

**FORMACIÓN****Vaporizadores anestésicos***Alberto Gironés Muriel**Hospital Sanitas La Moraleja, Madrid, España***RESUMEN**

El vaporizador ¡Vaporiza!; esa es su función. Y tras esta perogrullada se esconde una serie de procesos que todo anestesiólogo debería, o al menos, intentar conocer. Situarnos frente a un respirador anestésico (o bien, a una estación de trabajo para los más finos) es acercarnos a una maquinaria relativamente reciente. Y a pesar de que los actuales modelos se presentan con diseños futuristas, mostrando variedad de pantallas y lucecitas, encuadrándose ésta más en una consola de un vehículo Tesla que en un dispositivo para ventilar pacientes, la verdad es que la tecnología de un respirador descansa principalmente sobre aspectos mecánicos más que sobre aspectos puramente electrónicos. Y junto al respirador está, casi siempre, el vaporizador. El vaporizador anestésico se ha convertido en un elemento fundamental dentro de la obra de ingeniería que es un respirador y representa, en sí mismo, la labor de un anestesiólogo en quirófano.

Introducción

Situarnos frente a un respirador anestésico (o bien, a una estación de trabajo para los más finos) es acercarnos a una maquinaria relativamente reciente. Y a pesar de que los actuales modelos se presentan con diseños futuristas, mostrando variedad de pantallas y lucecitas, encuadrándose ésta más en una consola de un vehículo Tesla que en un dispositivo para ventilar pacientes, la verdad es que la tecnología de un respirador descansa principalmente sobre aspectos mecánicos más que sobre aspectos puramente electrónicos. Y junto al respirador está, casi siempre, el vaporizador. El vaporizador anestésico se ha convertido en un elemento fundamental dentro de la obra de ingeniería que es un respirador y representa, en sí mismo, la labor de un anestesiólogo en quirófano. Hay que admirar también cómo su funcionamiento tiene mucho de física y poco de electrónica siendo el propósito de este escrito mostrar algo más sobre la evolución y el funcionamiento de estos

aparatos que nos acompañan en nuestra vida profesional.

El vaporizador

El vaporizador ¡Vaporiza!; esa es su función. Y tras esta perogrullada se esconde una serie de procesos que todo anestesiólogo debería, o al menos, intentar conocer. Tenemos el desflurano, el sevoflurano, el isoflurano y el halotano como los principales anestésicos inhalatorios, (éste último resistente a ser relegado en algunos países). Podemos considerarlos como líquidos volátiles a temperatura ambiente. Es decir, son líquidos que deben convertirse en gas para pasar al territorio sanguíneo a través del alveolo. El desflurano tiene una especial característica; una temperatura de ebullición justo por encima de los 23,5° C a nivel del mar (algo menor según ascendemos en altura) por lo que podríamos considerarlo , siendo más quisquillosos, como un semi-gas o un líquido muy volátil.

Si miramos el mundo en su globalidad podemos constatar como en muchos de los quirófanos donde trabajan los anestesiólogos no existe un potente y carísimo aire acondicionado que estabilice completamente la temperatura ambiental de la sala. Es posible que tampoco veamos un moderno vaporizador autocompensado y una moderna monitorización que nos informe del flujo de gas administrado. En otros ambientes hospitalarios, en cambio, los abnegados anestesiólogos trabajan en un *agradable ambiente*, glacial y futurista. Un entorno ideal para el paciente, para el funcionamiento de los gases anestésicos y para el propio anestesta, generalmente semicongelado sentado a la cabecera del paciente. Esa es la estupenda diversidad que ofrece el mundo y nuestra profesión, que solo reseño, para advertir que aplicar gas anestésico no ha sido tan fácil como lo es hoy en día, en el mal llamado primer mundo.

Porque controlar la temperatura ambiente de un quirófano, la velocidad de flujo de gas fresco, la cantidad residual de anestésico que nos queda... Todo eso, y más, importa para calcular la cantidad de anestésico en estado gaseoso que queramos administrar a un paciente. Y hoy, los vaporizadores actuales lo hacen por nosotros.

Recordemos que la presión de vapor de un gas anestésico nos informa de su **volatilidad**. Esa “presión de vapor” solo indica la presión que ejerce el líquido dentro de un sistema cerrado cuando éste alcanza una temperatura determinada. El hecho físico relevante es que la **evaporación** es la fuga de moléculas en la superficie de un líquido hacia una fase

gaseosa. (hasta aquí todo son temas de una educación general básica). Lo interesante sucede cuando esa presión que ejerce nuestro líquido evaporado (presión de vapor) supera la presión que existe en el ambiente o sistema que lo contiene, cuando eso sucede, todo el líquido anestésico **ebulliciona** y se transforma en vapor.

El vaporizador es, por tanto, un dispositivo diseñado para facilitar este cambio de estado y administrar una cantidad controlada de vapor de gas al paciente, ya sea evaporándolo o ebullicionándolo. Para comprender totalmente el funcionamiento de un vaporizador es preciso

haber comprendido el concepto de la presión de vapor de un elemento y las leyes que gobiernan el comportamiento de los gases, pero esa es otra historia.

La física importa

La forma más sencilla de vaporización es hacer pasar un flujo de aire a través de un recipiente cerrado que contiene un líquido. Un símil poético sería la imagen del viento transformado en una agradable brisa marina al acariciar las olas del mar. (quédense solo con la imagen gráfica, por favor).

Este flujo (llamado **flujo vector**) arrastrará consigo moléculas del agente líquido en forma de vapor y las llevará fuera del recipiente. Este es el principio básico en el que descansa la tecnología de un vaporizador.



Si observamos un recipiente por el que pasa un flujo vector observaremos que, tras dejar salir ese flujo cargado de moléculas

	Punto ebullición	Presión de Vapor en C.N
Xenon	-108.1°C	
CO2	-78.5°C	
O2	-183°C	
N2	-196°C	
N2O	-88.5°C	58,8 atm
Enflurano	56.5°C	
Isoflurano	48.5°C	250 mmHg
Halotano	50.2°C	243 mmHg
Sevoflurano	58.6°C	157 mmHg
Desflurano	23.5 °C	667 mmHg
Agua	100°C	17,5 mmHg

de anestésico, se precisa recuperar el equilibrio en la presión de vapor del recipiente. Nuevas moléculas del líquido deberán pasar a la forma gaseosa hasta nivelar de nuevo las presiones. Así pues, con el paso del tiempo veremos como se origina una paulatina evaporación de una parte del líquido y también una disminución del propio líquido. Observamos también que hay una pérdida de temperatura del propio líquido. Esto no me lo invento yo, ya lo dijeron unos señores muy sabios y algo antiguos llamados Joule y Barón de kelvin con su *famosísimo* efecto llamado originalmente: efecto Joule-Kelvin.

Nos encontramos así con el primer problema. Como la volatilidad está relacionada con la temperatura, si existe una pérdida de temperatura, ésta condiciona una menor evaporación y, por consiguiente, un cambio en la cantidad de moléculas que podrían ser arrastradas por el flujo de aire en nuestro vaporizador. Pero esta es solo una de las variables físicas que incide en la precisión de gas anestésico aportado al paciente. Existen otras, como son las alteraciones de presión en el interior del vaporizador que dificultan el flujo constante del aire en la cámara de vaporización... Con todo, el vaporizador anestésico debe diseñarse para mantener una evaporación más o menos constante minimizando en lo posible los factores que inciden en la vaporización de un líquido. Por ello considero importante subrayar alguno esos factores físicos que determinan la concentración de gas anestésico aportado. Todo para comprender el diseño y la evolución de estos mecanismos:

1. La disminución de la temperatura del líquido volátil originado por su propia evaporación (como hemos comentado).

2. La temperatura ambiente existente en quirófano
3. La altura o la presión atmosférica a la que nos encontremos
4. La cantidad de litros minuto, o el flujo de aire que atraviesa el vaporizador
5. Las fluctuaciones de presión registradas dentro del vaporizador.
6. La presión retrógrada a la salida del vaporizador originada por la propia mecánica respiratoria.



Algunos vaporizadores Drager



Algunos vaporizadores Datex-Ohmeda

	Tec 4, 5 y 7 Sevo Tec Aladin Vapor 19 y Vapor 2000 y 3000	Copper Kettle Vernitrol Boyle	Tec 6 (Desflurano) Engström EAS 9010
Método de separación del flujo de aire	De cortocircuito variable: <i>El vaporizador determina la proporción del flujo de aire que atraviesa la cámara de vaporización</i>	De medición de flujo: <i>El anestesiólogo determina la división del flujo de aire que atraviesa la cámara de vaporización</i>	De circuito doble: (medición de flujo automática) <i>Flujos de aire independientes. El sistema controla automáticamente el flujo de aire vector</i>
Método de vaporización	Por sobreflujo	Por burbujeo	Por mezcla de GasVapor: <i>El calor produce vapor que es inyectado directamente en el flujo de gas fresco.</i>
Por método de compensación de la temperatura	Por mecanismos automáticos de compensación	Por medios manuales: Cambios en el caudal de flujo.	Temperatura controlada termostáticamente
Por tipo de calibración	Calibrado para un agente específicamente	Para múltiples agentes inhalatorios	Tec 6: Calibrado para desflurano Engstrom: 3 adaptadores para halotano, enflurano e isoflurano
Por capacidad	Tec 4, con 125ml Tec 5, con 300 ml Vapor 19, con 200ml Aladin, con 250ml	De 200 a 600ml	Tec con 390 ml Egstrom (<i>la botella original</i>)

Una clasificación

Vaporizadores anestésicos hay muchos, y los que tenemos ya canas y décadas hemos conocido unos cuantos. La mejor manera de estudiar esta preciosa obra de ingeniería es catalogándola de alguna manera. Para ello usaremos la clasificación propuesta por Dorsch en 1994 según cinco características funcionales de los vaporizadores: 1º; Por tipo de flujos, 2º; Por tipo de vaporización, 3º; Por el método de compensación de temperatura, 4º; Por el tipo de presión interna y 5º; Por el tipo de calibración). Desde luego hay otras clasificaciones, pero a mi modo de entender, ésta se acerca a los objetivos del presente documento, si bien, es preciso modificarla para entender mejor el funcionamiento de estos aparatos.

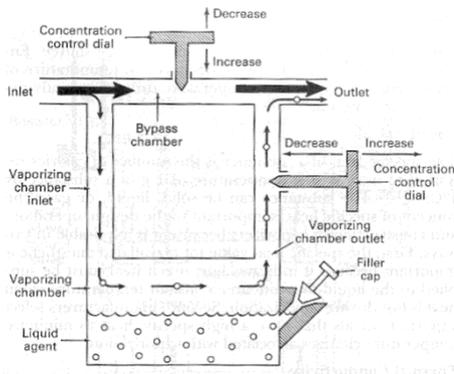
Teniendo como base la clasificación de Dorsch modificada, Para clasificar un vaporizador deberíamos enumerar las distintas características de diseño que pueden tener dicho vaporizador. Algunos comparten varias, otros tienen una característica específica.

El uso del Cortocircuito variable ("bypass")

Esta es una característica de diseño muy utilizada en los vaporizadores que se usan hoy. La característica que lo define es la existencia dentro del propio vaporizador de dos circuitos interconectados por donde circula el gas fresco: 1º; El circuito de vaporización y 2º; El circuito derivado que *bypasea* (perdonen el aforismo) la cámara de vaporización.

Estos dos circuitos vuelven a juntarse en su trayecto final con una mezcla de flujo cargado de anestésico y otro flujo sin contacto con el anestésico. A este grupo

pertenecen la mayoría de vaporizadores actuales como son los Tec 4, 5, 7, los Aladin, los Vapor 19, Vapor 2000 y los Vapor 3000, entre otros.



Estos dos circuitos presentes en el interior del vaporizador tienen su función. Por un lado el primer circuito de vaporización contiene el gas vector, cuya función es recoger el anestésico volátil. Es conveniente obligar a dicho flujo de aire vector a pasar lo más cerca posible de la superficie líquida del anestésico, pues de esta forma, se consigue un eficaz arrastre de vapor anestésico. De este modo se consigue alcanzar un flujo de aire cargado de anestésico a niveles que casi llegan a su presión de vapor.

Rebajar la mezcla

El pequeño problema es que, a unos 20° C, el sevoflurano, el desflurano y el isoflurano tienen una presión de vapor de 157, 667 y 250 mmHg respectivamente. Como resultado de la tozuda ley que Dalton formuló hace años, estas presiones de vapor ofrecen a la salida del vaporizador un flujo de gas con unas altas, por no decir sádicas, concentraciones de anestésico.

Si tomamos los fármacos descritos en el anterior párrafo obtendríamos unas concentraciones de anestésicos del 20%, el 87% y el 32% de halogenado respectivamente. Y sabemos que la CAM de estos anestésicos está muy por debajo de esas cifras. Para no sobredosificar al pobre paciente es necesario diluir piadosamente la

concentración de gas anestésico hasta unos niveles clínicos ...¿Cómo se consigue?

Esta dilución se consigue mediante el desvío de la mayor parte del flujo de gas fresco a través del otro circuito (el flujo derivado) precisamente por el que no pasa por la superficie del anestésico volátil. Los ingenieros han necesitado estrujarse la cabeza para diseñar una máquina que ajuste automáticamente la relación entre el flujo derivado y el flujo de vaporización para así aportar al paciente una concentración de gas anestésico adecuada. Así, cuando ajustamos un sevoflurano al 1% el vaporizador debe ofrecer un flujo de gas al paciente con sevoflurano 1% a pesar de que estemos usando dos, cinco o 7 litros por minuto en nuestros rotámetros.

Cómo se calibra ese porcentaje de gas anestésico

Los vaporizadores modernos, están calibrados para aportar la concentración de anestésico que determinemos mientras usemos unos flujos de aire fresco limitados, que suelen estar entre 0,5 y 12 litros/min.

Para el cálculo de la concentración del anestésico a la salida del vaporizador de doble circuito es necesario asumir que la cámara de vaporización está completamente saturada con vapor anestésico. También es preciso conocer ciertos parámetros físicos que hacen posible ajustar el porcentaje de anestésico a la salida del vaporizador: Estos parámetros son; 1- la presión de vapor del agente (PV), 2- la presión atmosférica ambiental (Patm), 3- el flujo total de gases aportados al paciente (FGF), 4- la relación entre el flujo derivado (Fd) /Flujo de vaporización (Fv), y por último, 5- la temperatura.

El porcentaje de anestésico (A%) que sale de la cámara de vaporización siguiendo la ley de Dalton

$$\% \text{ Anestésico} = \frac{P \text{ vapor}}{P \text{ atmos}} \times 100$$

En el caso del Sevoflurano; $(157/760) \times 100 = 20,65\%$

Otra manera formulación para calcular el porcentaje de anestésico que sale de la cámara de vaporización es

$$\% \text{ Anestésico} = \frac{\text{Vol anestésico}}{(\text{Vol anest} + \text{Vol aire vector})} \times 100$$

Donde el volumen de aire es el Flujo de gas fresco que llega a la cámara de vaporización)

Por lo tanto, juntando las dos ecuaciones y despejando nos queda la fórmula:

$$\frac{P \text{ vapor}}{P \text{ atm}} = \frac{\text{Vol anestésico}}{(\text{Vol anest} + \text{Vol aire vector})}$$

En un vaporizador con circuito derivado, y por tanto, con dos flujos (el de vaporización y el derivado) podemos decir también que el porcentaje final de anestésico obtenido es la mezcla de los dos flujos que se juntan, tanto el de vaporización (Fv) como el flujo derivado (Fd), por lo que podemos expresar la siguiente fórmula:

$$\% \text{Anest} = \frac{\text{Vol anest}}{(\text{Vol Anest} + \text{Fluj vapo} + \text{Fluj deriv})} \times 100$$

Dado que el volumen de anestésico no se conoce, y es la variable que queremos calibrar en nuestro vaporizador la solución es despejar el volumen de anestésico de las ecuaciones anteriores a partir de los volúmenes de aire aportados en la mezcla de gas fresco. Podemos calcular la concentración del anestésico si conocemos los flujos de gas a través de la cámara de vaporización y del circuito derivado. O a la inversa, pues a partir de una concentración de anestésico conocida se puede calcular la relación de ambos flujos.

$$\% \text{Anest} = \text{Fluj Vap} \times \frac{P \text{ vap}}{F \text{ deriv}} \times (P \text{ atm} - P \text{ vap}) + (F \text{ vap} \times P \text{ atm})$$

Es la manera que se tiene de calibrar el vaporizador en condiciones controladas mediante el flujo de aire aportado y la temperatura del anestésico.

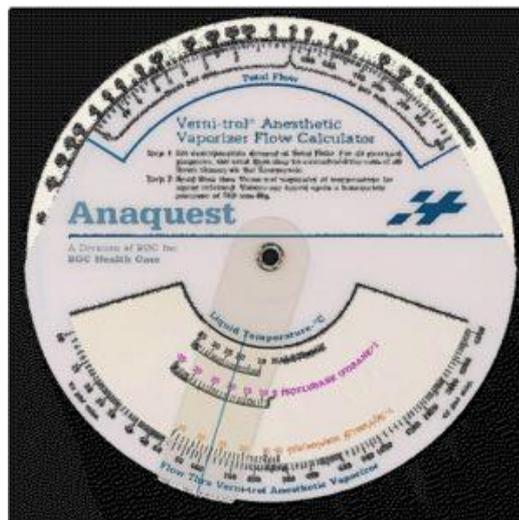


Tabla de ajuste del Verni-trol



Pero no hay que asustarse. No se suele ver a un anesesiólogo con calculadora, papel y bolígrafo mientras el vaporizador mediante el flujo de aire. Pero tampoco es una exageración, pues anteriormente sí era algo habitual. Con el uso de los vaporizadores de burbujeo tipo Vernitriol, se adjuntaban la utilización de unas tablillas o reglas que “facilitaban” la artesana labor de ajustar la concentración de halotano, isoflurano o enflurano mediante los litros/minuto de flujo aportado. Hoy en día eso ya viene de fábrica. El vaporizador queda calibrado y ajustado para ofrecer un flujo estable y una concentración de gas adecuada. Gracias a la ingeniería, toda esta formulación necesaria para comprender cómo se calibran los respiradores se simplifica a la “titánica labor” de girar el dial para elegir la adecuada concentración.

Así pues, recordar que tras el simple gesto de ajustar un vaporizador de sevoflurano al 2% se esconde un cuidadoso proceso de calibración previo que ajusta los dos flujos de gases dentro de los circuitos del vaporizador.

El uso del sistema de flujo cuantificado

¿Y no es mejor ajustar el flujo de aire que pasa por los circuitos de manera independiente? Parece más difícil calibrar el vaporizador para que ajuste automáticamente determinadas concentraciones mediante la mezcla de los dos circuitos que ajustar solo los flujos. Esta es una pregunta sencilla pero con una respuesta más complicada. El método de cuantificar el flujo por separado es más sencillo. Existen vaporizadores cuyo diseño se basa en la existencia de dos circuitos independientes (no *by-paseados*) que necesitan regularse por separado. Estamos hablando de **los vaporizadores con flujo cuantificado**.

Su diseño de base es más sencillo. De hecho, los respiradores/vaporizadores más antiguos solo necesitaban de un elemento más o menos pensante que se encargaba de controlar los dos flujos. Me refiero al propio anestésista con los viejos vaporizadores Copper Kettle o Vernitrol. En ellos se regulaba manualmente los dos flujos con un rotámetro. Después vino la electrónica e hizo posible que dicho flujo



Datex-Egstrom

fuera controlado electrónicamente. Este diseño de control electrónico fue asumido por el vaporizador del Datex-Engström EAS 9010, que controlaba electrónicamente el flujo en los dos circuitos. Después, los modernos vaporizadores electrónicos tipo TEC 6 para el desflurano o el Aladin también asumieron este tipo de flujo controlado en sus diseños. Es decir, el flujo de aire vector es controlado exactamente para aportar la concentración de anestésico buscada, independientemente de los litros/

minuto que aportemos al paciente. Son vaporizadores mucho más exactos, pero también mucho más caros.

La Inyección o la mezcla controlada del gas vapor.

Dentro de los vaporizadores de circuitos cuantificados, ya sea en circuitos dobles o independientes, la regulación puede realizarse antes de entrar en la cámara de vaporización o bien buscar su control con el aire ya cargado de anestésico. Este último tipo de tecnología tiene similitudes con los actuales motores diesel. Es un diseño más actual, más fino... Y más caro, pues precisa de un sistema que busca el control en la mezcla final del flujo del gas vector con el gas fresco. La forma de hacerlo es inyectando un flujo de gas saturado de anestésico en el flujo de gas fresco que se dirige hacia el paciente (obviamente de ahí su nombre)

Para ello es preciso producir un vapor de anestésico muy determinado. Hay que controlar en todo momento la temperatura de la cámara de vaporización para mantener constante la presión de vapor existente. El Vaporizador TEC 6, usado para el desflurano, y el Datex-Engström EAS 9010 utilizan esta inyección controlada del gas proveniente de la parte alta de la cámara de vaporización. Estos vaporizadores tienen otra característica añadida: es preciso que calienten la cámara de vaporización a una temperatura constante que sobrepase la temperatura de ebullición del anestésico. Hemos comentado también como el Aladin se comporta de esa manera cuando existen circunstancias que requieren aumentar la concentración de anestésico.

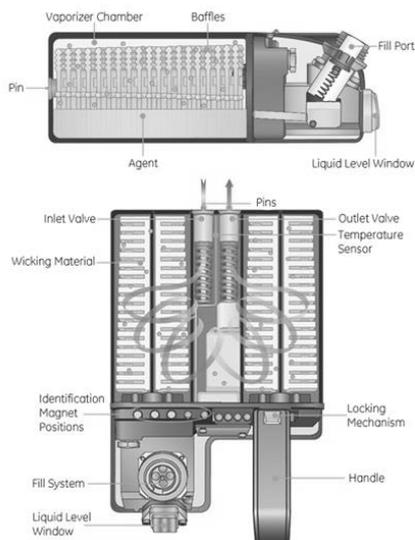
El Datex-Egstrom EAS 9010 es uno de los primeros vaporizadores de inyección electrónicos que se usaron. Hay que admirar la originalidad de su diseño para su tiempo y destacar cómo los ingenieros que lo desarrollaron consiguieron crear una presión constante de 0,4 bar en la botella original del halogenado que el fabricante proporcionaba. Se podía usar tanto el halotano, como el enflurano o el isoflorano). Todo mediante un adaptador especial para la misma botella original y un

flujo de oxígeno calibrado que impulsa el halogenado a la cámara de vaporización cuando era requerido. Allí el vaporizador asignaba una temperatura fijada según sea el agente anestésico (por ejemplo, 75° C para isoflorano) mientras una válvula electromagnética deja pasar bolos de 1ml de gas vapor hacia la corriente de gas fresco. La frecuencia de estos bolos dependía de la concentración de anestésico fijada por el anesthesiólogo. Así de simple, así de complicado.



Parte trasera del Datex-Egstrom con los adaptadores para las botellas de halogenado

El sistema de vaporización por arrastre o sobreflujo (Flow-over)



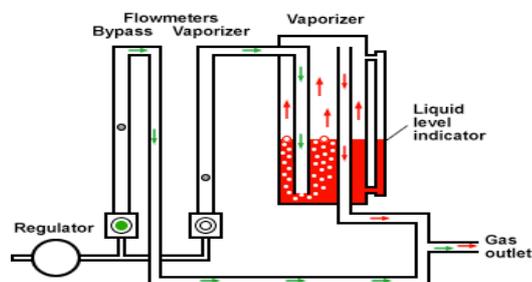
Vaporizador Aladin

Otra gran pregunta que deberíamos hacernos a la hora de catalogar un vaporizador es: cómo vaporiza. Un gran número de los vaporizadores en uso tienen la tecnología de sobreflujo en su diseño frente a la de burbujeo. Los de sobreflujo se basan en el paso (controlado o no) de un flujo de aire a través de una cámara de vaporización. Una cámara donde se

encuentra tanto el anestésico en fase líquida como en fase gaseosa evaporada que posibilita un arrastre de sus moléculas. Los vaporizadores de sobreflujo deben tener unas características físicas estables de temperatura y presión para que dicho espacio genere una presión de vapor constante. También requieren un control del flujo de aire que atraviesa la cámara de vaporización, pues a determinadas litros/min la cámara no es capaz de saturar convenientemente dicho aire.

Los TEC (salvo el Tec 6) y los VAPOR tiene esta forma de vaporización. El vaporizador Aladin también incorpora este tipo de vaporización, aunque cuando se requieren altas necesidades de concentración anestésico (como en el caso de inducciones inhalatorias) o con el empleo de desflurano) presenta un comportamiento más acorde al de un vaporizador de inyección, con la puesta en marcha de un ventilador en su interior que fuerza la circulación del flujo de gas vector.

El sistema de vaporización por burbujeo.



Este tipo de vaporización es la más sencilla frente a la de sobreflujo, y por ello, fue la primera en utilizarse.

El uso de esta técnica para producir vapor de gas desde un líquido se puede ver en los "humidificadores" de oxígeno que están presentes en el ambiente hospitalario (pues usan el mismo principio). El paso de una mezcla de aire u oxígeno a través del líquido anestésico origina un burbujeo y una saturación de halogenado a su paso. Este tipo de vaporización, es menos eficiente y más inexacto que en la vaporización por arrastre o sobreflujo.



Vaporizador Boyle

Pero no hay que menospreciara los vaporizadores de burbujeo pues son el origen real de nuestra especialidad. Son duraderos, no tienen necesidad de enchufe, y desde los tiempos en que Morton desarrolló el primer vaporizador para el éter, fueron evolucionando a la par que los halogenados para poder administrar gas anestésico con seguridad. Por ello dejo en un lugar muy especial a los viejos vaporizadores Boyle, Copper Kettle y Vernitrol, que utilizan esta forma de vaporización. Unos vaporizadores que no precisan de una cámara de vaporización saturada de vapor de anestésico ni disponen de la tecnología de diseño actual pero que han contribuido al desarrollo de nuestra gran especialidad.



Vaporizador Copper Kettle

El control de la temperatura

Los modernos vaporizadores son termocompensados. ¿Por qué? Porque la temperatura del anestésico debe ser constante, como hemos comentado antes. La vaporización de una sustancia implica siempre una pérdida de la fase líquida para transformarse en fase gaseosa (se agota el líquido anestésico). La pérdida de líquido se origina a una velocidad que depende mucho

de la temperatura. Esto no es magia, es simple teoría cinética: la pérdida de temperatura de un líquido evaporándose se origina porque la energía necesaria para romper las fuerzas intermoleculares y la tensión superficial de las moléculas del líquido (y así lograr que sus moléculas libres pasen a una fase gaseosa) es recogida de la propia energía cinética contenida en el líquido... Toda una parrafada que se resume en que la evaporación origina un enfriamiento del líquido.

¿Y por qué es importante mantener la temperatura del líquido anestésico dentro del vaporizador? Pues porque la pérdida de temperatura origina por sí misma una disminución de la presión de vapor, y una disminución de esta presión condiciona una menor saturación del anestésico en el flujo de gas vector tras haber pasado por la cámara de vaporización. Y a estas alturas ya deberías saber que esto originaría una inexactitud inaceptable en la concentración de anestésico administrado.

Así pues, para intentar minimizar este fenómeno, los vaporizadores se construyen con materiales que tengan: **un alto calor específico**. Esta es una magnitud que se refiere a la necesidad de transmitir una gran cantidad de calor para incrementar la temperatura del vaporizador. Un alto calor específico nos ofrece así, una resistencia al cambio de temperatura.

Pero también es adecuado que los materiales del vaporizador presenten una alta conductividad térmica. Esta última tiene una magnitud inversa a la resistencia térmica y se refiere a la capacidad o facilidad de un material de poder transferir calor o energía cinética a sustancias adyacentes a él. De este modo, la temperatura media de un quirófano (20-22° C), debería ser transmitida a la del líquido volátil contribuyendo a mantener la temperatura del líquido más estable dentro de la cámara de vaporización.

Estas razones nos reponen a por qué **el cobre** es el material más empleado en la construcción de vaporizadores, pues ofrece una alta conductividad térmica y un adecuado calor específico.

Hay otras medidas aparte de usar cobre, como es la colocación de mechas o dispositivos que aumentan la superficie de contacto entre el gas vector y el líquido volátil en la cámara de vaporización. Estas mechas están colocadas en contacto directo con la pared del vaporizador con el fin de reemplazar el calor perdido por la evaporación. Podemos decir entonces que la tecnología actual permite homogeneizar el rendimiento de los vaporizadores entre los 20-35° C de temperatura ambiente, mientras que por encima de esa temperatura la concentración de gas entregado es bastante... ¡Impredecible!

La compensación de la temperatura

Todo esto no basta para alcanzar el nivel de precisión que se exige hoy a los vaporizadores. Los ingenieros buscaron así unas soluciones de compensación a través del control del flujo de gas vector como manera de resolver los posibles cambios de temperatura. Dicha modificación del flujo la resolvieron de varios modos:

1- Mediante el ajuste del flujo de aire que pasa a la cámara de vaporización ya sea mediante un ajuste manual o electrónico. Aquí hablamos del cielo o del infierno. El infierno de aquellos años heroicos con los vaporizadores Copper Kettel y los Vernitroles, que necesitaban de una regulación manual a cargo del anestesiólogo que miraba la temperatura del líquido anestésico. Con el uso de unas tablas preestablecidas, modificaba manualmente el flujo de gas vector y ajustaba así la concentración de anestésico. Hoy, en cambio, nos llega el cielo que ofrecen los diferentes sensores de presión y temperatura dentro del propio vaporizador como ofrecen los Aladin y los TEC 6, por ejemplo, y que permiten modificar automáticamente el paso de flujo de gas vector dentro del vaporizador cuando la temperatura en el interior de la cámara de vaporización varía.

2- Mediante el empleo de procedimientos mecánicos o físicos que modulan el flujo automáticamente. Gran parte de los vaporizadores mas contemporáneos, especialmente los de cortocircuito variable, presentan esta solución, pues permiten la

compensación de la temperatura a través del flujo de gas vector mediante el empleo de ciertos elementos metálicos que modifican el flujo a su paso.

El mecanismo es relativamente sencillo. Se consigue mediante una lámina bimetálica o con pequeños elementos de expansión. El aumento o disminución de la temperatura del material metálico origina una contracción o expansión de su estructura, originando a su vez, un cambio de conformación o forma. Ésta nueva forma dependiente de la temperatura es la que condiciona un mayor o menor paso del flujo vector dentro de la cámara de vaporización.

3. La otra solución para compensar la temperatura es que la cámara de vaporización caliente el anestésico hasta una temperatura constante y superior a la del medio ambiente. A través de una resistencia eléctrica dentro del vaporizador se logra mantener al líquido anestésico con una temperatura por encima de su temperatura de ebullición. Los vaporizadores Tec 9, el Egstrom EAS 9010 y el Aladin pertenecen a este tipo de dispositivos. El Tec 9 calienta exclusivamente el desflurano a 39°, mientras que el Egstrom calienta según el tipo de anestésico utilizado (es multifármaco). El vaporizador Aladin tiene un control de dosificación de anestesia con un ventilador electrónico incorporado que incrementa la temperatura cuando es requerido.

El ajuste de la presión interna del vaporizador

El manejo de las presiones durante el ciclo respiratorio también ha inspirado a los ingenieros con la resolución de un problema que se da, sobre todo, en los vaporizadores de mayor uso actual; los de cortocircuito variable.

En una anestesia general, la inspiración respiratoria se genera mediante una presión positiva en el respirador hacia el paciente. Esta presión puede ser transmitida de forma retrógrada hasta la salida del vaporizador. Como resultado de esa presión aparece una resistencia a la salida del vaporizador. La consecuencia es un estado puntual de

ausencia de flujo en el interior del mismo vaporizador. Al no existir un recambio de aire en la cámara de vaporización se produce un aumento sustancial en la concentración de anestésico.

Pero también influye la espiración en las concentraciones que aporta el vaporizador. En la espiración del paciente, al ceder esa presión positiva que posibilita la ventilación la presión a la salida del vaporizador cae de manera brusca. Esto origina un cambio en el sentido de circulación de los dos circuitos presentes en los vaporizadores de cortocircuito variable. El vapor de anestésico sería capaz de circular tanto por el circuito de vaporización como por el circuito derivado de gas fresco, un lugar donde sólo debería pasar un flujo de aire sin vapor de halogenado.

Si no se corrige esta circunstancia la concentración de gas anestésico administrado iría aumentando respecto a la marcada por el dial paulatinamente en cada ciclo respiratorio mediante este efecto, llamado por los eruditos: **mecanismo del efecto de bombeo**.

Este mecanismo es más pronunciado cuando usamos flujos bajos, cuando tenemos bajas concentraciones de gas marcadas en el vaporizador y cuando tenemos bajos niveles de llenado de anestésico. El uso de frecuencias respiratorias altas junto a presiones pico elevadas originan un mayor aumento de esa caída de presión en la espiración. El resultado es un incremento de ese efecto de bombeo.

Soluciones al efecto de bombeo

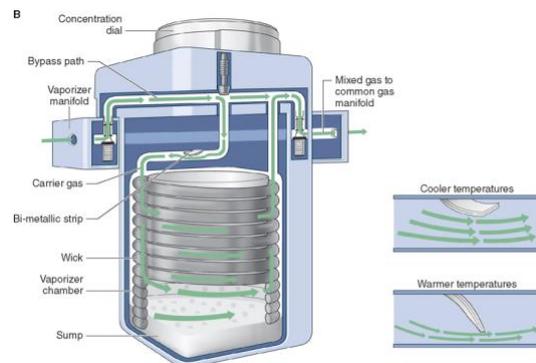
Los más modernos vaporizadores minimizan este efecto mediante diversas modificaciones estructurales. Una ha sido la reducción de la cámara de vaporización para disminuir la posibilidad de comprimir el gas, pues la compresión de un gas es más fácil de hacer con volúmenes grandes.

Otra modificación consiste en incrementar el recorrido del flujo de vaporización mediante un serpentín. El vaporizador Tec 3 fue de los primeros que incorporaron esa medida.

Podemos ver también la eliminación en el lugar de entrada del flujo de vaporización,

de las mechas que facilitan la evaporación y la conservación de la temperatura para no obstaculizar flujo y presiones.

Podríamos pensar que el colocar una simple válvula unidireccional en la salida de los vaporizadores acabaría con el efecto de bombeo. Sin embargo, esta válvula no elimina por completo este fenómeno pues el flujo de gas tozudamente puede fluir desde los rotámetros al vaporizador durante la inspiración (ver el diagrama de diseño para comprenderlo). Por dicha razón, se incorporaron a partir de los vaporizadores Tec 5 y los Vapor 19.3 unas tubuladuras helicoidales o en espiral que minimizan este efecto al alargar el camino hasta llegar a la cámara de vaporización y dificultar que los dos flujos (el derivado y el de vapor) se reúnan antes de lo diseñado



Source: Butterworth JF, Mackay DC, Wainicki JD: Morgan & Mikhail's Clinical Anesthesiology, 5th Edition: www.accessmedicine.com
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

Mecanismos compensadores en los TEC

Otras cuestiones

La importancia del flujo de gas en el rendimiento del vaporizador

La cantidad de flujo de gas fresco que pasa por el vaporizador tiene importancia en el resultado de su rendimiento. Los vaporizadores, especialmente los de cortocircuito variable, están calibrados para aportar una concentración de gas estable a unos determinados flujos. Por encima y por debajo de dichos niveles su rendimiento y precisión puede alterarse según las características de cada vaporizador. Los modernos vaporizadores suelen estar calibrados para flujos entre 0,2 y 10 l/min, con un rendimiento casi lineal cuando se solicitan concentraciones entre 3% y 12% de anestésico. Por regla general, a flujos

menores de 250 ml/min la cosa empieza a fallar y los vaporizadores ofrecen una concentración menor que la que marca el dial, esto es más patente en los vaporizadores de cortocircuito variable. Por otro lado, a flujos superiores a los 10 lpm la capacidad, la cámara de vaporización no puede dar un rendimiento óptimo entre el ritmo de vaporización del anestésico y la cantidad de anestésico que salen de la cámara. Así, cuando se tiene un gran flujo de aire vector circulando en su interior no se puede aportar la suficiente concentración de moléculas de vapor anestésico

Ya es hora de desechar la idea, por tanto, que con vaporizadores de cortocircuito variable, la maniobra de subir los rotámetros al máximo consigue aumentar la concentración de gas aportada. Debemos asumir que, a partir de los 12 litros/min, tan solo estaremos malgastando halogenado.

Para disminuir este problema, los vaporizadores Tec y Vapor, a partir de sus versiones 4 y 19.1 respectivamente, incorporaron una amplia mecha en la cámara de vaporización y un sistema de pantalla que logra generar una mayor superficie de contacto entre el líquido volátil y el flujo de gas vector, incrementando este rendimiento.

Recordar por último, que con el uso de los vaporizadores con inyección electrónica de flujo, como tienen los Aladín, Tec 6 y el Datex-Egstrom, esta merma de rendimiento a flujos altos queda minimizada.

La importancia de la composición del gas vector o transportador

Si hemos estudiado algo de física de gases, sabemos que no es lo mismo aportar un flujo de gas con oxígeno al 100% que con mezcla de N₂O. Aparte de lo evidente (disminución de la CAM) hay diferencias en cuanto a la eficiencia de un vaporizador. Una razón de esto se explica por la diferente solubilidad de estos gases, ya que una parte del gas vector debe diluirse en el anestésico. Hasta que el halogenado se sature completamente de los gases aportados por el gas vector, la cantidad de

gas anestésico que abandona la cámara de vaporización será algo menor. Esa es la razón por la que al añadir N₂O a la mezcla pudiéramos observar pequeñas variaciones transitorias inferiores al 10% en la concentración de halogenado de salida. ¡Eso sí, sin una gran significación clínica! No nos pongamos exquisitos. Por último reseñar que la “normalización” de las concentraciones buscadas se realiza dependiendo del tiempo y de los litros/minuto de flujo aportados que van de los 30 segundos cuando el flujo de gas fresco es de 5 l/m pero puede demorarse hasta 30 min cuando usamos flujos bajos menores al litro/min.

Por otro lado, la diferente viscosidad y densidad del oxígeno frente al aire y al N₂O también influye en la concentración aportada por el vaporizador a la salida del flujo de gas. En un vaporizador de tipo *bypass*, el circuito de derivación lleva únicamente gas fresco, mientras que el circuito de vaporización lleva agente anestésico saturado. Ambos espacios influyen de diferente manera en la resistencia y en los flujos. La relevancia clínica es irrelevante con los halogenados de uso actual salvo con el halotano cuyo estabilizante, el timol, se comporta como una resina que necesita de limpieza y revisión anual de nuestro vaporizador para trabajar en condiciones óptimas.

Y creo que es suficiente por hoy. Este documento escrito es un homenaje para todos aquellos que han contribuido a diseñar un aparato tan familiar y de tan fácil manejo en mi vida laboral. Existen más diseños, más detalles físicos, mejores explicaciones y mayor “envidia científica”, pero como le dije a algún residente... Todo está en los libros.

Correspondencia al autor

Alberto Gironés Muriel
agirones@gmail.com

Enviado a AnestesiaR en febrero de 2018.

