

## CAPÍTULO XXIX

# Principios de ventilación mecánica

---

*Edgar Celis, MD, FCCM*

*Departamento de Anestesiología y Cuidado Intensivo*

*Fundación Santa Fe de Bogotá*

*Presidente Asociación Colombiana de Medicina Crítica y Cuidado intensivo*

*Carlos Guerrero, MD*

*Departamento de Anestesiología*

*Fundación Santa Fe de Bogotá*

## INTRODUCCIÓN

En los centros hospitalarios donde se atienden pacientes con enfermedades y entidades de alta complejidad, los servicios de urgencia son los receptores de primera línea, y es allí donde se inicia el tratamiento que en muchos casos requiere soporte respiratorio mediante ventilación mecánica.

El personal que atiende urgencias -médicos, enfermeras y técnicos- debe estar familiarizado con los principios generales de la ventilación mecánica.

La ventilación mecánica se hace por medio de ventiladores, que son unidades que proveen las necesidades respiratorias cambiantes de una persona en estado crítico. Su manejo siempre debe estar a cargo de personal especializado, y generalmente se hace en las unidades de cuidado intensivo.

Los objetivos de la ventilación mecánica son:

- Mejorar el intercambio de gas a nivel pulmonar.
- Aliviar la dificultad respiratoria.
- Alterar la relación presión/volumen.

## CLASIFICACIÓN

Los ventiladores se clasifican de acuerdo a las siguientes variables:

- Generación de fuerza inspiratoria.
- Variables de control.
- Variables de fase.

### *GENERACIÓN DE FUERZAS INSPIRATORIAS*

Fuerza es definida como **masa x aceleración**. En términos fisiológicos la fuerza es medida como una presión. Los ventiladores mecánicos deben proporcionar la fuerza que normalmente generan los músculos inspiratorios. De este concepto nace la primera clasificación de los ventiladores, ya sea creando presión positiva o presión negativa extratorácica:

**Ventiladores de presión negativa.** Fueron los primeros ventiladores, inventados en 1928 por Dinker y Shaw. Generan presión negativa que crea presión subatmosférica alrededor del tórax y una presión similar a la atmosférica en las vías aéreas. El gradiente de presión que se produce es suficiente para mover la caja torácica y permitir el ingreso de aire.

**Ventiladores de presión positiva.** Crean una fuerza inspiratoria gracias a presión intrapulmonar positiva. Dentro de la evolución de los ventiladores de presión positiva se pueden diferenciar tres cambios generacionales:

- Primera generación: se caracterizan por un mecanismo neumático de control. Utilizan temporizadores y reguladores neumáticos para aplicar la presión a los pulmones.
- Segunda generación: aparecieron a finales de los años 1960, usaban tecnología electrónica analógica que controlaba los elementos.
- Tercera generación: aparecieron a comienzos de los 80 con el advenimiento de los microprocesadores. Proporcionan un mayor control mejorando de forma dramática la seguridad.

#### *VARIABLES DE CONTROL*

Existen tres factores que afectan los mecanismos de la respiración:

1. Fuerza.
2. Frecuencia.
3. Volumen.

La relación entre presión, volumen y flujo se puede resumir en la ecuación del movimiento del sistema respiratorio:

$$\text{PRESIÓN} = \text{VOLUMEN} / \text{DISTENSIBILIDAD} + (\text{RESISTENCIA} / \text{FLUJO})$$

En esta ecuación la resistencia y la distensibilidad son generalmente constantes (inherentes al paciente). La presión, el flujo y el volumen cambian durante el tiempo, es decir, son las variables que pueden ser modificadas por el operador. De la ecuación de movimiento se desprende que un ventilador puede modificar una de las tres variables. Los ventiladores, entonces, son clasificados como controladores

del volumen, controladores de presión o controladores de flujo.

**Ventiladores controladores de presión.** En la ecuación de movimiento del sistema respiratorio la presión es determinada por variaciones en el flujo y en el volumen. Son máquinas que permiten un flujo de gas al disparar una válvula accionada por el esfuerzo del paciente o por un mecanismo automático, el cual se mantiene hasta que se alcanza una presión máxima preestablecida.

**Ventiladores controladores de volumen.** Con estos ventiladores el volumen se mantiene inalterado a medida que se cambia la resistencia. El flujo se mantiene constante. De acuerdo a la ecuación de movimiento del sistema respiratorio, si el volumen es la variable controlada y el flujo se mantiene constante debido a su relación con el volumen, la presión debe ser la variable cambiante en presencia a una carga a vencer, que también cambia con el tiempo. La curva de volumen mantiene una caída positiva constante. Se proporciona siempre el mismo volumen independiente de la resistencia que ofrezca el sistema respiratorio del paciente.

**Ventiladores controladores de flujo.** Mantienen un flujo y volumen constantes ante la presencia de una carga variable (resistencia). La diferencia fundamental con los de volumen es que lo miden en forma indirecta con un transductor de flujo. Este es medido y calculado como una función del tiempo.

#### *VARIABLES DE FASE*

El ciclo respiratorio puede ser dividido en cuatro fases diferentes:

1. Transición de la espiración a la inspiración.
2. Inspiración.
3. Transición de la inspiración a la espiración.
4. Espiración.

En este contexto, la presión, el flujo, el volumen y el tiempo son todas variables de fase.

## PARÁMETROS DE VENTILACIÓN

En la actualidad los ventiladores proveen decenas de formas para proporcionar el soporte ventilatorio a los pacientes.

### TIPOS DE VENTILACIÓN

Hay tres tipos diferentes de ventilación:

1. Espontánea.
2. Asistida.
3. Controlada.

La **ventilación espontánea** se basa en la demanda del paciente. El flujo y el volumen están determinados por el esfuerzo inspiratorio del individuo. El flujo se inicia cuando el esfuerzo inspiratorio alcanza el nivel de sensibilidad preestablecido. A mayor esfuerzo inspiratorio mayor será el flujo obtenido.

La **ventilación asistida** se inicia cuando el esfuerzo inspiratorio del paciente es igual al nivel de sensibilidad determinado por el operador del ventilador.

En la **ventilación controlada** el paciente es ventilado de acuerdo a las variables de control preestablecidas por el operario. En ausencia de un esfuerzo inspiratorio del paciente, el ventilador proporciona la respiración controlada.

## MODOS DE VENTILACIÓN

### VENTILACIÓN MANDATORIA CONTROLADA

En este modo sólo se proporcionan ventilaciones controladas para reemplazar totalmen-

te la capacidad del paciente. Se inicia a una frecuencia predeterminada y se finaliza de acuerdo a unas variables de ciclo ajustadas por el operador. Puede controlarse por presión o por volumen. La ventilación mecánica controlada por volumen ha sido ampliamente utilizada en pacientes apnéicos como resultado de daño cerebral, sedación o parálisis de los músculos respiratorios.

### VENTILACIÓN ASISTIDA CONTROLADA

En este modo se le permite al paciente iniciar una respiración. La frecuencia es dada por el valor preestablecido en el ventilador o por las respiraciones espontáneas del paciente. En ausencia de un esfuerzo inspiratorio se administra una ventilación controlada. La presión necesaria para alcanzar el volumen corriente deseado puede ser proporcionada únicamente por la máquina o en parte por el paciente.

Aunque los parámetros sean seleccionados adecuadamente, los pacientes realizan cerca de un tercio del trabajo realizado por el ventilador en condiciones pasivas.

### VENTILACIÓN MANDATORIA INTERMITENTE

Este modo de ventilación le permite al paciente respirar espontáneamente entre ventilaciones controladas. La frecuencia del ventilador se adapta para asegurar que el ventilador soporte al paciente en caso de que éste no respire.

### VENTILACIÓN MANDATORIA INTERMITENTE SINCRÓNICA (*Synchronous Intermittent Mandatory Ventilation, SIMV*)

Las respiraciones proporcionadas por la máquina están sincronizadas con las respiraciones espontáneas del paciente. La sincronización se obtiene al dividir la frecuencia respiratoria en ciclos de SIMV. Al paciente se le permite respirar espontáneamente durante esos

ciclos. Si no se detecta esfuerzo inspiratorio, se inicia ventilación controlada justo en el comienzo del siguiente ciclo de SIMV.

#### *VENTILACIÓN MINUTO MANDATORIA EXTENDIDA*

Este modo se basa en la ventilación espontánea del paciente. El operario determina un volumen minuto mínimo que el paciente debe mantener, luego ajusta en el ventilador el flujo y el volumen necesarios para mantener este volumen minuto.

#### *VENTILACIÓN CON PRESIÓN POSITIVA CONTINUA EN LA VÍA AÉREA (CPAP)*

En este modo el paciente respira en forma espontánea. La presión en la vía aérea se eleva con relación a la presión atmosférica con el fin de aumentar la capacidad residual funcional. El flujo se administra una vez se alcanza el nivel predeterminado de sensibilidad.

#### *VENTILACIÓN CON PRESIÓN POSITIVA AL FINAL DE LA ESPIRACIÓN (PEEP)*

El término PEEP significa que la presión en la vía aérea es elevada por encima de la presión atmosférica una vez se completa la espiración. El principal efecto benéfico del PEEP es el aumento de la  $PaO_2$ , lo que permite disminuir la fracción inspirada de oxígeno ( $FiO_2$ ) con la consecuente reducción del riesgo de toxicidad por oxígeno. Distiende las unidades pulmonares ya abiertas, lo que previene el colapso de los alvéolos inestables, reclutando unidades pulmonares colapsadas y distribuyendo líquidos dentro del pulmón.

Los diversos métodos que se utilizan para producir PEEP se basan en aumentar la resistencia durante la espiración. Esto trae como consecuencia aumento de la presión intratorácica y disminución del retorno venoso, lo que

puede repercutir en forma importante sobre el gasto cardiaco.

Se han empleado tres niveles de PEEP:

1. PEEP fisiológica de 1-5 cm de agua. Se usa primordialmente en el postoperatorio inmediato y en el trauma.
2. PEEP convencional de 5-20 cm de agua. Busca mejorar la capacidad residual funcional en pacientes con lesión pulmonar moderada a severa.
3. Super PEEP, prácticamente en desuso. En 1975 se introdujo el término "mejor PEEP", el cual se refiere al PEEP que produce un máximo efecto sobre la capacidad residual sin producir efectos deletéreos en la función cardiopulmonar.

#### *VENTILACIÓN CONTROLADA POR PRESIÓN CON RELACIÓN INSPIRACIÓN/ESPIRACIÓN INVERTIDA*

En esta forma de ventilación el tiempo inspiratorio es mayor al espiratorio. El efecto final es una elevación en la presión al final de la espiración. Esto ocurre debido a que el tiempo espiratorio no es lo suficientemente prolongado como para permitir la salida del gas de los pulmones antes de que se inicie un nuevo ciclo. El aumento de la presión en este caso se denomina auto-PEEP.

#### *VENTILACIÓN CON PRESIÓN DE SOPORTE*

La presión de soporte aumenta el esfuerzo espontáneo del paciente por medio de presión positiva determinada. El paciente no tiene que realizar un trabajo tan elevado para mantener su ventilación espontánea. El volumen corriente está determinado por el esfuerzo inspiratorio del paciente, la presión positiva del ventilador y la impedancia del sistema.

Este modo ventilatorio tiene dos subdivisiones:

1. Ventilación controlada por presión (*Pressure Controlled Ventilation, PCV*).

## 2. Ventilación con presión de soporte (*Pressure Supported Ventilation, PSV*).

La PCV es utilizada primordialmente cuando se requiere soporte ventilatorio en pacientes con lesión pulmonar leve a moderada. Se inicia con PCV y a medida que la presión pulmonar va mejorando se cambia a PSV con niveles de presión de soporte menores a 20 mmHg. La PSV generalmente se utiliza con SIMV.

### *VENTILACIÓN DE ALTA FRECUENCIA*

Ventila a los pacientes con frecuencias inusualmente altas y volúmenes corrientes bajos. Está indicado en neonatos entre 23 y 41 semanas de edad gestacional. La frecuencia puede estar entre 150 y 1.500 ventilaciones por minuto. A medida que aumenta la frecuencia se administra volumen corriente cada vez más bajo, al punto que la ventilación alveolar ocurre con volúmenes menores al espacio muerto. El intercambio gaseoso en este modo ventilatorio no es completamente entendido, pero se cree que está basado en la mezcla de gases que ocurre debido a la turbulencia causada, ya sea por las divisiones bronquiales o por flujos pico instantáneos altos.

### *VENTILACIÓN DIFERENCIAL*

En este tipo de ventilación se usa un tubo endotraqueal de doble luz, el cual se conecta a dos ventiladores diferentes que son ajustados a las características mecánicas (distensibilidad) de cada uno de los pulmones. Está indicado como primera línea en el manejo de entidades como hemoptisis masiva, proteinosis alveolar, riesgo de aspiración interbronquial y en trasplante pulmonar unilateral. También se usa en el manejo de enfermedades pulmonares unilaterales o asimétricas y en el tratamiento de fístulas broncopleurales que no responden al manejo tradicional.

### *VENTILACIÓN EN POSICIÓN PRONA*

La ventilación en posición prona ha sido descrita como un método que mejora en algunos casos la oxigenación en los pacientes con SDRA. Varios mecanismos pueden explicar el aumento de la oxigenación vista en la posición prona:

- Reexpansión de consolidaciones dorsales.
- Mejoría del drenaje de secreciones relacionado con cambios ejercidos por la fuerza de gravedad.
- Distribución más homogénea del flujo sanguíneo.
- Menor compresión del corazón sobre algunas áreas del pulmón.
- Aumento de la capacidad residual funcional.
- Mayor distensibilidad de la caja torácica.

La ventilación prona debe estar disponible entre los recursos utilizados en las unidades de cuidado intensivo. Su utilidad está soportada en los resultados de varios estudios. El uso debe estar sujeto a la experiencia y seguridad ofrecidas por el personal médico y de enfermería de la unidad.

## **INDICACIONES DE VENTILACIÓN MECÁNICA**

Las indicaciones para utilizar ventilación mecánica derivadas de un estudio internacional con 1.638 pacientes en ocho países son (Esteban et al 2000):

1. Falla respiratoria aguda 66%.
2. Coma 15%.
3. Exacerbación de la EPOC 13%.
4. Enfermedades neuromusculares 5%.

## RETIRO DE LA VENTILACIÓN MECÁNICA (*WEANING*)

En la mayoría de los casos el paciente que recibe ventilación mecánica puede reasumir la respiración con poca o ninguna dificultad. Cerca de 20-30% de los pacientes fallan en los intentos iniciales de discontinuar la ventilación mecánica. En general cerca de 40% del tiempo que el paciente recibe ventilación mecánica es utilizado en tratar de retirarla.

Las fallas en los intentos de retiro de la ventilación mecánica se deben más comúnmente a disfunción de los músculos respiratorios, la cual resulta del desequilibrio entre la capacidad neuromuscular del sistema respiratorio y la carga de trabajo que debe ejercer. La hipoxemia es una causa menos común de fracaso.

En general no se debe iniciar el retiro de la ventilación mecánica en el caso de inestabilidad hemodinámica o hipoxemia persistente. Las variables usadas para predecir el éxito del retiro del soporte ventilatorio se pueden dividir en aquellas que evalúan el intercambio gaseoso, las que evalúan la fuerza muscular y las que tratan de evaluar la integración de ambas.

Entre los criterios de oxigenación están:

- $\text{PaO}_2 > 60$  mmHg con  $\text{FiO}_2 < 40\%$ .
- Gradiente alveolo arterial  $< 300$  mmHg.
- PEEP  $< 5$  cm de agua.

Entre los criterios ventilatorios se tienen:

- $\text{PaCO}_2 < 50$  mmHg.
- $\text{pH} > 7,4$ .
- Frecuencia respiratoria  $< 30$  por minuto.
- Volumen corriente espontáneo  $> 5$  ml/kg de peso.
- Capacidad funcional vital mayor 10 mL/kg de peso.
- Presión inspiratoria máxima  $< 20$  cm de agua.

El método original de retiro del ventilador utilizaba un tubo en T en periodos de cinco minutos, los cuales eran gradualmente prolongados de acuerdo con el estado del paciente. Cuando el individuo era capaz de mantener la ventilación espontánea por un tiempo de 2 horas, se realizaba la extubación.

La ventilación mandatoria intermitente (VMI) y la presión de soporte fueron introducidos a comienzos de los años 1970 y 1980, respectivamente. En la actualidad son técnicas ampliamente utilizadas para retirar la ventilación mecánica. Cuando se usa VMI se reduce la frecuencia del ventilador en forma escalonada (1-3 respiraciones por minuto). Cuando se usa la presión de soporte, se reduce el nivel de presión en forma paulatina (3-6 cm de agua) de acuerdo con la frecuencia respiratoria.

Otro método posible es el empleo de respiración espontánea a través de un tubo en T, realizado en un sólo intento. Si el paciente puede mantener la ventilación espontánea por 30-60 minutos sin dificultad respiratoria, puede ser extubado. Si se presentan signos de dificultad, la prueba finaliza y se reinicia la ventilación mecánica. Para permitir a los músculos respiratorios recuperarse del estrés de la prueba, se ventila al paciente con un alto nivel de asistencia por un periodo de 12-24 horas. Posteriormente se vuelve a intentar el retiro del ventilador.

## COMPLICACIONES DE LA VENTILACIÓN MECÁNICA

La ventilación mecánica invierte la fisiología normal de la ventilación, al crear presión positiva durante la fase inspiratoria que produce una serie de alteraciones sobre la circulación sistémica, el gasto cardiaco, la circulación pulmonar y el retorno venoso.

El barotrauma es la complicación más común con una incidencia reportada en la literatura de entre 7-25%. Se puede presentar en forma de neumotórax, enfisema mediastinal y enfisema subcutáneo. La frecuencia está más relacionada con la patología de base que con el nivel de presión máximo en la inspiración.

El neumotórax generalmente se evidencia por un incremento súbito en la presión inspiratoria pico. Si el barotrauma lleva el neumotórax a tensión, aparece inestabilidad hemodinámica, convirtiéndose en una verdadera emergencia médica.

Prácticamente todos los pacientes intubados que permanecen en la unidad de cuidado intensivo son colonizados por los gérmenes predominantes en las primeras 48 horas. Cerca de 20% desarrollan neumonía nosocomial.

Los pacientes sometidos a ventilación mecánica con presión positiva pueden desarrollar atelectasias, debido a que la presión se dirige preferencialmente a las zonas pulmonares con mayor distensibilidad. Las zonas con menor distensibilidad reciben así menor volumen, tendiendo a formar atelectasias.

La reducción del gasto cardiaco asociado con la presión positiva es otra complicación común y seria de la ventilación mecánica. Están implicados varios procesos, como el aumento de la presión intratorácica que produce dismi-

nución del retorno venoso al corazón. También hay desviación del tabique interventricular hacia la cavidad ventricular izquierda, lo que reduce el llenado diastólico.

## LECTURAS RECOMENDADAS

1. American College of Chest Physicians. Consensus Conference: Mechanical Ventilation. *Chest* 1993; 104:1883-1959.
2. Bochar L. Pressure support ventilation. En: *Principles and Practice of Mechanical Ventilation*. Editado por MJ Tobin. McGraw Hill. New York, 1994.
3. Brochard L, Rauss A: Comparison of three methods of gradual withdrawal from ventilatory support during weaning from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 1994; 150:896-903.
4. Caho D, Scheinman D. Weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med* 1998;14:800-819.
5. Dueñas C. Síndrome de lesión pulmonar asociado a ventilación mecánica. *Rev Col Neumol* 2001; 13:121-129.
6. Esteban A, Anzueto A, Alia I. How is mechanical ventilation employed in the intensive care unit? An international utilization review. *Am J Resp Crit Care Med* 2000; 16:1450-1458.
7. Kathleen G. The ventilator. *Crit Care Clin* 1998; 14:463-580.
8. Meade M. An evidence based approach to pressure and volume limited ventilation strategies. *Crit Care Med* 1998; 14:719-723.
9. Ortiz G. Ventilación mecánica. *Rev Col Neumol* 1998; 10:106-111.
10. Tobin MJ. Advances in mechanical ventilation. *N Engl J Med* 2001; 344:1986-1996.