

Diseño y construcción de un espirómetro *pitot* computarizado para tratamientos con radioterapia de tumores que se mueven durante la respiración

Design and construction of a computerized pitot spirometer for treatments with radiotherapy of tumors moving during breathing

Alberto Lachos¹, Bertha García¹, Fernando Valencia y Luis Pinillos¹

RESUMEN

Introducción: Ciertos tumores se mueven junto con los movimientos respiratorios dificultando la el tratamiento con la radioterapia. El propósito se este estudio fue implementar una técnica adaptada a la respiración para minimizar el movimiento del tumor, utilizando tecnología desarrollada en nuestro medio. **Métodos:** Con la ayuda de sensores de caudal de aire que provienen de la respiración, se generaron señales que fueron transformadas en gráficos por medio de interfaces mediante un software diseñado por los investigadores. El procedimiento de utilización de esta técnica constó de tres fases (calibración, entrenamiento y tratamiento). Para demostrar la eficacia de la técnica, se requirió tomar varias series TAC de simulación en diferentes momentos y al mismo paciente para demostrar que el isocentro del tumor no variaba cuando la respiración era bloqueada en el mismo momento del ciclo respiratorio. **Resultados:** El trabajo de diseño y construcción del espirómetro *pitot* computarizado se prolongó por cerca de un año, posteriormente se realizaron las pruebas en el equipo de tomografía y un planificador CAT PLAN. La técnica fue fácilmente aprendida por los pacientes. El isocentro del tumor en las diferentes series no sufrió cambios mayores a los 2 mm, con una desviación aceptada y atribuida a la incertidumbre por contorno. El GTV fue mucho mayor en la respiración libre que en respiración bloqueada hasta en 32%. El PTV presentó cambios mas drásticos (mayor en 62%). Se observó que cuando se bloquea la respiración en inspiración profunda, el volumen pulmonar aumenta hasta en un 30%, disminuyendo de esta manera el volumen de pulmón sano irradiado. **Conclusión:** La viabilidad de un diseño de espirómetros de este tipo amplía las posibilidades para el mejoramiento técnico de mayor envergadura, como la miniaturización del equipo, la comunicación inalámbrica de datos y la aplicación en otros sistemas médicos de imágenes como angiofluoroscopia y aplicación para equipos de antigua generación sin sistemas incorporados.

ABSTRACT

Introduction: Some tumors move along with the respiratory movements making it hard the treatment with radiotherapy. The aim of this study was to set up a technique adapted with respiration in order to minimize the tumor's movement with respiration by using our own developed technology. **Methods:** With help of sensors of air volume which come from breathing, was generated signals that were transformed in graphics through interfaces by a software, designed by our researchers. The method of utilization of this technique is listed of three stages (calibration, training and treatment). In order to show the efficacy of this technique, it was required to take several series of TAC of simulation, on different times and to the same patient, with the aim to show the tumor's isocenter does not vary when the respiration was blocked at the same moment of the respiratory cycle. **Results:** The work design and construction of the computer pilot spirometer was prolonged near to a year. After that, test were performed by the tomography equipment and the planner CAT PLAN. This technique was easily learned by patients. The tumor's isocenter on the different series did not suffer mayor changes to 2 mm, with an accepted deviation and attribute it to the uncertainty for contour. The GTV was much major in free respiration than blocked respiration on 32%. The PTV presented more drastic changes (major on 62%). We observed that when respiration is blocked on deep inspiration, the pulmonary volume grows about 30%, decreasing for this way the volume of the irradiated healthy lung. **Conclusion:** The viability of a design of espirometers of this type extend the possibilities to technical improvement of major magnitude, such as the miniaturization of the equipment, the wireless communication of data and the application in other medical imaging systems as angiofluoroscopia the application to equipment of old generation without incorporated systems.

Palabras clave: Radioterapia; Espirometría, Planificación, Medidas

Key words: Radiotherapy; Spirometry; Planification, Measurements

Afiliaciones:

Autor para correspondencia:
Alberto Lachos Dávila
Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas
Av. Angamos Este 2520, Surquillo
Lima 34 – Perú
Email: alachos@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

En Departamentos de radioterapia, donde se disponen de unidades de radiación, estas se utilizan para el tratamiento de tumores a veces ubicados cerca y/o en órganos que están en constante movimiento; por lo que su localización, variable temporal, se hace bastante difícil. Para conseguir esto, se diseñó y construyó un sistema totalmente automático para registrar y analizar la respiración del paciente, que sirve para tener la información en tiempo real de los parámetros necesarios a fin de lograr la localización tumoral en un ciclo de la inspiración.

Desde el descubrimiento de los rayos X por Wilhem Conrad Roentgen en 1895 y el descubrimiento del radium por los esposos Curie en 1898, la radioterapia ha seguido una constante evolución, desde los tratamientos en campos directos, tratamientos en dos dimensiones, conformacional en 3D con o sin modulación de intensidad, hasta los tratamientos en 4D (conformacional, tomando en cuenta el movimiento respiratorio).

La existencia de movimientos respiratorios es una preocupación durante la radioterapia de tumores torácicos (pulmones, mama, mediastino) y abdominales (hígado y riñones). A fin de asegurar la presencia del tumor en el volumen irradiado en todo momento del ciclo respiratorio, los radioterapeutas están obligados a recurrir a campos lo más grandes posibles, exponiéndose al mismo tiempo a irradiar una proporción más importante de tejido sano.

El advenimiento de la radioterapia conformacional con o sin intensidad modulada hace esta situación aun más difícil, puesto que el concepto de conformación esta basado en una localización más precisa de la posición anatómica del volumen tumoral a fin de reducir las dimensiones de los campos y mejor proteger los tejidos sanos, esto obliga a los radioterapeutas a buscar nuevas formas de poder liberar la irradiación en un momento preciso del ciclo respiratorio. Se han desarrollado diferentes técnicas para cumplir este propósito.^{1,2}

Técnicas de radioterapia adaptada a la respiración

1. Bloqueo respiratorio:

Bloqueo obtenido por la oclusión de una válvula de bloqueo activo (*Active Breathing control* o ABC).

Bloqueo voluntario por el paciente (*Deep inspiration breath Hold technique* o DIBH).

2. Seguimiento en tiempo real del ritmo respiratorio. *Real Time position Management* (RPM):

La técnica de bloqueo activo consiste principalmente en la utilización de una válvula que bloquea la

respiración del paciente a voluntad del operador. La técnica de seguimiento en tiempo real del ritmo respiratorio es altamente tecnológica, que ha tenido un desarrollo impresionante en los últimos cinco años en sus diferentes modalidades. El sistema "Varian" utiliza cámaras localizadas dentro de la sala de tratamiento para detectar el movimiento de la caja torácica, esta información es transmitida al sistema informático que con ayuda de un software grafica el ciclo respiratorio del paciente, permitiendo al operador irradiar el volumen blanco en un momento dado de la respiración, esta es una técnica muy costosa, que desde la planificación requiere de un simulador TAC implementado con software de reconstrucción de imágenes en 4D y los aceleradores lineales deben estar implementados con tecnología de radioterapia guiada por imágenes (IGRT).³

Actualmente, la radioterapia ha alcanzado su máximo desarrollo con la radiocirugía robótica implementada con tecnología guiada por imágenes y seguimiento en tiempo real del ritmo respiratorio, utilizando un acelerador lineal robótico llamado CYBERKNIFE.

En la técnica de respiración controlada por el paciente, se requiere de entrenamiento para familiarizar al paciente con el software, además de evaluar la capacidad pulmonar a un nivel de respiración profunda reproducible. La meta es inmovilizar al tumor y expandir el pulmón normal fuera de la región de alta dosis.

Existe en Francia un protocolo de estudio prospectivo randomizado de RAR de evaluación de la casuística y prevención de secuelas y evaluación médico-económica, en el cual participaron más de 20 centros de radioterapia. Durante dos años se reclutaron 1120 pacientes (560 pacientes en el grupo RAR y 560 pacientes en el grupo control). Costo total del proyecto 3.6 millones de euros. El equipo que se utilizó en la mayoría de los casos es el SPIRO DIN'R, constituido de un espirómetro, lentes de video, y el software de control. Este equipo es fácil de manipular y mucho menos costoso que otros equipos. Se ha publicado los primeros resultados, demostrando sobre todo las ventajas dosimétricas de la radioterapia adaptada a la respiración, donde la radioterapia con bloqueo respiratorio voluntario presenta ventajas dosimétricas sobre la modalidad de seguimiento en tiempo real del ritmo respiratorio protegiendo mayor volumen de pulmón sano y cubriendo el volumen tumoral con mayor exactitud.

MÉTODOS

Para el diseño y construcción de un espirómetro *pitot* computarizado se requirió de una investigación profunda y la colaboración de diferentes profesionales especialistas en física medica, ingeniería electrónica y programación de software. El diseño se centra en las características condicionadas por los caudales producidos en la respiración, los cuales

tienen una variedad de componentes diferenciales los cuales producen y registran un amplio rango de velocidades de flujo; esto se logra con ayuda de sensores de caudal de aire que provienen de la respiración. Estas señales son transformadas en gráficos por medio de interfaces y con la ayuda de un software, diseñado por el equipo investigador.

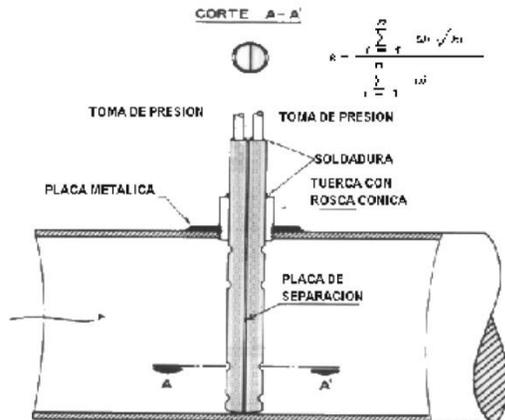


Figura 1. Diseño físico del sensor. h_1 =diferencia de presiones en ambos lados del indicador; K = constante del sensor.

Los datos experimentales nos dan las señales puras emitidas por un diseño de sensor diferencial, luego las señales se registran, se restan y se integran por métodos matemáticos; posteriormente se depuran señales parásitas que no están en el perfil gráfico de señales.^{4,5,6,7,8}

Matemática del sistema:

Se hacen aproximaciones por métodos numéricos a la curva de ajuste. Se proyecta la curva paramétrica del sensor con una ecuación que será típica del sensor como función del caudal instantáneo (velocidad/sección), logrando la correspondencia funcional matemática.

En medidas repetitivas de larga estadística, se observa la continuidad y permanencia de la curva obteniendo un dispositivo aplicador fiable.

Sensores Electrónicos y Hardware:

Se utilizan sensores de presión piezoeléctricos electrónicos del tipo adosable a tarjeta impresa de alta sensibilidad y de 40 cm de H₂O de rango máximo de presión, esto permite detectar los mínimas pérdidas o caudales a través del sensor e incluirlas en la iteración matemática.

Software

El Software de Host PC se realiza con el Programa C.

El Software del Hardware en Programa Pic Basic

Estructura del Software: 3 pantallas

Calibración, Entrenamiento , Tratamiento

Entorno amigable

Setting : Volumen de Calibración

Porcentaje automático de error tras la calibración

Corrección acumulativa automática

Pistón virtual de calibración

Gráfica en tiempo real

Archivo de registro vía PDF

Desviación estándar de la toma de datos

Desviación estándar instantánea

Este recuadro permite observar cambios instantáneos de los valores base los cuales pueden ser corregidos manual o automáticamente en calibración, así mismo detecta pérdidas por fugas en retención de aire aún así no haya empezado el procedimiento. La calibración se realiza por un análisis matemático de las señales de los sensores a presión atmosférica, estableciendo una referencia inicial sobre las que variarán las presiones ejercidas en el dispositivo durante la respiración.

Se alcanzó una precisión máxima como función de la comparación con el pistón de calibración variando entre el 0 y 0.3 %, como máximo de error en los datos experimentales.

Compatibilidad Técnica

El sistema es compatible con la visualización simultánea en dos monitores: "monitor paciente" y "monitor operador".

Así también se facilita con un mensaje de status en pantalla la comunicación vía Monitor y también por audio.

Aplicación clínica de la técnica

La espirometría utilizada sirve para medir el flujo respiratorio el cual es obtenido por los captadores de presión colocadas sobre el circuito del aire de doble dirección, esto permite visualizar el flujo de aire en los 2 sentidos inspiración y espiración .una jeringa calibrada de 2 o 3 litros es utilizada, traducida a la medida electrónica en litros de aire. El espirometro es un neumotacógrafo a fin de limitar la influencia de la temperatura sobre la medida de presión y de evitar la creación de condensación. El paciente respira a través de un embudo bucal con un filtro antibacteriano con una pinza en la nariz a fin de evitar la respiración nasal El paciente puede visualizar su curva de respiración .

Las señales roja y verde permiten comunicar directamente las consignas de respiración. El paciente debe realizar las apneas durante las cuales serán efectuadas las adquisiciones de imágenes TAC y las fases del tratamiento siempre con el mismo nivel de aire.

Los pacientes deben tener una capacidad de apnea superior a 20 segundos. El nivel en inspiración profunda depende de las capacidades de cada persona, y varía entre 0.9 a 3 litros.

La TAC torácica será realizada durante la respiración normal y respiración profunda controlada.

El contorno es realizado con el sistema de planificación MEVIS. Delimitando los volúmenes de irradiación de acuerdo al ICRU 50. Los planes de tratamiento son realizados en 3DCRT en respiración normal y tres secuencias en respiración bloqueada realizados en diferentes momentos pero con las mismas características de espirometría con el objetivo de demostrar que el isocentro del tumor no sufre cambios significativos que puedan desacreditar el método.

Las dosis por fracción asignadas para el tratamiento virtual son de 200 cGy. con dosis total 70Gy al isocentro planificados en el sistema de planificación MEVIS con energía de 18 MV. Es importante señalar que el objetivo propuesto en esta fase del estudio es demostrar que esta técnica de espirometría funciona y sobre todo que los volúmenes de tratamiento siempre se encuentren en la posición exacta en cada una de las sesiones de tratamiento.

RESULTADOS

El trabajo de diseño y construcción del espirómetro *pitot* computarizado se prolongó por cerca de un año, posteriormente se realizaron las pruebas en el equipo de tomografía y el planificador CAT PLAN en nuestra institución. Se demostró que la técnica era fácilmente aprendida por los pacientes, los primeros ensayos de uso demuestran una simpleza y entendimiento del método tanto por una paciente octogenaria que no tuvo contacto previo con un monitor de Computadora. Así como por un paciente de 65 años que demostró destreza e intuición en el procedimiento.

Tabla 1. Conservación del isocentro en las series de respiración bloqueada (bloq).

Ejes	Respiración libre	Respiración bloq 1	Respiración bloq 2	Respiración bloq 3
X	9.97	10.26	10.26	10.48
Y	2.18	3.86	3.59	3.96
Z	6.99	8.95	8.95	8.95

Se demostró que el isocentro del tumor en las diferentes series no sufrió cambios mayores a los tres milímetros, desviación aceptada y atribuida a la incertidumbre por contorno (como se puede observar en el cuadro inferior en las tres series de respiración bloqueada) (tabla 1).

Se demostró que el GTV (volumen tumoral) es mucho mayor en la respiración libre que en la respiración bloqueada hasta en 32%. Sufriendo los cambios mas drásticos el PTV que fue mayor en 62%. (tabla 02) Un dato importante es que cuando el paciente se somete a bloqueo respiratorio en inspiración, el volumen pulmonar se incrementa hasta en un 30%, disminuyendo de esta manera el volumen de pulmón sano irradiado.

Tabla 2. Disminución de los volúmenes (GTV y PVT) mediante respiración bloqueada

	Respiración libre	Respiración bloqueada	Ahorro de volúmenes	% del volumen
GTV Tumor	22.2	15.1	-7.1	32
(PTV)	184.6	69.8	-114.8	62

CONCLUSIONES

Los movimientos inducidos por la respiración causan dificultades en la entrega de una dosis adecuada de radiación. Estos desplazamientos son incompatibles con una terapia conformacional de alta precisión con una dosis mayor al GTV. El método tradicional de expandir el margen del GTV a CTV por 2 cm no es ideal ya que se tiende a incluir más volumen de pulmón sano que el necesario, y puede dirigir a una pérdida marginal. El desarrollo de volúmenes blancos al combinar información de bloqueo respiratorio en estados inhalados muestra alguna promesa en minimizar el exceso de pulmón irradiado manteniendo una cobertura adecuada del tumor pero se requiere que esta sea una técnica reproducible y factible en un contexto clínico en nuestra realidad.^{9,10,11}

Errores por movilización anatómica causan distorsión del volumen blanco, con un posicionamiento e información volumétrica incorrecta esto es debido a la inclusión de cambios temporales en la anatomía durante la adquisición de la imagen, planeamiento, y la entrega de radiación que se beneficiarían con una técnica adaptada a la respiración.^{12,13,14,15}

Hay una fuerte evidencia clínica que dosis más altas de radiación llevan a mejorar el control local del tumor, mejorando la sobrevida en cáncer de pulmón. La radioterapia conformada brinda la posibilidad de aumentar las dosis de radiación. El propósito es implementar una técnica de radioterapia adaptada a la respiración controlada por el paciente a fin de minimizar el movimiento del blanco inducido por

la respiración durante la simulación y tratamiento lo cual permitirá escalar dosis mayores de radiación, minimizando el daño a órganos circundantes. La importancia radica en que no existe ningún tipo de técnica de tratamiento con radioterapia en nuestro país, que considere los cambios producidos por la respiración. Los resultados obtenidos en nuestra evaluación, demuestran claramente las ventajas que nos proporciona esta técnica, la repetitividad de las condiciones para el tratamiento es la más importante conservando el mismo isocentro en todas las sesiones de tratamiento. Se demuestra que los volúmenes tanto del GTV como PTV disminuyen enormemente. El GTV es mucho mayor en respiración libre que en respiración bloqueada hasta en 32%. Sufriendo los cambios más drásticos el PTV que es mayor en 62%. Un dato importante es que cuando el paciente se somete a bloqueo respiratorio en inspiración, el volumen pulmonar es mayor hasta en un 30%, disminuyendo de esta manera el volumen de pulmón sano irradiado.

La viabilidad de un diseño de espirómetros de este tipo amplía las posibilidades para el mejoramiento técnico de mayor envergadura, como la miniaturización del equipo, la comunicación inalámbrica de datos y la aplicación en otros sistemas médicos de imágenes como angiofluoroscopia y aplicación para equipos de antigua generación sin sistemas incorporados.

REFERENCIAS

1. Gaona E, Manuel V Tovar M., Manual para uso de aceleradores lineales de electrones en radioterapia (en la modalidad de rayos X), Instituto de Cancerología, Edilibros, S.A. - México- 1984.
2. William R. Hendee, Radiation therapy physics, Year Book Medical Publishers, Chicago-London.
3. Paul Keall. 4-Dimensional computed tomography Imaging and treatment planning Seminars in Radiation Oncology 2004;14:81-90.
4. Nichols JC, Nichols EA, Rony PR. Micropocesorador Z-80, Programación e Interfaces - México - 1984
5. Fox. Análisis y diseño con Amplificadores Operacionales, traducción al castellano por Ing. Juan R. Bryson, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
6. Seyer MD. Conexiones en el IBM PC/XT/AT, Teoría y práctica de periféricos, comunicaciones y configuraciones, -Colombia-1987.
7. Lancaster D, Manual de circuitos integrados TTL, Ediciones Técnicas REDE S.A., -España- 1985.
8. Bets D. Dispositivos y sistemas electrónicos, Tomo 2, Lima - Perú- 1989.
9. Purdy JA. Current ICRU definitions of volumes. Limitations and future directions Seminars in Radiation Oncology 2004;14: 27-40.
10. Murphy MJ. Tracking Moving Organs in real time. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:52-64
11. Shirato M. Intrafractional tumor motion. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:10-18.
12. Dawson L. Interventions to reduce organ motion effects in radiation delivery. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:76-8
13. van Herk M. Errors and Margins in radiotherapy. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:52-64
14. Deep GS. Inspiration Breath hold and Respiratory Gating Strategies for reducing organ motioning radiation treatment. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:65-75
15. Goitein M. Organ and tumor motion: An overview. Seminars in Radiation Oncology 2004;14:2-9

Declaración de conflictos de intereses: Los autores declaran que no existen potenciales conflictos de intereses con esta investigación.

Financiación: El presente trabajo fue financiado parcialmente por un *Grant* del INEN.