

# **FISIOLOGÍA DE LA RESPIRACIÓN**

Modesto i Alapont V, Vidal Micó S, Ibiza Palacios E, Álvarez Montañana P.

Unidad de Reanimación y Cuidados Intensivos Pediátricos

Hospital Infantil Universitari "La Fe" (València)

Dirección:

La ventilación mecánica intenta sustituir artificialmente la función de nuestro aparato respiratorio. Sólo si estudiamos con detalle la fisiología de la mecánica respiratoria seremos capaces de sustituirla adecuadamente. Durante la inspiración, para introducir aire en los pulmones la musculatura respiratoria debe crear suficiente presión como para vencer dos fuerzas: una estática, el incremento en la **presión de retracción** del pulmón cuando éste aumenta de volumen, y otra dinámica, la **fricción** asociada con el flujo por la vía aérea. Durante la espiración, la salida del aire es pasiva. En este capítulo estudiaremos primero las propiedades estáticas del sistema respiratorio, que nos indicarán el comportamiento (sano o patológico) del parénquima alveolar y de la caja torácica. Luego estudiaremos el comportamiento dinámico, cómo se produce el flujo de aire desde la atmósfera hacia los alvéolos en la inspiración, y en sentido contrario en la espiración. Con ello estaremos explorando el estado de la vía aérea. Finalmente estudiaremos el funcionamiento conjunto del sistema e introduciremos un concepto capital para resumir toda la mecánica del sistema respiratorio: la **constante de tiempo**. Remitimos al lector a la fuente original de la que se han obtenido los conceptos principales, un espléndido tutorial web de acceso libre en internet<sup>1</sup> donde podrá practicar y comprender con más profundidad lo aquí aprendido.

## 1.- ESTÁTICA DE LA MECÁNICA RESPIRATORIA:

Las propiedades “estáticas” de la mecánica respiratoria se estudian, por definición, en condiciones de flujo aéreo = 0 L/s. Nosotros mismos podemos, jugando con nuestro propio cuerpo, simular las condiciones en las que se pueden estudiar estas propiedades en un laboratorio de fisiología. Debemos sólo ser capaces de realizar una apnea prolongada, bien contrayendo el diafragma manteniendo la glotis abierta o bien cerrando la glotis (evitando que el pulmón pierda volumen) pero relajando toda la musculatura respiratoria. Así seremos capaces de descubrir como responden a los cambios de presión tanto el pulmón como la caja torácica.

Para entenderlo mejor, representaremos las medidas de presión utilizando unos diagramas anatómicos con un código de colores (Figura 1) y situándolas sobre un eje de coordenadas: en abscisas pondremos los valores de presión y en ordenadas los volúmenes pulmonares (medidos como % de la Capacidad Pulmonar Total (TLC)). La presión atmosférica media ( $P_{atm}$ ) es la presión que hay en la boca, y es de 760 mmHg a nivel del mar (p. ej. en la playa de “El Postiguet” de Alicante), pero para los cálculos de la fisiología pulmonar se considera que su valor es cero cmH<sub>2</sub>O (**la presión de referencia**). La representaremos con un color amarillo. Las presiones cuya magnitud sea positiva (mayor que cero, la referencia) se situarán a la derecha del eje de abscisas, y se colorearán de verde. Las presiones cuya magnitud sea negativa (menor

que la presión de referencia) quedarán a la izquierda del eje de abscisas y se colorearán de morado.

### 1.1.- Propiedades elásticas del pulmón:

La presión del interior del alveolo ( $P_{alv}$ ) y la presión del interior del espacio pleural ( $P_{pl}$ ) son presiones estáticas y, como ya hemos dicho, deben medirse sin que exista flujo del aire. Llamaremos presión de retracción del pulmón o **presión trans-pulmonar (PTP)** a la diferencia *estática* de presión entre el alveolo y el espacio pleural ( $P_{pl}$ ) (**PTP =  $P_{alv}$  –  $P_{pl}$** ) (Figura 2). Cuando el pulmón sano se llena, cada volumen pulmonar se corresponde con un valor específico de PTP. Durante el vaciado, esta relación es ligeramente diferente (Figura 3). A esta propiedad se le denomina **histéresis**, y se debe –entre otras cosas- a la presencia de surfactante y a la tracción ejercida sobre cada alveolo por sus vecinos. El parénquima pulmonar patológico pierde casi completamente la histéresis. Por eso, y para simplificar las cosas, vamos a estudiar sólo el comportamiento del “asa inspiratoria”: el llenado pulmonar.

Empecemos, pues, haciendo el siguiente “primer experimento (mental)”. Nos ponemos de pie frente a un espejo y exhalamos aire hasta que en nuestro pulmón sólo queda el Volumen Residual (RV): el aire que rellena las vías aéreas. En ese momento hacemos una apnea prolongada, manteniendo la glotis abierta. En esta situación ¿Cuál será nuestra  $P_{alv}$ ? Si pensamos un poco, como la glotis está abierta y la apnea es mantenida durante un tiempo, la presión del interior de nuestros alvéolos se igualará a la presión atmosférica. Por ello la respuesta correcta es que en esta situación  $P_{alv} = 0$   $\text{cmH}_2\text{O}$ . Si ahora, alguien pudiera medir nuestra presión intrapleural (cosa muy poco recomendable ¡¡por eso hemos dicho que se trata de un experimento mental!!, pero que puede hacerse en un laboratorio de fisiología mediante una aguja de toracocentesis o una sonda nasogástrica colocada en el tercio distal del esófago, la zona mediastínica de este órgano) comprobaría que nuestra  $P_{pl}$  es de  $-3$   $\text{cmH}_2\text{O}$ . Si recapitulamos, veremos que a un volumen pulmonar que corresponde con RV, la  $P_{alv} = 0$   $\text{cmH}_2\text{O}$ , y la  $P_{pl} = -3$   $\text{cmH}_2\text{O}$ , luego  $PTP = 0 - (-3) = +3$   $\text{cmH}_2\text{O}$ .

Hagamos ahora el “segundo experimento (mental)”. Nos hacen una traqueotomía (¡¡insistimos en que el experimento debe ser mental...!!) y conectan el extremo exterior de la cánula a un aspirador de pared hasta que vacían nuestro pulmón hasta un volumen que corresponde de nuevo al RV. El aspirador de pared hace una succión dentro de nuestra vía aérea de  $P_{alv} = -4$   $\text{cmH}_2\text{O}$ . ¿cuál será el valor que alcanzará nuestra presión intrapleural?. La respuesta (¡¡creannos!!) es  $P_{pl} = -7$   $\text{cmH}_2\text{O}$ . Como estamos a RV, que hemos dicho corresponde con  $PTP = P_{alv} - P_{pl} = +3$   $\text{cmH}_2\text{O}$ , ya

que  $Palv = -4 \text{ cmH}_2\text{O}$ , simplemente despejando de la ecuación sabemos que  $Ppl = -7 \text{ cmH}_2\text{O}$ .

Si repetimos el anterior “primer experimento” pero ahora exhalando aire hasta Capacidad Residual Funcional (CRF), nos daremos cuenta que a CRF,  $Palv = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$  (glotis abierta, apnea prolongada), pero  $Ppl = -5 \text{ cmH}_2\text{O}$ , con lo que  $PTP = 0 - (-5) = +5 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Esto parece claro, pero veamos si verdaderamente hemos entendido este concepto. Para ello nos planteamos ahora un pequeño examen. Sea la siguiente situación: sacamos un pulmón de un cadáver (este examen ¡¡es también un examen mental!!, aunque si alguno no se cree la respuesta y tiene la oportunidad, es muy recomendable hacerlo con un cadáver de animal real...). Como es bien sabido el pulmón fuera de la caja torácica tenderá a colapsarse completamente. La pregunta del examen es la siguiente: ¿Cuánta presión intralaveolar hemos de aplicarle para que el pulmón esté relleno hasta CRF?. La respuesta es fácil si, como hemos dicho anteriormente, sabemos que CRF corresponde con una  $PTP = +5 \text{ cmH}_2\text{O}$ . El pulmón esta fuera de la caja torácica, por tanto la  $Ppl$  corresponderá a la presión atmosférica:  $Ppl = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Y en este caso, como queremos llevarlo a CRF, deberemos obtener una  $PTP = +5 = Palv - Ppl = Palv - 0$ . Luego hemos de aplicar una  $Palv = +5 \text{ cmH}_2\text{O}$  para que su volumen alcance CRF. Esta situación ilustra claramente por qué se debe usar una  $Palv$  positiva (**llamada PEEP**) en ventilación mecánica cuando el paciente está sedorrelajado (es incapaz de crear presión negativa intrapleurale) y queremos que al final de su respiración el pulmón esté lleno con un volumen correspondiente a FRC. Por último, repitamos de nuevo este “primer experimento”, pero ahora llenando los pulmones de aire hasta alcanzar la Capacidad Pulmonar Total (CPT). Comprobaremos que a CPT,  $Palv = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$  (glotis abierta, apnea prolongada), pero la contracción de nuestros músculos respiratorios ha hecho caer la presión intrapleurale hasta  $Ppl = -30 \text{ cmH}_2\text{O}$ , con lo que  $PTP = 0 - (-30) = +30 \text{ cmH}_2\text{O}$ .

Resumamos lo aprendido hasta aquí:

Volumen	PTP	Palv	Ppl
VR	+ 3	0	- 3
		- 4	- 7
CRF	+ 5	0	- 5
		+ 5	0
		+ 10	+ 5 (DP)
CPT	+ 30	0	- 30

De todo ello, podemos fácilmente deducir una propiedad capital de la estática respiratoria:

**El pulmón únicamente cambia de volumen cuando cambia de magnitud**

Contrariamente a lo que parece decir nuestra intuición, lo que hace cambiar de volumen al pulmón no es el valor de la  $P_{alv}$ , sino el valor de la  $PTP$ . Cuando el pulmón se llena de aire, cada volumen pulmonar se corresponde con un valor específico de  $PTP$ . Sean cuales sean los valores de  $P_{alv}$  y  $P_{pl}$ , si la  $PTP$  es  $+5 \text{ cmH}_2\text{O}$ , el pulmón se rellena de un volumen de aire que es Capacidad Residual Funcional (CRF), si la  $PTP = +30 \text{ cmH}_2\text{O}$ , el pulmón está a Capacidad Pulmonar Total (CPT), y si  $PTP = +3 \text{ cmH}_2\text{O}$  su volumen es Volumen Residual (VR). La penúltima fila de la tabla representa la situación en la que el paciente tiene un derrame pleural cuya presencia produce que la presión intrapleural pase a ser positiva ( $+5 \text{ cmH}_2\text{O}$ ): si no lo ventilamos con una PEEP de  $+10 \text{ cmH}_2\text{O}$ , su volumen telespiratorio no alcanzará CRF.

### 1.2.- Complianza pulmonar

Representemos todos estos valores de presión y de volúmenes pulmonares en nuestro eje de coordenadas (Figuras 4A, 4B, 4C y 4D). Obtenemos la “famosa” curva de presión-volumen del pulmón. La propiedad que caracteriza a la estática pulmonar es la **COMPLIANZA**, que se define como el cambio de volumen que produce cada cambio en la presión transpulmonar, medido sobre la curva estática de presión volumen (obtenida en situación de flujo  $0 \text{ L/s}$ ). **Su valor normal en toda la edad pediátrica es  $1 - 2 \text{ mL/kg/cmH}_2\text{O}$ .**

$$C = \Delta V / \Delta P$$

Como puede apreciarse en la (Figura 5), el pulmón es mucho menos compliante a volúmenes altos. La complianza máxima se obtiene en el entorno de CRF.

### 1.3.- Propiedades elásticas de la caja torácica

Llamaremos presión de retracción de la caja torácica o **presión trans-caja (PTC)** a la diferencia estática de presión entre la  $P_{pl}$  y la atmósfera ( **$PTC = P_{pl} - P_{atm}$** ).

Mediante experimentos un poco más complicados, y utilizando un transductor de presión colocado en el espacio pleural (mediante una aguja de toracocentesis o una

sonda nasogástrica colocada en el tercio distal del esófago), podemos medir la presión dentro de dicho espacio que corresponde con cada volumen del pulmón. Así, exhalando todo el aire hasta VR, cerrando la glotis (con lo que evitamos que pueda producirse cambio de volumen de aire) y relajando luego el diafragma, notaremos como la base de nuestra caja torácica tiende a ensancharse: la Ppl se hace de  $-30 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Manteniendo una apnea con la glotis abierta ( $P_{\text{alv}} = P_{\text{atm}} = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ ), nuestra Ppl es de  $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Y cargando aire hasta CPT, cerrando la glotis y relajando luego el diafragma la Ppl se vuelve positiva y se hace de  $+3 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Tal y como habíamos hecho con la PTC, puede establecerse una correspondencia entre volúmenes pulmonares y PTC. Es la curva que aparece en la (**Figura 6**): la curva de presión-volumen de la caja torácica. Como puede apreciarse claramente (**Figura 7**), desde VR hasta el 75% de la CPT, la caja tiende a expandirse: las presiones de retracción son negativas, y por eso esta parte de la curva se sitúa a la izquierda del eje de volúmenes. Por encima del 75% de la CPT, si la caja gana volumen tiende ya a retraerse, y por eso sus presiones de retracción son positivas (a la derecha del eje).

#### **1.4.- Propiedades elásticas conjuntas (caja torácica + pulmón)**

La suma algebraica de PTP + PTC se llama presión de retracción total del sistema respiratorio. La línea que une todos estos puntos constituye la curva presión-volumen de todo el sistema respiratorio conjunto (Figura 8). El punto volumétrico (eje vertical) en el que esta presión total se hace cero es justo el punto en el que PTP y PTC, por ser de la misma magnitud y de signo contrario, se anulan. Ese es exactamente el volumen al que llega nuestro sistema respiratorio en el reposo absoluto (sin contracción muscular). Por eso a este valor de volumen se le llama **Volumen de Reposo** del sistema respiratorio. En el adulto sano el Volumen de Reposo (un concepto anatomo-fisiológico estático) **coincide con la CRF** (un concepto clínico-fisiológico dinámico, o de "laboratorio de pruebas de función pulmonar": el aire que queda en un pulmón sano al final de una respiración normal). Por eso en la ventilación espontánea, la espiración es pasiva.

Y aquí aparece una importante diferencia de la fisiología de los niños con respecto a la de los adultos (recordad: ¡¡el niño no es un adulto bajito!!). Durante todo el primer año de vida, y sobretodo en los recién nacidos (y mucho más en los prematuros), en que la caja torácica no se ha osificado aún del todo, la Complianza de la Caja torácica es muchísimo mayor que la que se va a tener de adulto –de hecho, en los libros de neonatología suele poner que la complianza de la caja torácica del prematuro es casi infinita (sic)-. Si miramos la repercusión que esto va a tener en la curva de presión-volumen total del sistema respiratorio de los lactantes (Figura 9), podemos deducir que

el Volumen de Reposo del sistema respiratorio de los lactantes es mucho más bajo que el de los adultos. Es tan bajo que queda **por debajo del punto de cierre de su vía aérea**, el punto volumétrico en el que se inicia el colapso de los alveolos. Y por ello se produce el síndrome apnea-bradicardia del neonato: si hacen apnea prolongada (inmadurez de su centro respiratorio), su caja torácica es incapaz de hacer que sus pulmones pierdan volumen, sus alvéolos se colapsan, y se produce shunt intrapulmonar e hipoxia.

Multitud de trabajos han demostrado que los neonatos y lactantes, para evitar este fenómeno, tienen una espiración que no es pasiva. Por ejemplo, su contracción diafragmática se inicia en una fase telespiratoria previa a que se alcance su volumen de reposo (relación I:E muy alta e incluso invertida) y presentan un movimiento de aproximación de las cuerdas vocales durante la espiración (resistencia del sistema mayor en espiración que en inspiración). Con todo ello, los lactantes sanos tienden a producir un mecanismo de “Hiperinsuflación dinámica” (Ver capítulo de asma) para incrementar su volumen tele-espiratorio. Por ello, **en neonatos-lactantes el Volumen de Reposo no coincide con la CRF**: el volumen al que realizan la respiración espontánea es mucho más alto que el volumen al que les llevaría su la fuerza de retracción de su caja. Este fenómeno fisiológico suele acabar a los 2 años de vida, en los que la caja, totalmente osificada, ya es capaz de mantener alto el volumen pulmonar durante la apnea, y Volumen de Reposo y CRF ya coinciden. Y, si lo pensáis un poco, esto explica porque el tratamiento del síndrome apnéico-bradicárdico es la CPAP no invasiva: aunque el neonato tenga episodios de apnea, y su carbónico se sitúa en el límite alto de la normalidad, su pulmón no perderá volumen, y no habrá shunt ni hipoxia.

De lo dicho hasta aquí, podemos extraer una segunda propiedad capital de la estática respiratoria, con repercusión directa sobre la ventilación mecánica que vamos a realizar sobre nuestros niños enfermos:

**Sea cual sea la estrategia ventilatoria que vayamos a utilizar sobre nuestros niños enfermos, SIEMPRE procuraremos que al FINAL DE LA INSPIRACIÓN el volumen que alcancen sus pulmones sea (como máximo) la *CPT* que tendría si estuviera sano, y al FINAL DE LA ESPIRACIÓN sus pulmones tengan (como mínimo) la *CRF*: el volumen que tendrían si estuvieran sanos.**

## 2.- DINÁMICA DE LA RESPIRACIÓN:

En física se define el flujo o caudal de un fluido (en nuestro caso el aire) como la cantidad de volumen del fluido que se mueve por unidad de tiempo:

$$\text{Flujo} = V / t$$

A diferencia de las propiedades “estáticas”, las propiedades “dinámicas” de la mecánica respiratoria se estudian en condiciones en las que existe flujo aéreo: cuando se está produciendo movimiento del aire. Para estudiar con más detalle el comportamiento dinámico del sistema respiratorio utilizaremos unos diagramas en los que usaremos de nuevo el mismo código de colores: las presiones supra-atmosféricas se representarán en color verde, la presión atmosférica en amarillo, y la presión infra-atmosférica (negativa respecto a la atmósfera) en morado. Además, una bolita roja representará nuestra posición respecto al tiempo en cada una de las fases del ciclo respiratorio.

Antes de una inspiración (Figura 10), la musculatura respiratoria (diafragma y músculos accesorios) está en reposo. La tendencia natural a la retracción de la caja torácica hace que en la cavidad pleural (Ppl) exista una presión infra-atmosférica de aproximadamente  $-5 \text{ cmH}_2\text{O}$ , pero la presión alveolar coincide con la de la atmósfera ( $P_{\text{alv}} = P_{\text{atm}} = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ ), por lo que no hay flujo de aire. La PTP es  $PTP = 0 - (-5) = +5 \text{ cmH}_2\text{O}$ , y ello lleva el volumen pulmonar a Capacidad Residual Funcional (CRF), el volumen de reposo del sistema respiratorio.

La inspiración se inicia, inmediatamente antes de que comience a entrar el aire, con la contracción de los músculos inspiratorios (Figura 11). Ello disminuye la presión del espacio pleural (Ppl): la hace más negativa. Durante ese instante inicial no hay aún entrada de aire: el pulmón no ha cambiado de volumen, y eso sólo puede significar (ver antes) que inicialmente la PTP se ha mantenido constante. La única forma de que esto se produzca es que, inmediatamente antes de que comience a entrar el aire, la caída de la Ppl provoca **una caída de la Palv en la misma magnitud**. Es esa caída de la Palv a niveles inferiores a la Patm la que genera el gradiente para que se produzca la entrada de aire.

La caída de la Pavl genera un flujo de entrada (Figura 12) que produce que los pulmones vayan llenándose de aire y ganando volumen. El cambio en el volumen pulmonar incrementa paulatinamente la PTP: la contracción de la musculatura hace caer aún más la Ppl, pero la entrada de aire a los alvéolos no deja caer mucho la Palv. Esta situación se mantiene durante toda la inspiración hasta que, en la fase final (**Figura 12B**) la contracción muscular es máxima y el volumen pulmonar y la PTP

alcanzan su valor máximo, pero la  $P_{alv}$  y la  $P_{atm}$  se igualan y cesa el flujo de aire. Se produce la pausa inspiratoria.

Tras la pausa inspiratoria se produce **bruscamente** el cese total de la contracción de la musculatura respiratoria (**Figura 13**). El pulmón mantiene su volumen máximo, y ello significa que la PTP es idéntica a la que había durante la pausa inspiratoria (no hay aún pérdida de volumen), pero el cese de la contracción muscular convierte la  $P_{pl}$  en cero. Toda la PTP se debe ahora a la  $P_{alv}$ , que alcanza valores máximos debido a la tendencia a la retracción pasiva del tejido pulmonar. El incremento de la  $P_{alv}$  por encima de la atmosférica origina el flujo de salida del aire (**Figura 14**).

Una vez ha salido todo el aire (**Figura 15**) cesa el flujo: la presión alveolar y la atmosférica se igualan ( $P_{alv} = P_{atm} = 0 \text{ cmH}_2\text{O}$ ), y la  $P_{pl}$  vuelve a su valor de reposo ( $P_{pl} = -5 \text{ cmH}_2\text{O}$ ). La PTP se hace de  $5 \text{ cmH}_2\text{O}$ , y el pulmón se mantiene en un volumen igual a la CRF. El proceso vuelve a comenzar.

### 2.1- Resistencia de la vía aérea:

En resumen de lo dicho, y como ocurre en toda dinámica de fluidos, la experiencia empírica nos enseña que en la dinámica respiratoria rige un principio general:

**En el interior del sistema respiratorio, el aire se mueve ÚNICAMENTE (y siempre a favor) si existe GRADIENTE DE PRESIÓN.**

Si no hay gradiente entre la boca y los alvéolos, no existe movimiento (entrada o salida) del aire. Si la presión alveolar ( $P_{alv}$ ) es menor que la atmosférica ( $P_{atm}$ ), el aire entrará en los alvéolos y si la  $P_{alv}$  es superior a la  $P_{atm}$ , el aire saldrá de los alvéolos. Cuando ambas presiones coincidan el flujo del aire cesará. Entendido al revés este principio suele tener mucha mayor aplicación práctica en la ventilación mecánica: **si el aire se está moviendo (o sigue moviéndose) es siempre porque existe un gradiente de presión.**

Este principio general puede expresarse matemáticamente, mediante la famosa relación que gobierna la dinámica de todos los fluidos:

$$\text{Flujo} = \Delta P / R$$

El flujo de un fluido que pasa por un tubo es directamente proporcional al gradiente de presión entre los dos extremos del tubo, e inversamente proporcional a la **RESISTENCIA** que oponen las paredes del tubo al paso de este fluido. Despejando en

esta ecuación obtenemos la fórmula de la **RESISTENCIA** del sistema respiratorio al paso del aire por su interior, la propiedad que va a caracterizar el sistema desde el punto de vista físico. **Su valor normal depende, sobre todo, del calibre del TET** (de la cuarta potencia de su radio):

$$R = \Delta P / \text{Flujo}$$

## 2.2- Fundamento fisiológico de la Presión de Soporte:

Cuando al inspirar, el enfermo es incapaz de generar suficiente fuerza de contracción muscular como para disminuir la Ppl a una cifra verigracia inferior a  $-7 \text{ cmH}_2\text{O}$ , se produce la situación que refleja la **(Figura 16)**. Como la Palv coincide con la atmosférica, la PTP máxima será de  $+7 \text{ cmH}_2\text{O}$ , y el pulmón no podrá llenarse casi de aire. Es lo que ocurre clínicamente cuando el paciente entra en fracaso respiratorio **(Figura 16A)**.

Si ahora **(Figura 16B)**, y sólo durante el tiempo que dura la inspiración, somos capaces de presurizar rápidamente la vía aérea para que la Palv suba hasta un valor preestablecido (llamado **presión de soporte**), con el mismo esfuerzo muscular (Ppl =  $-7 \text{ cmH}_2\text{O}$ ) la PTP se hace mucho mayor, y el pulmón alcanza un volumen inspiratorio mucho más alto. Cuando cesa la inspiración, la vía aérea se despresuriza pero ocurre igual que en la ventilación espontánea: el cese de la contracción muscular convierte la Ppl en cero. Toda la PTP se debe ahora a la Palv, que alcanza valores máximos debido a la tendencia a la retracción pasiva del tejido pulmonar. El incremento de la Palv por encima de la atmosférica origina el flujo de salida del aire (ver antes).

Así que para que funcione la Presión de Soporte, necesitaremos: una manera de saber que la inspiración comienza (trigger inspiratorio), un valor de presión a la que presurizar la vía aérea sólo durante la inspiración, y una manera de saber que la inspiración ha terminado (trigger espiratorio o ETS).

## 3.- FÍSICA DEL FUNCIONAMIENTO CONJUNTO: CONSTANTE DE TIEMPO:

Para poder analizar cómo las propiedades estáticas y dinámicas actúan conjuntamente, los físicos estudian el funcionamiento conjunto del sistema respiratorio modelizándolo en el laboratorio mediante un simulador. El dispositivo experimental más comúnmente utilizado es el denominado **CUERPO DE MAXWELL**: un aparato constituido por un muelle y una caja de rozamiento conectados en serie. La elasticidad del muelle simula la COMPLIANZA del sistema y el rozamiento del pistón simula la RESISTENCIA del sistema.

La **(Figura 17)** esquematiza el comportamiento de un cuerpo de Maxwell sometido a tracción brusca desde su posición de equilibrio hasta un desplazamiento fijo (en la Figura denominado  $\Delta L$ ). Como se observa, la tracción del extremo del muelle una distancia  $\Delta L$  genera un desplazamiento del pistón la misma distancia  $\Delta L$ , pero lo primordial de la Figura es que hemos de darnos cuenta de que el movimiento del émbolo **NO ES INSTANTÁNEO**. La interacción entre la elasticidad del muelle (Complianza) y el rozamiento del pistón (Resistencia) hace que *necesariamente* el émbolo precise de un tiempo para recorrer esta distancia. De hecho la Figura muestra como la relajación de la presión generada en el muelle decrece exponencialmente con el tiempo. De igual manera, y como un comportamiento intrínseco e ineludible del proceso, la entrega (o recogida) del aire a través del todo el sistema respiratorio tampoco es instantáneo. Tiene un desarrollo exponencial en el tiempo, caracterizado físicamente por una magnitud denominada **CONSTANTE DE TIEMPO** (la llamaremos CT, aunque para la mayoría de los autores se simboliza con la letra griega  $\tau$ ).

En **(Figura 18)** se muestra el trazado de una curva presión-tiempo que aparecerá en la pantalla de un respirador mecánico que trabaje a flujo constante (“volumétrico”), y que estudiaremos en el capítulo correspondiente. Como se ve claramente, la fuerza que va a mover todo el proceso de llenado pulmonar (el gradiente de presión generado) precisa alcanzar un valor máximo que puede dividirse en dos componentes: la presión necesaria para vencer la resistencia al flujo ( $\Delta P_{din} = \text{Flujo} \cdot \text{Resistencia}$ ) y, una vez el flujo se haga cero, la presión necesaria para mantener el pulmón distendido ( $\Delta P_{est} = \text{Volumen}/\text{Complianza}$ ). Matemáticamente, los físicos consideran que en cada instante temporal del proceso, la presión del sistema es la suma algebraica de estos dos gradientes. Por ello, conforme el tiempo inspiratorio va transcurriendo, el valor que va tomando la presión en cada uno de los instantes temporales infinitesimales pueden aproximarse mediante lo que se llama la **ECUACIÓN DE MOVIMIENTO** del sistema respiratorio:

$$dP/dt = V/C + F \cdot R$$

Esta es la ecuación que rige el desarrollo temporal de todo el proceso desde el punto de vista físico, y vemos que depende de dos constantes que simbolizan las dos características físicas del sistema: complianza y resistencia.

Podemos simplificar aún más las cosas si encontramos **UN SOLO PARÁMETRO QUE RESUMA TODO EL COMPORTAMIENTO FÍSICO DEL SISTEMA**. ¿Qué ocurre si multiplicamos ambas constantes?:

$$\begin{aligned} C \cdot R &= V/P \cdot P/F = V/P \cdot P/(V/t) = \\ &= L/\text{cmH}_2\text{O} \cdot \text{cmH}_2\text{O}/(L/\text{seg}) = \text{seg} \end{aligned}$$

El producto de complianza y resistencia tiene unidades de tiempo, y por ello se denomina **CONSTANTE DE TIEMPO**. Si lo vemos como médicos clínicos, CT resulta un muy buen candidato para ser ese “parámetro mágico” que nos informe de todo el estado físico del sistema. Una vez tenemos conectado al paciente al respirador, la complianza sólo puede empeorar: si se desarrolla patología alveolar C será menor que su valor normal, y cuando empiece a mejorar, C volverá a su valor normal. C sólo se mueve a la baja. Sin embargo R sólo se mueve al alza: si se produce patología de la vía aérea R aumentará, y cuando el enfermo sane, R disminuirá hasta su valor mínimo en el sistema (el determinado por el tamaño del TET). Por ello, si al conectar a un paciente al ventilador, medimos su C y esta está en valores normales ( 1 – 2 cc/cmH<sub>2</sub>O/kg) y CT = C\*R está más elevada que su valor normal, podemos inmediatamente concluir que el problema se debe a un aumento de la Resistencia. Si por el contrario el niño lleva el TET que le toca (y no tiene mocos que lo obstruyan) y CT = C\*R es menor que su valor normal, el problema estará en un deterioro de la C (¿El niño ha desarrollado un SDRA?).

Si consideramos el sistema respiratorio como un cuerpo de Maxwell, y nos ponemos en el eje de tiempo, nos daremos cuenta de que si han transcurrido sólo CT = C\*R segundos (una constante de tiempo) (**Figura 19A y 19B**) , el proceso de llenado o vaciado del sistema **SÓLO SE HA COMPLETADO AL 68%**. La naturaleza exponencial del desarrollo del proceso hace que, para que el proceso se complete al 95% se debe esperar 3 constantes de tiempo. Para que el proceso se realice completamente, se debe esperar de 3 a 5 constantes de tiempo. Si queremos que el gradiente que hemos generado en uno los extremos del tubo (para el llenado pulmonar, en la boca; para el vaciado, en el alveolo) llegue íntegro al otro extremo, deberemos esperar irremediamente de 3 a 5 constantes de tiempo.

Como resumen de esto podemos establecer un nuevo principio general de funcionamiento del sistema: En resumen de lo dicho, y como ocurre en toda dinámica de fluidos, la experiencia empírica nos enseña que en la dinámica respiratoria rige un principio general:

**La CONSTANTE DE TIEMPO es el principal parametro que resume toda la fisiología del sistema respiratorio.**

**BIBLIOGRAFÍA:**

Modificado de Ball WC (1996) Interactive Respiratory Physiology. Johns Hopkins School of Medicine. Disponible en: [http://oac.med.jhmi.edu/res\\_phys/](http://oac.med.jhmi.edu/res_phys/)

---