

# Monitorización de la función respiratoria en el niño con ventilación mecánica (II): complianza, resistencia, hiperinsuflación dinámica, espacio muerto y trabajo respiratorio

J. López-Herce Cid

Sección de Cuidados Intensivos Pediátricos. Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid. España.

Existen diversos parámetros que pueden ayudar a conocer la mecánica respiratoria del niño sometido a ventilación mecánica. La complianza es una medida de la distensibilidad del sistema respiratorio. En ventilación mecánica puede medirse la complianza estática (distensibilidad del pulmón), en modalidades volumétricas mediante la aplicación de una pausa inspiratoria con el sistema respiratorio en reposo (paciente sedado sin respiración espontánea), o con más frecuencia la complianza dinámica (distensibilidad de todo el sistema respiratorio), que no precisa pausa inspiratoria ni sistema respiratorio en reposo. La complianza puede ser calculada numéricamente o expresada gráficamente en la curva de volumen-presión. Muchos respiradores pueden calcular también la resistencia de la vía aérea (que incluye también la del tubo endotraqueal) durante la inspiración y espiración. Para valorar la existencia de hiperinsuflación dinámica se utilizan diversas medidas (medición de PEEP intrínseca o auto-PEEP, volumen aéreo atrapado) tras la aplicación de una pausa espiratoria prolongada. Los respiradores de última generación permiten realizar estas mediciones de forma casi automática. También es posible medir el trabajo y esfuerzo respiratorio realizado por el paciente mediante el cálculo de diversas medidas (producto de la presión inspiratoria por el tiempo, trabajo respiratorio impuesto, presión 0,1, máximo esfuerzo inspiratorio). Sin embargo, estas medidas no han sido todavía estandarizadas en el paciente pediátrico.

## Palabras clave:

*Complianza. Distensibilidad pulmonar. Resistencia. Atrapamiento aéreo. Trabajo respiratorio. Mecánica respiratoria.*

## RESPIRATORY FUNCTION MONITORING II: COMPLIANCE, AIRWAY RESISTANCE, DYNAMIC HYPERINFLATION, PULMONARY DEAD-SPACE, WORK OF BREATHING

Several parameters can be used to study respiratory mechanics in children on mechanical ventilation. Compliance is a measure of the distensibility of the respiratory system. In mechanical ventilation two measures of compliance can be used. Static compliance (pulmonary distensibility) can be measured in volume modes by the application of an inspiratory pause with the respiratory system at rest (sedated patients without inspiratory effort). Dynamic compliance does not require an inspiratory pause and the respiratory system need not be at rest. Compliance can be calculated numerically or expressed graphically in the volume-pressure curve. Many respirators can calculate inspiratory and expiratory airway resistance (including endotracheal tube resistance). Several measures can be used to detect dynamic hyperinflation (intrinsic PEEP, auto-PEEP, trapped air volume) after application of an expiratory pause. The latest respirators can perform these measurements almost automatically. Work of breathing and respiratory effort can also be analyzed by measuring several parameters (pressure-time product, imposed work of breathing, P 0.1, maximum inspiratory pressure). However, these measures have not yet been standardized in children.

## Key words:

*Compliance. Pulmonary distensibility. Airway resistance. Pulmonary hyperinflation. Work of breathing. Respiratory mechanics.*

**Correspondencia:** Dr. J. López-Herce Cid.  
Sección de Cuidados Intensivos Pediátricos.  
Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid. España.  
Dr. Esquerdo, 49. 28009 Madrid. España.  
Correo electrónico: pielvi@retemail.es

Recibido en abril de 2003.  
Aceptado para su publicación en abril de 2003.

## INTRODUCCIÓN

Hasta hace poco tiempo, la monitorización de la función respiratoria en los niños sometidos a VM exigía sofisticados y complicados aparatos y laboriosas técnicas que sólo estaban disponibles en determinadas unidades de cuidados intensivos pediátricos (UCIP) y se empleaban, únicamente, para estudios de investigación. Pero en los últimos años, los respiradores de última generación han incorporado las gráficas respiratorias como un parámetro de monitorización habitual e, incluso, algunos de ellos permiten realizar con sencillez diversas pruebas de función respiratoria. El objetivo de este capítulo es analizar la utilidad de la monitorización de las curvas respiratorias en la valoración de la VM en el niño y de algunas pruebas de función pulmonar como la complianza, resistencia, atrapamiento aéreo, medición del espacio muerto y del trabajo respiratorio. Estas pruebas pueden ayudar en el diagnóstico de algunas alteraciones pulmonares, sirven para determinar algunos parámetros que no pueden valorarse con una monitorización convencional, y ayudan a evaluar la respuesta terapéutica a modificaciones de la ventilación mecánica o la administración de fármacos.

## COMPLIANZA

### Concepto

La complianza es una medida de la elasticidad del sistema respiratorio, que relaciona el volumen corriente con la presión necesaria para introducir ese volumen en el pulmón.

$$\text{Complianza (ml/cmH}_2\text{O)} = \frac{\text{volumen (ml)}}{\text{presión (cmH}_2\text{O)}}$$

En ventilación mecánica se consideran dos tipos de complianza<sup>1-6</sup>:

1. *Complianza estática.* Mide la elasticidad del pulmón y la caja torácica en situación de reposo, es decir cuando el flujo es 0.

Medición. Sólo puede medirse aplicando una pausa inspiratoria al final de la inspiración, es decir, en modalidades programadas por volumen. Algunos respiradores la miden automáticamente y en otros hay que programar

manualmente una pausa inspiratoria prolongada (generalmente de 0,5 s) para medir la presión meseta.

$$\text{Complianza estática} = \frac{\text{volumen corriente}}{\text{presión meseta-presión espiratoria final}}$$

2. *Complianza dinámica.* Valora no sólo la complianza del pulmón y de la pared torácica, sino también la resistencia de las vías aéreas. Se puede medir tanto en modalidades de volumen como de presión.

$$\text{Complianza dinámica} = \frac{\text{volumen corriente}}{\text{presión pico-presión espiratoria final}}$$

La complianza dinámica es del 10 al 20% menor que la estática.

3. *Complianza específica.* Es la relación entre la complianza y el volumen al que ésta se mide (capacidad funcional residual)  $C_{\text{esp}} (1/\text{cmH}_2\text{O}) = C/\text{CFR}$ . Algunos autores prefieren utilizar la complianza específica para poder comparar pacientes ventilados con volúmenes diferentes.

Existen pocos estudios que analicen los valores de complianza en niños sometidos a VM. Se consideran normales valores de complianza (ml/cmH<sub>2</sub>O), de  $2 \times \text{peso (kg)}$  en lactantes,  $1,64 \times 10^{-3} \times (2,54 \times \text{altura en cm})^2$ <sup>18</sup> en niños, y 200 en adultos (tabla 1).

### Curva de volumen-presión

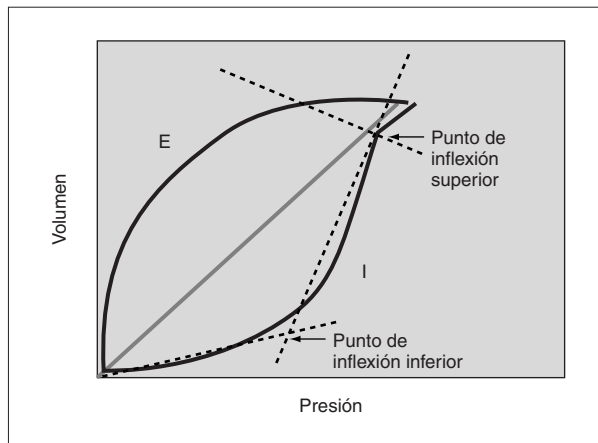
La relación entre el volumen y la presión puede expresarse gráficamente por una curva de volumen-presión o de complianza. Esta curva es de tipo sigmoideo con una rama inspiratoria y otra espiratoria, refleja la impedancia del sistema respiratorio (elasticidad toracopulmonar más resistencia de las vías aéreas), en la que la bisectriz representa la complianza (fig. 1). En los volúmenes intermedios, que es donde se produce la respiración normal, la relación volumen/presión es bastante lineal. Sin embargo, a volúmenes pulmonares bajos o altos la complianza es mucho menor y, por tanto, la curva se aplana<sup>1,3,6</sup>.

La curva de volumen-presión permite representar gráficamente la complianza y valorar los cambios de la misma tras modificaciones de la asistencia respiratoria. Además, permite determinar los puntos de inflexión inferior

TABLA 1. Valores normales de complianza y resistencia según la edad

|   | Pretérmino | Recién nacidos | 1 año | 7 años | Adulto |
|---|------------|----------------|-------|--------|--------|
| Complianza pulmonar (ml/cmH <sub>2</sub> O)               | 1,5        | 5              | 15    | 50     | 60-100 |
| Complianza específica (cmH <sub>2</sub> O <sup>-1</sup> ) | 0,06       | 0,06           | 0,06  | 0,07   | 0,08   |
| Resistencia de las vías aéreas (cmH <sub>2</sub> O/l/s)   | 80         | 40             | 15    | 4      | 2      |
| Espacio muerto anatómico (ml)                             | 3          | 6              | 20    | 50     | 150    |

Complianza específica: complianza dividida por la capacidad funcional residual.



**Figura 1.** Curva de volumen-presión o de complianza. Puntos de inflexión inferior (apertura alveolar) y superior (sobredistensión).

**TABLA 2. Disminución de complianza. Enfermedades pulmonares restrictivas**

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| <i>Pulmonares</i>  |                                      |
| Aumento de la tensión superficial por alteración del surfactante | Enfermedad de las membranas hialinas |
| SDRA   |                                      |
| Ocupación de los alvéolos por líquido o inflamación              | Edema pulmonar                       |
| Neumonía   |                                      |
| Alteración de la estructura del pulmón                           |                                      |
| Edema intersticial   |                                      |
| Neumonitis   |                                      |
| Fibrosis   |                                      |
| Disminución del volumen disponible para la ventilación           |                                      |
| Atelectasia  |                                      |
| SDRA   |                                      |
| Derrame pleural-neumotórax                                       |                                      |
| <i>Torácicas</i>   |                                      |
| Distensión abdominal   |                                      |
| Malformaciones congénitas de la pared torácica                   |                                      |
| Enfermedades neuromusculares                                     |                                      |

SDRA: síndrome de dificultad respiratoria aguda.

(presión a la que empiezan a abrirse los alvéolos) y superior (presión a la que empieza a producirse sobredistensión) (fig. 1).

La curva de complianza se traza mientras se hinchan y se deshinchan pasivamente los pulmones de forma escalonada por medio de la técnica de la superjeringa<sup>6,8</sup>. Este método es muy laborioso, por lo que no se utiliza habitualmente en la práctica clínica, reservándose solamente para estudios clínicos. Actualmente, muchos respiradores dibujan la curva de volumen-presión de cada respiración, lo que permite valorar gráficamente la complianza<sup>7</sup>, e incluso algunos de ellos, por ejemplo Galileo Gold (Hamilton<sup>®</sup>), permiten además trazar la curva de volumen-presión paso a paso, consiguiendo una valoración

más precisa de los puntos de inflexión y los volúmenes de apertura.

### Utilidad

1. La medición de la complianza puede servir para caracterizar el tipo de alteración pulmonar (obstructiva o restrictiva)<sup>6,7</sup>.

2. También ayuda a cuantificar la evolución clínica del paciente y los cambios secundarios a las modificaciones de asistencia respiratoria, por ejemplo tras administración de surfactante o aplicación de la PEEP.

3. La curva de volumen-presión sirve para determinar los puntos de inflexión inferior (apertura de los alvéolos) y superior (hiperinsuflación) y su modificación con la asistencia respiratoria; fundamentalmente para valorar la PEEP óptima.

4. Indicador de la posibilidad de extubación: En adultos una complianza estática menor de 25 ml/cmH<sub>2</sub>O es un indicador de que el paciente no puede ser retirado del respirador. No existen estudios que analicen su capacidad predictiva en niños.

### Causas de alteración de la complianza

Disminución de complianza:

1. En el niño, la complianza torácica es mayor que en el adulto, debido a la menor osificación de las costillas y, por el contrario, la complianza pulmonar es mucho menor. Esto hace que la capacidad residual funcional sea menor lo que aumenta el riesgo de producción de atelectasias y de hipoxemia.

2. En el paciente crítico la complianza de la pared torácica varía con la cirugía, dolor, distensión abdominal, sedación, contracción de los músculos respiratorios y relajación muscular.

3. Las enfermedades restrictivas (tabla 2), aumentan las fuerzas de retracción elásticas de los pulmones o la caja torácica, y disminuyen la complianza.

Aumento de complianza: muy raro en niños. Enfisema pulmonar.

### RESISTENCIAS

#### Concepto

La resistencia respiratoria es igual a la suma de las resistencias de las vías aéreas y las del tejido pulmonar. En la práctica se considera sólo la resistencia de las vías aéreas, producida fundamentalmente por los bronquios de mediano calibre, ya que la resistencia del tejido pulmonar se mantiene constante y contribuye relativamente poco a la resistencia total. La resistencia de las vías aéreas depende del volumen pulmonar (menor cuanto mayor sea el volumen pulmonar) y del tipo de flujo (laminar o turbulento); y es directamente proporcional a la viscosi-

dad del aire, a la longitud de la vía aérea y a la velocidad del flujo de aire, e inversamente proporcional a la cuarta potencia del radio<sup>1,3-5</sup>.

### Medición

La resistencia se calcula dividiendo el cambio de presión entre la entrada y salida del circuito por el flujo de aire.

$$\text{Resistencia} = \text{Diferencia de presión/flujo (cmH}_2\text{O/l/s)}$$

Durante la ventilación mecánica pueden medirse tanto las resistencias inspiratorias como las espiratorias. Los valores normales de la resistencia de las vías aéreas en niños por encima de año de edad pueden calcularse por la fórmula  $R = 3,87 \times 106 \times \text{altura}^{-2,6}$  (tabla 2).

La medición de la resistencia de las vías aéreas varía entre un respirador y otro dependiendo del lugar donde esté situado el sensor de flujo y de presión en el circuito respiratorio:

1. Los respiradores en los que el sensor de flujo y presión está cerca del tubo endotraqueal miden la resistencia causada por el tubo endotraqueal y las vías aéreas durante la inspiración o la espiración.

2. Los respiradores en los que el sensor está a la entrada y salida del respirador miden la resistencia causada por el tubo endotraqueal, las vías aéreas, los humidificadores, el capnógrafo y las tubuladuras durante la inspiración o la espiración.

La medición de la resistencia de las vías aéreas también puede estar artefactada por las respiraciones activas del paciente.

La resistencia del aparato respiratorio puede expresarse gráficamente mediante la curva de presión-volumen<sup>7,8</sup>. La amplitud del asa de la curva volumen-presión suele usarse como una estimación cuantitativa del comportamiento resistivo (fig. 2), y cuando éste se divide por el flujo se obtiene la resistencia.

### Utilidad

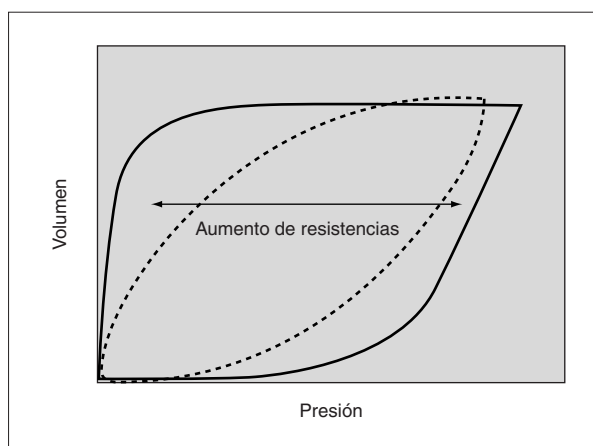
1. Valoración y cuantificación de la resistencia de las vías aéreas en la patología pulmonar del paciente<sup>8</sup>. Las causas más frecuentes de aumento de resistencia en el niño con ventilación mecánica vienen recogidas en la tabla 3.

2. Valoración del efecto de los broncodilatadores.

### ATRAPAMIENTO DE AIRE-HIPERINSUFLACIÓN DINÁMICA-AUTO-PEEP

#### Concepto

El atrapamiento de aire durante la VM refleja la imposibilidad de espirar todo el aire que se ha introducido al



**Figura 2.** Curva de volumen-presión. Valoración de la resistencia. El aumento de la resistencia hace que la curva se amplíe.

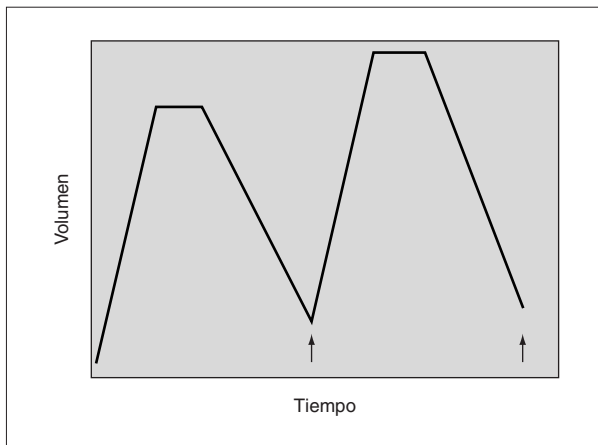
**TABLA 3. Aumento de resistencias. Enfermedades pulmonares obstructivas**

|                                   |
|-----------------------------------|
| Acodamiento del tubo endotraqueal |
| Asma                              |
| Aumento de secreciones            |
| Broncodisplasia                   |
| Broncospasma                      |
| Bronquiolitis                     |
| Bronquitis                        |
| Cuerpo extraño                    |
| Estenosis traqueobronquial        |
| Flujo aéreo elevado               |
| Sedación inadecuada               |
| Tubo endotraqueal pequeño         |

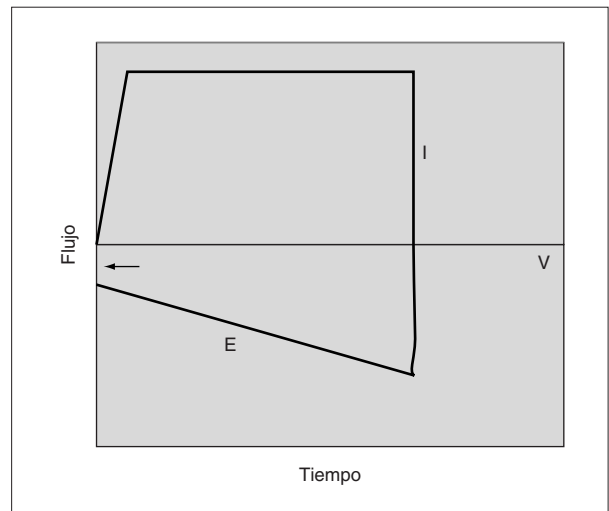
paciente durante la inspiración. Se ha denominado de diversas formas, atrapamiento de aire, hiperinsuflación dinámica, auto-PEEP o PEEP intrínseca, lo que ha contribuido a dificultar la comprensión de este concepto<sup>9,10</sup>. El atrapamiento de aire ocurre cuando el tiempo espiratorio es demasiado corto debido a:

1. Un volumen corriente excesivo.
2. Una frecuencia respiratoria muy elevada.
3. Una relación inspiración:espiración muy alargada.
4. Una impedancia del circuito muy elevada.
5. La existencia de obstrucción espiratoria de la vía aérea.
6. Un pico de flujo espiratorio muy bajo.

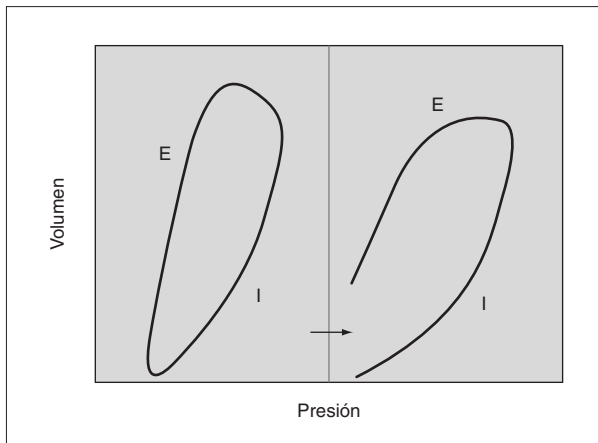
Cuando existe atrapamiento aéreo aumenta el riesgo de volutrauma y barotrauma, de compromiso hemodinámico con hipotensión y, en pacientes con respiración espontánea, aumenta el trabajo respiratorio.



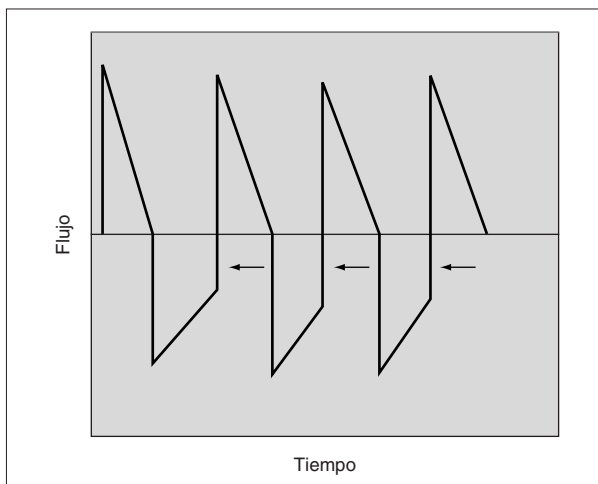
**Figura 3.** Atrapamiento aéreo en la curva de volumen-tiempo. La inspiración comienza antes de que el volumen llegue a la situación basal durante la espiración.



**Figura 6.** Atrapamiento aéreo en la curva de flujo-volumen. La inspiración empieza antes de que el flujo espiratorio llegue a 0.



**Figura 4.** Atrapamiento aéreo en la curva de volumen-presión.



**Figura 5.** Atrapamiento aéreo en la curva de flujo-tiempo. La inspiración empieza antes de que el flujo espiratorio llegue a 0.

### Medición

La valoración del atrapamiento aéreo o hiperinsuflación pulmonar puede realizarse de diversas formas (radiografía de tórax, medición de la constante de tiempo, curvas de volumen o flujo, medición de la PEEP total, medición del volumen atrapado).

1. Curvas de volumen y flujo: en las curvas de volumen-tiempo (fig. 3) y volumen-presión (fig. 4), se observa que la inspiración empieza antes de que el volumen espiratorio haya llegado a la situación basal. En las curvas de flujo-tiempo (fig. 5) y flujo-volumen (fig. 6) se aprecia que la inspiración empieza antes de que el flujo espiratorio llegue a cero<sup>8</sup>.

2. La constante de tiempo espiratorio mide el tiempo de vaciamiento de los pulmones y es el producto de la complianza por la resistencia espiratoria. En una constante de tiempo se elimina el 63% del VC, en dos constantes el 86,5%, en tres el 95%, y en cuatro el 98%. Las enfermedades que producen un aumento de la complianza y/o de la resistencia espiratoria aumentan también el tiempo necesario para eliminar el aire de los pulmones. Si el tiempo espiratorio es menor de 3 constantes de tiempo se producirá un vaciado pulmonar incompleto con atrapamiento del aire.

3. Auto-PEEP o PEEP intrínseca: la PEEP total puede medirse en cualquier respirador que pueda realizar una pausa espiratoria prolongada (muchos respiradores antiguos lo pueden hacer). El problema en ellos es poder valorar adecuadamente los resultados. La metodología es la siguiente<sup>9</sup>:

a) Mantener al paciente sedado y adaptado al respirador. La medición exige que el paciente no interfiera con la respiración del aparato; por tanto, no puede determinarse con fiabilidad en niños en respiración espontánea.

b) Tras una inspiración producir una pausa espiratoria prolongada (fig. 7).

4. En algunos respiradores antiguos el médico decide la duración de la pausa espiratoria hasta que el valor de la presión se estabiliza en el manómetro. Este valor es la PEEP total. El valor de auto-PEEP o PEEP intrínseca es igual al valor de PEEP total menos el de PEEP programada en el respirador:

$$\begin{aligned} \text{Auto-PEEP (PEEP intrínseca)} &= \\ &= \text{PEEP total} - \text{PEEP extrínseca} \end{aligned}$$

5. En otros respiradores el médico prolonga la pausa espiratoria hasta que el aparato avisa que se ha medido la PEEP total.

6. En algunos respiradores recientes el aparato realiza una pausa espiratoria fija de 3 a 10 s (según sea lactante o niño-adulto) y mide automáticamente la auto-PEEP y el volumen atrapado.

7. Algunos respiradores de última generación, además de poder realizar maniobras de pausa espiratoria manual, miden continuamente la auto-PEEP en cualquier modalidad sin necesidad de interrumpir la ventilación ni realizar maniobras de oclusión, pero esta medida es poco fiable cuando el paciente está respirando activamente.

## Utilidad

1. Medición y cuantificación del atrapamiento aéreo, y de su variación con las modificaciones de la asistencia respiratoria<sup>9,10</sup>.

2. Prevención del daño asociado a ventilación mecánica y de la fatiga respiratoria<sup>9,10</sup>.

## Tratamiento

1. En pacientes con tiempo espiratorio corto se debe intentar alargar el tiempo espiratorio ajustando la frecuencia respiratoria, el flujo inspiratorio y la relación I:E.

2. En pacientes con limitación del flujo espiratorio por colapso de la vía aérea, el aumento de la PEEP externa hasta alcanzar el 75 o 100% de la PEEP intrínseca puede mejorar el atrapamiento porque mantiene abierta la vía aérea.

3. En pacientes con ventilación espontánea aumentar la presión de soporte o variar la sensibilidad de inicio de la espiración para que la inspiración termine antes.

## ESPACIO MUERTO

### Concepto

El volumen de aire enviado por el respirador puede dividirse en ventilación alveolar y espacio muerto. El espacio muerto fisiológico es el volumen de aire que no participa en el intercambio gaseoso, y a su vez se divide en espacio muerto anatómico que es el aire que llena la vía aérea (sus valores normales varían con la edad y están recogidos en la

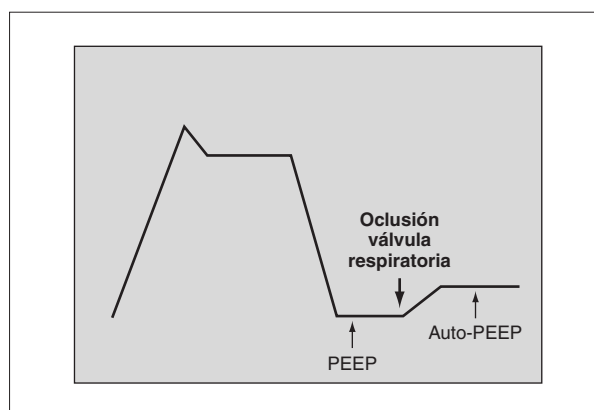


Figura 7. Medición de la auto-PEEP.

tabla 1) y espacio muerto alveolar, que es el volumen de aire que alcanza los alvéolos, pero que no interviene en el intercambio gaseoso debido a que estos alvéolos no están perfundidos. Si aumenta el espacio muerto anatómico (broncodilatación, aumento de la distancia entre las tubuladuras y el paciente) o el espacio muerto alveolar (embolia pulmonar, bajo gasto cardíaco, uso de PEEP) y el volumen minuto no se incrementa de forma compensadora, se producirá una disminución de la ventilación alveolar.

## Medición

El espacio muerto fisiológico (VD/VT) se mide en la práctica por la diferencia entre la PaCO<sub>2</sub> y la PetCO<sub>2</sub> (VD/VT = PaCO<sub>2</sub>-PetCO<sub>2</sub>/PaCO<sub>2</sub>). El valor normal del espacio muerto es menor a 0,3. Si aumenta el espacio muerto fisiológico la diferencia PaCO<sub>2</sub> menos PetCO<sub>2</sub> se incrementa.

## Utilidad

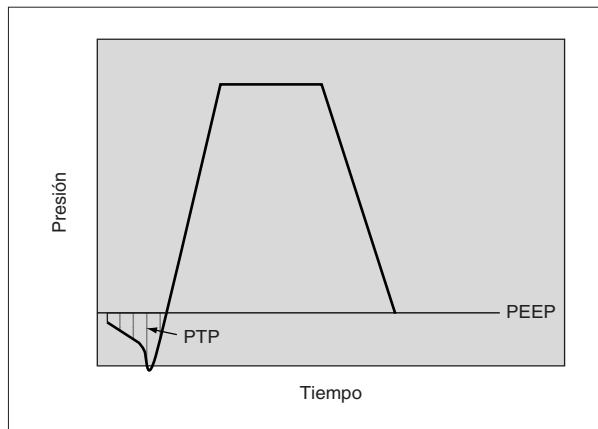
En un estudio reciente en adultos con síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA) se ha encontrado que el VD/VT es un buen predictor de mortalidad, mejor incluso que la puntuación de gravedad o la medición de complianza respiratoria<sup>11</sup>.

## TRABAJO RESPIRATORIO

Hasta hace poco tiempo, la medición del trabajo respiratorio era muy laboriosa, por lo que estaba reservada a trabajos de experimentación clínica. En el momento actual algunos respiradores informan automáticamente de algunos parámetros relacionados con el trabajo respiratorio, lo cual permite su empleo en la práctica clínica cotidiana.

### Producto de la presión inspiratoria por el tiempo (PTP) y trabajo respiratorio impuesto (WOB<sub>imp</sub>) (j/l)

Los equipos de VM y la vía respiratoria artificial (válvula respiratoria, tubuladuras, humidificador) añaden una resistencia que el paciente debe vencer para conseguir el aire. Este esfuerzo (trabajo impuesto o adicional) es realizado



**Figura 8.** Medición del producto presión-tiempo (PTP), aérea rayada, en la curva de presión-tiempo.

exclusivamente por el paciente y, por tanto, sólo puede ser medido en las respiraciones iniciadas por el paciente.

1. El PTP es la presión realizada por el paciente multiplicada por el tiempo que tarda en alcanzar el nivel de PEEP o CPAP. EL PTP no mide el trabajo realizado para trasladar el aire por el tubo endotraqueal, las vías respiratorias y los pulmones, pero es un buen indicador de la adaptación del paciente al respirador.

Se determina midiendo el área bajo la curva (AUC) en la gráfica de presión-tiempo desde que empieza el esfuerzo inspiratorio hasta que se alcanza el nivel de PEEP (fig. 8), aunque en la actualidad algunos respiradores lo miden de forma automática. Todavía no se han publicado valores normales del PTP para niños.

2. El trabajo respiratorio impuesto se mide valorando la presión en la vía aérea integrada sobre el volumen inspiratorio, hasta que la presión alcanza el nivel de PEEP. Algunos respiradores lo miden de forma automática. Tampoco existen referencias de los valores normales en niños.

Si el PTP o el trabajo respiratorio impuesto aumentan se debe:

1. Mirar si hay agua o secreciones en las tubuladuras.
2. Aumentar la sensibilidad o valorar pasar a sensibilidad de flujo.
3. Pasar a una modalidad espontánea.
4. Acortar el tiempo de rampa o de retardo inspiratorio.

### Presión 0.1 (P 0.1)

Es la máxima presión ejercida por el paciente en los primeros 100 ms de la inspiración, cuando la vía aérea está ocluida durante una respiración tranquila, sin que el paciente sea consciente de que se le está realizando la prueba. Más que una medida del trabajo respiratorio, se considera que la P 0.1 valora el funcionamiento del centro respiratorio y que es independiente del esfuerzo voluntario del paciente y de su mecánica respiratoria<sup>12</sup>.

La P 0.1 ha demostrado su utilidad para predecir el éxito de la extubación en algunos trabajos en adultos. Una P 0.1 menor o igual a  $-4$  cmH<sub>2</sub>O indica un esfuerzo adecuado, y una P 0.1 mayor o igual  $-6$  cmH<sub>2</sub>O indica un esfuerzo excesivo con riesgo de fatiga respiratoria y probable fracaso de la extubación. En estos casos hay que valorar aumentar la presión de soporte o acortar el tiempo de rampa.

La medición de la P 0.1 es sencilla, pero sólo está disponible en algunos respiradores de última generación<sup>12-14</sup>, y existe muy poca experiencia en niños<sup>15</sup>. Son necesarios estudios que analicen su capacidad predictiva del éxito de la extubación en pacientes pediátricos.

### Máximo esfuerzo o presión inspiratoria máxima (PI<sub>máx</sub>)

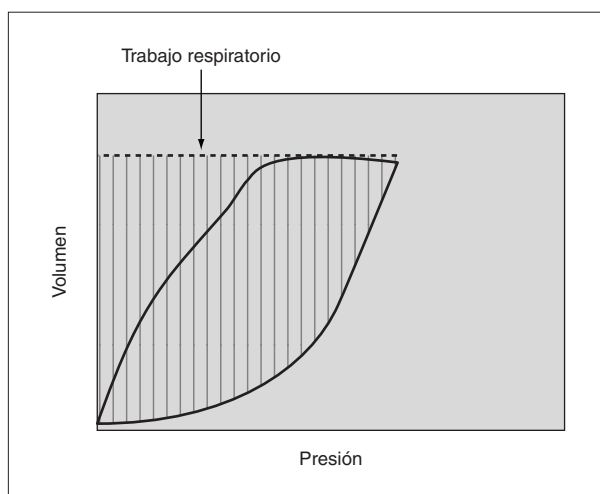
Valora la máxima capacidad de esfuerzo respiratorio realizado por el paciente (la capacidad muscular contráctil, sobre todo diafragmática, y la integridad del estímulo neurológico). Se valora ocluyendo la válvula espiratoria de forma prolongada y pidiendo al paciente que realice una inspiración máxima<sup>12</sup>. La medición de la PI<sub>máx</sub> depende de la colaboración del paciente, por lo que sólo es posible medirla en niños mayores de 6 a 7 años, aunque también puede intentarse sin colaboración del paciente mediante un período de oclusión de la vía aérea de 20 s. En adultos, una PI<sub>máx</sub> mayor de  $-30$  cmH<sub>2</sub>O indica posibilidad de éxito de la extubación, mientras que una PI máxima menor de  $-20$  cmH<sub>2</sub>O orienta a un fracaso de ésta. Sin embargo, la especificidad predictiva de este parámetro es muy baja. Existen muy pocos estudios que hayan valorado su utilidad en el paciente pediátrico<sup>15</sup>.

### Trabajo respiratorio

El trabajo respiratorio es proporcional a la presión generada por los músculos respiratorios para provocar un cambio de volumen pulmonar. El trabajo respiratorio se divide en trabajo resistivo (empleado para vencer la resistencia de las vías aéreas, que depende del flujo y la resistencia) y trabajo elástico (empleado para distender el pulmón, que depende del volumen y la complianza)<sup>12,13</sup>. El trabajo realizado por el paciente depende de:

1. La intensidad del esfuerzo del paciente.
2. El tipo de sensibilidad (flujo o presión) y la sensibilidad programada.
3. El volumen y la resistencia del circuito respiratorio.

El trabajo respiratorio se representa gráficamente en la curva de volumen-presión por el área comprendida entre la curva y el eje de volumen<sup>8</sup> (fig. 9). El trabajo respiratorio realizado por el paciente puede calcularse a partir de la presión esofágica medida con un catéter-balón y de las mediciones de flujo, volumen y presión obtenidas del respirador o de un neumotacógrafo que se intercala en el circuito respiratorio. En los pacientes con respiración asistida, el trabajo respiratorio del paciente se calcula superponien-



**Figura 9.** Valoración del trabajo respiratorio en la curva de volumen-presión.

do las curvas de volumen-presión de las respiraciones controladas y las asistidas. Sin embargo, estos cálculos son laboriosos, por lo que no se utilizan en la práctica clínica habitual<sup>12,13</sup>. Recientemente, algunos respiradores de última generación han incorporado el cálculo automático del trabajo respiratorio realizado por el paciente y el respirador.

El trabajo respiratorio informa del esfuerzo respiratorio realizado por el paciente para conseguir el volumen minuto respiratorio y puede orientar sobre la necesidad de modificación de la asistencia respiratoria y la posibilidad de extubación. Todavía no hay estudios en niños que validen las mediciones del trabajo respiratorio obtenidos por el respirador, ni el rango de valores normales en relación a la edad o el peso, por lo que en el momento actual estas determinaciones deben ser valoradas con reserva.

## BIBLIOGRAFÍA

- Pérez Fontán JJ, Haddad GG. Fisiopatología respiratoria. En: Behrman RE, Kliegman RM, Jenson HB, editores. *Nelson: Tratado de Pediatría*. 16.ª ed. (ed. esp.). Madrid: McGraw-Hill-Interamericana, 2000; p. 1358-66.
- Brochard L. Principios de fisiología respiratoria necesarios para la comprensión de la ventilación artificial. En: Brochard L, Mancebo J, editores. *Ventilación artificial: Principios y aplicaciones*. Paris: Arnette Blackwell, 1996; p. 1-20.
- D'Angelo E. Static and dynamic behaviour of the respiratory system. En: Milic-Emili J, editor. *Applied Physiology in respiratory mechanics*. Milano: Springer, 1998; p. 39-49.
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. Respiratory function measurements in infants: Symbols, abbreviations, and units. *Am J Respir Crit Care Med* 1995;151:2041-57.
- Velasco M, Ulloa E, López-Herce J. Ventilación mecánica. En: López-Herce J, Calvo C, Lorente M, editores. *Manual de Cuidados Intensivos Pediátricos*. Madrid: Publimed, 2001; p. 620-43.
- Benito S. Complianza pulmonar. En: Net A, Benito S, editores. *Función pulmonar en el paciente ventilado*. Barcelona: Doyma, 1990;8:68-78.
- Waugh JB, Deshpande VM, Harwood RJ. Rapid interpretation of ventilators waveforms. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- Lu Q, Rouby J-J. Measurement of pressure-volume curves in patients on mechanical ventilation: Methods and significance. *Crit Care Med* 2000;4:91-100.
- Rossi A, Polese G, Brandi G, Conti G. The intrinsic positive end expiratory pressure (PEEPi): Physiology, implications, measurement, and treatment. *Intensive Care Med* 1995;21:522-36.
- Marini JJ. Auto-positive end-expiratory pressure and flow limitation in adult respiratory distress syndrome-Intrinsically different? *Crit Care Med* 2002;30:2140-1.
- Nuckton TJ, Alonso JA, Kallet RH, Daniel BM, Pittet JF, Eisner MD, et al. Pulmonary dead-space fraction as a risk factor for death in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2002;346:1281-6.
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. ATS/ERS Statement on Respiratory muscle testing. 10. Assessment of respiratory muscle function in the intensive care unit. *Am J Respir Crit Care Med* 2002;166:610-23.
- Marini JJ. Trabajo respiratorio durante la ventilación mecánica. En: Net A, Benito S, editores. *Función pulmonar en el paciente ventilado*. Barcelona: Doyma, 1990;6:49-63.
- Kuhlen R, Hausmann S, Pappert D, Slama K, Rossaint R, Falke K. A new method for p 0.1 measurement using standard respiratory equipment. *Intensive Care Med* 1995;21:554-60.
- Manczur TI, Greenough A, Pryor D, Rafferty GF. Assessment of respiratory drive and muscle function in the pediatric intensive care unit and prediction of extubation failure. *Pediatr Crit Care Med* 2000;1:124-6.

## Abreviaturas

|  |  |
|--|--|
| CPAP: presión positiva continua en vía aérea.                        | PO <sub>2</sub> : presión parcial de oxígeno.                    |
| FiO <sub>2</sub> : fracción inspiratoria de oxígeno.                 | PVC: presión venosa central.                                     |
| PA: presión arterial.  | PvO <sub>2</sub> : presión parcial venosa de oxígeno.            |
| PaCO <sub>2</sub> : presión parcial arterial de anhídrico carbónico. | SatHb: saturación arterial de la hemoglobina.                    |
| PACO <sub>2</sub> : presión parcial alveolar de anhídrico carbónico. | SatO <sub>2</sub> : saturación de oxígeno en sangre arterial.    |
| PaO <sub>2</sub> : presión parcial arterial de oxígeno.              | SIMV: ventilación mecánica intermitente mandatoria sincronizada. |
| PAO <sub>2</sub> : presión parcial alveolar de oxígeno.              | VC: volumen corriente.   |
| Paw: presión media de la vía aérea.                                  | VM: ventilación mecánica.  |
| PCP: presión capilar pulmonar.                                       | VMC: ventilación mecánica convencional.                          |
| PCO <sub>2</sub> : presión parcial de anhídrico carbónico.           | VNI: ventilación no invasiva.                                    |
| PEEP: presión positiva telespiratoria.                               | VNIP: ventilación no invasiva con presión positiva.              |
| PH <sub>2</sub> O: presión del vapor de agua.                        |  |