núcleo de ingeniería biomédica
facultades de medicina e ingeniería
universidad de la república

Métodos de reducción de dosis de radiación en tomografías computadas

Federico Jorge[1]

[1]Núcleo de Ingeniería Biomédica - Facultades de Medicina e Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay

Email: Federico Jorge - fjo[en]adinet[.]com[.]uy;

Resumen

Introducción - Los estudios de tomografía computada corresponden al 10 % del total de los estudios radiológicos pero superan el 40 % de la dosis de radiación colectiva al paciente. Esto genera una gran presión en buscar reducir las dosis en tomografía computada. Se expone aquí una introducción general al problema y algunos métodos usados en la búsqueda de la optimización de dosis de radiación.

Metodología - Esta monografía comenzó con el estudio de ciertos mecanismos para optimizar la dosis de radiación en tomografías computadas. Posteriormente se vio la necesidad para poder introducir el tema investigar sobre los tomógrafos computados y la radiación ionizante tanto para profundizar en los conocimientos, como para dar un enfoque mas global del tema.

Resultados - En este trabajo se presenta un resumen del tema de radiaciones ionizantes, en particular rayos X y algunas técnicas para optimizar su uso en tomografías computadas.

1. Introducción

1.1. Tomografía Computada

Una tomografía axial computarizada, también conocida por la sigla TAC o TC es una técnica de diagnóstico utilizada en medicina. Esta consiste, como su nombre lo indica, en obtener una representación gráfica de un corte axial. Para obtener una tomografía axial, el tomógrafo emite un haz de rayos X sobre un plano tomográfico del objeto a estudiar. El paso de los rayos X a través de los tejidos atenúa la radiación, la cual es recogida por detectores y después analizada por un ordenador que reconstruye el corte basándose en una técnica desarrollada por el físico J. Radon llamada retroproyección. (backprojection). [1]

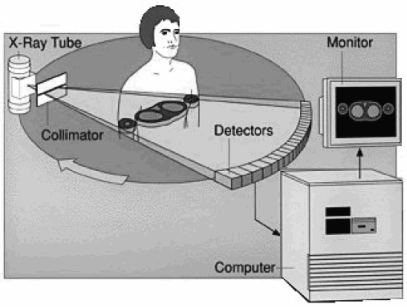

Figura 1: Tomografía computada

La retroproyección consiste en hacer una sumatoria de las proyecciones obtenidas, con un proceso de filtrado incluido, de manera de reducir los efectos de usar una cantidad discreta de proyecciones y los efectos que esto trae en la reconstrucción.(Efecto Estrella)

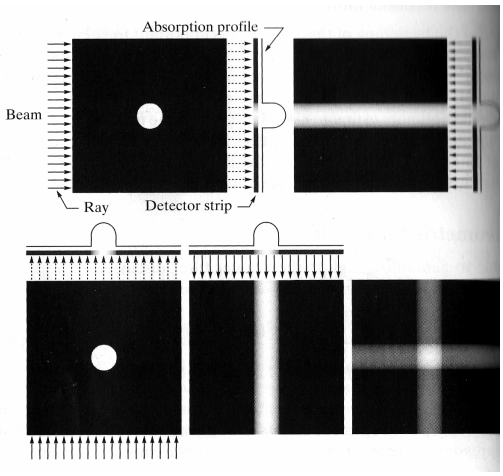

Figura 2: Retroproyección

1.2. Emisión de Rayos X

Las partículas cargadas emiten radiación electromagnética siempre que son aceleradas o frenadas. La cantidad de radiación emitida es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la masa de la partícula.

Por consiguiente, los electrones emiten mucha más radiación X que partículas más pesadas, como los protones, si todas las demás condiciones son iguales. Los sistemas de rayos X producen rayos X mediante la aceleración de electrones que circulan a través de una gran diferencia de potencial eléctrico, de muchos kV o MV. Los electrones son después frenados rápidamente en un material denso y resistente al calor, como el tungsteno (W).

Los rayos X emitidos desde estos sistemas tienen energías que se extienden en un espectro que va desde alrededor de cero hasta la energía cinética máxima adquirida por los electrones antes de la deceleración. A menudo, a este espectro continuo se superponen rayos X de energía discreta, que se producen cuando los electrones frenados ionizan el material del blanco o anticátodo. Como otros electrones orbitales saltan para llenar los huecos dejados tras la ionización, emiten rayos X de energías discretas. Reciben el nombre de rayos X característicos porque son característicos del material del blanco (anticátodo). [2]

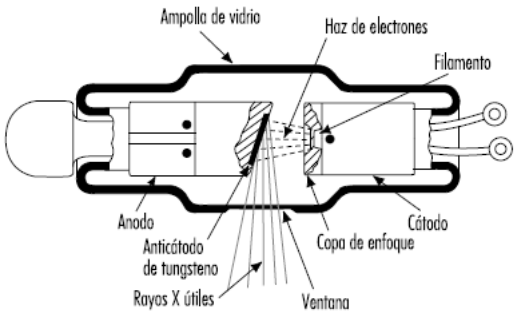

Figura 3: Tubo de rayos X

A la salida del tubo de rayos X aparece el colimador. Es un elemento que me permite regular el tamaño y la forma del haz de rayos, filtra los rayos X dejando pasar solamente los que tienen la energía suficiente para penetrar al paciente, de esta manera ayudan a reducir la dosis de rayos X recibida por los pacientes. Aquí es también donde se varía el ancho del corte tomográfico.

1.3. Radiación

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. La radiación propagada en forma de ondas electromagnéticas (Rayos X, Rayos UV, etc...) se llama radiación electromagnética, mientras que la radiación corpuscular es la radiación transmitida en forma de partículas subatómicas (partículas α , β , neutrones,..) que se mueven a gran velocidad en un medio o el vacío, con apreciable transporte de energía.

1.4. Fotones

Es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética. Su concentración es el factor fundamental en la determinación del ruido en la imagen recibida. Se miden en Becqueler (fotones por segundo) o curie.

1.5. Radiación ionizante

La radiación ionizante implica que tiene la energía suficiente para ionizar la materia, es decir, extraer al menos un electrón de un átomo o una molécula. Las radiaciones ionizantes pueden provocar reacciones y

cambios químicos con el material con el cual interaccionan. Por ejemplo, son capaces de romper los enlaces químicos de las moléculas o generar cambios genéticos en células reproductoras. Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas en forma de rayos X o rayos gamma, o bien partículas, como pueden ser núcleos de Helio, electrones o positrones, protones u otras. La habilidad de los fotones para ionizar un átomo o molécula varían a través del espectro electromagnético.

- Rayos X y Rayos Gamma pueden ionizar casi cualquier molécula o átomo.
- Luz ultravioleta de alta frecuencia puede ionizar muchos átomos y moléculas
- Luz ultravioleta de alta frecuencia puede ionizar muchos átomos y moléculas a de baja frecuencia y la luz visible pueden ionizar muy pocas moléculas. (luz: film fotográfico y moléculas involucradas en la fotosíntesis)
- Microondas y ondas de radio son no ionizantes.

La radiación ionizante está en todas partes. Llega desde el espacio exterior en forma de rayos cósmicos. Está en el aire en forma de emisiones del radón radiactivo. Se encuentra en menr medida en alimentos, y el agua. Los isótopos radiactivos que se originan de forma natural entran y permanecen en todos los seres vivos.

Figura 4: Exposición a radiaciones

De media recibimos 2.4 mSv de radiaciones naturales al año (aunque en ciertos lugares del planeta se alcanzan varias decenas de mSv). Una de estas fuentes naturales es la radiación cósmica, que nos llega de fuera del planeta. La atmósfera sirve de blindaje para la mayor parte de esta, pero de cualquier manera las personas reciben una dosis de 0,3 a 1 mSv al año. En un vuelo trasatlántico de Europa a EE.UU., se reciben de 30 a 45 mSv solo de radiación cósmica.

La fuente más importante de estas radiaciones es la inhalación de radón, gas natural que se emite por todos los materiales, con valores de dosis efectiva de 0,2 a 10 mSv al año . También existen fuentes de radiaciones creadas por el hombre (aceleradores de particulas, detectores de gases y aerosoles)

En el caso de los aparatos médicos, los estudios de tomografía computada corresponden al 10 % del total de los estudios radiológicos pero superan el 40 % de la dosis de radiación colectiva al paciente. Esto genera una gran presión en buscar reducir las dosis en tomografía computada.

1.6. Unidades de medida de la radiación ionizante

Los efectos de la radiactividad sobre la salud son complejos. Dependen de la dosis absorbida por el organismo. Como no todas las radiaciones tienen la misma nocividad, se multiplica cada radiación absorbida

por un coeficiente de ponderación, para tener en cuenta las diferencias. Esto se llama **dosis equivalente** (Q), que se mide en sieverts (S.I.) o rem.

$$\text{Dosis equivalente en el tejido T} = H_T = \sum_R W_R \times D_{TR} \tag{1}$$

Existen también unidades como el gray (S.I.) o el rad las cuales solo miden la **dosis absorbida**(D) sin tomar en cuenta los tipos de radiaciones.

$$\text{Dosis absorbida} = D = \frac{\partial \bar{e}}{\partial m} \tag{2}$$

Una radiación alfa o beta es relativamente poco peligrosa fuera del cuerpo. En cambio, es extremadamente peligrosa cuando se inhala. Por otro lado, las radiaciones gamma son siempre dañinas puesto que se las neutraliza con dificultad. Tampoco toman en cuenta el tejido irradiado, el cual unidades como el sieverts, que miden dosis equivalente, toman en cuenta. Existen varias unidades de medida de la radiación ionizante, unas tradicionales y otras del sistema internacional de unidades (SI).

Concepto	Radioactividad	Exposición	Dosis Absorbida	Dosis Equivalente
Proceso Físico	Desintegración nuclear	Ionización del aire	Energía depositada	Efecto Biológico
Unidades tradicionales	Curie(Ci)	Roentgen	Rad	Rem
Sistema Internacional	Becquerel(Bq)	Coulombs/ kg	Gray(Gy)= J/kg	Sievert

Figura 5: Unidades de radiación

1.7. Consecuencias para la salud de la exposición a las radiaciones ionizantes Efectos biológicos de las radiaciones

1.7.1. Efectos determinísticos

Dependen de la dosis administrada y pueden producir daño celular por sobre una dosis umbral en la cual la probabilidad aumenta drásticamente. Antes del umbral las probabilidades son prácticamente nulas. Ejemplos son alteraciones digestivas, anemia, caída del cabello, esterilidad, radiodermitis, cataratas, etc.

1.7.2. Efectos estocásticos

Estos dependen únicamente del azar, independientes de la dosis; de esta forma, si solo un fotón de rayos X impacta en un punto de una célula especialmente sensible, podría ser capaz de provocar lesiones como malformaciones hereditarias o generar el desarrollo de un cáncer. Desde su constitución en 1928 la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICPR) viene estableciendo, periódicamente, los límites de dosis para pacientes y personal profesionalmente expuesto. Las sucesivas propuestas recomiendan una progresiva disminución de la dosis máxima permisible.

Esta continuada reducción de los límites no se debe tanto a una evidencia positiva del daño que producen las radiaciones sino más bien a una aplicación progresiva del principio de cautela sobre la base del conocimiento de la incertidumbre y, a la vez, evidente aumento del número de individuos expuestos. Profundizando en esta línea, en 1965 se evita, ya, cifras concretas y se crea el concepto ALARA (as low as reasonably achievable). Uruguay, siguiendo las recomendaciones del ICPR toma para el trabajador los siguientes limites:

- Una dosis efectiva de 20 mSv por año, promediado en un período consecutivo de 5 años (100 mSv en 5 años).
- Una dosis efectiva de 50 mSv en un solo año.

- Una dosis equivalente para el cristalino de 150 mSv en un año.
- Una dosis equivalente para las extremidades (manos y pies) o piel de 500 mSv en un año.

Teniendo requisitos más exigentes para el público general o estudiantes menores. En el caso de los pacientes se busca ALARA siempre que el beneficio supere el costo. Las radiaciones ionizantes no afectan uniformemente a todos los órganos, la ley de la radiosensibilidad (también conocida como ley de Bergonie y Tribandeau) dice que los tejidos y órganos más sensibles a las radiaciones son los menos diferenciados y los que exhiben alta actividad reproductiva. Como ejemplo, tenemos:

- Tejidos altamente radio sensibles: epitelio intestinal, órganos reproductivos (ovarios, testículos), médula ósea
- Tejidos medianamente radio sensibles: tejido conectivo
- Tejidos altamente radio resistentes: neuronas, hueso

Para una población global el riesgo de cáncer se incrementa en un 10 % cuando se recibe una dosis única de 1 Sv (1000 mSv). Si se limita al adulto de edad media el riesgo llega al 1 %. Al contrario, cuando se acota a edades inferiores a los 10 años asciende al 15 %.

2. Métodos de reducción de dosis en Tomografías Computadas

2.1. Factores que influyen en la dosis

Nos enfocaremos en los factores de diseño para reducir las dosis. Estos podríamos resumirlos en:

2.1.1. Retocar el potencial del tubo de rayos X

- Esta generalmente estandarizado en 120kV
- De 80 / 100 kV puede ser usado
  - Mayor dosis para igual nivel de ruido.
  - Mejor contraste que a 120kV
  - El contraste de tejidos suaves por lo que pueden ser optimo para el uso en ciertos exámenes de angiografía en la cabeza
  - Puede ser usado en protocolos pediátricos para reducir la intensidad del rayo.
  - En este intercambio por otro lado suelen aparecer distorsiones (artefactos) si la energía del rayo baja demasiado (80kV).
- De 135 / 140 kV a veces es usado
  - Marginal menor dosis para igual ruido de imagen.
  - El contraste es un poco menor.
  - La penetración es mayor. (puede usarse en pacientes obesos o de secciones densas.)

2.1.2. Disminuir el tiempo de exposición (mAs)

- Reduce la dosis de radiación en proporción a la reducción en mAs.
- Pero incrementa el ruido de la imagen en proporción.

$$\sqrt{(mAs_{original})\,(mAs_{reducida})}\ [7] \tag{3}$$

- Se han desarrollado técnicas para ajustar dinamicamente el tiempo de exposición. .°curren grandes variaciones en la absorción de radiación con las variaciones en el ángulo de proyección y en la región anatómica (ver figura 2.1.2). Ya que la proyeccion con mas ruido determina de manera sustancial el ruido de la imagen final, es posible reducir la dosis (fotones) de otras proyecciones sin con esto incrementar el ruido en la imagen final." [5] Mediante la modulación de la corriente de rayos X se han obtenido reducciones de dosis de hasta el 40

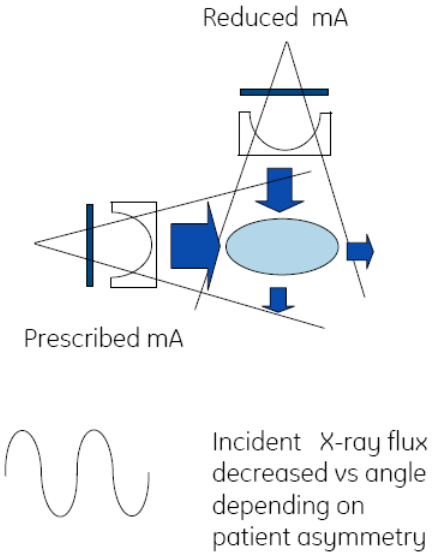

Figura 6: Modulación de la corriente del tubo

AEC (automatic Exposure Control) es el análogo a lo que seria el tiempo de adquisición en radiografía general. El usuario determina los requerimientos de calidad de la imagen y el TC determina el producto tiempo corriente. Este objetivo no es fácil ya que depende de muchos factores como el tamaño y del paciente, el examen particular a realizar, y los requerimientos específicos de imagen.

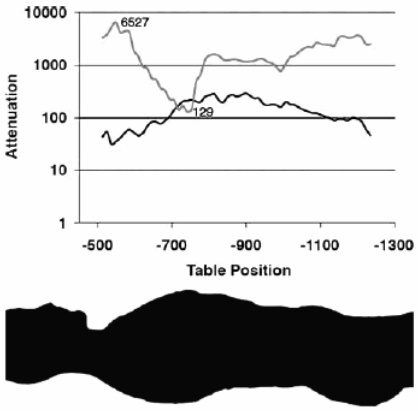

Figura 7: Atenuación sobre cada eje; eje y - negro, eje z - gris

2.1.3. Mejorar la calidad del haz de rayos

Para tener una mejor respuesta se suelen usar filtros que regulan la energía de los rayos, como se menciono al comienzo, anulando los de poca penetración y buscando brindar una dosis homogénea. Un ejemplo de esto son los filtros Bowtie. Estos filtros proporcionan el ajuste necesario para llevar un rayo uniforme al detector. Minimiza la dosis y ayuda a reducir el ruido y los artefactos.

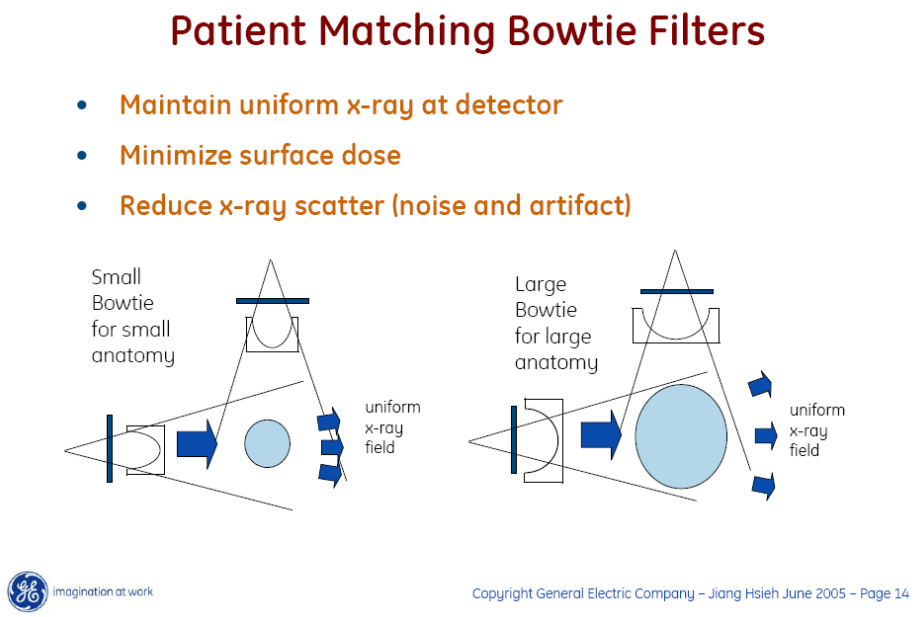

Figura 8: Filtros Bowtie

2.1.4. Búsqueda de una correcta colimación del haz de rayos

En TC multicorte, colimaciones estrechas resultan en una mayor dosis debido al 'overbeaming' en el eje z.

- Evitar hacer imágenes usando la penumbra del rayo.
- El efecto es menos significativo en colimaciones más anchas y en tomógrafos de mas cortes, para una misma imagen.

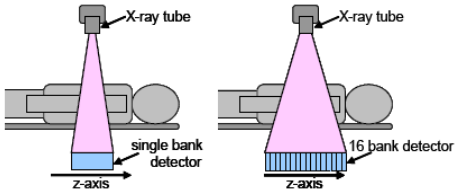

Figura 9: Diagrama mostrando un TC de un solo corte y un multicorte

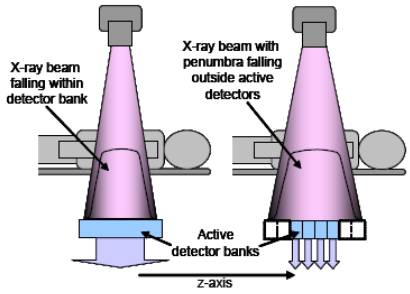

Figura 10: 10mm de un corte vs. 2.5 de 4 cortes

3. Conclusiones

La tomografía computada ha tenido muchos avances, sin embargo sus mejoras tecnológicas han también aumentado la dosis absorbida. Esto trajo consigo un llamado de atención que fue reportado en muchos papers. Mucho ha surgido de aquí y se sigue buscando reducir las dosis. Se mencionaron algunas técnicas usadas en la búsqueda de una optimización en las dosis de radiación. Hay muchas, las cuales abarcan desde la búsqueda de una salida homogénea de rayos X a filtros adaptativos que se ajustan tomando en cuenta el ruido mientras reconstruyen la imagen. Vemos en esto algo de importancia debido a la gran cantidad de usos que tiene el TC.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Marcelo David y a Daniel Geido por su tiempo y colaboración en la elaboración de este artículo.

Referencias

1. Image Reconstruction from Projections http://marr.bsee.swin.edu.au/lectures/het408/backproj.pdf
2. Radiaciones ionizantes http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cd49/48.pdf
3. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly http://www.unscear.org/docs/reports/gareport.pdf
4. NormaUY100-Reglamento básico de protección y seguridad radiológica. http://www.miem.gub.uy/arch/NORMA%20UY%20100.pdf
5. CT Dose Reduction and Dose Management Tools: Overview of Available Options. http://radiographics.rsnajnls.org/cgi/reprint/26/2/503.pdf
6. Tomografía Axial Computada http://www.nib.fmed.edu.uy/Corbo.pdf
7. Tradeoffs in CT Image Quality and Dose (enlace muy largo, usar Google)
8. Radiation dose issues in multi-slice CT scanning http://www.impactscan.org/download/msctdose.pdf