

CAPÍTULO III:

LA ESPIROMETRÍA

En el presente capítulo se explicará la teoría en que se basa el funcionamiento de un aparato espirométrico, la técnica y metodología que se sigue para la obtención de resultados, así como se hablará de los diferentes tipos de aparatos de espirometría que existen.

3.1 INTRODUCCIÓN

La función respiratoria en todo ser humano la podemos considerar como un evento físico de dos etapas, la inhalación (entrada de aire fresco a los pulmones) y la exhalación (salida de aire caliente de los pulmones). En términos generales, cuando un médico quiere establecer si un paciente tiene o no una enfermedad respiratoria, le interesa conocer ciertos parámetros, tales como la diferencia de presión que existe entre el medio ambiente y el pulmón, ya que, gracias a ésta diferencia de presión, el pulmón puede realizar el intercambio de gases; para con esta diferencia de presión, conocer el flujo y el volumen aéreo de intercambio durante el proceso respiratorio. Para medir estos parámetros se emplea la técnica de espirometría.

La espirometría es la prueba de función respiratoria más importante. Básicamente consiste en soplar a través de una boquilla para medir el tamaño de los pulmones con la finalidad de determinar si los bronquios están o no obstruidos.

La espirometría es un estudio no invasivo que mide los volúmenes pulmonares y la velocidad del flujo aéreo espirado en función del tiempo; lo cual permite valorar la permeabilidad de los bronquios. Cuando los bronquios están obstruidos, como sucede en enfermedades pulmonares tales como el asma o el enfisema, el aire dentro de los pulmones sale más lentamente que cuando los bronquios son normales, complicando el proceso respiratorio.

El uso básico de la espirometría es para la detección de enfermedades restrictivas y obstructivas, resultando de un incremento de la resistencia al flujo en las vías respiratorias, lo cual puede deberse a:

- Deterioro de la estructura alveolar, lo que resulta en un cierre prematuro de las vías aéreas.
- Disminución en el diámetro de las vías causado por un broncoespasmo o presencia de secreciones que incrementan la resistencia al flujo.
- Bloqueo parcial de la vía traque-faríngea que, en casos extremos, puede deberse a un tumor que disminuye el diámetro de la vía, ocasionando un flujo turbulento.

3. 2 LA PRUEBA ESPIROMÉTRICA

La maniobra de espirometría es similar a la acción de apagar las velas de un pastel. Primero se llenan por completo los pulmones de aire, después se coloca la boquilla del espirómetro en la boca, con los labios apretados alrededor de ella, y se sopla tan prolongadamente como sea posible, de forma tal que los pulmones queden, aparentemente, vacíos. (Recordando que en esta situación, en el interior de los pulmones sólo queda el volumen reserva)

Para la prueba en adultos es recomendable que el paciente se sienta, erguido, con los pies apoyados firmemente en el piso. En los niños se sugiere que la prueba se realice de pie. Si el paciente se encuentra acostado, los datos obtenidos serán alrededor de un 10% inferiores a los obtenidos si se está sentado, por lo que se recomienda seguir siempre el proceso establecido. Por otro lado, resulta conveniente utilizar una pinza nasal para evitar inspiraciones inconscientes durante la prueba.

Como criterio de aceptación de la maniobra, de acuerdo a la ATS, al menos dos de las tres mejores espiraciones no deben variar entre sí más del 5% o más de 100 ml.

La espirometría puede ser simple o forzada, según se determine durante la mecánica respiratoria. Puede ser relajada o bien, mediante maniobras a máximo esfuerzo y en el menor tiempo posible.

En la espirometría simple el paciente respira tranquilamente y, en un momento dado, debe realizar una inspiración máxima seguida de una espiración completa, volviendo a respirar después, de forma pausada. Se obtienen así los valores de volúmenes y capacidades pulmonares en reposo, independientemente del tiempo.

En la espirometría forzada el paciente, tras una inspiración máxima, debe realizar una espiración lo más potente y prolongada posible. Con esto, además de conocer el volumen de aire exhalado, se cuantifica la velocidad del flujo a medida que va aumentando el volumen.

3.3 PARÁMETROS ESPIROMÉTRICOS

La espirometría básica, proporciona datos directos e indirectos de las capacidades y volúmenes pulmonares expuestos en el capítulo anterior, tales como: la Capacidad Vital Forzada (CVF), la Capacidad Vital (CV), la Capacidad Pulmonar Total (CPT), la Capacidad Inspiratoria (CI), la Capacidad Residual Funcional (CRF), el Volumen Corriente (VC), el Volumen Residual (VR), así como Gasto Respiratorio, parámetro que significa el volumen de aire que entra y sale de los pulmones en un minuto, el cual se obtiene multiplicando el Volumen Corriente por la frecuencia respiratoria.

Los valores aproximados, en litros, de diversos volúmenes pulmonares en individuos sanos se presentan en la tabla 2.

	Hombres	Mujeres	Hombres
	Jóvenes	Jóvenes	Ancianos
Capacidad Inspiratoria	3,6	2,4	2,6
Volumen de Reserva Espiratoria	1,2	0,8	1,0
Capacidad Vital	4,8	3,2	3,6
Volumen Residual	1,2	1,0	2,4
Capacidad Residual Funcional	2,4	1,8	3,4
Capacidad Pulmonar Total	6,0	4,2	6,0
Volumen de Espacio Muerto	0,16	0,1	0,18

Tabla 2. Valores de volúmenes pulmonares en individuos sanos [17].

3.4 TIPOS DE ESPIRÓMETROS

Existen diferentes tipos de espirómetros, dependiendo del mecanismo que empleen.

- **Espirómetros de agua o de campana.** Consta de una cámara volumétrica en forma de campana inmersa en un recipiente con agua. Los desplazamientos experimentados por la campana, como consecuencia de las variaciones volumétricas, se llevan a un inscriptor gráfico. Son los primeros que se utilizaron y debido a su tamaño y difícil transporte solo eran utilizados en laboratorios de función pulmonar.

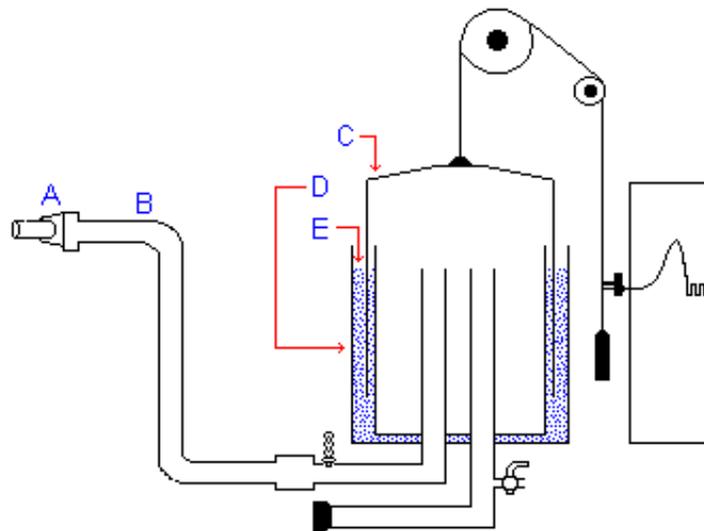


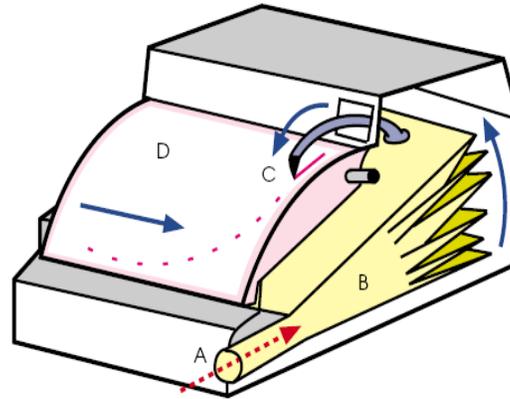
Figura 12. Espirómetro de campana. A: Boquilla. B: Tubo del espirómetro. C: Campana. D: Cilindro de doble pared. E: Agua para sellar la campana.

- **Espirómetros secos o de fuelle.** La cámara volumétrica que lo constituye tiene forma de fuelle o acordeón. Las variaciones de volumen se transmiten a una guía conectada a un registro de papel que, al moverse gracias a un

mecanismo de relojería a velocidad constante, permite relacionar el volumen con el tiempo.



(a)



(b)

Figura 13. (a) Espirómetro de fuelle de la marca Vitalograph. (b) Esquema de funcionamiento de un espirómetro de fuelle. A: entrada de aire. B: fuelle. C: punta de escritura. D: carro móvil con el papel de registro.

- **Espirómetros de flujo.** Estos espirómetros incorporan en la boquilla un transductor de flujo conocido como neumotacógrafo, el cual transforma la señal de flujo en otra señal física, para posteriormente ser analizada por un microprocesador que genera digitalmente los datos de volumen y flujo espirados.

Los espirómetros de flujo son aquellos que obtienen directamente el flujo ventilatorio, mientras que el volumen de aire exhalado se obtiene por integración del flujo [11].

Por su practicidad y costo, los espirómetros de flujo son los más utilizados en la actualidad.



(a)



(b)

Figura 14. Espirómetros de flujo. (a) Espirómetro marca Vitalograph, (b) Espirómetro marca Microlife

3. 4. 1 EL ESPIRÓMETRO DE FLUJO

Si bien el esquema general de los espirómetros de flujo es el mismo, existen diferentes clasificaciones de estos espirómetros en dependencia del elemento transductor que empleen; en otras palabras, debido a que existen diferentes tipos de neumotacógrafos, la división en el ramo de los espirómetros de flujo es diversa.

El neumotacógrafo es un transductor de flujo gaseoso, que, gracias a una resistencia que se coloca en su interior, transforma dicho flujo en otra señal física, ya sea luminosa, de calor o de presión.

La medición del flujo puede realizarse valiéndose de diversos principios físicos, lo que origina una extensa familia de neumotacógrafos que emplean diversas aproximaciones para lograr el mismo fin.

3. 4. 1. 1 Tipos de Neumotacógrafos

La división de los distintos tipos de neumotacógrafos se origina en función del tipo de resistencia que se coloque en su interior [10]. En el mercado existen principalmente cuatro tipos diferentes de neumotacógrafos:

- ❖ Neumotacógrafo de turbina.
- ❖ Neumotacógrafo de hilo caliente (termistor).
- ❖ Neumotacógrafos ultrasónicos.
- ❖ Neumotacógrafos de resistencia neumática:
 - Neumotacógrafo de Fleisch.
 - Neumotacógrafo de Lilly.

Los **neumotacógrafos de turbina** tienen un cabezal con un eje sobre el que gira una pequeña hélice; en los extremos del cabezal hay unas aspas fijas que ordenan el flujo de aire al penetrar en el cabezal. El flujo de aire hace girar la hélice, y las aspas de ésta interrumpen una fuente de luz en cada paso que realizan. La velocidad de giro de la hélice es proporcional al flujo, y por tanto, a más flujo, más veces se interrumpirá la señal luminosa. Esta información se envía a un microprocesador, el cual, en función de las revoluciones de la hélice calcula el flujo de aire, y posteriormente, por integración, calcula el volumen.

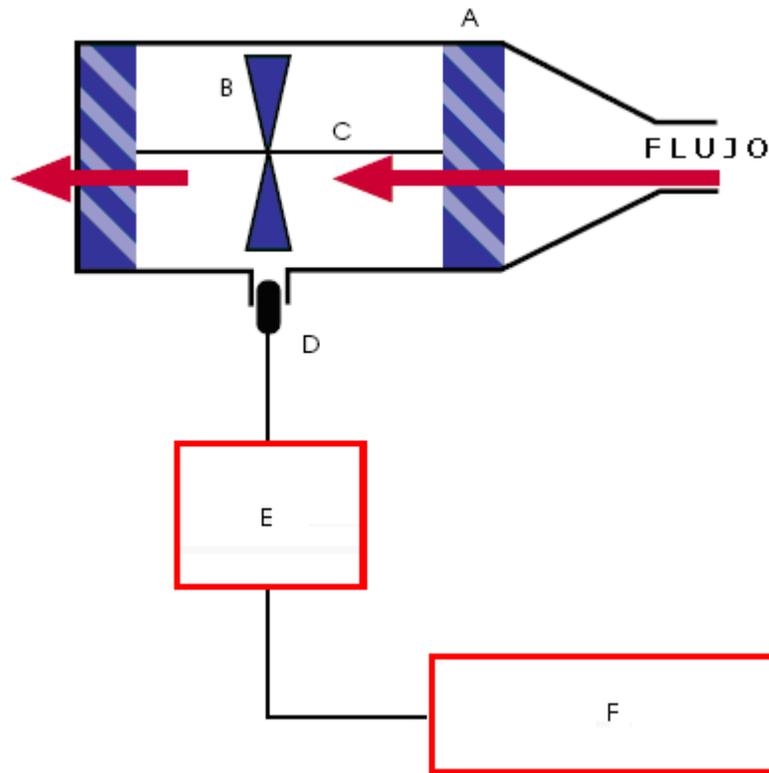


Figura 15. Esquema de un espirómetro de flujo con neumotacógrafo de turbina. A: aspas fijas para dirigir el flujo de aire. B: hélice (turbina). C: eje de la hélice. D: sensor óptico para el movimiento de la hélice. E: microprocesador. F: despliegue de datos.

Los **neumotacógrafos de hilo caliente (o termistor)**, tienen en su cabezal un hilo metálico (generalmente de platino) calentado a temperatura constante por medio de corriente eléctrica. Al pasar el flujo de aire se enfría el hilo; para mantener la temperatura del hilo constante, el circuito debe suministrar más corriente eléctrica. Por tanto, la corriente consumida es directamente proporcional al flujo de aire, pues a más flujo, mayor será el enfriamiento del hilo metálico.

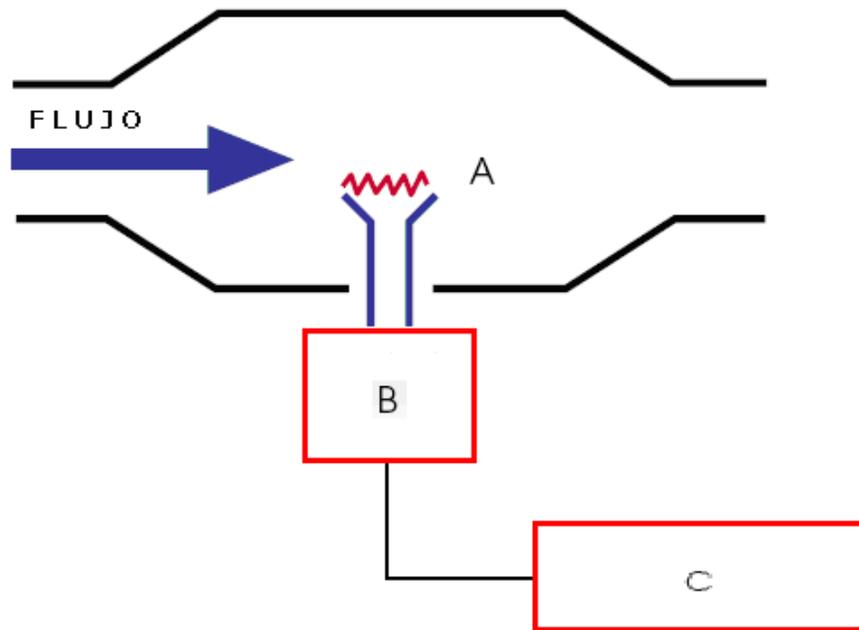


Figura 16. Esquema de un espirómetro de flujo con neumotacógrafo de hilo caliente (termistor). A: hilo de platino, calentado por medio de corriente eléctrica. B: microprocesador, C: despliegue de datos.

En los **neumotacógrafos ultrasónicos**, para calcular el flujo aéreo, se emplea la propiedad de los ultrasonidos que dice que, cuando se forma un determinado ángulo con la dirección del flujo, los ultrasonidos que van en el mismo sentido que el flujo tardan menos en llegar al receptor que aquellos que van en sentido contrario al del flujo. Esta diferencia de tiempo es tanto mayor cuanto mayor sea el flujo.

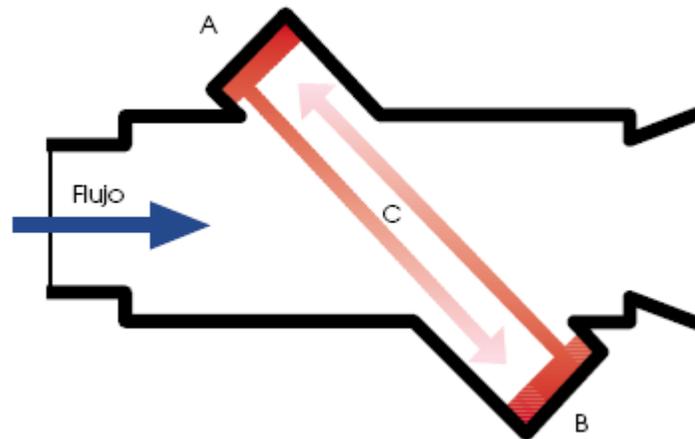


Figura 17. Esquema de un neumotacógrafo ultrasónico. A y B: emisores-receptores de ultrasonidos. C: haces de ultrasonidos.

Los **neumotacógrafos de resistencia neumática**, tienen en su interior, como su nombre lo indica, un elemento resistivo al paso del flujo aéreo, provocando a su salida una caída de presión, que es proporcional a la cantidad de flujo de gas que pasa por el neumotacógrafo. Son los más utilizados en el mundo por su practicidad y costo.

Se tienen dos tipos de neumotacógrafos de resistencia neumática, el de *Fleisch* y el de *Lilly*. En los *neumotacógrafos de Fleisch* el sistema de resistencia es implementado con tubos capilares de 1 ó 2 mm de diámetro y de 3 ó 5 cm de longitud, colocados en paralelo formando una estructura cilíndrica de varios centímetros de diámetro, con el fin de convertir el flujo de entrada de turbulento a laminar.

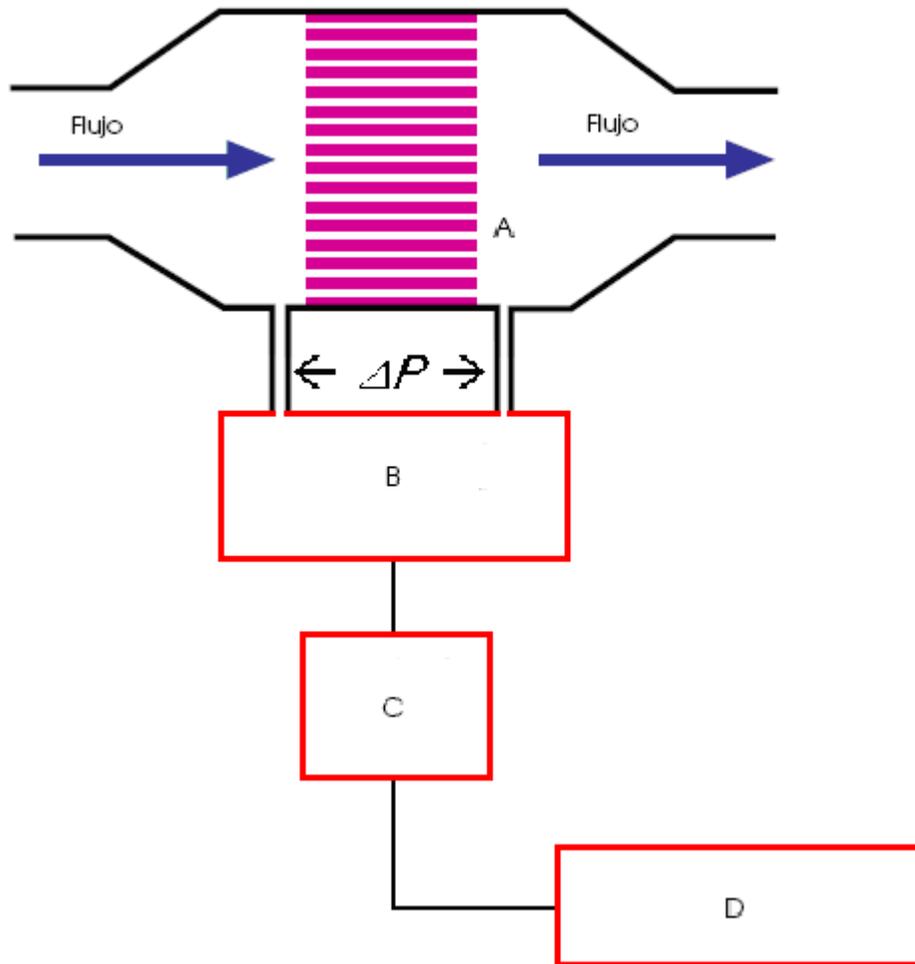


Figura 18. Esquema de un espirómetro de flujo con neumotacógrafo de Fleisch. A: tubos capilares, B: sensor de presión diferencial, C: microprocesador, D: despliegue de datos.

En los *neumotacógrafos de Lilly* se sustituyen los tubos capilares por membranas o mallas metálicas, pero el principio de funcionamiento es el mismo. (Véase Figura 19).

Una consideración importante que se debe tomar en cuenta al momento de seleccionar el transductor de flujo y el sensor de presión diferencial es la colocación de los mismos, ya que, una conexión corta entre el neumotacógrafo y el sensor provoca una mejoría de la respuesta en frecuencia, pero causaría inconvenientes de vibración y humedad; una conexión más larga proporciona

mayor libertad de movimiento al paciente, pero disminuye la respuesta en frecuencia.

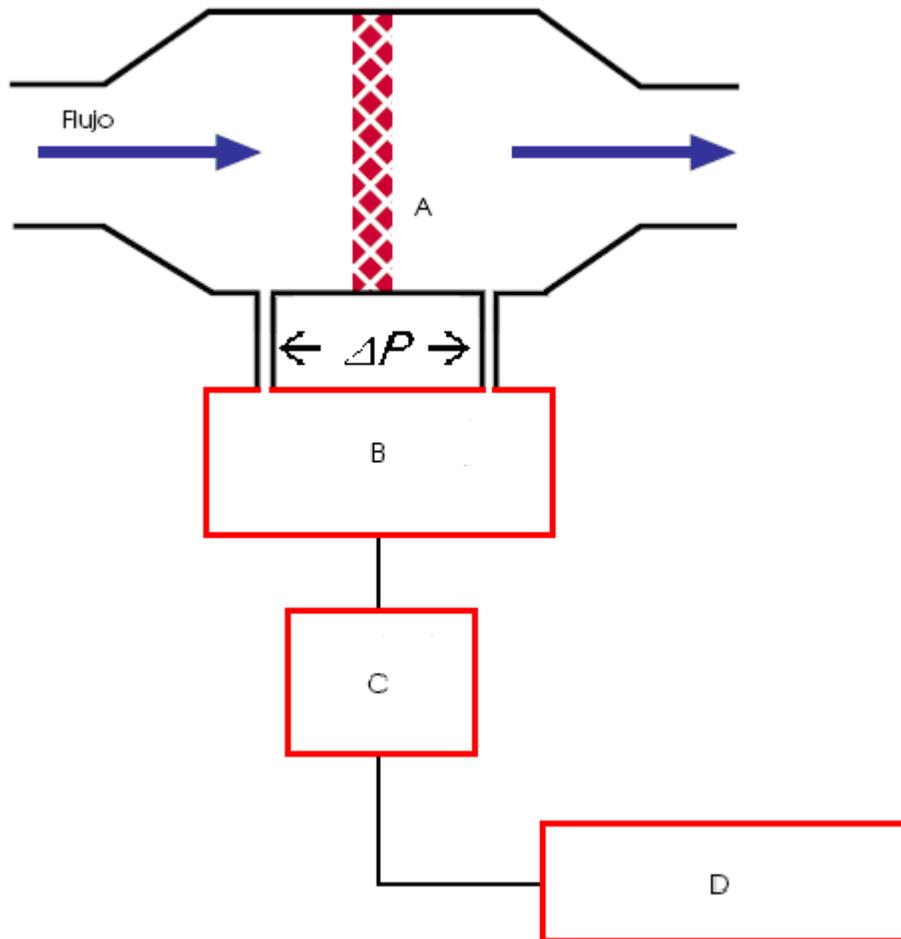


Figura 19. Esquema de un espirómetro de flujo con neumotacógrafo de Lilly. A: membrana, B: sensor de presión diferencial, C: microprocesador, D: despliegue de datos

Ahora bien, aunque el principio de funcionamiento es el mismo para ambos neumotacógrafos, la resistencia que proporciona la pantalla metálica del neumotacógrafo de Lilly presenta una mejoría en la respuesta en frecuencia comparándolo con la resistencia producida de los tubos capilares del neumotacógrafo de Fleisch.

El desarrollo del diseño del espirómetro de flujo que se presenta en esta tesis, tiene como elemento transductor un neumotacógrafo de Lilly.

3. 5 REQUERIMIENTOS DEL USUARIO DE UN ESPIRÓMETRO

Debido a la gran variedad de espirómetros que existen en el mercado, de acuerdo a un estudio realizado para la Sociedad Torácica de Australia [3], el personal médico que realiza la prueba tiende a elegir un espirómetro que, además de cumplir con normas internacionales, posean las siguientes características:

- Sean sencillos de usar.
- Ser seguros y efectivos al cumplir con estándares médicos y electrónicos.
- Poseer una rutina de calibración relativamente simple y estable que permita ajustes del personal médico.
- Ser robusto y que no requiera altos costos de mantenimiento.
- Utilizar un sensor que pueda ser limpiado e incluso desechado.
- Contar con un proveedor confiable que pueda proporcionar entrenamiento, servicio y reparación.

3. 6 CALIBRACIÓN

Para poder determinar la calidad y fiabilidad de los datos obtenidos durante una prueba ventilatoria, no sólo se depende de la técnica empleada, sino también del aparato utilizado, el cual debe cumplir con los criterios de exactitud y precisión que marca la Norma Hospitalaria.

Validar un espirómetro significa conocer el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos, en cuanto a repetitividad, exactitud y precisión.

Resulta imprescindible validar y calibrar un espirómetro antes de empezar a trabajar con él, ya que los resultados obtenidos van a ser comparados con otros datos sucesivamente a través del tiempo.

La Norma Hospitalaria propone, para los Espirómetros de Flujo, una calibración diaria antes de utilizar el equipo. El método de calibración empleado se conoce como calibración estática o de volumen, la cual se lleva a cabo con una jeringa de 3 [L] de capacidad. Se conecta la jeringa al neumotacógrafo del espirómetro y se bombea el aire de la jeringa, procurando emplear la misma técnica tras cada medición, sin velocidad excesiva y sin interrupciones. Se toma lectura de la cantidad de volumen que indique el espirómetro, y si el valor leído es erróneo, se procede al ajuste de los componentes electrónicos hasta obtener valores que cumplan la normativa internacional de la American Thoracic Society [8], la cual establece los siguientes criterios para un espirómetro de flujo:

1. Precisión de ± 50 mililitros ó $\pm 3\%$
2. Debe poder medir volumen con un rango mínimo de 0-7 litros en condiciones BTPS (temperatura, presión y saturación de agua corporal).
3. Debe ser calibrado volumétricamente a diario.
4. Deberá ser capaz de acumular aire por lo menos durante 10 segundos.
5. Deberá tener resistencia al flujo de aire inferior a 1.5 cm de H₂O/litro/segundo a un flujo de 12 litros/segundo.