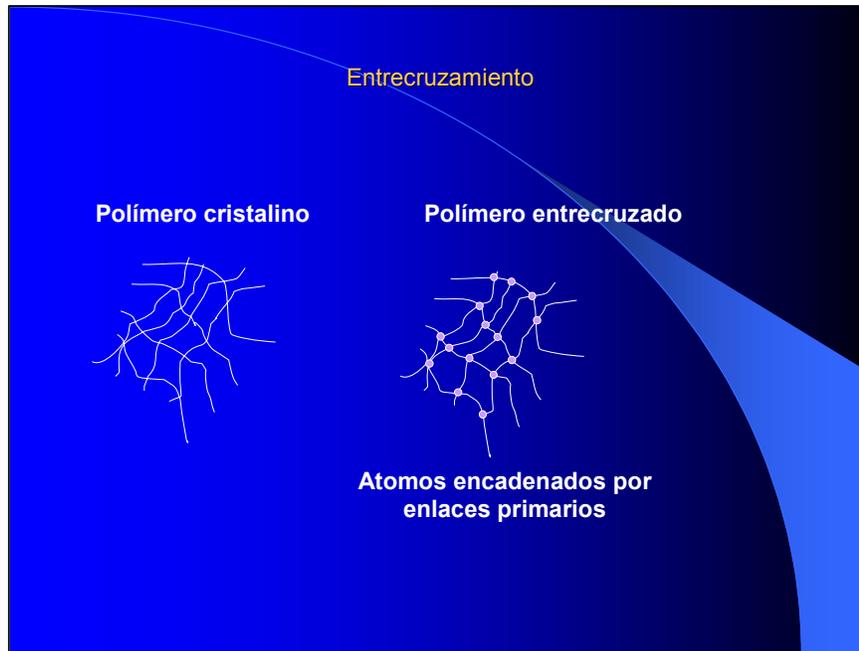
Debido a este fenómeno y al grado del daño producido (función de la dosis absorbida) las células afectadas pasan a un estado denominado de apoptosis, que significa la muerte celular programada, mecanismo éste con que cuentan todos los seres vivo (bacterias, hongos parásitos y virus), logrando por este mecanismo esterilizar o disminuir la contaminación, hasta alcanzar los niveles establecidos para los diferentes productos.

Daños a la estructura celular por radiación

En el caso de los materiales poliméricos o plásticos el principio es similar, la radiación afecta las cadenas largas propias de estos materiales, dando por resultado roturas y entrecruzamiento entre cadenas (“croslinking”).



Este efecto provoca cambios estructurales que, en algunos casos, implican mejoras en las propiedades físicas de los materiales tales como mayor resistencia mecánica, mayor resistencia térmica y química, aumento en las propiedades de termocontracción o disminución del tiempo de curado, compitiendo técnica y económicamente con catalizadores químicos.



Los tratamientos con radiaciones presentan diversas ventajas respecto a otros métodos como, por ejemplo, la esterilización por óxido de etileno o vapor húmedo por no dejar efectos residuales, no generar contaminación ambiental ni destrucción de la capa de ozono o requerir tiempos prolongados de tratamiento.



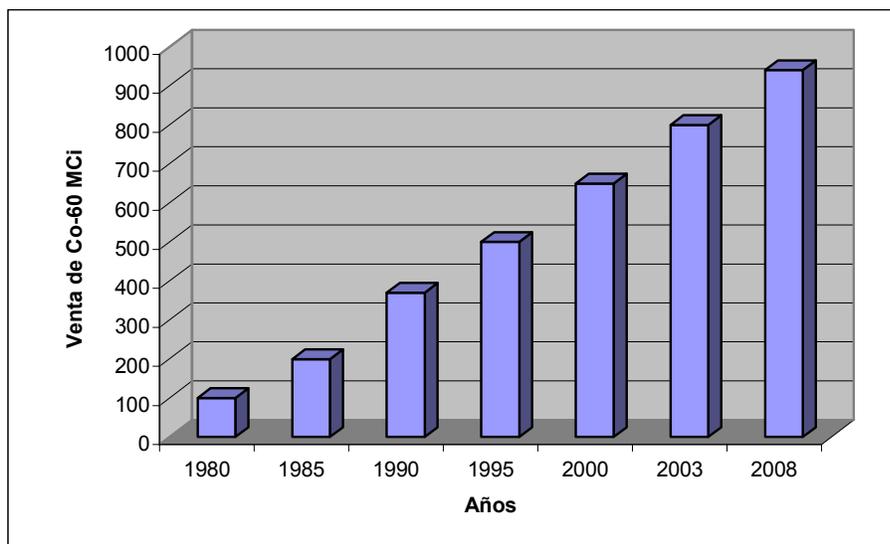
Las ventajas del tratamiento con radiaciones son:

- Los productos tratados pueden ser usados inmediatamente
- Los productos son irradiados en su embalaje definitivo sin ser alterados.
- No posee acción residual
- Mínimo aumento de temperatura durante el tratamiento
- Pueden tratarse productos enfriados o congelados.
- Precisión y repetición de las condiciones de tratamiento
- Facilidad en el control de proceso
- Uniformidad de suministro de la dosis de radiación requerida.

Crecimiento industrial de la plantas de irradiación

El uso comercial de la irradiación gamma para esterilización de productos biomédicos y farmacéuticos se desarrolló en la década de 1950, por lo que la tecnología en procesos de irradiación es muy bien conocida y se cuenta con gran experiencia y confianza en estas áreas. Esta expansión de las aplicaciones industriales de irradiación condujo al desarrollo de grandes plantas permitiendo optimizar los diseños de instalaciones e incorporar nuevas aplicaciones. Actualmente diversas empresas ofrecen al mercado diseños de plantas modernos y específicos para cada producto.

Una medida del crecimiento mundial de la tecnología de irradiación la proporciona el incremento en la producción de fuentes industriales de Co-60 durante los últimos 28 años como muestra la figura siguiente.



Basándose en estos datos puede estimarse que la capacidad instalada se incrementa a una tasa del 6% anual aproximadamente.



Es interesante notar que el uso de material biomédico descartable y envases para la industria de la alimentación aumenta a una tasa similar de entre 6% a 8% anual

Puede verse, entonces, que el tipo de aplicaciones en que se utiliza la irradiación gamma se incrementa en forma firme y sostenida en áreas tales como “crosslinking” y polimerización, esterilización de productos médicos, irradiación de alimentos y aplicaciones para cuidado del medio ambiente como pueden ser la irradiación de barros cloacales y el tratamientos de gases para la eliminación de los SOx y NOx y su conversión como fertilizantes o mejoradotes de suelos.

Por otra parte, existen aplicaciones emergentes en las áreas de nanomateriales, materiales compuestos, materiales absorbentes, hidrogeles y polímeros inteligentes.

PROCESO DE IRRADIACIÓN

Durante el proceso de irradiación, los productos o materiales son intencionalmente irradiados para preservar, modificar, crear o mejorar características.

El proceso se lleva a cabo disponiendo el producto a tratar en las vecindades de un conjunto de fuentes radiactivas de Co-60 (rack portafuentes) durante intervalos de tiempo y posiciones prefijadas, haciendo circular el material a tratar en torno al irradiador mediante un sistema de transporte apropiado.

La radiación proveniente del conjunto de fuentes radiactivas interactúa con el producto suministrando la energía necesaria para alcanzar el efecto buscado, la cantidad de energía absorbida por el producto depende de su densidad y espesor y del tiempo de irradiación.

Se denomina dosis a la energía absorbida por unidad de masa de producto y su unidad es el Gray (J / Kg). Cada tipo de producto tratado recibirá una dosis particular de acuerdo al efecto que se pretenda y su valor exacto se determina mediante investigaciones y ensayos preliminares.

Es muy importante saber que un producto sometido a los efectos de la radiación gamma o rayos X no se transforma en un material radiactivo como suele confundirse, y solo se ven modificados aspectos físicos y/o biológicos cuyos efectos hacen al interés del tratamiento, tal como sucede en el tratamiento de terapia o diagnóstico sobre pacientes humanos para la cura y diagnóstico de diversas enfermedades.

Abreviaturas y unidades

Algunas de las definiciones y unidades usadas en procesos de irradiación son:

Dosis absorbida: cantidad de energía absorbida por un material expuesto a una fuente de radiaciones. Su unidad es el gray (Gy), equivalente a 1 Joule por Kilogramo.

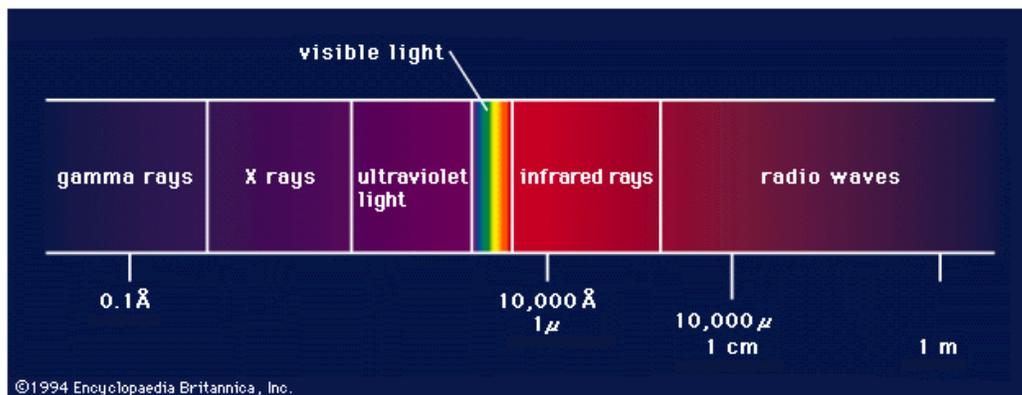
Actividad: cantidad de átomos que desintegran por segundo en una fuente radiactiva cualquiera. Su unidad es el becquerel, equivalente a 1 desintegración por segundo, aunque también se usa el curie que es igual a 37 GBq.



Período de semidesintegración: tiempo en el cual una cantidad estadísticamente significativa de átomos radiactivos se reducen a la mitad; es una característica de cada radioisótopo.

Energía asociada a una onda: es la energía de radiación electromagnética que es capaz de transferir a un medio por cada fotón que interactúa con el mismo. Su unidad es el electrón volt (eV), pero suele usarse más su múltiplo Mev.

La radiación electromagnética, también conocida como radiación gamma, proviene de la desintegración radiactiva de diversos materiales (en particular interesa el caso del Co-60) y se encuentra ubicada dentro del espectro electromagnético en la vecindad de los rayos X.



La energía asociada a la desintegración gamma emitida por los átomos del cobalto-60 posee una penetración suficiente como para romper ligaduras moleculares y producir ionizaciones a nivel de la estructura electrónica de los átomos con los cuales interactúa, pero no resulta suficiente para afectar la estructura del núcleo atómico, razón por la cual no puede transformar en radiactivos los átomos con los que interactúa.

Las fuentes de radiación más utilizadas comercialmente para el tratamiento con radiaciones son el cobalto-60, el cesio-137 y máquinas generadoras de rayos X y electrones de alta energía en el rango de 5 a 10 Mev.

Las ventajas en el uso de Co-60 frente a otras alternativas es que no resulta soluble en agua que normalmente utilizada como blindaje biológico en tanto que el Cs-137 sí lo es, posee una buena energía por desintegración (dos fotones de 1,33 MeV y 1,17 MeV), tiene un período de 5,21 años, compatible con la duración de una planta (proyectadas para 30 años), es de fabricación nacional, bajo costo comparativo, buena confiabilidad de fabricación y mantenimiento sin fallas.

Irradiadores

Se entiende por irradiador a un arreglo geométrico de fuentes radiactivas.

Generalmente se utilizan geometrías planas, de tal forma que el campo de radiación emitido resulta paralelo al irradiador y panorámico, es decir emite radiaciones en todas las direcciones, de tal forma que el campo de radiación alcance en forma homogénea



a todo el producto a tratar. También existen otras configuraciones aptas para diferentes propósitos.

Las fuentes industriales de Co-60 son “lápices” de 450 mm de largo por 11 mm de diámetro formadas por dos tubos cilíndricos concéntricos de acero inoxidable sellados en sus extremos con tapones soldados. Dado que el material radiactivo se encuentra dentro del cilindro interno, se garantiza una doble barrera de protección frente a posibles pinchaduras o fugas del cobalto metálico radiactivo.

Los procedimientos y normas de construcción de fuentes radiactivas conducen a un producto rigurosamente controlado y confiable desde el punto de vista mecánico y radiológico.

Los lápices se disponen en forma paralela dentro de un marco metálico de acero inoxidable en grupos de 30 lápices aproximadamente, formando lo que se conoce como portafuentes individuales. Cada portafuentes esta formado por una estructura rígida de 500 mm por 500 mm.

Estos portafuentes individuales se agrupan de acuerdo al tamaño del irradiador, en un *rack* o estructura metálica para formar el irradiador completo. Su tamaño final debe contemplar no sólo la carga existente, sino espacio suficiente para el agregado de nuevas fuentes a lo largo de la vida útil de la instalación, estimada normalmente en 30 años. Las nuevas fuentes se adicionan a razón de un 12,5 % por año a fin de mantener constante el inventario de material radiactivo, conforme a la demanda de la planta y a su decaimiento.

Pueden distinguirse los lápices nuevos, por resultar más luminosos, que los lápices ya decaídos. La luminosidad se debe a un efecto conocido con el nombre de Cherencov.

PLANTAS DE IRRADIACIÓN

Existen una gran variedad de irradiadores, con características particulares, según su empleo y condiciones de servicio pudiendo tipificarlos como:

- Experimentales
- De Laboratorio
- Industriales
- Fijos
- Móviles
- Secos
- Bajo agua

En todos los casos, las normas de construcción, seguridad y mantenimiento están reglamentadas y actualizadas por la Autoridad Regulatoria Nuclear, único ente oficial encargado de controlar y legislar todos los aspectos de seguridad radiológica y nuclear del país.



Plantas industriales

Toda planta industrial de irradiación con fuentes depositadas bajo agua cuenta con los siguientes elementos:

- Blindaje masivo en la sala de irradiación
- Laberinto de ingreso y egreso
- Pileta de guarda de fuentes
- Sistema de elevación de fuentes
- Sistema de transporte del producto
- Sistema de refrigeración de agua de pileta (según la potencia instalada)
- Sistemas de seguridad, instrumentación y control
- Sistema de ventilación
- Sistema de tratamiento de agua de pileta
- Sistema de agua de emergencia
- Zonificación de áreas.

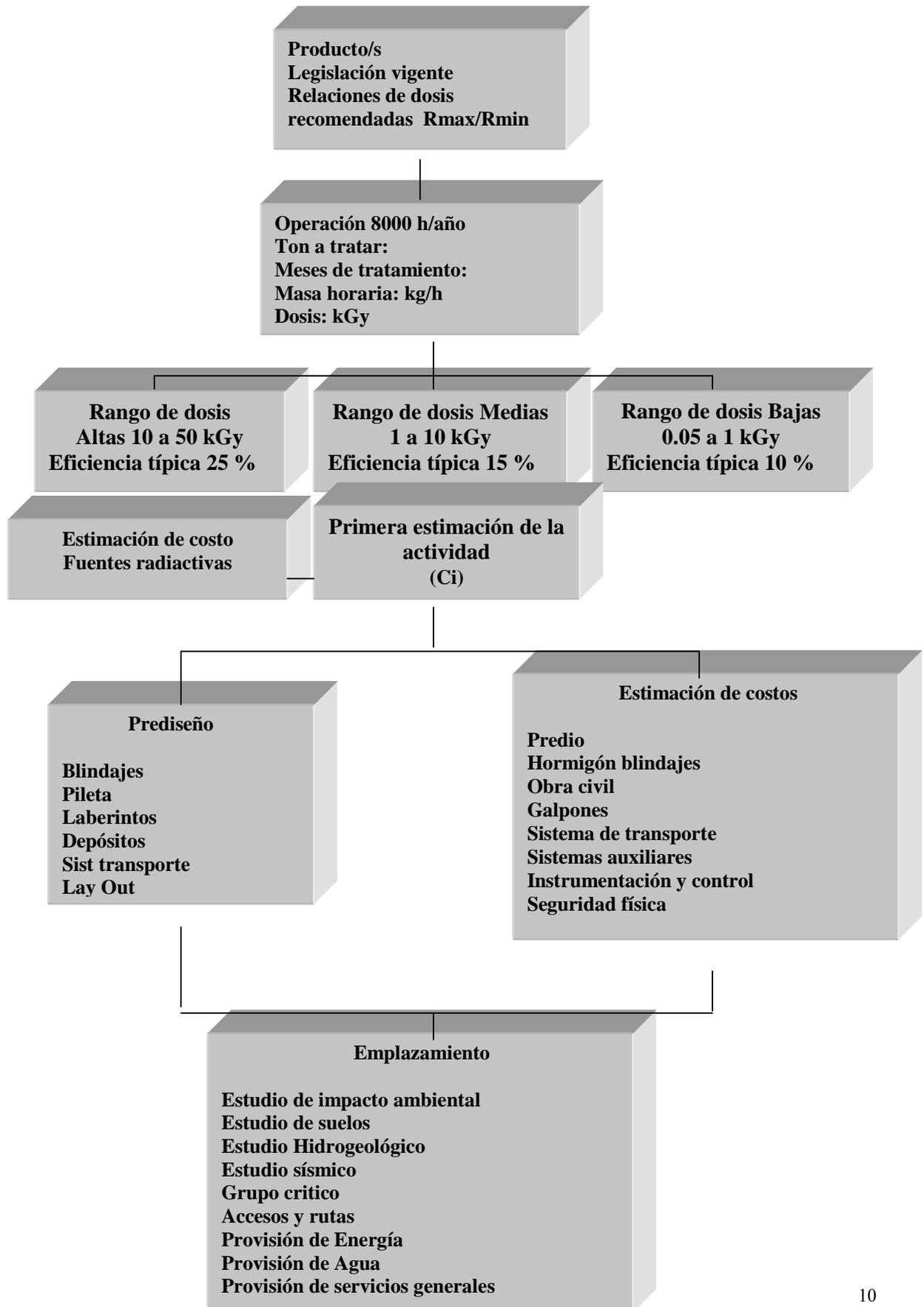
Cada uno de estos sistemas deberá ser diseñado, construido y aprobado priorizando la seguridad radiológica y física tanto del personal de planta como del público y el cuidado del medioambiente. En este sentido, la selección de materiales y componentes sometidos a campos intensos de radiación resulta de vital importancia para garantizar el mejor desempeño de cualquier instalación.

Aspectos de diseño

El esquema siguiente muestra los datos y pasos requeridos para efectuar el diseño de plantas de irradiación con fuentes bajo agua.

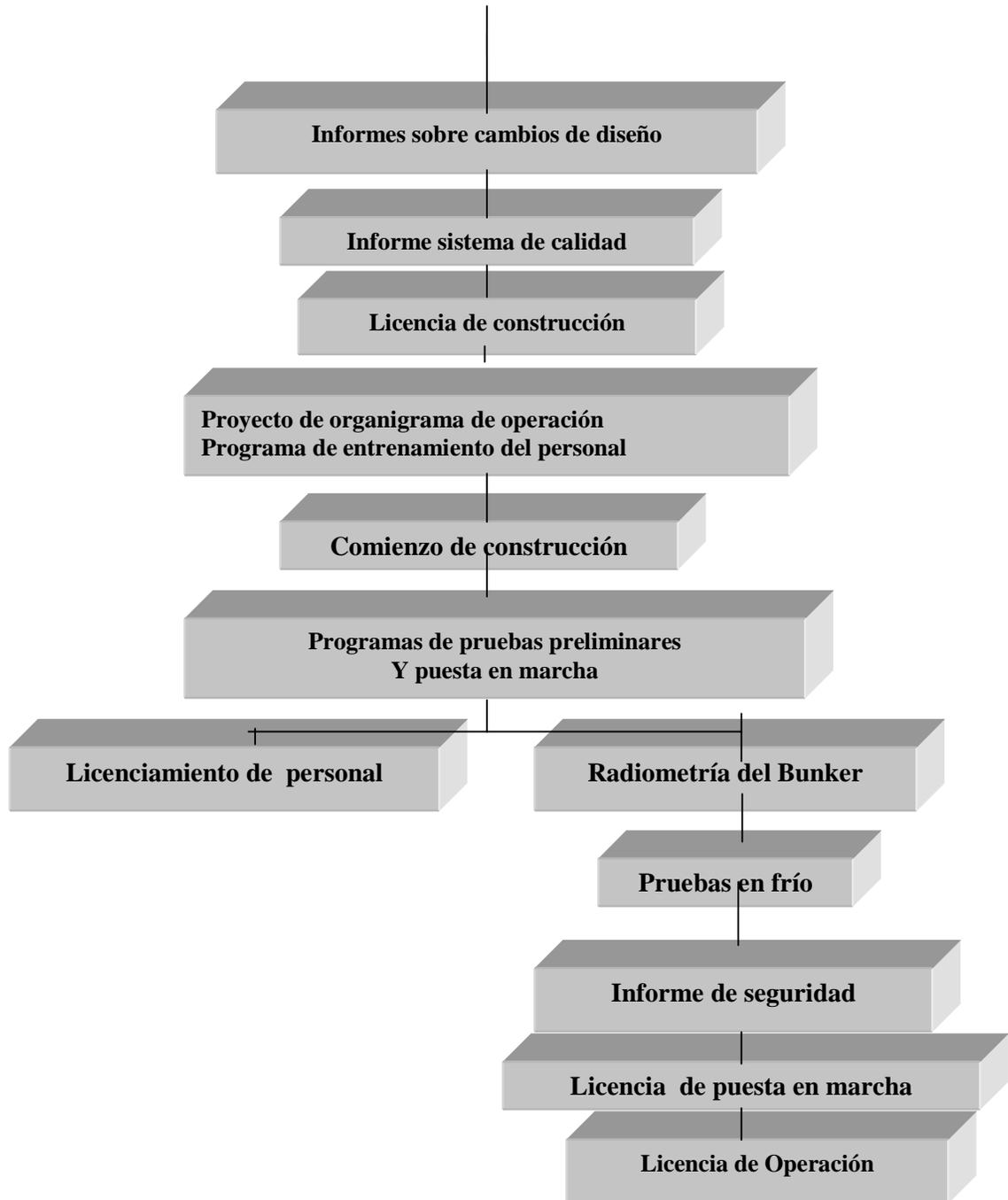


DISEÑO DE PLANTAS DE IRRADIACIÓN





**DOCUMENTACIÓN Y REQUISITOS HASTA LA PUESTA EN MARCHA
REQUISITOS DEL ARN**



Principios de diseño

Como se ha dicho, es posible el diseño de irradiadores pequeños normalmente utilizados en trabajos de investigación (decenas o centenas de Ci) o grandes plantas de irradiación que operan con millones de Ci.



Las principales diferencias entre ambos tipos es el inventario radiactivo (cantidad de Co-60) y la forma de mover los materiales a irradiar dentro del campo de radiaciones, por lo que el modo de operación debe ser seleccionado para una necesidad específica.

Los principios básicos de diseño pueden sintetizarse en

- Maximizar la utilización de energía
- Proveer la mejor uniformidad de dosis
- Asegurar una operación segura y sencilla.

Estas premisas pueden lograrse incorporando elementos que han sido probados y reconocidos desde el comienzo del uso de esta tecnología.

- Disponer el producto en más de una fila de cajas frente al irradiador
- Minimizar los espacios horizontales y verticales entre cajas
- Optimizar la distancia fuente producto para la relación de dosis requerida.
- Mover las cajas de producto en el sentido horizontal y vertical en ambas caras del irradiador
- Usar lápices de cobalto con doble encapsulado
- Agua desmineralizada en la pileta de almacenaje
- Diseñar el blindaje biológico de la sala de irradiación y el laberinto en concreto con densidades estándar. (2,32 g/cm³) o baritado (3,2 g/cm³).

Actividad de diseño

La masa horaria de producto a ser tratado depende directamente de la actividad de Co-60 y de la dosis requerida.

La actividad instalada será siempre menor que la actividad de diseño. Esta última se calculará en base a los requerimientos de dosis y a la máxima carga anual de producto durante la vida útil de la instalación incluyendo futuras necesidades e incrementos de demanda.

Los irradiadores se licencian para almacenar una actividad en fuentes que no supere la actividad de diseño.

La velocidad de dosis sobre el producto está directamente relacionada con la actividad instalada.

La variable de ajuste sobre la dosis entregada al producto es el tiempo de irradiación, que es controlado por el operador, ya sea mediante la regulación de la velocidad del sistema de transporte o modificando el tiempo por posición del producto frente al irradiador.



La única corrección en el tiempo de irradiación de los productos se debe al decaimiento propio de las fuentes radiactivas, que disminuyen su actividad en un 12,5% anualmente es decir un 1% mensual aproximadamente, con lo cual se requiere aumentar el tiempo de exposición en esta cantidad para mantener la misma dosis sobre cada producto. Esto lleva a que, en determinados casos, el tiempo total de irradiación se haga particularmente largo, debiendo entonces reponerse la actividad decaída a fin de mantener las mismas condiciones de producción.

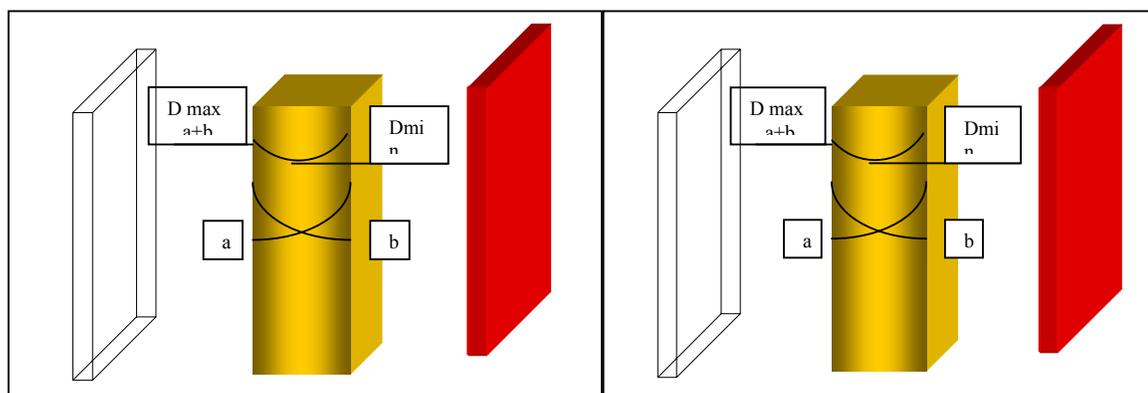
La eficiencia de una planta se define como la relación entre la energía por unidad de tiempo absorbida por el producto y la emitida por el irradiador. Su valor típico para una planta de 1 MCi es del orden del 25% al 30%

Dosis requerida y dosis suministrada

La dosis requerida para lograr un efecto buscado y conocido normalmente se fija a través de trabajos de investigación que involucran la determinación de la relación dosis-efecto ligada directamente a la relación producto-efecto, por ejemplo esterilización o reducción de patógenos.

Estos trabajos conducen a determinar dos límites importantes: la dosis mínima requerida para lograr el efecto buscado y la dosis máxima que tolera el producto irradiado sin modificar características de calidad que se desean conservar (aromas, sabores, colores, resistencia mecánica etc).

La distribución de dosis en profundidad sobre un producto al ser irradiado por ambas caras tiene el aspecto que se muestra en las figuras siguientes.



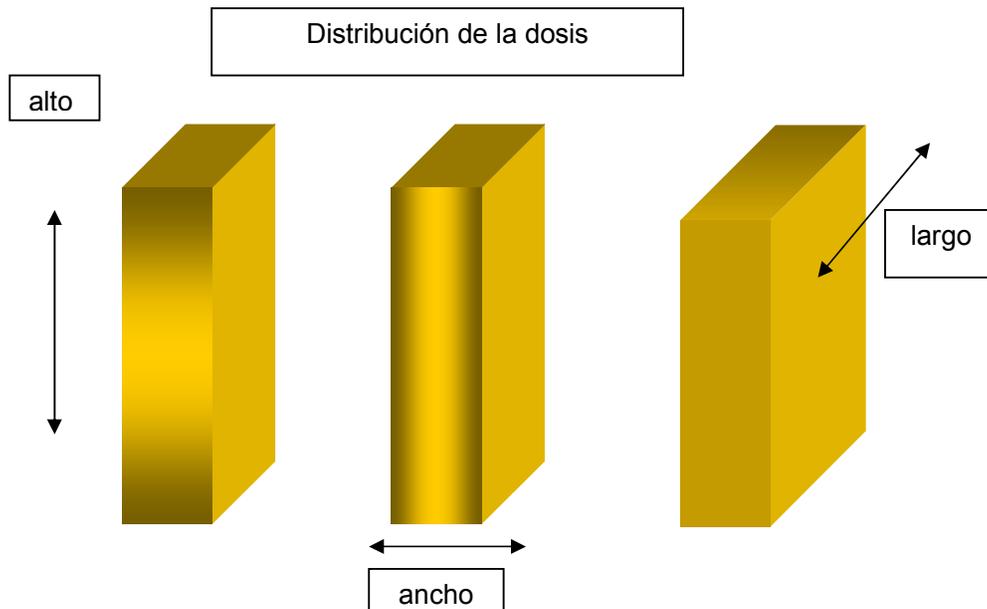
Durante el proceso de irradiación, la radiación gamma interactúa con el producto de diversas formas, conocidas como efecto Compton, efecto fotoeléctrico y efecto de formación de pares, los que generan, además, subsecuentes ionizaciones e interacciones secundarias depositando la energía en la materia irradiada.

Este proceso de transferencia de energía decrece en su intensidad a medida que aumenta el espesor del material aparejando también un decrecimiento de la dosis con la profundidad de penetración.

La forma de la curvas a y b muestran el decrecimiento de la dosis absorbida dependiendo de la composición del material irradiado, de su densidad, de la energía



de la radiación incidente y de la distancia entre la fuente y el producto, esta distribución de dosis en el producto debe imaginarse en las tres dimensiones de las cajas.



La homogeneidad en la distribución de las dosis, es decir, tratar de hacer mínima la relación entre D_{max} / D_{min} puede mejorarse mediante diversos caminos.

En el sentido del alto, moviendo al producto verticalmente o bien haciendo que el tamaño del irradiador exceda los límites del producto (“*overlap*” de fuente sobre producto).

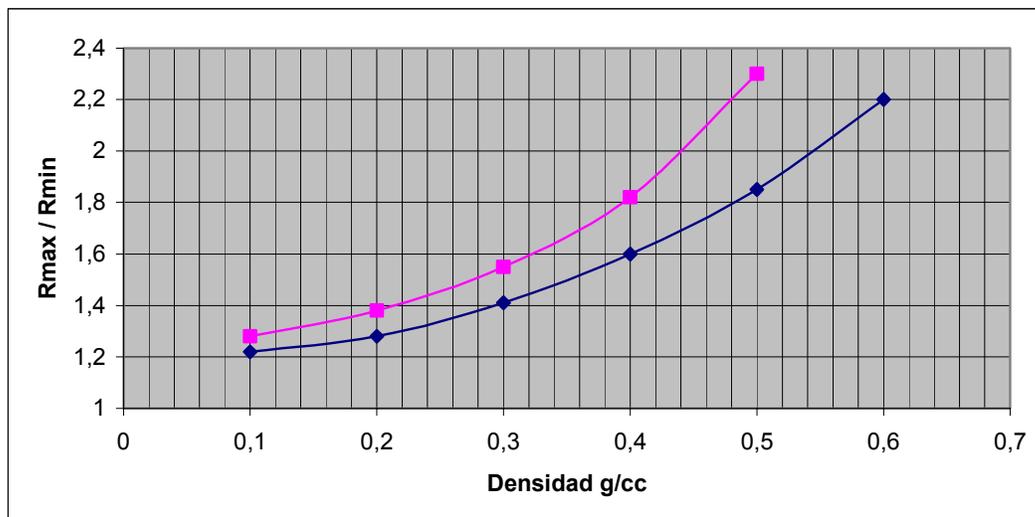
En el sentido del largo, no presenta mayores dificultades siempre que el producto recorra toda la longitud del irradiador en ambos sentidos.

En el sentido del espesor de la caja bastará con irradiarla por ambas caras en todas las posiciones durante el mismo tiempo.

Estos movimientos se logran diseñando un sistema de transporte de producto con movimientos y posiciones precisas, en las tres direcciones, y en ambas caras del irradiador.

De lo dicho se desprende que tanto el sistema de transporte, como la geometría entre la fuente y el producto son factores determinantes de la relación de dosis R_{max} / R_{min} y por ende de la eficiencia del irradiador.

Por otra parte, la relación de dosis se incrementa con la densidad del producto y con las dimensiones de las cajas como se muestra en el siguiente gráfico.



La figura muestra como aumenta la relación de dosis como función de la densidad del producto para el caso de dos diseños de irradiadores comerciales diferentes.

En la práctica, relaciones de dosis próximas a 1 pueden obtenerse cuando se trata de trabajos de investigación, para espesores de muestra delgados y cuando se trata de conocer los efectos de la dosis sobre un producto dado. Esto se logra con muestras de tamaño pequeño.

Para plantas comerciales esto no es posible por razones económicas, por lo que los tamaños típicos de contenedores de producto se encuentran en el rango de 0,1 m³ a 0,5 m³.

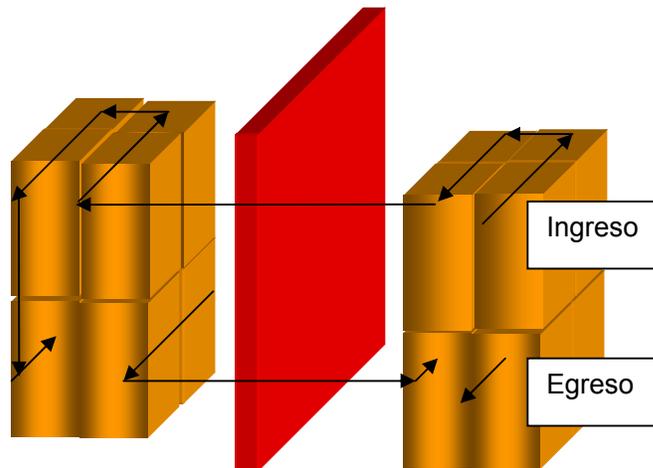
Irradiadores panorámicos categoría II y IV

Bajo esta denominación el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) clasifica los irradiadores comerciales según se almacenen las fuentes en seco o bajo agua.

Por otra parte, estos tipos de irradiadores pueden operar en forma continua, por “*batch*” o por tiempos por posiciones predeterminadas (“*shuffle – dwell time*”).

Existen diversas formas de mover el producto en torno al irradiador dependiendo del sistema de transporte seleccionado,

La experiencia ha demostrado que en la medida que sea posible desplazar el producto en diversas pasadas (2, 4 o 6 en ambas direcciones y en, por lo menos, dos niveles) se consiguen mejor homogeneidad y menor relación de dosis, optimizando de esta forma la eficiencia del irradiador.

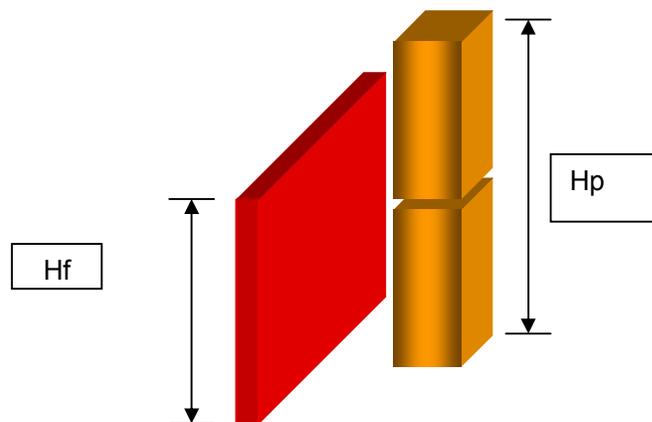


La ingeniería del sistema de transporte debe contemplar la reducción del espacio entre cajas en ambos sentidos, vertical y horizontal, tratando de interponer la menor cantidad de materiales estructurales tanto en el diseño del rack portafuentes como en el sistema de soporte y movimiento de cajas.

Existen dos formas básicas de ubicar el producto frente al portafuentes.

Producto sobre fuente

En este caso el alto de las cajas que contienen el producto a irradiar resulta más grande que el alto del irradiador.



Si bien el campo de radiación en los extremos del irradiador cae rápidamente, generando zonas de menores dosis que en su parte central, este efecto puede compensarse diseñando un sistema de movimiento que permita intercambiar ambas cajas, esto se logra, en la práctica, mediante un sistema de ascensores que toman la caja inferior y la ubica en la parte superior o bien manualmente en el exterior de la sala de irradiación.

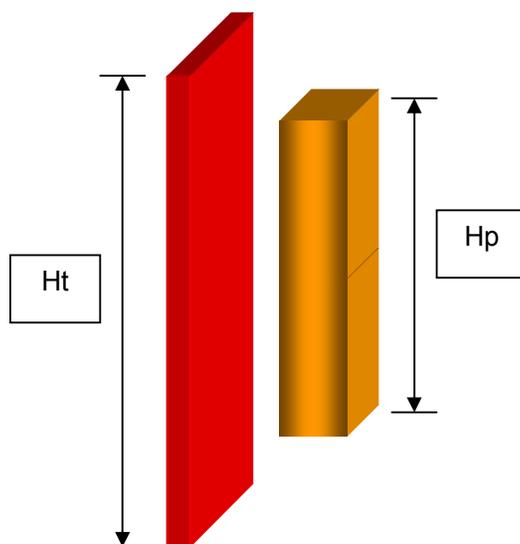


Este arreglo geométrico tiene la ventaja de aprovechar en forma más eficiente la energía proveniente de las fuentes dado que el irradiador se encuentra rodeado por mayor cantidad de producto.

Como límite dimensional se busca $H_p = 2 \cdot H_f$. En la práctica esta relación geométrica da una aceptable y homogénea distribución de dosis sobre el producto.

Fuente sobre producto

En este caso la fuente excede el tamaño del producto con lo cual no es necesario el intercambio de cajas para lograr una mejor distribución de dosis, pudiéndose alcanzar la dosis solicitada con una sola pasada por ambos lados del irradiador. Normalmente esta geometría se acompaña con dos o cuatro filas de carros portadores de producto a cada lado del rack.



Si bien existen plantas basadas en este arreglo, desde el punto de vista de la eficiencia en el aprovechamiento de energía resultan de menor rendimiento por desaprovecharse una parte de las radiaciones provenientes de los extremos del portafuentes.

Criterios de selección del un irradiador

Para lograr una operación eficiente de una plana de irradiación, un requerimiento crítico resulta ser el pleno conocimiento de los siguientes puntos:

- Tipo de producto a ser irradiado (densidad, tamaño, homogeneidad).
- Estacionalidad del producto (si se trata de alimentos)
- Volumen o masa anual a procesar.
- Dosis y uniformidad de dosis requerida
- Si se trata de un servicio de irradiación o es parte de un proceso de manufactura.



- Si está orientada a tratar un solo producto o se trata de una instalación multipropósito.

Existen diversos métodos para aproximarse a un diseño de irradiador; como idea general se busca determinar la dosis recibida por el producto en su pasaje por el entorno de las fuentes.

Esta determinación puede facilitarse asumiendo las siguientes hipótesis:

- El punto donde el producto recibe la dosis máxima se encuentra siempre en el centro de las caras externas de las cajas, paralelas al irradiador
- El punto donde el producto recibe la dosis mínima se encuentra siempre en alguna parte del plano medio de la cajas (por comodidad se toma el centro de la caja).
- La distribución de actividades en el irradiador es homogénea
- El campo de radiación es siempre simétrico respecto a los ejes del irradiador.
- La distancia entre cajas es despreciable
- El tiempo de pasaje de una posición a otra del producto es despreciable.
- El producto es homogéneo e isótropo.
- Es aplicable el principio de superposición de los efectos

Aceptando estas premisas se han desarrollado en la década de los 70 modelos de cálculo teóricos que, posteriormente, fueron verificados en la práctica con errores por defecto del orden del 10%. Actualmente con el auxilio de programas inspirados en códigos de cálculo basados en el método de Montecarlo se logran excelentes aproximaciones y diseños más realistas, confiables y económicos.

A fin de contar con un modelo de cálculo sencillo y rápido se da el siguiente ejemplo, utilizando los trabajos realizados por F.X. Rizzo, L.Galanter y K Krishnamurthy (1969).

El cálculo consiste en obtener las tasas de dosis mínima y máxima en el eje central de un irradiador cuyas dimensiones dependen del tamaño de la caja portadora de producto, de la densidad del producto y del número de pasadas que efectúa el producto frente al irradiador.

Existen diversos tipos de irradiadores, de acuerdo a la forma de mover el producto frente al rack portafuentes, el modo más sencillo lo constituye el llamado irradiador estacionario a partir del cual se obtuvieron gran cantidad de datos y experiencias dando origen a los trabajos realizados en el Brookhaven National Laboratory.

Se trata de una placa activa con fuentes de Co-60 donde el producto se mueve en el sentido perpendicular a la placa y cada caja pasa de ambos lados del irradiador. El tiempo de irradiación es el mismo para cada caja, cada caja ocupa las mismas cantidad de posiciones en ambos lados y el espacio entre cajas se considera despreciable.

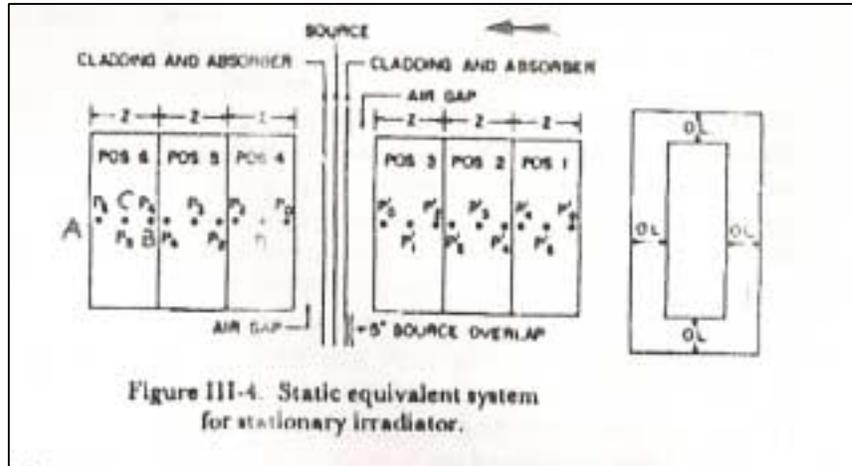


Figure III-4. Static equivalent system for stationary irradiator.

La dosis recibida en los puntos A y B de una caja que transita todo el camino por ambos lados del irradiador será:

$$D_{PA} = D_{P6} + D_{P4} + D_{P2} + D_{P0} + D_{P2} + D_{P4}$$

$$D_{PB} = D_{P4} + D_{P2} + D_{P0} + D_{P2} + D_{P4} + D_{P6}$$

Aceptando que el campo de radiaciones es simétrico y homogéneo en ambas caras de la fuente se tiene que:

$$D_{P0} = D_{P0'} ; D_{P1} = D_{P1'} ; D_{P2} = D_{P2'} ; D_{P3} = D_{P3'} ; D_{P4} = D_{P4'} ; D_{P5} = D_{P5'} ; D_{P6} = D_{P6'}$$

Resultando que:

$$D_{PA} = D_{PB} = D_{P6} + D_{P0} + 2 \cdot (D_{P4} + D_{P2}) = \text{Dosis máxima en el centro de las caras externas.}$$

La dosis mínima en el plano central será:

$$D_{PC} = D_{P5} + D_{P3} + D_{P1} + D_{P1'} + D_{P3'} + D_{P5}$$

Que por razones de simetría se reduce a:

$$D_{PC} = 2 \cdot (D_{P1} + D_{P3} + D_{P5})$$

La profundidad del blanco (cajas) entre los puntos P0 a P6, cuando el espesor de la caja es Z, será:

$P_0 = 0$ punto sobre el eje central del irradiador a profundidad cero = gap de aire

$P_1 = Z \cdot 1/2$

$P_2 = Z$

$P_3 = 3/2 \cdot Z$



$$P_4 = 2Z$$

$$P_5 = 5/2 \cdot Z$$

$$P_6 = 3 \cdot Z$$

La expresión general para un irradiador con (n) número de pasadas y un espesor de blanco z será:

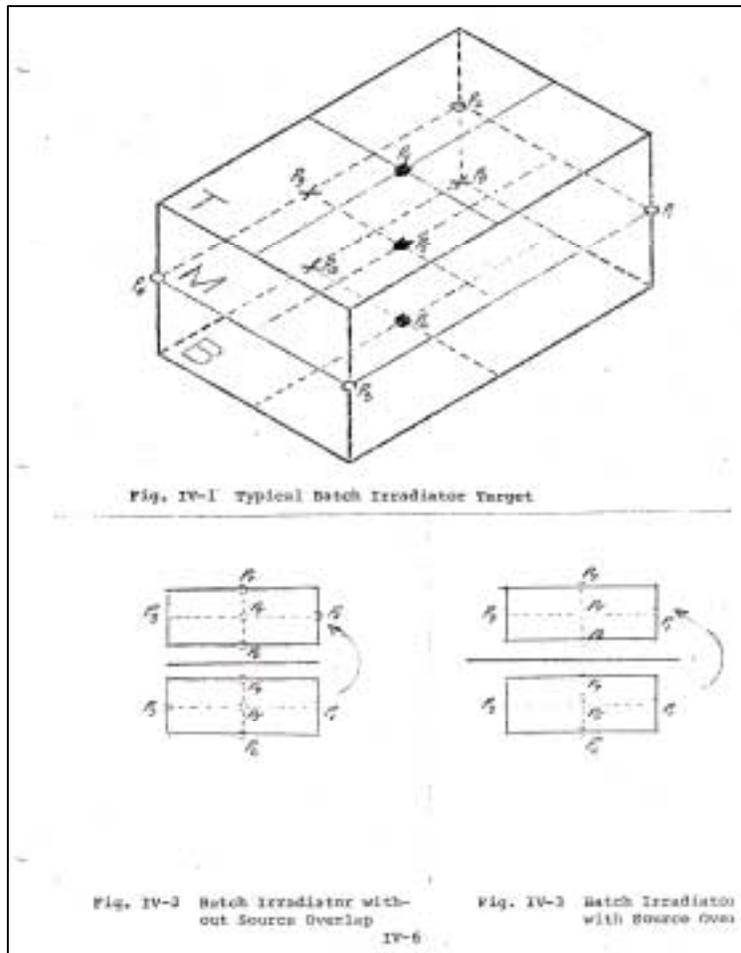
$$D_{\max} = D_0 + D_n + 2 \cdot (D_{n-2} + D_{n-4} + \dots + D_2)$$

$$D_{\min} = 2 \cdot (D_{n-1} + D_{n-3} + D_{n-5} + \dots + D_1)$$

Y la relación de dosis

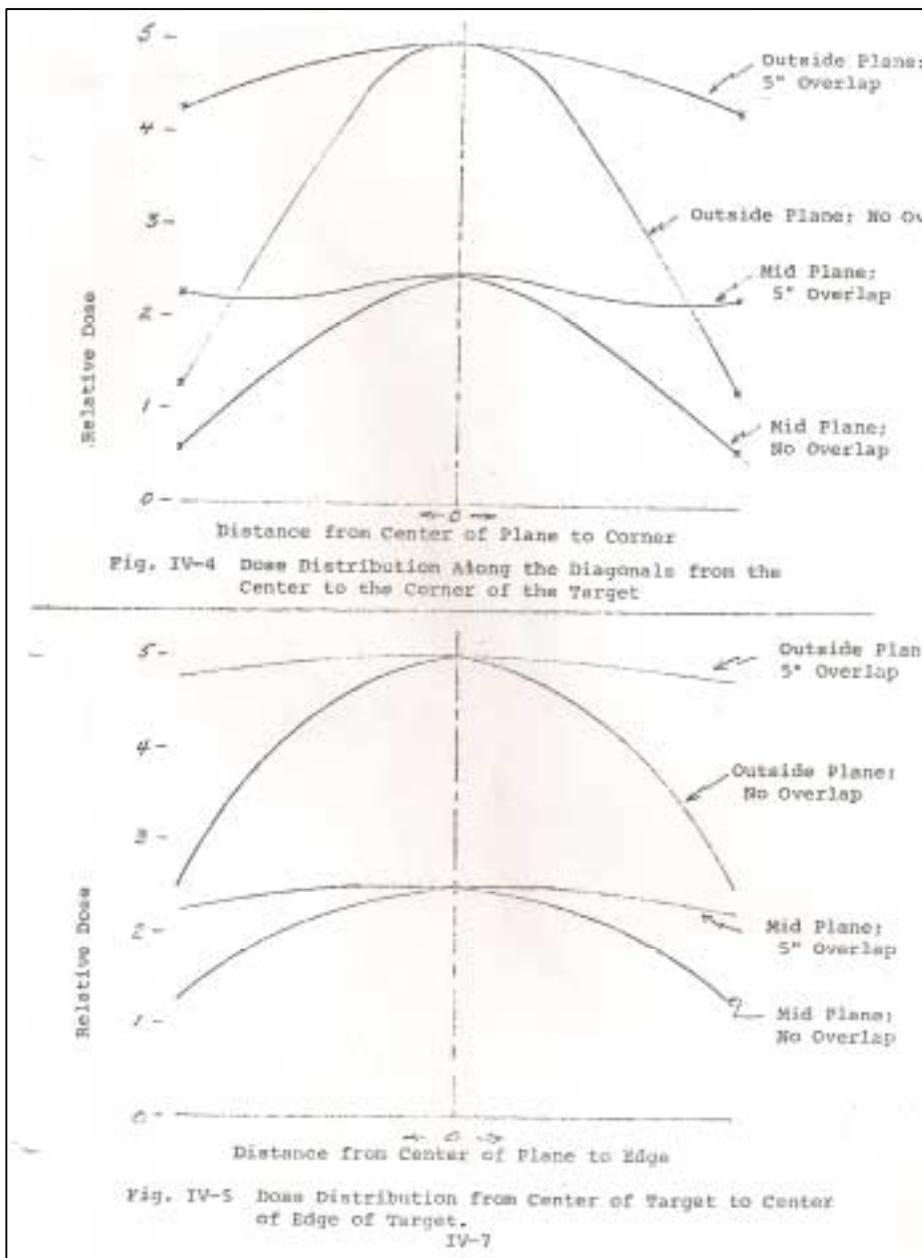
$$H = D_{\max} / D_{\min}$$

Para ilustrar donde se ubican los puntos de dosis máxima y dosis mínima se toma una caja que fue irradiada por ambas caras con dosímetros colocados en los puntos indicados.





La irradiación se llevó a cabo para las dos condiciones de las figuras donde en la última puede verse que el irradiador excede el tamaño de la caja (5"overlap de fuente sobre producto).



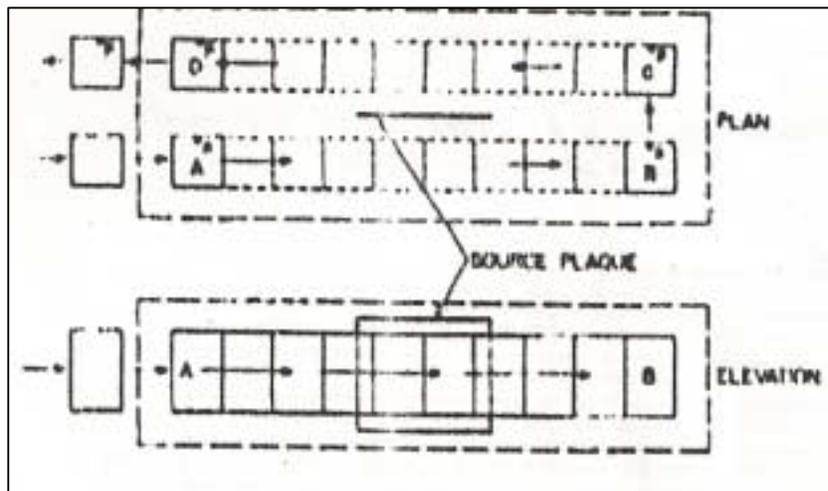
Si se grafica la distribución de dosis a lo largo de las diagonales pasando por el centro de la caja, ya sea en el plano T o B como en el plano M p3 p2 o p1 p4, puede verse como aumenta la dosis relativa en los extremos, aplanándose las curvas y mejorando la relación de dosis en ese caso. En forma análoga desplazándose desde el centro de la caja hacia la mitad de los lados el efecto es el mismo.



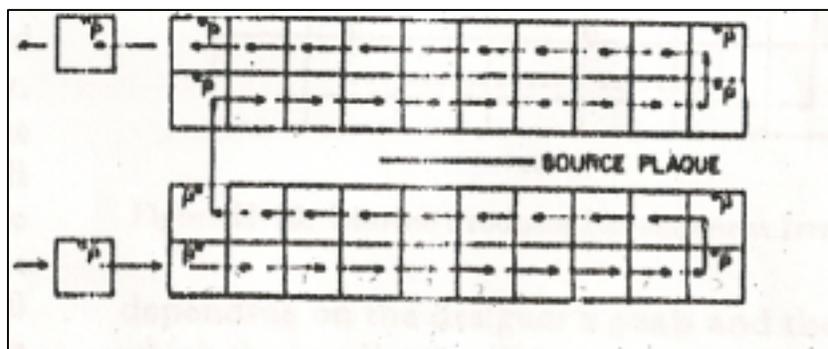
Como conclusión puede afirmarse que agregar fuentes más activas en los bordes del irradiador o extender las dimensiones del irradiador más allá del producto, desplaza los puntos de dosis mínima desde las esquinas hacia el centro de la caja, mejorando la homogeneidad y la relación de dosis.

A partir de los trabajos realizados con el modelo estacionario pueden extenderse conclusiones que permiten estudiar otras configuraciones geométricas y sistemas de transporte.

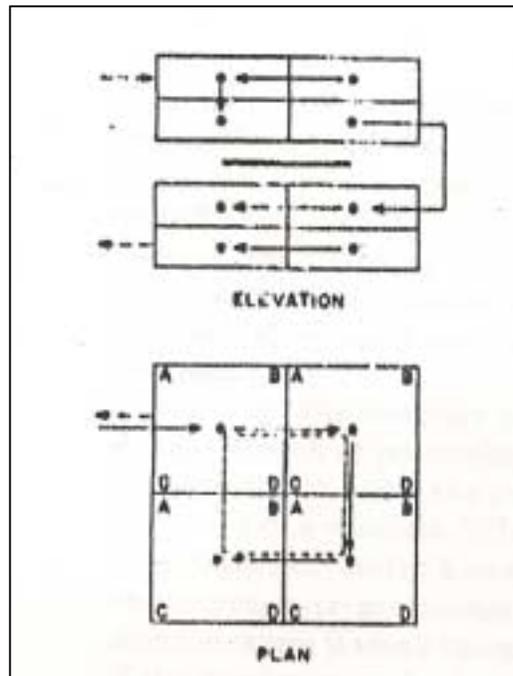
De acuerdo a la forma de mover el producto los irradiadores pueden clasificarse como muestran las siguientes figuras.



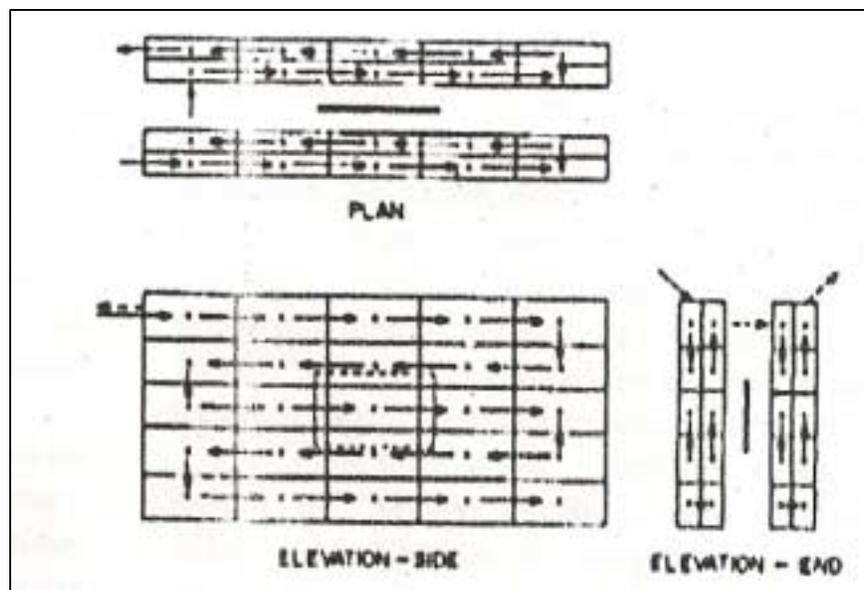
Un irradiador, dos pasadas, una dirección



Un irradiador, multipasada, una dirección



Un irradiador, dos direcciones (x,y), multipasada, tipo cuadrante



Dos direcciones, multiposición, multipasada

Como puede verse existe una gran variedad de formas y de tamaños, tanto de irradiadores como de maneras de mover el producto en torno al mismo.

Por lo tanto, un buen diseño conduce a la búsqueda del logro de las siguientes características.

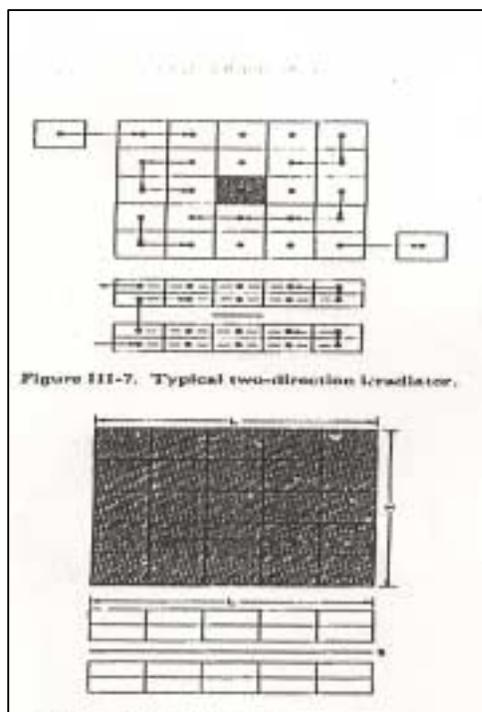


- 1) Todo irradiador debe ser diseñado para suministrar al producto la mayor uniformidad de dosis, es decir la menor relación $H = D_{max}/D_{min}$.
- 2) La uniformidad de dosis es un efecto compuesto entre la uniformidad en profundidad en la dirección normal al irradiador y la uniformidad lateral de dosis en planos paralelos al irradiador.
- 3) La uniformidad de dosis esta limitada por la densidad del producto, por el espesor del producto y por la energía de la fuente utilizada.
- 4) La distribución lateral de dosis depende de la geometría entre producto y fuente.
- 5) La uniformidad en profundidad se mejora irradiando al producto por ambas caras, y usando multipasadas.
- 6) La uniformidad de dosis lateral se mejora aumentando la actividad mediante el incremento del tamaño de la fuente relativa al producto, aplicando el criterio del overlap, disminuyendo el tamaño del producto y aumentando el tamaño de la fuente y moviendo el producto en las direcciones vertical y horizontal.
- 7) Los puntos de máxima dosis absorbida están siempre ubicados en alguna de las caras externas del producto paralelas al irradiador.
- 8) Los puntos de mínima dosis absorbida siempre estarán ubicados en el plano medio del producto paralelo al irradiador.

Criterio de diseño mediante el uso del *Irradiador Equivalente Estático*

Este criterio de cálculo rápido, permite lograr diseños con buena aproximación que, luego, pueden ser ajustados con modelos de cálculo mas sofisticados.

La idea se sustenta en reemplazar el movimiento de un producto cualquiera, en general visto como cajas moviéndose en torno a una fuente, por el movimiento de la propia fuente cubriendo la misma área expuesta y considerando el producto estático.

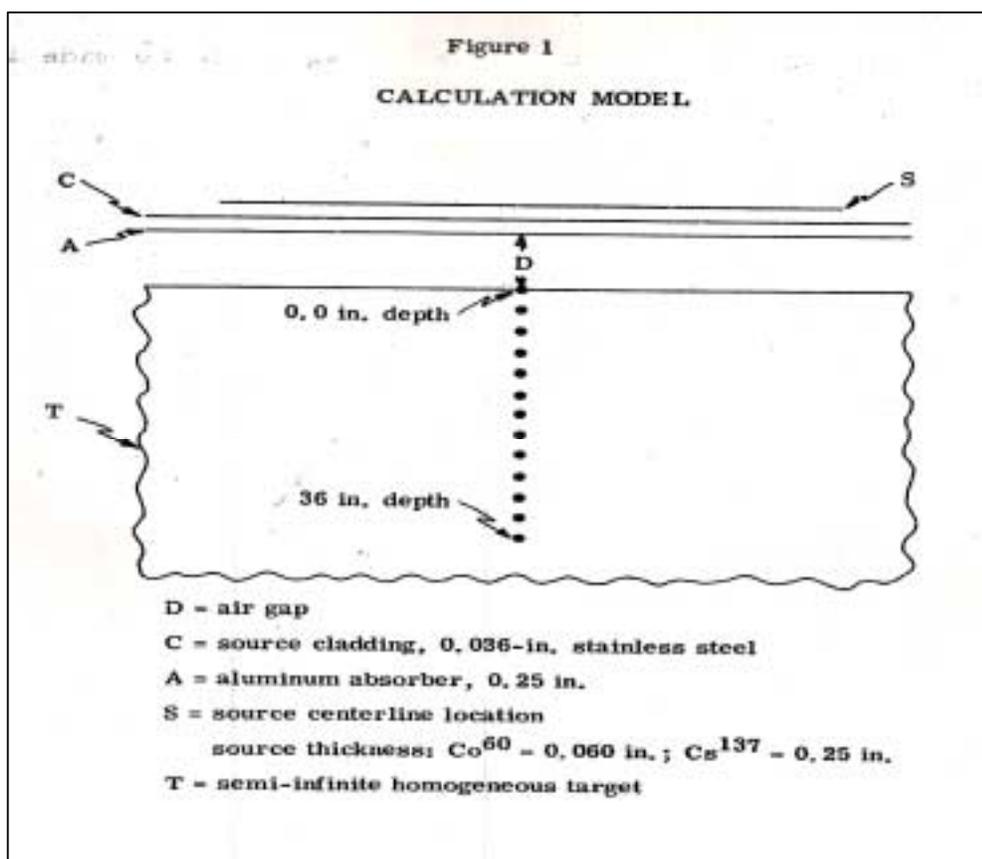




La figura anterior esquematiza un arreglo de cajas en torno a una placa real activa del tamaño de una caja. Si se intercambia el movimiento de las cajas por el de la fuente recorriendo todas las posiciones de las cajas con la fuente real puede asumirse que esto resulta equivalente a tener una sola fuente ficticia del mismo tamaño que la superficie de todo el arreglo de cajas.

La otra consideración que a hacer es que la placa grande (llamada placa ficticia) posee una actividad específica unitaria es decir nos entrega una dosis en el eje central de la placa de D ($\text{rad.cm}^2 / \text{h.Ci}$).

Mediante trabajos experimentales y programas de computación que corroboran estos datos, se han construido tablas donde figuran las tasas de dosis específicas a distintas profundidades y distancias fuente producto, para diferentes densidades de materiales y tamaños de placas fuentes cuadradas, desde 10"x10" hasta 120"x120", teniendo en cuenta el tipo de fuente (Co-60 o Cs-137) y la absorción de radiación en los materiales, las fuentes y el portafuentes según el modelo de la figura.



A título ilustrativo se ejemplificará el cálculo de un irradiador como el de la figura, multipasadas (4) dos de cada lado y dos direcciones (x;y) en el que se desea conocer, la dosis máxima, la dosis mínima y la relación de dosis, con las siguientes características:



- Fuente de Co-60
- Tamaño de la placa real 24"x24"
- Características de las fuentes (ver figura 1)
- Distancia fuente producto ("gap" de aire) = 3"

- Dimensiones de cada caja 24"x 24"
- Densidad del producto 0,7 g/cm³
- Espesor de la caja Z = 4"
- Arreglo geométrico entre fuentes y cajas: 5 filas x 5 columnas X 4 pasadas, 2 a cada lado de la placa.
- Placa ubicada en el centro del arreglo.

Dado que las cajas son indexadas de una posición a otra en forma horizontal y vertical, este movimiento puede sustituirse por una placa ficticia de 5 filas x 24" = 120" por 5 columnas x 24" = 120" según lo indicado en el modelo del *Equivalente Estático*.

Por lo tanto el modelo estático tendrá las siguientes características:

- Tamaño de placa ficticia 120"x120"
- Espesor de la caja 4"
- Gap de aire 3"
- 4 pasadas.

De acuerdo a lo visto para el cálculo de la dosis máxima, ésta puede expresarse para este caso como:

$$D_{\max} = D_{p0} + D_{p4} + 2 \cdot D_{p2}$$

Y la dosis mínima será

$$D_{\min} = 2 \cdot (D_{p3} + D_{p1})$$

La profundidad de los puntos considerados será:

$$P_0 = 0''$$

$$P_1 = 2''$$

$$P_2 = 4''$$

$$P_3 = 6''$$

$$P_4 = 8''$$

Las tasas de dosis específicas para los puntos considerados pueden obtenerse de las tablas para fuentes de Co-60, placa de 120"x120", gap de aire = 3", y densidad de producto 0,7 g/cm³ resultando:

$$D_{P_0} = 19,65 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$



$$D_{P1} = 12,99 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

$$D_{P2} = 9,38 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

$$D_{p3} = 7,02 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

$$D_{p4} = 5,36 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

Luego:

$$D_{\max} = 19,65 + 5,36 + (2 \times 9,38) \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2 = 43,77$$

$$\times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

$$D_{\min} = 2 \times (7,02 + 12,99) \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2 = 40,02 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

$$\text{Las relación de dosis resulta } H = D_{\max} / D_{\min} = 43,77 / 40,02 = 1,094$$

En este punto debe comentarse que, en todos los casos de los irradiadores planteados, la dosis máxima calculada por el método de la línea central coincide con las dosis medidas en la práctica, no ocurriendo lo mismo con las dosis mínimas, las que, en genera, resultan sobreestimadas.

Como criterio general se adopta corregir los valores calculados dependiendo del modelo de irradiador en estudio mediante coeficientes que se encuentran tabulados y que surgen de acuerdo a si la fuente real presenta un overlap respecto del tamaño de las cajas.

Para el caso de irradiadores del tipo multipasada y dos direcciones de movimiento la dosis mínima resulta sobreestimada entre un 5 a un 10 %.

A los efectos prácticos del ejemplo se disminuirá la dosis mínima un 7,5% resultando

$$D_{\min} = 40,02 \times 10^4 \times 0,925 = 37,02 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2$$

Y la nueva relación de dosis resulta ser

$$R = 43,77 / 37,02 = 1,18$$

Asumiendo que se procesará una caja / hora para una dosis de esterilización solicitada $D_s = 2,5 \text{ Mrad.} = 25 \text{ kGy}$, la actividad específica necesaria de la placa real será:

$$A_s = D_s / D_{\min} = 2,5 \times 10^6 \text{ rad/h} / 37,02 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2 = 6,75 \text{ Ci/cm}^2$$

$$\text{Si el área de la placa real es de } 24'' \times 24'' = 60,96 \text{ cm} \times 60,96 \text{ cm} = 3.716 \text{ cm}^2$$

Resulta una actividad real para irradiar una caja por hora de

$$6,75 \text{ Ci/cm}^2 \times 3716 \text{ cm}^2 = 25.083 \text{ Ci}$$

Si se requiriera irradiar 5 cajas por hora se tendrá una actividad total de placa de 125,415 KCi, o bien una actividad superficial de 33,75 Ci/cm²



Por último la eficiencia del irradiador será:

$$\eta = \frac{D_s \text{ (Gy)} \cdot M \text{ (kg/h)}}{3600 \text{ s/h} \cdot 0,0148 \text{ w/Ci} \cdot A \text{ (Ci)}} =$$

$$= \frac{25000 \text{ Gy} \cdot 132,14 \text{ kg/h}}{3600 \text{ s/h} \cdot 0,0148 \text{ w/Ci} \cdot 1,25 \cdot 10^5 \text{ Ci}} = 0,496 = 49,6\%$$

Y la producción anual será

$$132,14 \text{ kg/h} \cdot 8000 \text{ h/año} = 1.057 \text{ Tn/año.}$$

Por otra parte, se vió que las tablas de Rizzo están expresadas en velocidades de dosis específicas es decir, en rad/h .cm²/Ci, resultando entonces que la dosis solicitada provista por la placa real será:

$$D_s \text{ (rad)} = \frac{D_{\min} \text{ (rad/h} \cdot \text{cm}^2/\text{Ci)} \cdot A \text{ (Ci)} \cdot \Delta t \text{ (h)}}{S \text{ (cm}^2\text{)}}$$

De donde puede conocerse el tiempo de exposición necesario para alcanzar la dosis requerida.

Es decir

$$\Delta t \text{ (h)} = \frac{D_s \text{ (rad)} \cdot S \text{ (cm}^2\text{)}}{D_{\min} \text{ (rad/h} \cdot \text{cm}^2/\text{Ci)} \cdot A \text{ (Ci)}}$$

Resultando en este caso

$$\Delta t \text{ (h)} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \text{ (rad)} \cdot 3716 \text{ cm}^2}{37,02 \times 10^4 \text{ rad / h por Ci/cm}^2 \cdot 125.415 \text{ Ci}} = 0,2 \text{ hora / caja}$$

Es decir 12 minutos / caja o bien las 5 cajas por h.

A continuación se describirá un método determinístico de cálculo que permite aproximar valores de dosis cuando se requiere irradiar productos a bajas dosis como suele suceder en los alimentos o las especias.

En estos casos para lograr suministrar bajas dosis y una razonable relación de $D_{\max} / D_{\min} \leq 2$ o 3 según la legislación, deberá alejarse el producto a irradiar a distancias que varían entre 0,5 m a 2m, dependiendo de la densidad del producto y del espesor del bulto, con la consecuente pérdida de eficiencia de la instalación.

A los efectos prácticos cuando se quiere alcanzar un prediseño para efectuar una evaluación económica preliminar de la instalación, este método resulta aceptable.

Como ya hemos visto de las tablas de Rizzo, estas proveen valores de tasa de dosis específica para gap de aire hasta 7" = 17,78 cm y distintos espesores y densidades de materiales.

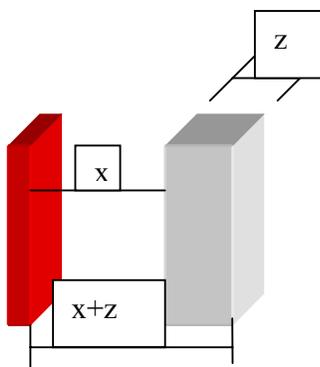


Si se quisiera extender este rango a distancias mayores que 7" pueden extrapolarse estos datos teniendo en consideración las siguientes premisas.

- a) Elaborar tablas calculando las velocidades de dosis específicas para los puntos P_0, P_1, P_2 en aire.
- b) A partir de estos valores pueden deducirse factores de contribución k_d, k_x para la configuración adoptada (estos factores se describirán a continuación).
- c) Calcular por el método de las tablas, las dosis D_{p0} en aire. para las distancias elegidas.
- d) Idem para los puntos D_{p1}, D_{p2}
- e) Con los valores obtenidos para cada distancia y utilizando los factores de contribución a partir de los D_{p0} , calcular los D_{p1} y D_{p2} en el material.

La contribución a la atenuación de la radiación entre dos puntos de un mismo material (por ejemplo agua) resulta independiente de la distancia a la fuente de radiación, siempre que se estudien puntos a separación constante.

La tabla siguiente expresa los valores de relación de dosis $H^{x+z}_z = D_{p(x+z)} / D_{px}$ para distintos espesores de agua (distante $x+z$ de la fuente) y la superficie (distante x de la fuente) para diferentes distancias fuente producto irradiado con una fuente de Co-60 y un blanco de agua.



Campo (")	DFP	H	H	H
		10 cm	20 cm	30 cm
14x14	50 cm	0,517	0,245	0,117
14x14	60 cm	0,545	0,268	0,136
14x14	80 cm	0,578	0,30	0,150
14x14	100 cm	0,60	0,32	0,168



$$\text{Sean } D^{50} = \frac{A \cdot \Gamma}{(50)^2} \text{ y } D^{50}_{p10} = \frac{A \cdot \Gamma \cdot e^{-\mu \cdot 10}}{(60)^2} \cdot k_{10}$$

las velocidades de dosis a 50 cm de aire de la fuente y a 50 cm de aire mas 10 cm de espesor de agua respectivamente.

Donde A (Ci) es la actividad de la fuente y Γ (R/h. m²/Ci) es la constante específica de radiación gamma.

La relación entre ambas velocidades de dosis será:

$$H^{50}_{10} = \frac{(50)^2}{(60)^2} \cdot e^{-\mu \cdot 10} \cdot k_{10} = 0,517$$

De donde

$$e^{-\mu \cdot 10} \cdot k_{10} = 0,517 / 0,6944 = 0,744$$

Si se aleja el producto a 60 cm de la fuente y se estudia la dosis a la misma profundidad 10 cm se tiene:

$$H^{60}_{10} = \frac{(60)^2}{(70)^2} \cdot e^{-\mu \cdot 10} \cdot k_{10} = 0,545$$

De donde

$$e^{-\mu \cdot 10} \cdot k_{10} = 0,545 / 0,7347 = 0,742$$

Puede verse que, en efecto, la influencia en la contribución a la dosis para ambas distancias de 50cm y 60cm de aire resultan prácticamente iguales.

Puede verificarse fácilmente con otros ejemplos que esto mismo sucede para distintas distancias de aire interpuesto entre fuente y producto y para otros espesores de producto, siempre que se comparen el mismo espesor de producto para las distintas distancias a la fuente.

Se generaliza entonces, esta propiedad para cualquier producto diciendo que H^{x+z}_z , la relación de dosis en un punto de un medio cualquiera a una profundidad o espesor (z), y a una distancia (x) de la placa fuente, puede pensarse como el producto de dos factores de contribución distintos, uno debido a la distancia fuente producto en aire y otro a la absorción de energía en el propio producto, esto es:

$$H^{x+z}_z = K_{x+z} \cdot K_z$$

Donde $K_{x+z} = D_{x+z} / D_x$ en aire

Llamando K_z a la fracción de dosis que se atenúa por absorción en el material, y que resulta invariante con la distancia fuente producto.



A modo de ejemplo se verá el caso de querer extrapolar valores para una placa de 120" x 120" con un gap de aire de 3" a los valores de dosis que se esperaría tener en la misma placa pero a una distancia de 7" de gap, sobre un producto de 0,5 g/cm³ de densidad y 4" de espesor.

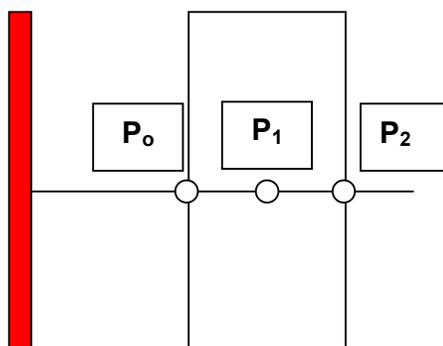
De acuerdo a lo dicho, debe calcularse primero las velocidades de dosis específicas en aire para los puntos a distancias 3" ; 5" ; 7" de la placa.

En este caso se han elegido intencionalmente valores de dosis en aire que puedan ser extraídos de las tablas, pero si las distancias que requiere el cálculo no figuran en tablas se recurre a calcularlas manualmente mediante el modelo que se da en el anexo I o bien con algún programa de cálculo comercial como el MSHield.5

Para facilitar la presentación de los datos se construirá la siguiente tabla.

Distancia	Punto	D _{px} (aire)	D _{px+z} (mat)	K _z (mat)	K _{x+z} (aire)
3" (aire)	P ₀	19,645x10 ⁴	19,645x10 ⁴	1	1
3"(aire)+2"(mat)	P ₁	18,406 x10 ⁴	14,341 x10 ⁴	0,779	0,917
3" (aire)+4"(mat)	P ₂	14,966 x10 ⁴	11,140 x10 ⁴	0,774	0,762

Donde



Son los puntos donde se evaluarán las velocidades de dosis.

$$K_{x+z} (\text{aire}) = D_{p1}(\text{aire})/D_{p0} (\text{aire}) = 18,406 \times 10^4 / 19,645 \times 10^4 \text{ idem para } P_2$$

$$K_z (\text{mat}) = D_{p0+z} (\text{mat})/D_{p0} (\text{aire}) = 14,341 \times 10^4 / 19,645 \times 10^4 \text{ idem para } P_2$$

Ahora deberá calcularse, o extraer de tablas Rizzo, las velocidades de dosis específicas en aire para la nueva distancia 7".



- 1) Se usan los factores de contribución K_z (mat) hallados con los valores de tabla.
- 2) Se calculan los nuevos K_{x+z} (aire)
- 3) Se calculan los nuevos D_{px+z} (mat) = D_{po} (aire) . K_z (mat) . K_{x+z} (aire)

Distancia	Punto	D_{px} (aire)	D_{px+z} (mat)	K_z (mat)	K_{x+z} (aire)
7" (aire)	P ₀	16,945x10 ⁴	16,945x10 ⁴	1	1
7"(aire)+2"(mat)	P ₁	15,60x10 ⁴	12,140x10 ⁴	0,779	0,920
7" (aire)+4"(mat)	P ₂	14,10x10 ⁴	10,910x10 ⁴	0,774	0,832

Se calculan ahora las D_{max} y D_{min} como:

$$D_{max} = D_{po+z} \text{ (mat)} + D_{p2+z} \text{ (mat)} = 16,945 \times 10^4 + 10,910 \times 10^4 = 27,85 \times 10^4 \text{ rad/h.cm}^2/\text{Ci}$$

$$D_{min} = 2 \cdot D_{p1+z} \text{ (mat)} = 2 \cdot 12,140 \times 10^4 = 24,28 \times 10^4 \text{ rad/h.cm}^2/\text{Ci}$$

Resultando la relación de dosis

$$H = D_{max} / D_{min} = 1,14$$

Si se verifican estos valores calculándolos directamente de la tabla para 120"x120" de placa 7" de gap 4" de espesor de material y 0,5g / cm³ de densidad se obtiene:

$$D_{max} = 27,49 \times 10^4 \text{ rad/h.cm}^2/\text{Ci}$$

$$D_{min} = 26,50 \times 10^4 \text{ rad/h.cm}^2/\text{Ci}$$

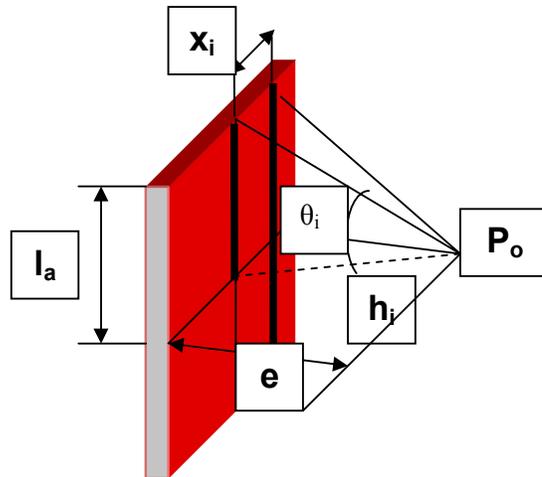
$$H = D_{max} / D_{min} = 1,03$$

Donde se ve que la diferencia entre los valores calculados de la velocidad de dosis mínima, resulta en una subestimación razonable del 8%.

Finalmente se expondrá como herramienta de cálculo, un método para estimar la velocidad de dosis proporcionada por una placa fuente en su eje central, haciendo uso de un conjunto de expresiones cuya demostración se omite, pudiendo el lector encontrarlas en las referencias bibliográficas que se sugieren.

El modelo permite calcular la velocidad de dosis específica para una placa fuente como muestra la figura, en la que se supondrán las siguientes premisas:

- 1) Es una placa ideal sin efectos de absorción de la radiación por los materiales que encapsulan a las fuentes ni por los que forman la estructura del rack.
- 2) Existe simetría respecto de todos los planos de la fuente.
- 3) La distribución superficial de actividad es homogénea e isótropa.
- 4) El cálculo solo tiene en cuenta la dosis suministrada en un punto, inmerso en un medio infinito de aire.



e = Distancia normal entre P_o y el plano fuente

P_o = Punto de interés a determinar la vel de dosis

l_a = alto y largo de $\frac{1}{4}$ de placa

x_i = Distancia horizontal desde el centro de la placa hasta la ordenada de cálculo.

θ_i = ángulo subtendido desde P_o hasta la fracción de fuente en estudio.

La expresión de cálculo para la velocidad de dosis en P_o aportada por la fuente lineal iésima ubicada a distancia x_i del centro de la placa es:

$$D_{ip} = \frac{A(Ci) \cdot \Gamma(r/h \cdot m^2/Ci) \cdot \theta_{ir}}{l_a(\text{cm}) \cdot h_i(\text{cm})} = \frac{1,34(r/h \cdot m^2/Ci) \cdot \theta_{ir}}{l_a(\text{cm}) \cdot h_i(\text{cm})}$$

Distancia del punto a la faja de fuente ubicada en la coordenada x_i

$$h_i = (e^2 + x_i^2)^{1/2} =$$

Tangente del ángulo θ_i

$$\text{tg } \theta_i = \frac{l_a}{h_i}$$

Angulo θ_i expresado en radianes.

$$\theta_{ir} = \frac{\pi \cdot \theta_i}{180}$$

Constante específica de radiación gamma para el Co-60

$$\Gamma(r/h \cdot m^2/Ci) = 1,34$$



Ejemplo numérico

Tamaño de la placa ficticia 228cm x 228cm = 90"x 90"

Ancho de cada faja o fuente 5cm

Gap 7" = 17,78cm

x_i (m)	x_i^2 (m ²)	e	e^2 (m ²)	h_i (m)	hi2	l_a (m)	$t_g\theta_i$	θ_i (grad)	θ_{ir} (rad)	X_i r.h/Ci
0,05	0,0025	0,1778	0,0316	0,1847	0,0341	1,14	6,1885	80,8210	1,4106	8,954
0,1	0,01			0,2040	0,0416		5,6032	79,8809	1,3942	8,012
0,15	0,0225			0,2326	0,0541		4,9136	78,4964	1,3700	6,905
0,2	0,04			0,2676	0,0716		4,2712	76,8229	1,3408	5,874
0,25	0,0625			0,3068	0,0941		3,7258	74,9760	1,3086	5,001
0,3	0,09			0,3487	0,1216		3,2776	73,0330	1,2747	4,285
0,35	0,1225			0,3926	0,1541		2,9116	71,0446	1,2400	3,703
0,4	0,16			0,4377	0,1916		2,6112	69,0446	1,2051	3,227
0,45	0,2025			0,4839	0,2341		2,3623	67,0562	1,1704	2,836
0,5	0,25			0,5307	0,2816		2,1539	65,0955	1,1361	2,510
0,55	0,3025			0,5780	0,3341		1,9774	63,1739	1,1026	2,236
0,6	0,36			0,6258	0,3916		1,8265	61,2994	1,0699	2,004
0,65	0,4225			0,6739	0,4541		1,6962	59,4777	1,0381	1,806
0,7	0,49			0,7222	0,5216		1,5826	57,7124	1,0073	1,635
0,75	0,5625			0,7708	0,5941		1,4829	56,0061	0,9775	1,487
0,8	0,64			0,8195	0,6716		1,3947	54,3598	0,9488	1,357
0,85	0,7225			0,8684	0,7541		1,3162	52,7742	0,9211	1,243



0,9	0,81			0,9174	0,8416		1,2459	51,2488	0,8945	1,143
0,95	0,9025			0,9665	0,9341		1,1826	49,7829	0,8689	1,054
1	1			1,0157	1,0316		1,1254	48,3753	0,8443	0,975
1,05	1,1025			1,0649	1,1341		1,0733	47,0246	0,8207	0,904
1,1	1,21			1,1143	1,2416		1,0258	45,7290	0,7981	0,840
1,15	1,3225			1,1637	1,3541		0,9822	44,4867	0,7764	0,782
									$\sum X_i$	68,77

Para obtener el valor de la velocidad de dosis total en el punto p debe multiplicarse la sumatoria de los aportes individuales $\sum X_i$ por la superficie de la placa y por un factor para pasar de röntgen a rad = 0,96 rad / r, y por 4 para el efecto de la placa total, esto es:

$$68,77 \text{ (r.h /Ci)} \cdot 5 \text{ cm} \cdot 114,3 \text{ cm} \cdot 0,96 \text{ rad/r} \cdot 4 = 15,09 \times 10^4 \frac{\text{rad.cm}^2}{\text{h.Ci}}$$

Si se compara el valor calculado con el obtenido de tablas Rizzo para el tamaño de placa en estudio, y un gap de aire de 7" se obtiene un valor de $15,3 \times 10^4 \frac{\text{rad.cm}^2}{\text{h Ci}}$ es decir una diferencia $\leq 2\%$.

Es decir que el método de cálculo adoptado, sin tener en cuenta las absorciones por los encapsulados de fuentes y materiales interpuestos, resulta aceptablemente bueno para calcular las dosis en aire a distintas distancias de un irradiador cualquiera.