

Seguimiento del patrón ventilatorio en reposo mediante tomografía por impedancia eléctrica

Marco Balleza^{a,b}, Jaume Fornos^b, Núria Calaf^a, Teresa Feixas^a, Mercedes González^a, Daniel Antón^b, Pere Riu^b y Pere Casan^a

^aUnitat de Funció Pulmonar. Departament de Pneumologia. Hospital de la Santa Creu i de Sant Pau. Facultat de Medicina. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. España.

^bDepartament d'Enginyeria Electrònica. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España.

OBJETIVO: La tomografía por impedancia eléctrica (TIE) permite realizar un seguimiento del patrón ventilatorio a partir de una secuencia de imágenes torácicas obtenidas por la captación de una corriente alterna de baja intensidad. La relación entre las imágenes torácicas y el volumen circulante no está suficientemente validada. El propósito del presente estudio ha sido comparar, en un grupo de 13 voluntarios sanos, la correspondencia entre las imágenes de la TIE y la señal volumen/tiempo obtenida mediante un neumotacómetro.

MATERIAL Y MÉTODOS: Los equipos que se utilizaron para las mediciones fueron: *a)* MedGraphics prevent TM™ Pneumotach, implementando el *software* adecuado para registrar las señales volumen/tiempo (prueba de referencia), y *b)* TIE-4, cuarta versión de un equipo diseñado por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, que permite tanto el registro de la señal volumen/tiempo como una representación gráfica de la sección transversal situada en el sexto espacio intercostal.

RESULTADOS: La media \pm desviación estándar de volumen circulante obtenida mediante el neumotacómetro fue de 0,523 \pm 0,102 l, y con la TIE-4, de 0,527 \pm 0,106 l (p no significativa). El coeficiente de correlación lineal entre ambas determinaciones fue de 0,923 (p = 0,001). La media de las diferencias entre ambos procedimientos fue de -0,003 l (intervalo de confianza del 95 %, -0,045 a 0,038). Las mayores diferencias estaban relacionadas con el sexo femenino, el índice de masa corporal y el contorno torácico, lo que obligó a una ecuación diferente para calibrar la TIE-4 en función de estas variables.

CONCLUSIONES: La TIE-4 se presenta como un método alternativo para realizar el seguimiento del patrón ventilatorio, aunque deben resolverse aspectos relacionados con la conformación de la caja torácica.

Monitoring of Breathing Pattern at Rest by Electrical Impedance Tomography

OBJECTIVE: Electrical impedance tomography (EIT) involves the application of a small alternating current to produce a series of chest images that can be used to monitor breathing pattern. The relation between chest images and tidal volume has not been sufficiently validated. The aim of the present study was to analyze the correlation between EIT images and the volume-time signal measured with a pneumotachometer in 13 healthy volunteers.

MATERIAL AND METHODS: The following measurement devices were used: *a)* MedGraphics preVent™ Pneumotach, with special software for recording the volume-time signal (reference test), and *b)* EIT-4, a fourth-generation prototype unit designed by the Department of Electronic Engineering at the Universidad Politécnica de Cataluña, Spain that records the volume-time signal and produces a graphic depiction of a cross section of the thorax at the sixth intercostal space.

RESULTS: The mean (SD) tidal volume measured by the pneumotachometer and the EIT-4 was 0.523 (0.102) L and 0.527 (0.106) L, respectively (P value not significant). The linear correlation coefficient between the 2 measurements was 0.923 (P=0.001), and the mean of the differences between the 2 procedures was -0.003 L (95% confidence interval, -0.045 to 0.038). The greatest differences were associated with female gender, body mass index, and chest circumference. In view of these differences, a different equation based on these variables was needed for calibration of the EIT-4.

CONCLUSIONS: The EIT-4 provides an alternative means of monitoring breathing pattern, although a number of issues related to the circumference of the rib cage need to be resolved.

Palabras clave: Tomografía por impedancia eléctrica. Patrón ventilatorio. Neumotacómetro.

Key words: Electrical Impedance Tomography. Breathing pattern. Pneumotachometer.

Introducción

La forma o patrón de la ventilación es el resultado final de un complejo sistema de receptores, vías de con-

ducción, núcleos de integración y órganos efectores, que resumen la situación del sistema respiratorio en su conjunto. Clásicamente se expresa según la ecuación: ventilación = volumen circulante \times frecuencia respiratoria, o en su variante de: ventilación = volumen circulante/tiempo inspiratorio \times tiempo inspiratorio/tiempo total, que especifican mejor el *driving* y el ritmo de la respiración¹. Para medir el patrón ventilatorio se utiliza habitualmente un neumotacómetro, lo que supone la conexión al paciente mediante una boquilla y la modifica-

Correspondencia: Dr. M. Balleza.

Unitat de Funció Pulmonar. Hospital de la Santa Creu i de Sant Pau. Antoni Maria Claret, 167. 08025 Barcelona. España.

Correo electrónico: jballeza@santpau.es

Recibido: 29-8-2006; aceptado para su publicación: 26-9-2006.

ción espontánea de la forma de respirar. Como método alternativo se ha utilizado un sistema de bandas inductivas que no alteran la dinámica respiratoria².

La tomografía por impedancia eléctrica (TIE) es una técnica no invasiva que permite obtener imágenes torácicas durante la respiración espontánea, que ha demostrado su eficacia para determinar la función pulmonar unilateral³ y otros aspectos de la fisiología respiratoria⁴, y que está suficientemente estandarizada para su uso en neumología⁵.

Disponer de un equipo sencillo, no invasivo y barato que permita medir el patrón ventilatorio es un objetivo no del todo satisfecho en fisiología respiratoria. Si además pudiera almacenar un gran número de señales y realizar el seguimiento este patrón durante largos períodos, resultaría de gran utilidad. Nuestro propósito ha sido probar la bondad del equipo de TIE-4, cuarta versión de un prototipo disponible en nuestro laboratorio, para seguir el patrón ventilatorio en reposo. Para ello, el objetivo parcial de este trabajo fue comparar los datos obtenidos mediante el equipo de TIE y el considerado de referencia, en forma de la señal proporcionada por el neumotacómetro, en un grupo de voluntarios sanos, además de presentar las ventajas e inconvenientes más destacables de este método para efectuar el seguimiento el patrón ventilatorio.

Material y métodos

Neumotacómetro

Se utilizó el equipo MedGraphics prevent TM Pneumotach, conectado al *software* facilitado por la propia Medical Graphics Corporation (St. Paul, MN, EE.UU.), que permite registrar las señales de flujo y tiempo de manera continua y en línea, tanto gráfica como numéricamente. La calibración se realizó mediante una jeringa de 3 l, según el protocolo habitual del laboratorio (diferencia aceptada < 1%).

Equipo TIE-4

El equipo TIE-4, cuarta versión de un prototipo diseñado por el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cataluña, permite obtener, a partir de la representación gráfica de una sección transversal al nivel del sexto espacio intercostal, una señal volumen-tiempo (volumen circulante). La calibración del equipo se efectuó mediante una imagen de referencia de 64 × 64 píxeles. Para el ajuste del equipo TIE-4 se requiere, además, utilizar 2 variables (A y B) para calcular la señal final de impedancia. Estas variables son función de las características antropométricas de cada individuo y se obtienen al finalizar la prueba (véase apartado "Discusión"). Inicialmente la adquisición de señales se consigue a partir de 16 electrodos colocados alrededor del tórax (Red Dot 2560 de 3M, London, Ontario, Canadá) (fig. 1). El equipo TIE-4 genera una corriente a una frecuencia de 48 kHz, que es conducida a un par de multiplexores, que posteriormente la inyectarán al paciente mediante otro par de electrodos. El resto de los electrodos mide secuencialmente la tensión que se induce en la superficie del paciente, con ayuda de un sistema de detección. Una vez que todas las medidas se han realizado para ese par inyector, se trasladan los puntos de inyección y se comienza un nuevo ciclo de medida. El procedimiento se repite hasta haber utilizado todos los electrodos como inyectores y detectores. El equipo, probado previamente, se utiliza para otros registros en el laboratorio^{3,5}.

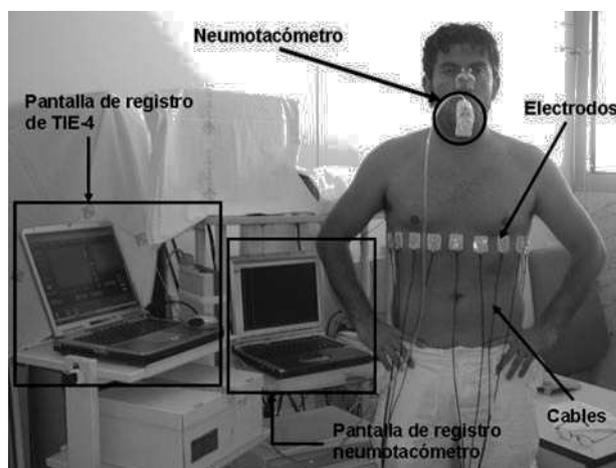


Fig. 1. Disposición de ambos equipos. A la derecha, colocación de los electrodos alrededor del tórax. En la boca del voluntario puede observarse el neumotacómetro. A la izquierda, los equipos informáticos utilizados para el estudio, en ambos casos coordinados a través de un PC portátil. TIE: tomografía por impedancia eléctrica.

Voluntarios

Los voluntarios estudiados eran personas sanas (un total de 13) del entorno del laboratorio (6 varones y 7 mujeres), con una edad comprendida entre los 20 y los 55 años, no fumadores y con espirometría en el margen de referencia. Las exploraciones se realizaron en el mismo período (9-12 h de la mañana) durante 4 semanas, en una habitación tranquila, con temperatura ambiente de 25 °C, un 60% de humedad y a nivel del mar.

Procedimiento

Los 2 equipos de medición (neumotacómetro y TIE-4) se situaron en paralelo, con funcionamiento independiente y sin interferencias de uno en el otro. Se registró numérica y gráficamente el patrón ventilatorio de los voluntarios en reposo, durante períodos de 30 s (se recogían entre 5 y 8 ciclos respiratorios), con un descanso entre medidas de 3 min. El total de ciclos analizados para cada individuo osciló entre 20 y 25. Los datos se presentan en forma de media ± desviación estándar.

Antes de iniciar el procedimiento de medida se recogieron los datos antropométricos de los voluntarios (sexo, edad, talla, peso, índice de masa corporal), perímetro torácico en reposo e inspiración y espiración máximas, pliegues cutáneos (anterior, lateral y posterior del tórax) mediante unas pinzas caliper electrónico tipo Skinfoldmeter.

Una vez calibrados ambos equipos y después de haber colocado al individuo los 16 electrodos y el neumotacómetro (fig. 1), se iniciaba el registro de los ciclos respiratorios, almacenando 3 lecturas diferentes en archivos con extensión TXT y ASC para su posterior procesamiento.

Comparación estadística

La comparación estadística se realizó mediante la prueba de la t de Student (una cola) para datos apareados, el coeficiente de correlación de Spearman para datos no paramétricos y el análisis de concordancia de Altman y Bland. Se efectuó una aproximación multivariante para calcular las variables A y B de la TIE en función de los datos antropométricos y físicos de los voluntarios. Se consideró significativa una $p < 0,05$.

TABLA I
Características antropométricas –sexo, edad, talla, peso e índice de masa corporal (IMC)–, contorno torácico y pliegues cutáneos de los voluntarios estudiados

Caso	Sexo	Edad (años)	Talla (m)	Peso (kg)	IMC (kg/m ²)	Contorno torácico (cm)			Pliegues (mm)		
						Insp	Esp	Basal	Anterior	Posterior	Lateral
1	V	23	1,84	73	21,6	92	84	87	12	15	9
2	V	29	1,81	87	26,6	104	98	100	23	29	22
3	V	19	1,82	74	22,2	86	81	84	12	15	11
4	V	23	1,83	79	23,6	93	86	87	12	12	12
5	V	30	1,66	60	21,8	92	82	88	12	12	12
6	V	51	1,68	75	26,6	103	97	100	16	28	17
7	M	51	1,62	77	29,3	87	84	85	14	21	16
8	M	54	1,61	61	23,5	81	77	79	16	19	19
9	M	46	1,58	66	26,4	80	77	77	17	17	10
10	M	50	1,53	55	23,5	80	76	77	19	19	20
11	M	25	1,65	63	23,1	78	74	76	15	17	11
12	M	27	1,70	70	24,2	79	75	76	15	18	16
13	M	49	1,58	54	21,6	79	75	76	18	18	18
Media		36,7	1,68	68,8	24,2	87,2	82	84	15,5	18,5	14,8
DE		13,4	0,11	9,9	2,4	9,0	7,9	8,5	3,3	5,2	4,2

DE: desviación estándar; Esp: espiración; Insp: inspiración; M: mujer; V: varón.

Resultados

La edad media \pm desviación estándar de los voluntarios estudiados fue de 37 ± 13 años, la talla de $1,68 \pm 0,11$ m, el peso de 69 ± 10 kg y el índice de masa corporal de $24,2 \pm 2,4$ kg/m². Las determinaciones del contorno torácico en situación basal y en inspiración y espiración máximas fueron de $84 \pm 8,5$; $87,2 \pm 9$, y $82 \pm 7,9$ cm, respectivamente. Los pliegues cutáneos torácicos, medidos en zona anterior, posterior y lateral, fueron de $15,5 \pm 3,3$; $18,5 \pm 5,2$, y $14,8 \pm 4,2$ mm, respectivamente. Los datos de cada uno de los 13 voluntarios estudiados se recogen en la tabla I.

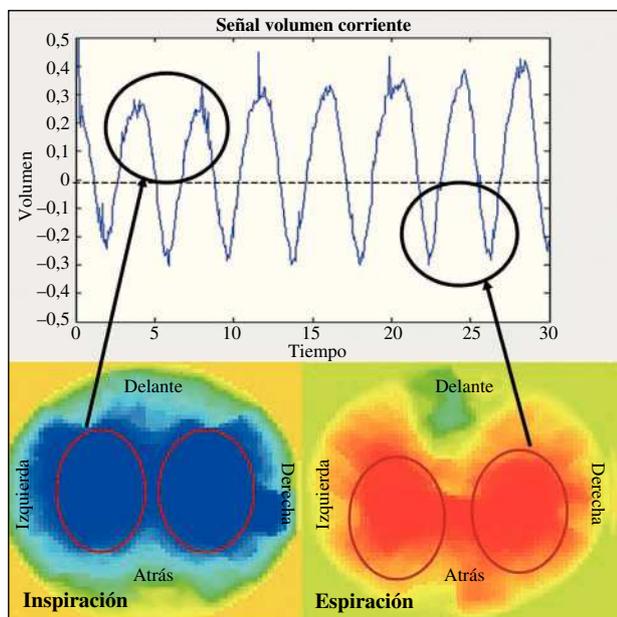


Fig. 2. En la parte inferior, imagen de tomografía por impedancia eléctrica obtenida en inspiración y en espiración máximas para poder deducir el volumen circulante, que aparece en la parte superior de la figura.

TABLA II
Variables de calibración A y B para ajustar la señal de tomografía por impedancia eléctrica (TIE) (véase texto) y volumen circulante obtenido mediante el neumotacómetro y la TIE

Caso	A	B	Volumen circulante (l)	
			Neumotacómetro	TIE-4
1	1.477	-542	0,538 \pm 0,057	0,521 \pm 0,053
2	826	170	0,513 \pm 0,063	0,506 \pm 0,065
3	1.431	143	0,499 \pm 0,072	0,501 \pm 0,078
4	1.293	44	0,606 \pm 0,081	0,654 \pm 0,110
5	2.054	458	0,680 \pm 0,107	0,679 \pm 0,103
6	1.091	-45	0,711 \pm 0,089	0,712 \pm 0,069
7	1.610	-143	0,390 \pm 0,036	0,378 \pm 0,033
8	847	-44	0,491 \pm 0,049	0,526 \pm 0,050
9	1.407	-249	0,535 \pm 0,058	0,500 \pm 0,058
10	989	-357	0,382 \pm 0,051	0,389 \pm 0,057
11	1.498	-556	0,427 \pm 0,049	0,431 \pm 0,046
12	1.623	-348	0,582 \pm 0,069	0,596 \pm 0,073
13	1.036	-29	0,451 \pm 0,053	0,454 \pm 0,045

Valores expresados como media \pm desviación estándar.

Los valores medios de volumen circulante obtenidos con el neumotacómetro fueron de $0,523 \pm 0,102$ l, y los obtenidos mediante la TIE fueron de $0,527 \pm 0,106$ l (p no significativa) (tabla II). Las frecuencias respiratorias fueron idénticas para ambas lecturas, al estar los aparatos conectados simultáneamente y en paralelo, y no fueron el objetivo de esta comparación.

El coeficiente de correlación lineal entre ambas determinaciones fue de 0,923 ($p = 0,001$). La distribución de las diferencias entre las observaciones en función del valor de la media (análisis de concordancia) se refleja en la figura 2. La media de las diferencias fue de $-0,003$ l (intervalo de confianza del 95%, $-0,045$ a $+0,038$).

Los valores calculados de las constantes A y B para cada individuo y que permitieron ajustar las lecturas de TIE se resumen en la tabla II.

Discusión

Disponer de un equipo y de un procedimiento sencillo y no invasivo que permita registrar el patrón ventilatorio en reposo, sin que se modifiquen las características propias de la respiración, es un objetivo no suficientemente cubierto en neumología. El presente estudio aporta datos concluyentes, obtenidos en voluntarios sanos, que abren una expectativa prometedora en este campo. La comparación estadística entre el volumen circulante medido con la TIE y con la técnica considerada de referencia, el neumotacómetro, indica que ambos procedimientos podrían ser intercambiables.

Una de las primeras consideraciones que pueden hacerse a partir de los datos obtenidos es que si se utiliza el neumotacómetro de una manera ordenada, con el individuo en reposo, con determinaciones después de un período de adaptación y con un amplio promedio de ciclos, la interferencia del equipo en el patrón ventilatorio propio de cada individuo es menor. Las escasas diferencias observadas entre los 2 procedimientos empleados en el presente estudio permiten hacer la afirmación anterior, que a su vez está avalada por otros estudios de la literatura médica⁶.

La TIE se presenta como un equipo alternativo para obtener estos datos. La sencillez del procedimiento, la facilidad con que los electrodos se colocan alrededor del tórax, la ausencia de radiaciones, el hecho de que no sea invasiva y, en consecuencia, no influya en la forma de respirar, la posibilidad de almacenar gran número de señales, etc., hacen de la TIE un procedimiento a considerar. No obstante, la experiencia acumulada en el estudio obliga a destacar las principales dificultades y la necesidad de seguir perfeccionando el equipo y el procedimiento.

Los electrodos utilizados para emitir y captar la señal eléctrica son de alta calidad y se emplearon después de depilar la zona cutánea y demostrar una buena capacidad de conducción. Las conexiones del electrodo con el equipo de lectura se realizaron a través de un cable coaxial (resistencia de 50 ohmios/m y 2 m de longitud) para impedir interferencias. A pesar de estas precauciones, una de las mayores dificultades de las lecturas fue la aparición de ruido (corriente alterna), atribuible al movimiento de los electrodos o a defectos en el contacto con los cables, que no siempre era posible evitar. La aparición de este ruido producía un error superior al 10% en algunas lecturas, que debieron repetirse en 3 de los 13 voluntarios estudiados. Al mismo tiempo, hacía casi imposible el cálculo matemático de las variantes del *driving* y el ritmo del patrón ventilatorio. En posteriores prototipos deberá realizarse un esfuerzo mayor para filtrar estas señales en tiempo real y lograr un registro de mayor calidad.

Otro problema estriba en la necesidad de utilizar simultáneamente el neumotacómetro en una primera aproximación. Las características físicas de cada individuo hacen necesario calcular las constantes A y B de un polinomio⁷, en el que deben valorarse la circunferencia torácica máxima y el pliegue cutáneo, para calibrar adecuadamente la lectura de la TIE. Todo ello debe ajustarse, en una primera lectura, a un volumen circulante pre-

viamente conocido. Para asignar los correspondientes valores a A y B se promediaron las crestas máximas y mínimas, tanto de las señales generadas por el neumotacómetro como por el equipo TIE-4. En esta última señal se trazaba el número de cuentas correspondientes al ciclo respiratorio en el eje de ordenadas y el de tiempo en las abscisas. Los promedios calculados se sustituían en las ecuaciones siguientes:

$$A = \frac{\text{Promedio cuentas máx.} - \text{promedio cuentas mín.}}{\text{Promedio volumen máx.} - \text{promedio volumen mín.}}$$

$$B = \text{Promedio cuentas máx.} - (\text{promedio volumen máx.} \cdot A)$$

Una vez obtenidos los valores de A y B, se introducían en el panel principal de seguimiento del equipo de tomografía y se ejecutaban los archivos almacenados correspondientes al propio individuo, con extensión ASC. Posteriormente, se comparaba el volumen circulante generado por ambos equipos. Dichas variables A y B fueron únicas y personales para cada voluntario estudiado. Sólo la existencia futura de diferentes algoritmos de interpretación de la señal eléctrica, en función de las características físicas de cada tórax, podrá solventar este inconveniente.

En conclusión, a pesar de la necesidad de ajustar el equipo a la forma del tórax de cada persona (mayor dificultad de lectura en obesos o con deformidades torácicas), de la existencia de ruido difícil de predecir antes de cada lectura y de la necesidad de no poder prescindir absolutamente del neumotacómetro, al menos en la lectura inicial, la TIE supone un paso importante para poder disponer en poco tiempo y con garantías suficientes de un equipo sencillo, reproducible, no invasivo y barato para efectuar el seguimiento del patrón ventilatorio. Deberán hacerse nuevos esfuerzos para perfeccionar el actual prototipo y para aumentar su capacidad de almacenamiento de señales antes de poder utilizarlo de forma habitual en fisiología respiratoria y en el control de varias enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cotes JE. Lung function. Assessment and application in medicine. 5th ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1993.
2. Konno K, Mead J. Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing. *J Appl Physiol.* 1967;22:407-22.
3. Serrano E, De Lema B, Casas O, Feixas T, Calaf N, Camacho V, et al. Use of electrical impedance tomography (EIT) for the assessment of unilateral pulmonary function. *Physiol Meas.* 2002;23:211-20.
4. Harris ND, Sugget AJ, Barber DC. Applications of applied potential tomography (APT) in respiratory medicine. *Clin Phys Physiol Meas.* 1987;8:155-65.
5. De Lema B, Casan P, Riu PJ. Tomografía por impedancia eléctrica. Estandarización del procedimiento para su aplicación en neumología. *Arch Bronconeumol.* 2006;42:299-301.
6. Calverley PMA. Control of breathing. Lung function testing. En: Gosselink R, Stam H, editors. *European respiratory monograph.* 2005;10:44-56.
7. Coulombe N, Gagnon H, Marquis F, Skrobik Y, Guardo R. A parametric model of the relationship between EIT and total lung volume. *Physiol Meas.* 2005;26:401-11.