
CALIBRADOR DE ESPIROMETROS POR DESCOMPRESION EXPLOSIVA

P. CASAN, J. GINER, R.M. MIRALDA, J. CANET,
D. NAVAJAS* y J. SANCHIS

Unitat de Funció Cardiopulmonar.
Hospital de la Sta. Creu i Sant Pau.

Introducción

Los recientes acuerdos en la estandarización de la espirometría^{1,2} han agudizado la necesidad de una correcta calibración de los aparatos de medición. La necesidad es especialmente apremiante por la rápida evolución y creciente complejidad de los instrumentos utilizados: de la sencillez y relativa estabilidad de funcionamiento de los espirómetros de agua se ha pasado a los cada vez más usados sistemas de función pulmonar (SFP), de complejo diseño. Los SFP suelen estar compuestos por un medidor de flujo aéreo —generalmente un neumotacómetro—, un transductor de la señal detectada, un microordenador para el proceso de datos y un registrador de los resultados, datos espirométricos. Cada uno de los componentes puede poseer una linealidad y deriva propias y diferentes. Los microprocesadores están limitados en su precisión por la exactitud de la entrada de los datos, la adecuación en la frecuencia de muestreo y los posibles errores de programación. Por consiguiente, para la correcta valoración global de la respuesta, tanto de los espirómetros como de los SFP, se requiere su estudio en condiciones dinámicas, simila-

res a las de trabajo. Hasta muy recientemente, sin embargo, la calibración de los espirómetros comprendía por lo general la comprobación de su exactitud en la medición de volumen, desplazamiento del inscriptor y velocidad de transporte del papel de registro, sin tener en cuenta la inercia y presión retrógrada generadas durante la espirometría. El funcionamiento de los SFP se evaluaba con la señal de volumen proporcionada por una jeringa de 1 a 3 litros de aire, y la señal eléctrica proporcionada por un circuito interno del sistema. Un paso más era la calibración con diferentes flujos escalonados obtenidos de un generador de flujo constante³. Así pues, ni espirómetros ni SFP se calibraban satisfactoriamente, en condiciones dinámicas reproducibles. Ello impedía percibir defectos de funcionamiento que, en ocasiones, han llegado a invalidar estudios por lo demás de diseño impecable⁴.

El presente informe describe la construcción y funcionamiento de un instrumento de calibración dinámica. El aparato, modificado del propuesto por Ferris et al⁵ y fabricado por Petusevsky et al⁶, se ensayó en un espirómetro y varios SFP de uso común para probar su utilidad en la calibración. Nuestro propósito es difundir su empleo y facilitar los detalles de construcción que lo hagan asequible al mayor número posible de laboratorios de función pulmonar.

* Departamento de Física Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Barcelona.

Recibido el día 22 de julio de 1982.

Descripción del aparato

La pieza central del aparato de descompresión explosiva es un cilindro metálico, hueco y hermético, cuyas paredes permiten soportar una presión de trabajo de un Kg/cm² sin deformaciones. Sus dimensiones internas, 170 mm de eje y 173 mm de diámetro, le proporcionan una capacidad próxima a los 4 litros. El cilindro está dispuesto horizontalmente (fig. 1) y unas prolongaciones de sus caras le sirven de base de descanso. Como muestra la figura 2, en una de las caras posee un orificio de 14,5 mm de diámetro para conexión con electroválvula* de salida roscada para la colocación de diferentes resistores. En la cara opuesta tiene dos orificios, uno para la válvula de seguridad (2 Kg/cm²) y otro para el grifo de entrada de aire**, conectado en serie con una válvula de aguja*** que permite la regulación fina manual de un posible exceso de presión interna. En la parte superior del lado del cilindro hay un orificio para la conexión de un manómetro**** de $\pm 1\%$ de resolución con escala 1 a 1,6 Kg/cm², cuyas divisiones corresponden a incrementos de 25 g/cm². El interior del cilindro se rellena parcialmente con malla fina de cobre (unos 200 g de peso y unos 22 ml de desplazamiento), lavada con acetona y repartida uniformemente por

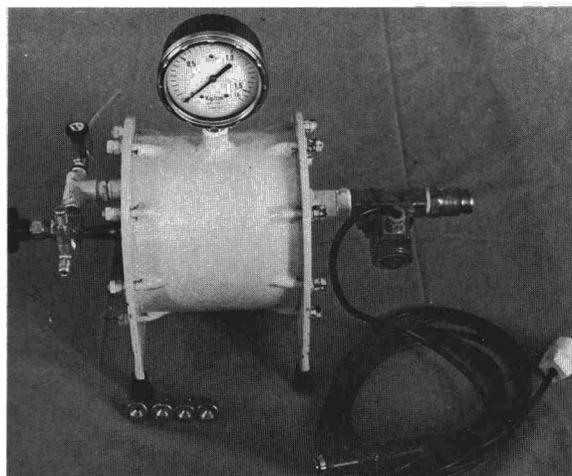


Fig. 1. Aparato de descompresión explosiva para calibración de espirómetros.

todo el espacio. El paso de rosca de la salida de la electroválvula se corresponde con el de los resistores, simples piezas roscadas de diferentes dimensiones internas que modifican el orificio de salida, produciendo una resistencia creciente del número 1 al número 4 (tabla I).

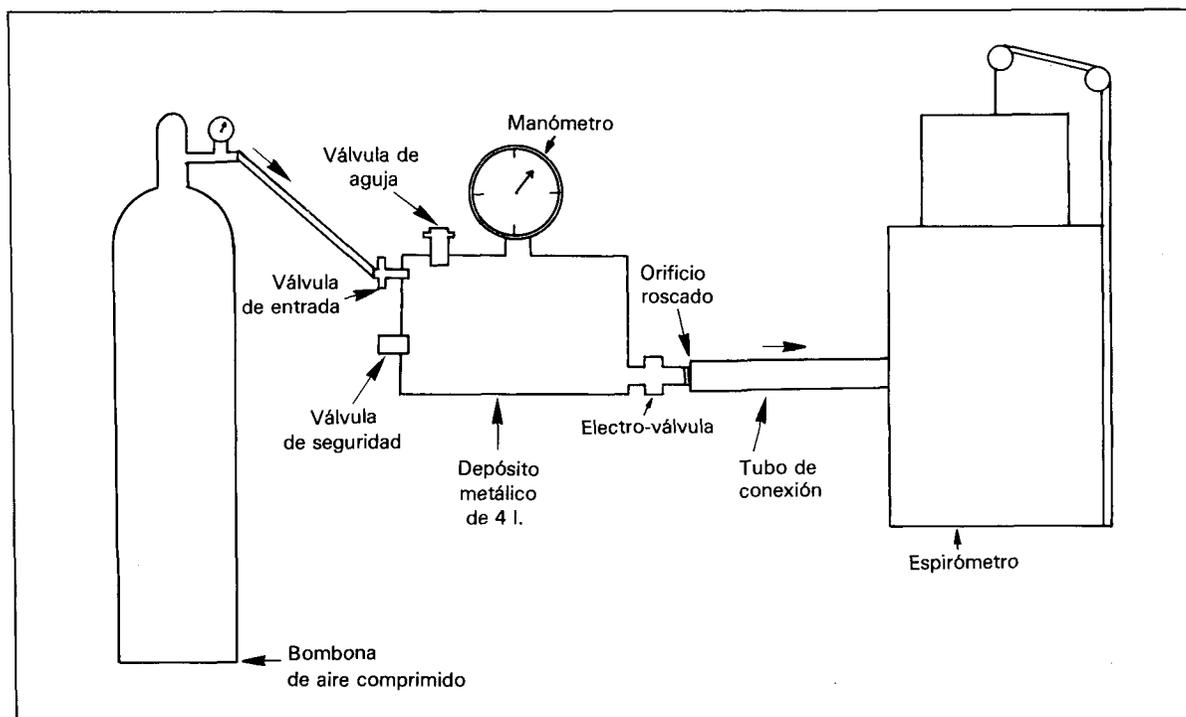


Fig. 2. Representación esquemática de los elementos que intervienen en el proceso de calibración.

*. Electroválvula tipo LUCIFER n.º 321G 1810 Sperry Vickers.
 ** Válvula de entrada tipo N. NUPRO COMPANY. Cleveland. Ohio. 44110.

*** Válvula de aguja tipo Whitey. B-IRFA. Regulable por sistema NUPRO Pat. D.
 **** Manómetro de precisión. BOURDON-Española. AISI 316 L. Clase 0.5.

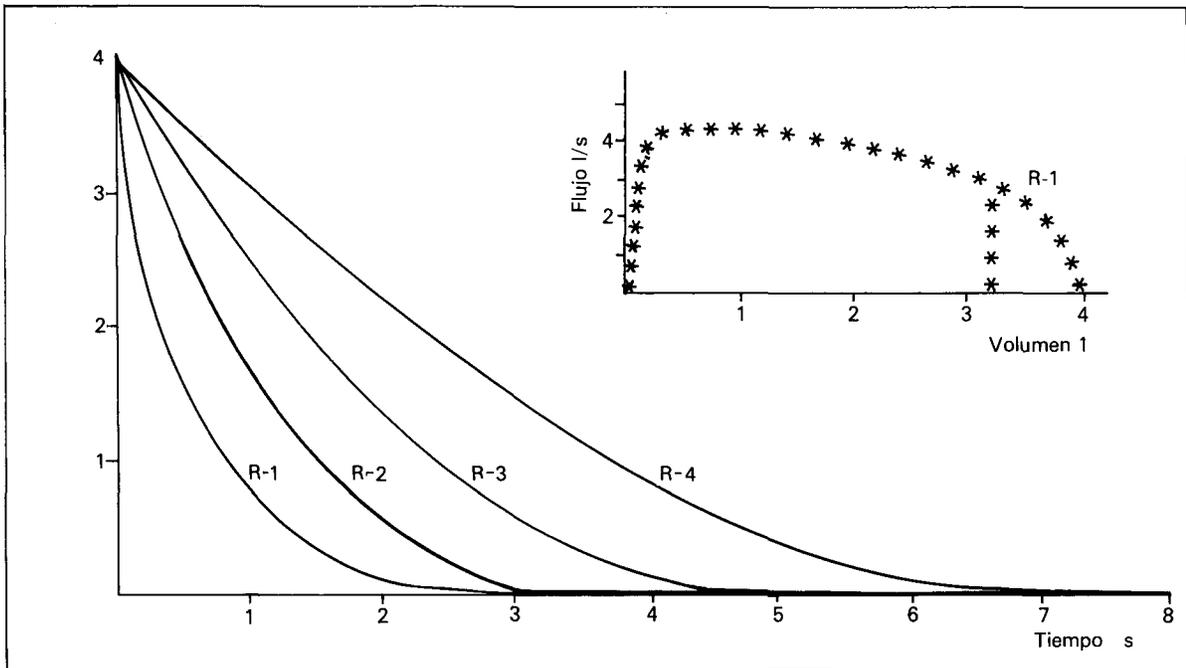


Fig. 3. Registros espirométricos VOLUMEN/TIEMPO obtenidos con el aparato de descompresión explosiva para cada uno de los resistores. En la parte superior, un registro de FLUJO/VOLUMEN con el resistor 1. La línea vertical que corta la curva hacia su final, corresponde al punto en la escala de volumen, en que se alcanzó el primer segundo de expulsión (FEV₁).

TABLA I

Relación y dimensiones de los cuatro resistores utilizados

	RESISTOR			
	1	2	3	4
Resistencia	0,98	1,91	5,45	15,70
Longitud (mm)	13	8	11	13
Diámetro (mm)	4	3	2,5	2

La resistencia se expresa en proporciones crecientes. La longitud de cada pieza y el diámetro del orificio en mm.

Procedimiento

El funcionamiento del aparato consiste en la descompresión súbita con salida explosiva de un volumen de aire igual a la capacidad del cilindro y cuya velocidad se determina por la estrechez del resistor colocada a la salida. En primer lugar el cilindro se llena con aire hasta alcanzar una atmósfera de presión interna. Para ello se conecta el grifo de entrada a una bombona de aire comprimido, o a un pequeño compresor motorizado o activado por el observador. Caso de sobrepasar la presión requerida, se purga cuidadosamente a través de la válvula de aguja hasta alcanzar exactamente una atmósfera de presión según indica el manómetro.

El orificio de salida de la electroválvula se conecta mediante un tubo flexible con el espirómetro o neumotacómetro sometido a calibración. El calibre interior del tubo es igual o superior al del apa-

rato calibrado y, en el caso del neumotacómetro, la longitud mínima es de 1 m, para evitar el efecto de las turbulencias de la salida brusca del aire del descompresor sobre el neumotacómetro.

Al accionar el pulsador de apertura de la electroválvula se produce un vaciado súbito, explosivo, del exceso de aire del cilindro, con un volumen idéntico al del mismo.

El registro flujo/volumen o volumen/tiempo así obtenido con el aparato de calibrar es muy parecido al de la espiración forzada (fig. 3). Los distintos resistores simulan espirometrías con diferentes grados de limitación al flujo aéreo. La malla de cobre en el interior del cilindro convierte la descompresión en isotérmica, lo que evita que su fase terminal se produzca a flujo muy bajo, y la asemeja a la de la espirometría real⁶.

En conjunto, el llenado del cilindro y vaciado con registro espirométrico requieren un tiempo inferior a 1 minuto, lo que permite repetir las maniobras a voluntad.

Comprobaciones experimentales

Para verificar su funcionamiento, se conectó el aparato a un espirómetro Stead-Wells* (ES-W) de 10 l cuidadosamente calibrado para la medición de volumen y tiempo. En series consecutivas se re-

* Warren E. Collins, Braintree, Mass. USA.

gistraron 10 o más descompresiones para cada uno de los cuatro resistores. Con los trazados convencionales de volumen/tiempo así obtenidos se calcularon la FVC, FEV₁ y FEF₂₅₋₇₅ en la forma recomendada¹ y siempre por el mismo observador entrenado. Los resultados en ATPS, expresados por la media (\bar{x}), desviación típica (SD) y coeficiente de variación (vc) para cada uno de los parámetros, se recogen en la tabla II.

No se intentó la medición del volumen del cilindro, toda vez que su tamaño se eligió arbitrariamente. Como volumen de expulsión de referencia para subsiguientes comprobaciones se tomó 3,97 ± 0,05 l, la media de las 58 determinaciones de FVC obtenidas con el ES-W. Las variaciones en la fidelidad de medición de la presión se registrarían después, si las hubiere, como cambios en la FVC obtenida con el ES-W.

Una vez obtenidos los datos de FVC, FEV₁ y FEF₂₅₋₇₅ con el espirómetro de referencia, se repitió el estudio en otros cuatro aparatos de espirometría de características bien diferentes: Vitalograph-S Function Analyser (Vitalograph, Inglaterra), Vicatest-4 (Mijnhardt, Holanda), H-P 47405A y H-P 9825A (Hewlett Packard, U.S.A.). El número de descompresiones realizadas para cada resistor y aparato, y los datos espirométricos obtenidos en valores ATPS, expresados por la \bar{x} , SD y vc pueden verse en la tabla III.

Discusión

Dada la dificultad de probar y calibrar espirómetros y SFP en condiciones dinámicas, el único recurso hasta hace muy pocos años era la realización de espirometría en voluntarios con el aparato sometido a prueba conectado en serie a un espirómetro patrón (generalmente el ES-W), o alternando los aparatos en orden aleatorio si la conexión no era posible. El procedimiento es muy lento y requiere una ejecución muy rigurosa. Sus resultados deben tener en cuenta la variabilidad intraindividual en la función pulmonar pero, a cambio, ofrecen la ventaja de usar la señal física más auténtica:

la espiración forzada. Sin menoscabo del valor de este tipo de comprobaciones para la cualificación de nuevos aparatos, el uso diario de los espirómetros y SFP exige, especialmente en los últimos, la comprobación frecuente y rápida con señales estables y reproducibles pero similares al máximo a la de la espiración forzada, en la línea de las recomendadas por la ATS¹. Tanto las jeringas autoimpulsadas⁷⁻¹⁰ como el aparato de descompresión explosiva⁵ usado en el presente trabajo producen este tipo de señales para calibración. Como demostraron Petusevsky et al⁶, y nuestros datos confirman, la reproducibilidad de la señal producida en el ES-W es excelente (ver tabla II), máxime si se tiene en cuenta que el coeficiente de variación incluye el error de cálculo gráfico del observador. Los datos acumulados en 2½ años indican una variabilidad a largo plazo no significativa⁵, con lo que se elimina otro posible problema.

El efecto de la temperatura, altitud y presión barométrica, no produce diferencias significativas⁶ por lo que no se examinó en el presente trabajo. La única salvedad ya mencionada por Petusevsky et al⁵, es la necesidad de elevar la presión del cilindro al doble de la atmosférica del lugar, si se pretende obtener siempre el mismo volumen de expulsión. Esto puede ser un factor a tener en cuenta por los laboratorios situados a altitudes cuya presión barométrica difiera claramente de los 760 mm Hg del nivel del mar.

El aparato de descompresión explosiva posee otras de las cualidades requeridas por los instrumentos de calibración. Es de construcción sencilla, al alcance del servicio de mantenimiento del propio hospital —como en nuestro caso— o de un pequeño taller. Es barato, pues su precio no sobrepasa el 10 % del importe de los espirómetros más económicos. Es también portátil, rápido y fácil de manejar, por lo que su uso no sobrecarga el trabajo de rutina en el laboratorio.

El análisis de los resultados observados en los cuatro SFP permite destacar algunos hallazgos importantes. En todos ellos se sobrepasaron, al menos con alguno de los resistores empleados, los límites de exactitud propuestos por la ATS. Es es-

TABLA II

Resultados de calibración obtenidos con el descompresor explosivo conectado a un espirómetro Stead-Wells para cada uno de los resistores utilizados, y en cada uno de los parámetros convencionales de la espirometría (FVC, FEV₁, FEF₂₅₋₇₅ %)

	RESISTOR-1 N:15			RESISTOR-2 N:17			RESISTOR-3 N:15			RESISTOR-4 N:11		
	FVC	FEV ₁	FEF 25-75 %									
\bar{x}	3,96	3,17	2,99	3,98	2,12	1,70	3,99	1,58	1,17	3,96	1,05	0,74
SD	0,05	0,06	0,08	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,02	0,06	0,05	0,03
vc	1,3	1,9	2,8	0,6	2,1	2,0	1,2	2,6	1,9	1,6	5,0	3,4

\bar{x} : media. SD: desviación típica. vc: coeficiente de variación.

TABLA III

Resultados de calibración con el descompresor explosivo conectado a cuatro espirómetros de diferentes características (Vitalograph, Vicatest-4, HP-47405A y HP-9825 A)

		VITALO-GRAPH	DIF	VICATEST-4	DIF	HP-47405	DIF	HP-9825 A	DIF	
RESISTOR-1	N	11		10		10		34		
	FVC	\bar{x}, SD vc	$3,88 \pm 0,33$ 0,8	- 80	$4,05 \pm 0,01$ 0,1	+ 90	$4,13 \pm 0,11$ 2,7	+ 170 + 4,3 %	$4,08 \pm 0,06$ 1,4	+ 120 + 3 %
	FEV ₁	\bar{x}, SD vc	$3,18 \pm 0,04$ 1,2		$3,26 \pm 0,01$ 0,2	+ 90	$3,20 \pm 0,02$ 0,06		$3,18 \pm 0,04$ 1,2	
	FEF ₂₅₋₇₅ %	\bar{x}, SD vc	$3,11 \pm 0,03$ 1,0	+ 120 + 4 %	$3,09 \pm 0,00$ 0,0		$2,93 \pm 0,05$ 1,8		$2,94 \pm 0,03$ 1,1	
RESISTOR-2	N	11		10		10		31		
	FVC	\bar{x}, SD vc	$3,84 \pm 0,02$ 0,5	- 140 - 3,5 %	$4,06 \pm 0,01$ 0,2	+ 80	$4,13 \pm 0,05$ 1,1	+ 150 + 3,8 %	$4,12 \pm 0,002$ 0,5	+ 140 + 3,5 %
	FEV ₁	\bar{x}, SD vc	$2,03 \pm 0,03$ 1,2	- 90 - 4,3 %	$2,16 \pm 0,01$ 0,4		$2,11 \pm 0,01$ 0,5		$2,10 \pm 0,01$ 0,05	
	FEF ₂₅₋₇₅ %	\bar{x}, SD vc	$1,70 \pm 0,00$ 0,0		$1,73 \pm 0,00$ 0,0		$1,67 \pm 0,01$ 0,8		$1,72 \pm 0,01$ 0,5	
RESISTOR-3	N	11		10		10		32		
	FVC	\bar{x}, SD vc	$3,80 \pm 0,03$ 0,8	- 190 - 4,8 %	$4,06 \pm 0,01$ 0,2	+ 70	$4,16 \pm 0,06$ 1,4	+ 170 + 4,3 %	$4,26 \pm 0,03$ 0,8	+ 270 + 6,8 %
	FEV ₁	\bar{x}, SD vc	$1,46 \pm 0,06$ 4,0	- 120 - 7,6 %	$1,58 \pm 0,001$ 0,4		$1,56 \pm 0,01$ 0,7		$1,58 \pm 0,01$ 0,6	
	FEF ₂₅₋₇₅ %	\bar{x}, SD vc	$1,19 \pm 0,03$ 2,5	+ 1,7 %	$1,18 \pm 0,00$ 0,0		$1,19 \pm 0,01$ 0,6		$1,23 \pm 0,01$ 0,6	+ 5,1 %
RESISTOR-4	N	11		20		10		33		
	FVC	\bar{x}, SD vc	$3,71 \pm 0,02$ 0,5	- 250 - 6,3 %	$4,06 \pm 0,01$ 0,3	+ 100	$4,14 \pm 0,12$ 3,0	+ 180 + 4,6 %	$4,33 \pm 0,01$ 0,3	+ 370 + 9,3 %
	FEV ₁	\bar{x}, SD vc	$0,89 \pm 0,02$ 2,5	- 160 - 15,2 %	$1,01 \pm 0,01$ 1,3	- 3,8 %	$1,02 \pm 0,02$ 1,5		$1,06 \pm 0,01$ 0,04	
	FEF ₂₅₋₇₅ %	\bar{x}, SD vc	$0,74 \pm 0,05$ 6,8		$0,73 \pm 0,00$ 0,0		$0,75 \pm 0,01$ 1,3		$0,79 \pm 0,01$ 0,6	+ 6,8 %

Se expresan la media (\bar{x}), desviación típica (SD) y coeficiente de variación (vc) de los parámetros espirométricos convencionales (FVC, FEV₁, FEF₂₅₋₇₅ %) para cada uno de los resistores. Se indican las diferencias, en valor absoluto (ml) y en %, observadas con el espirómetro patrón (Stead-Wells), cuando fueron superiores a las aceptadas por la ATS¹.

pecialmente notable la tendencia a la lectura excesiva en la FVC mostrada por el HP-9825A (ver tabla III), que se acrecienta con la reducción de calibre de los resistores. Es decir, a mayor obstrucción más error por exceso de la FVC.

La explicación de esta conducta radica en el sistema de calibración interna incorporado en el HP-9825A, que corrige su respuesta de acuerdo con la señal producida durante la calibración. Así, tras calibrar el HP-9825A con el resistor n.º 1, que en el ES-W producía una FVC de 3,96 l (ver tabla II), la media de 10 espirometrías realizadas con el n.º 1 fue de $4,00 \pm 0,001$ L, y la de otras 10 efectuadas con el n.º 4 fue $4,25 \pm 0,00$ L. Cuando se cali-

bró con el n.º 4 (FVC 3,96 con el ES-W), la FVC media obtenida en 10 espirometrías hechas con el n.º 1 fue $3,84 \pm 0,013$ L y la de 10 con el n.º 4 fue $4,01 \pm 0,01$ L. El hallazgo obliga a una decisión previa sobre la señal de calibración, de acuerdo con el tipo de pacientes estudiados comúnmente en el laboratorio que use un HP-9825A. Elegir la señal es fácil con el calibrador propuesto en el presente trabajo. En el HP-47405A, al no incorporar un sistema de autocorrección, el exceso en la lectura es menor y sistemático, por lo que su corrección fue sencilla. El Vicatest-4 muestra únicamente un ligero exceso también sistemático en la lectura de la FVC, fácil de corregir según las instrucciones del

fabricante. Por último, el Vitalograph exhibe una tendencia general a la lectura por defecto en la FVC y FEV₁, mientras el FEF₂₅₋₇₅ ofrece valores ligeramente en exceso respecto al ES-W con el resistor n.º 1. En conjunto, aunque los errores superan los límites recomendados, son de fácil corrección en casi todos los aparatos, lo que resalta la importancia de la calibración dinámica como medida necesaria en el control de calidad del laboratorio pulmonar.

Resumen

La correcta calibración de espirómetros requiere generar una señal de flujo-volumen, tan similar a la espiración forzada como sea posible.

El aparato descrito, de construcción sencilla y económica, simula la curva espiratoria de manera fácil y reproducible. Consiste básicamente en un cilindro provisto de un manómetro de precisión y una válvula de apertura súbita. El cilindro se llena de aire hasta alcanzar una presión doble a la atmosférica, con lo que al abrir la válvula expele bruscamente un volumen de aire igual a la capacidad del cilindro. La salida se regula intercalando diferentes resistencias en el orificio externo de la válvula, así se reproducen cuatro espirometrías con similar FVC y diferentes flujos espiratorios.

Probado con un espirómetro Stead-Wells calibrado, produjo una FVC de $3,97 \pm 0,05$ l. La mayor SD observada en el FEV₁ de las 4 diferentes espirometrías fue 0,06 l, lo que refleja la repetibilidad de la señal generada.

Se describen las medidas del calibrador, los detalles de construcción, procedimiento y comprobaciones, así como los resultados de su uso en 4 sistemas espirométricos diferentes.

Summary

EXPLOSIVE DECOMPRESSION CALIBRATION FOR SPIROMETERS.

Correct spirometric calibration requires a flow-volume signal as close as possible to that for forced expiration. The described calibrator is easily and cheaply constructed and simulated the expiratory curve in a simple and easily repeated manner. A cylinder with a built-in manometer and solenoid valve are the basic components. The cylinder is filled with air until a pressure double that of the surrounding air is reached. When the outlet valve

is opened, an air volume equal to the capacity of the cylinder is brusquely expelled. The escape may be regulated by changing the external valve opening. Four different spirometric measures of FVC with different expiratory flow volumes may thus be obtained.

When tested with a calibrated Stead-Wells spirometer the FVC was $3.97-0.05$ l. The largest SD seen during the four different FEV₁ measurements was 0.06 l which reflects the stability of the easily repeated signal.

The sizes for the calibrator, construction, handling and testing for the calibrator are discussed as well as the results of its use in four different spirometric systems.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Servicio de Mantenimiento del Hospital de la Santa Creu i Sant Pau su colaboración en la construcción del aparato, al Sr. P. Caminal su ayuda en el diseño de los resistores utilizados y a la Srta. I. Campi por la mecanografía del manuscrito.

BIBLIOGRAFIA

1. American Thoracic Society Statement: Snowbird Workshop on Standardization of Spirometry. *Am Rev Respir Dis* 1979; 119: 831-838.
2. Interim report on standardized lung function testing. European Community for Coal and Steel. Luxembourg, August 1981.
3. Caminal P, Farré JR, Roca J, Romero PV, Sanchis J: La bioingeniería aplicada a la exploración funcional pulmonar. II Reunión Nacional de la SEPAR, Santander, junio 1981.
4. Report of the second workshop on epidemiology of respiratory diseases. Bethesda: Div. of Lung Diseases. *Nat Heart and Lung Inst*, nov 1973; 1-18.
5. Ferris BC: Recommended standardized procedures for pulmonary function testing. Epidemiology standardization project. *Am Rev Respir Dis* 1978; 118 (Suppl): 55-88.
6. Petusevsky ML, Lyons LD, Smith AA, Epler GR, Gaensler EA: Calibration of time derivatives of forced vital capacity by explosive decompression. *Am Rev Respir Dis* 1980; 121: 343-350.
7. Clausen JL, Tisi GM, Moser KM: Methods of evaluation of accuracy of spirometers and pneumotachographs. *Med Instru* 1974; 8: 117.
8. Bouhuys A, Virgulto JA: Calibration of flow-volume curves. *Lung* 1978; 155: 123-130.
9. Gardner RM, Hankinson JL, West BJ: Evaluating commercially available spirometers. *Am Rev Respir Dis* 1980; 121: 73-82.
10. Glindmeyer HW, Anderson ST, Kern RG, Hughes J: A portable adjustable forced vital capacity simulator for routine spirometer calibration. *Am Rev Respir Dis* 1980; 121: 599-603.