

Capítulo III. Espirometría

En el presente capítulo se explicará la teoría en que se basa el funcionamiento de un aparato espirométrico, así como los tipos de aparatos espirométricos que existen. De la misma forma se hablará de la obtención e interpretación de resultados a través de las gráficas proporcionadas por los espirómetros.

La espirometría, que es el proceder de exploración funcional más empleado, mide los volúmenes pulmonares y la velocidad del flujo aéreo espirado a partir de la capacidad vital en función del tiempo. En general, estos estudios espirométricos nos ofrecen información sobre: [9]

- Intensidad de la ventilación.
- Estado de la mecánica ventilatoria.
- Flujos máximos en una unidad de tiempo.
- Estimado del consumo de oxígeno por minuto.
- Variaciones funcionales bajo la influencia de fármacos, y de carga de esfuerzos físicos [9].

Las pruebas espirométricas son una de las pruebas más empleadas en el mundo por los especialistas. A ello contribuye el hecho de ser una técnica no invasiva, relativamente sencilla de realizar e interpretar, con gran capacidad para el diagnóstico de procesos pulmonares de todo tipo (Asma y COPD fundamentalmente) y de bajo costo. Se basa en el análisis de la magnitud de los volúmenes pulmonares y la velocidad con que son movilizados (flujos) [9].

Los principales determinantes de la función pulmonar son el género, la talla, la edad, el origen étnico y los factores técnicos. En conjunto, las variables mencionadas explican cerca de 70% de la variabilidad total, en tanto que no explica el 30% restante de la variabilidad de la función pulmonar entre sujetos. Actualmente existe suficiente evidencia en la literatura respecto al efecto racial o étnico de la función pulmonar en diferentes grupos de población como los sujetos de raza negra, habitantes de las islas del Pacífico, nativos de Norteamérica y Nueva Zelanda, orientales y latinos en Estados Unidos de América (EUA) [3].

De forma general, los espirómetros digitales están formados por un neumotacógrafo, encargado de convertir la señal física del flujo volumétrico ventilatorio en una señal eléctrica proporcional, un circuito de acondicionamiento analógico y una tarjeta de adquisición de datos, un programa de procesamiento de la información, una interfaz de usuario de la prueba espirométrica y una base de datos para la administración de la información.

3.1 Tipos de pruebas espirométricas

Existen dos tipos de pruebas espirométricas útiles en función del estado del paciente y de la información demandada de la prueba.

3.1.1 Espirometría “simple” o estática

La persona 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 obtiene así una gráfica que muestra los volúmenes y capacidades pulmonares en reposo. Este tipo de pruebas no son muy utilizadas en la práctica médica [10].

3.1.2. Espirometría forzada

Tras una inspiración máxima, el paciente debe realizar una espiración lo más potente y prolongada que pueda (“forzada”). Se obtienen así dos tipos fundamentales de gráficas: de volumen/tiempo, que muestra el aumento del volumen espirado a lo largo del tiempo; y de flujo/volumen, que nos indica el comportamiento en el flujo a medida que va aumentando el volumen. La primera es útil para establecer el tiempo de espiración correcto (al menos 6 segundos); la segunda ayuda a determinar posibles errores durante la realización de la maniobra que podrían haber pasado inadvertidos en la gráfica de volumen-tiempo [10].

3.2 Indicaciones generales de los estudios espirométricos

Las personas que deben tomar un estudio espirométrico cuentan con las siguientes características:

I. En el estudio de individuos sanos que por las características de su actividad profesional o no, se requiere conocer el estado de los diferentes parámetros biológicos: medicina deportiva, medicina aeronáutica, medicina subacuática, medicina militar (estudios de aptitud y selección).

II. En el estudio de personas sanas o supuestamente sanas con riesgo de enfermar por determinadas condiciones relacionadas con su profesión u oficio, condiciones ecológicas del lugar de residencia, principalmente, medicina del trabajo, epidemiología e higiene.

III. En el estudio de personas con algún grado de dificultad respiratoria, que se indican por toda una serie de especialidades médicas donde se destacan: neumología, medicina interna, alergología, pediatría, cirugía, anestesiología.

IV. En la investigación científica estas pruebas pueden utilizarse en la medición de la respuesta broncodilatadora de fármacos específicos, en pruebas de broncoprovocación y en el ensayo de medicamentos protectores de la broncoconstricción [5].

En general, con estos estudios se puede conocer el comportamiento ventilatorio como consecuencias de alteraciones músculo-esqueléticas, parenquimatosas, bronquiales, con el empleo de maniobras no invasivas, de fácil y rápida ejecución; aplicables a adultos y niños sin causar dolor y que pueden repetirse a voluntad [2].

3.3 Indicaciones específicas de los estudios espirométricos

Una indicación que pudiera llamarse especial, es la evaluación pulmonar prequirúrgica que tiene por objetivos:

- a) Identificar a la persona que presenta un riesgo pulmonar preoperatorio.
- b) Permite establecer regímenes terapéuticos preoperatorio y postoperatorio [5].

Resulta importante para establecer los pronósticos, y que todos los componentes reversibles sean tratados adecuadamente. Esto permite transformar a un candidato marginal en uno con riesgo aceptable. Si el volumen espiratorio forzado (V_{EF}) es menor del 50 %, o hay signos de compromiso del flujo aéreo, entonces deben indicarse investigaciones adicionales. Si después de una preparación intensa el volumen espiratorio forzado al primer segundo (V_{EF-1}) es menor que 1 L, el riesgo puede calificarse de elevado [9].

Los estudios espirométricos bajo la influencia de una carga de esfuerzo físico son útiles para:

- a) Evaluar la capacidad de trabajo de un individuo y los factores que limitan la tolerancia al ejercicio.
- b) Puede apoyar el diagnóstico de asma inducida por el ejercicio.
- c) Es inapreciable para determinar la necesidad de oxigenación suplementaria ambulatoria.
- d) Útil en el diagnóstico de disfunción en pacientes con enfermedad pulmonar y cardiovascular asociadas [5].

3.4 Bases físicas que rigen el funcionamiento de un espirómetro

Las bases físicas que rigen el funcionamiento de un espirómetro se basan en la mecánica pulmonar dada por la ventilación externa y la ventilación interna, la cual se explicará a continuación.

3.4.1 Ventilación Externa

El proceso ventilatorio externo consiste fundamentalmente en la renovación del gas contenido en los alvéolos pulmonares. La renovación del gas alveolar se consigue gracias a la acción de la musculatura respiratoria, que actúa como generador de presión. La respiración normal se lleva a cabo, casi por completo, gracias al movimiento del diafragma, que durante la inspiración se retrae, aumentando el volumen interno de la caja torácica, y en consecuencia, de los pulmones. Durante la espiración el diafragma simplemente se relaja permitiendo el retroceso elástico de los pulmones, la pared torácica y las estructuras abdominales comprimiendo los pulmones y expulsando el aire [14].

El volumen de ventilación pulmonar (P_{VV}) corresponde a la cantidad de aire intercambiado en una respiración [14].

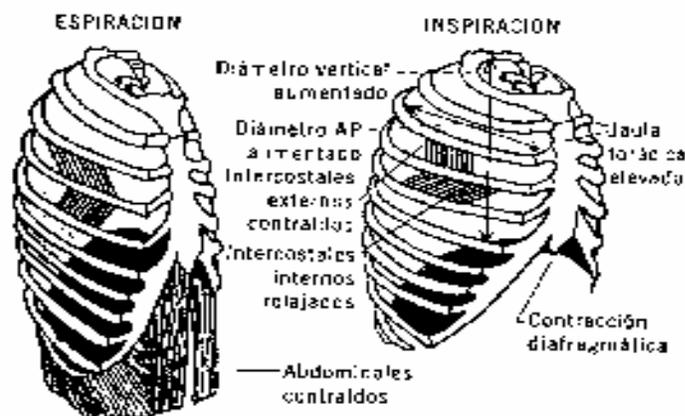


Fig. 3.1 Proceso Ventilatorio [14].

En el caso de la inspiración forzada, ésta se realiza gracias a la elevación de la caja costal, por medio de los músculos elevadores. Esto produce una separación del esternón y la columna, que aumenta el diámetro anteroposterior del tórax un 20%. En cuanto a la espiración intensa, las fuerzas elásticas del abdomen no son lo suficientemente fuertes como para causar la contracción rápida necesaria. Por lo tanto, se contraen los músculos abdominales, que forzan el contenido del abdomen hacia el fondo del diafragma. Si la espiración se realiza con el máximo esfuerzo y lo más rápido posible, la maniobra se denomina espiración forzada [14].

Para entender el funcionamiento de la respiración, es posible hacer una analogía con el sistema eléctrico; basándose en dos parámetros encontrados en ambos. En el sistema eléctrico, se define la resistencia como la oposición que ofrecen ciertos materiales al paso de la corriente eléctrica, de forma similar, en el sistema respiratorio se define la resistencia neumática como la oposición al flujo de gas que ofrecen las vías por las cuales este fluido debe circular [14].

En el sistema respiratorio se conceptualiza una propiedad del tejido o envoltura pulmonar denominada complacencia, como medida de la facilidad con la cual éste tejido puede ser expandido. Como se aprecia, ésta propiedad se relaciona directamente con la capacidad pulmonar. Su análogo en el sistema eléctrico es la capacitancia (condensador).

De esta forma, se establecen un modelo para el estudio del sistema respiratorio basado en su equivalente eléctrico [14].

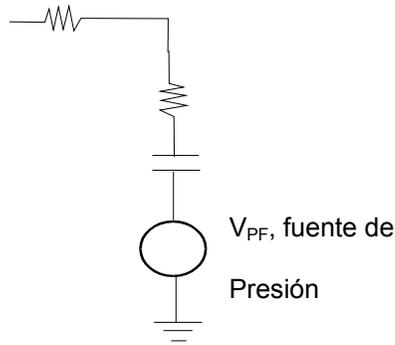


Fig. 3.2 Analogía del sistema respiratorio con un circuito eléctrico [14].

La fuente de presión (V_{PF}) refleja las propiedades combinadas de los pulmones y las paredes torácicas.

La mayoría del gas que descansa en los pulmones se encuentra alojado en los alvéolos y es continuamente intercambiado con la sangre, como volumen alveolar V_A . La cantidad remanente de gas es llamada volumen de espacio muerto V_D en las vías respiratorias y no participan en el intercambio de gas. La capacidad residual funcional es la suma del volumen alveolar y el volumen de espacio muerto, como el fin de una exhalación pasiva: [16]

$$V_{FRC} = V_A + V_D \quad (3.1)$$

Cuando inspiramos un volumen periódico de aire fresco (V_T), parte de este (V_D) permanece inerte en el espacio muerto y el remanente como $V_T - V_D$. Durante la expiración, el volumen V_T de mezcla de gas deja los alvéolos. El volumen V_D de este gas permanece en

las vías respiratorias, y se expelen una cantidad neta $V_T - V_D$. Por lo tanto con cada respiración, hay un reemplazo ventilatorio de $V_T - V_D$ de gas alveolar por el mismo volumen de aire fresco [16].

La velocidad de difusión de los gases (bajo las mismas condiciones) es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular. Esta ley se conoce como la Ley de Graham y puede considerarse como una aplicación de la teoría cinética de los gases. A una determinada temperatura, las partículas más pequeñas se mueven más rápido y colisionan con mayor frecuencia, por ello difunden más rápido. En tal sentido, cuando la mezcla gaseosa se mueve a través de las vías aéreas, las solubilidades de dos gases cualesquiera de la mezcla será: $s_1 = s_2 = 1$. Tomando en cuenta que la temperatura es la misma para ambos gases, obtenemos para las velocidades de difusión: [16]

$$V_{d1} / V_{d2} = \sqrt{M_2 / M_1} \quad (3.2)$$

En el caso particular, donde el gas 1 es el CO_2 y el gas 2 es el O_2 , se obtiene: [12]

$$V_{d CO_2} / V_{d O_2} = \sqrt{32 / 44} = 0.85 \quad (3.3)$$

De acuerdo a la ecuación 3.3, podemos notar que en las vías aéreas, el oxígeno difunde más rápidamente que el dióxido de carbono [16].



3.4.2 Ventilación Interna

Los alvéolos pulmonares se encuentran rodeados por pequeños capilares llenos de sangre. Cada vez que la persona inhala, el aire que contiene mucho oxígeno llena los alvéolos. La sangre presente en los alvéolos es deficiente en oxígeno. Por tanto el oxígeno se mueve desde los alvéolos hacia la sangre contenida en los capilares perialveolares. La difusión del oxígeno hacia la sangre a través de los capilares pulmonares es generada por el gradiente entre la presión parcial de oxígeno en la sangre venosa (de la arteria pulmonar) y la del gas alveolar (presente en los pulmones) [14].

Si se aplica la Ley de Graham al proceso de difusión de aire a través de la barrera alvéolo-capilar, suponiendo temperatura constante obtenemos: [16]

$$\begin{aligned} VdCO_2 / VdO_2 &= (s CO_2 / s O_2) (M O_2 / M CO_2) && (3.4) \\ &= (0.592 / 0.0244) (32 / 44) \\ &= 24 \times 0.85 = 20.6 \end{aligned}$$

Finalmente por la ecuación 3.4, podemos notar que el CO₂ se difunde más rápidamente que el O₂ entre el alvéolo y la sangre capilar.

La ley de Henry establece que a una temperatura dada y a presiones parciales bajas, la cantidad de gas que se disuelve en un líquido depende directamente de la presión parcial del mismo según la siguiente ecuación:

$$C = S * P \quad (3.5)$$

Donde la S corresponde a la solubilidad del gas, y depende inversamente de la temperatura. Esta ley deja de ser válida cuando existe reacción química entre la fase gaseosa y la fase líquida. En este caso, puede ocurrir, que la concentración del gas sea independiente de la presión parcial [16].

Ley de Poiseuille

La ley de Poiseuille permite determinar el flujo laminar estacionario Φ_V de un líquido incompresible y uniformemente viscoso a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante. La fórmula que caracteriza esta ley se define como [7]:

$$\Phi_V = \frac{dV}{dt} = v_{media} \pi r^2 = \frac{\pi r^4}{8\eta} \left(-\frac{dP}{dz} \right) = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{L}, \quad (3.6)$$

Donde V es el volumen del líquido que circula en la unidad de tiempo t , v_{media} la velocidad media del fluido a lo largo del eje z del sistema de coordenadas cilíndrico, R es el radio interno del tubo, Δp es la caída de presión entre los dos extremos, η es la viscosidad dinámica y L la longitud característica a lo largo del eje z . La ley se puede derivar de la ecuación de Darcy-Weisbach, desarrollada en el campo de la hidráulica y que por lo demás es válida para todos los tipos de flujo [7].

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad Re = \frac{2\rho v_s R}{\eta}, \quad (3.7)$$

Relación con los circuitos eléctricos

Para poder entender la electricidad de forma más fácil se puede hacer la analogía con fluidos. Esta analogía hidráulica es todavía útil en el ámbito académico con fines didáctico. La ley de Poiseuille tiene su relación con la ley de Ohm para los circuitos eléctricos, donde la caída de presión Δp^* es reemplazada por el voltaje V y el caudal ΦV por la corriente eléctrica I . De acuerdo con esto el término $8\eta l/\pi r^4$, de la ecuación 3.6 es un sustituto adecuado para la resistencia eléctrica R [7].

Relación con el pulmón

La ley de Poiseuille tiene aplicación en la ventilación pulmonar al describir el efecto que tiene el radio de las vías respiratorias sobre la resistencia del flujo de aire en dirección a los alveolos. De ese modo, si el radio de los bronquiolos se redujera por la mitad, la ley de Poiseuille predice que el caudal de aire que pasa por ese bronquiolo reducido tendría que oponerse a una resistencia 16 veces mayor, siendo que la resistencia al flujo es inversamente proporcional al radio elevado a la cuarta potencia.

Este principio cobra importancia en el asma y otras enfermedades obstructivas del pulmón. Al reducirse el radio de las vías aéreas respiratorias, el esfuerzo de la persona se eleva a la cuarta potencia [7].

3.5 Tipos de Espirómetros

Los espirómetros actuales son aparatos computarizados que miden volúmenes o flujos de aire. Estos aparatos son básicamente de dos tipos, los de turbina y los neumotacómetros, pudiendo ser válidos cualquiera de ellos, siempre que cumplan un mínimo de requisitos entre los que se encuentran:

- Que permita ver en tiempo real las curvas (Flujo-Volumen y Volumen –Tiempo), como mínimo la de Flujo-Volumen.
- La incorporación de la medida automática de temperatura e idealmente de la presión barométrica para la conversión automática a valores BTPS.
- La posibilidad de imprimir los resultados obtenidos [2].

Existen multitud de aparatos diferentes para obtener un espirograma, pero básicamente los podemos agrupar en cuatro grupos, según el método que utilicen para determinar las medidas:

1. Espirómetros de agua o de campana Fueron los primeros aparatos que se utilizaron, y aún se emplean en laboratorios de función pulmonar. Se trata básicamente de un circuito de aire que empuja una campana móvil, que transmite su movimiento a una guía que registra el movimiento en un papel continuo. La campana va sellada en un depósito de agua (de ahí el nombre del instrumento). Sirve para registrar los volúmenes pulmonares (excepto el volumen residual), y al aumentar la velocidad del papel al doble se puede registrar también la capacidad vital forzada. Es muy útil para realizar estudios completos, pero su tamaño y complejidad limitan su uso exclusivamente a los laboratorios de función pulmonar, por lo que no se recomienda en atención primaria [16].

b) Neumotacómetros. Se trata de aparatos que incorporan en la boquilla una resistencia que hace que la presión antes y después de la misma sea diferente. Esta diferencia de presiones es analizada por un microprocesador, que a partir de ella genera una curva de flujo – volumen y/o de volumen – tiempo. Al estar informatizado, tanto los valores obtenidos como los teóricos nos los da el propio aparato, siempre que hayamos introducido los datos antropométricos del paciente por medio del teclado. Obtienen directamente el flujo y por integración calculan los volúmenes [16].

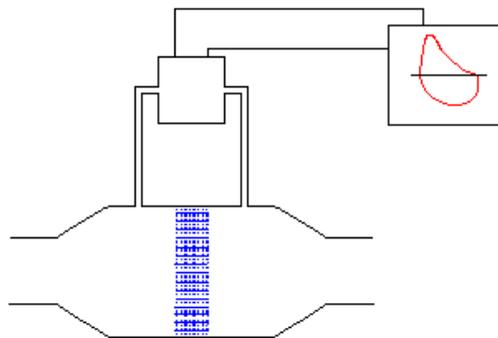


Fig. 3.5 Espirómetro con neumotacómetro [16].

c) Espirómetros de turbina. Incorporan en la boquilla del aparato una pequeña hélice, cuyo movimiento es detectado por un sensor de infrarrojos. Esta información es analizada por un microprocesador, que da como resultado tanto una gráfica de flujo – volumen como de volumen – tiempo. Al igual que en el caso anterior, el propio aparato nos da los resultados y los valores teóricos de cada paciente. El sensor de infrarrojos detecta el movimiento de la turbina y lo transmite al microprocesador, que calcula los flujos y los volúmenes [16].

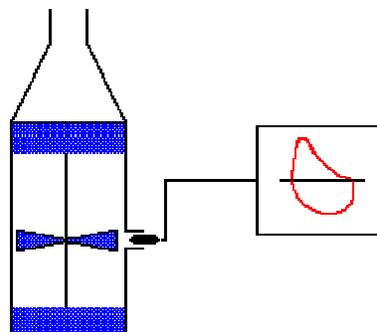


Fig. 3.6 Espirómetro con turbina [16].

En atención primaria deben utilizarse los espirómetros secos, y preferentemente los computarizados (neumotacómetros y espirómetros de turbina), por su tamaño reducido y su facilidad de uso. En el modelo del neumotacómetro es que se basará esta tesis [16].

3.6 Gráficas espirométricas

La mecánica pulmonar se puede interpretar a través de las gráficas espirométricas. Las gráficas espirométricas nos proporcionan la siguiente información:

- Mediciones gráficas de curvas volumen-tiempo
- Mediciones gráficas de flujo-volumen (espirogramas)
- F_{VC} (capacidad vital forzada) y F_{EVI} (Volumen espiratorio forzado en el primer segundo)
- Información del paciente [10].

Existen cuatro volúmenes pulmonares estándar y cuatro capacidades pulmonares estándar que constan de dos o más volúmenes en combinación:

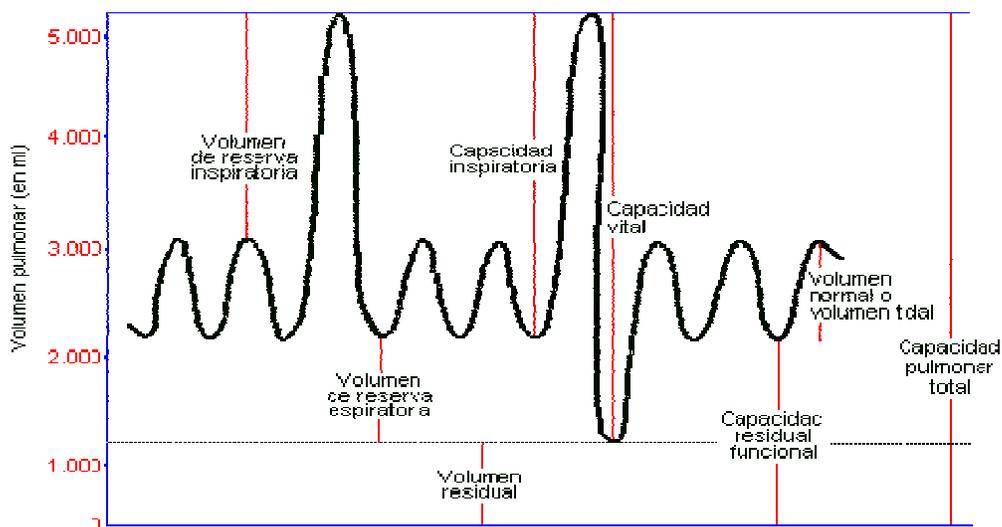


Fig. 3.7 Gráfica Espirométrica [16].

V_C (Volumen Corriente o Volumen Tidal.)

Volumen de aire usado para vivir normalmente. Es de aproximadamente 500 ml. Equivale al 3% del peso corporal ideal [2].

V_{IR} (Volumen Inspiratorio de Reserva)

El volumen de reserva inspiratoria es el máximo volumen de aire que puede ser inspirado a partir del volumen corriente, es decir, el volumen que puede inhalarse al final de una inspiración normal [2].

V_{ER} (Volumen Espiratorio de Reserva)

Es el máximo volumen de aire que puede ser espirado durante una espiración forzada máxima, es decir, es el volumen evaluado a partir de finalizar la espiración tranquila [2].

V_R (Volumen Residual)

El volumen residual es el volumen de aire que permanece en el pulmón después de una espiración máxima. El aumento de este valor indica atrapamiento aéreo y su ausencia provocaría que los pulmones se colapsaran [2].

C_{PT} (Capacidad Pulmonar Total)

Es la máxima cantidad de aire que albergan los pulmones después de una inspiración forzada, que es de aproximadamente 6 litros. Es la suma del volumen corriente (V_C), el

volumen inspiratorio de reserva (V_{IR}), el volumen espiratorio de reserva (V_{ER}) y el volumen residual (V_R) [2].

C_V (Capacidad Vital)

Se denomina capacidad vital al volumen de aire capaz de ser movilizado por los pulmones. Es la suma del volumen corriente (V_C), el volumen de reserva inspiratoria (V_{IR}) y el volumen espiratorio de reserva (V_{ER}) [2].

C_I (Capacidad Inspiratoria)

La capacidad inspiratoria es la suma del Volumen Corriente o Tidal y el Volumen de Reserva Inspiratoria. En términos de la espiración corresponde al máximo volumen que puede inhalarse después de una espiración normal [2].

C_{RF} (Capacidad Residual Funcional)

La capacidad residual funcional es la cantidad de aire que permanece en los pulmones después de una espiración normal. Corresponde a la sumatoria del volumen espiratorio de reserva y el volumen residual [2].

Los valores aproximados en litros de diversos volúmenes pulmonares en individuos sanos se presentan en la tabla 3.1 [5].

Tabla 3.1. Volúmenes pulmonares en individuos sanos [5].

	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

La gráfica característica volumen-tiempo durante una espiración forzada se presenta en la figura 3.8 mientras que la gráfica característica flujo-volumen durante la espirometría forzada se aprecia en la figura 3.9.

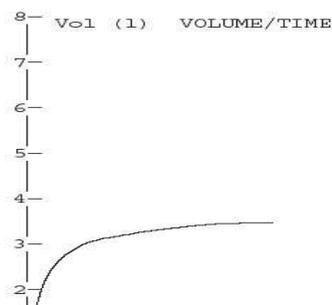


Fig. 3.8 Gráfica Volumen-Tiempo durante espiración forzada [5].

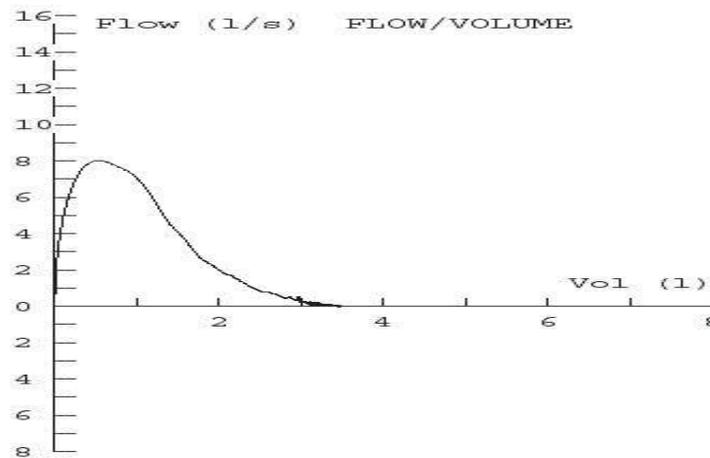


Fig. 3.9 Gráfica Flujo-Volumen durante espiración forzada [5].

3.7 Requerimientos para la medición de la función pulmonar

La cooperación del paciente es fundamental para la realización de las diferentes pruebas. Deben determinarse edad, sexo, talla, peso corporal, para poder calcular los valores predictivos [5].

Por ser estudios en los que se manejan gases, es importante precisar la temperatura ambiental y la presión atmosférica, para hacer los ajustes de acuerdo con las condiciones de éstas (BTPS) [5].

La forma correcta de realizar la maniobra espirométrica es la siguiente

- El paciente realizará una inspiración máxima, de forma relajada.
- Con la boca libre de comida u otros obstáculos, se colocará la boquilla entre los labios, cerrando estos perfectamente sobre aquella.
- El técnico dará entonces una orden enérgica y tajante para que el paciente comience la espiración forzada, con lo que se evitarán los comienzos dubitativos.
- Durante la espiración forzada, el técnico animará con insistencia y energía al paciente para que siga soplando todo lo que pueda, para obtener el máximo esfuerzo del paciente y evitar la interrupción temprana de la maniobra.
- La maniobra de espiración forzada se prolongará, como mínimo, 6 segundos.
- La maniobra de espiración forzada se repetirá como mínimo tres veces, siempre que las curvas obtenidas sean satisfactorias. De no ser así, se repetirá la maniobra hasta obtener 3 curvas satisfactorias, siempre con un máximo de nueve [5].

La mejor curva de las obtenidas será aquella en la que la suma del F_{EVI} y del F_{VC} sea mayor, aunque alguno de estos parámetros sea mayor por separado en alguna otra curva.

El orden de lectura de la prueba espirométrica se da de la siguiente forma:

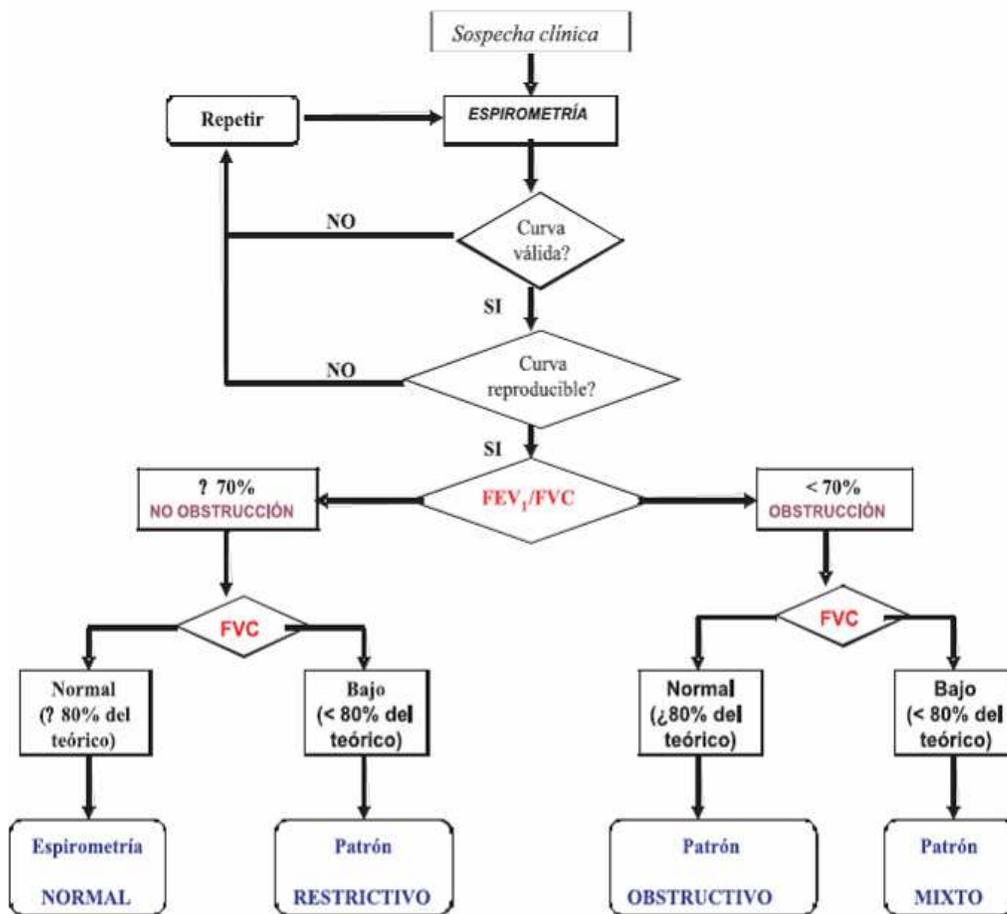


Fig. 3.10 Orden de lectura de una prueba espirométrica [13].

Maniobra técnicamente satisfactoria

La maniobra se considera técnicamente satisfactoria cuando, tras obtener tres curvas correctas, la diferencia entre las dos mejores es inferior al 5% o a 100 ml, además las curvas deberán durar como mínimo 6 segundos [16].

Un ejemplo de maniobra no satisfactoria, a pesar de haber registrado 3 curvas correctamente se presenta en la figura 3.11, ya que, tanto en la curva volumen – tiempo como en la de flujo – volumen existe una diferencia entre las tres curvas superior al 5%, que visiblemente es muy grande [16].

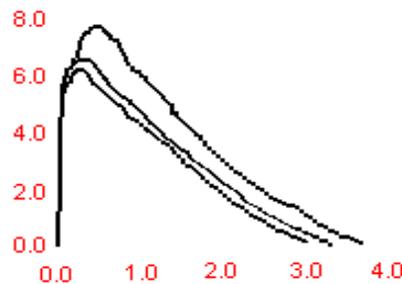


Fig. 3.11 Gráfica de maniobra no satisfactoria [16].

Por el contrario, en la figura 3.12, vemos una maniobra realizada de forma satisfactoria, que cuenta con una buena reproducibilidad ya que sus diferencias son menores al 5% [13].

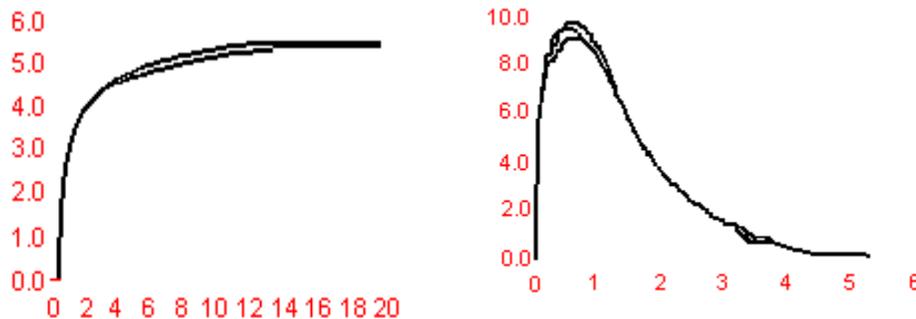


Fig. 3.12 Gráficas de maniobras satisfactorias [16].

Finalmente, ya que se conocen y comprenden los principios físicos que rigen el funcionamiento de un aparato espirométrico, el tipo de aparatos que existen, y los resultados que debemos obtener, se procede a realizar el nuevo prototipo, en base al anterior.