

Correspondencia
E-mail labneumo@lanari.fmed.uba.ar

Principios del funcionamiento de los equipos del laboratorio pulmonar. Transductores de presión

Autor Eduardo Luis De Vito
Instituto de Investigaciones Médicas Alfredo Lanari, Facultad de Medicina,
Universidad de Buenos Aires.

Conocer algo en forma meramente cualitativa es conocerlo de manera vaga. Si tenemos conocimiento cuantitativo (captando alguna medida numérica que lo distinga de un número infinito de otras posibilidades) estamos comenzando a conocerlo con profundidad, comprenderemos algo de su belleza y accederemos a su poder y al conocimiento que proporciona. El miedo a la cuantificación supone limitarse, renunciar a una de las perspectivas más firmes para entender y cambiar el mundo.

Carl Sagan

En el ámbito del laboratorio pulmonar, antes de realizar un adecuado diagnóstico fisiopatológico, es de crucial importancia tener la seguridad que los resultados de los estudios funcionales fueron obtenidos utilizando equipos confiables y con una metodología apropiada. Todas las variables fisiológicas que se miden en los laboratorios pulmonares responden en definitiva a leyes de la física. De manera que todo intento de comprenderla y aplicarla a la fisiología respiratoria nunca será improductivo. El celebrado advenimiento de equipos más compactos y automatizados, con sus indiscutibles ventajas, genera en contrapartida, cierta dificultad para aprehender esos fenómenos físicos. Se produce la paradoja donde el médico debe cumplir con las etapas de puesta a punto de los equipos sugeridas por el fabricante sin saber, quizá, sus fundamentos.

Este es un intento de ofrecer algunos elementos básicos de la operación de equipos biomédicos, instrumentación biomédica y su aplicación al laboratorio pulmonar y la fisiología respiratoria. En este artículo nos ocuparemos de 1) caracterizar los diversos tipos de aparatos que pueden estar disponibles en un laboratorio pulmonar y 2) del funcionamiento de los transductores. En forma deliberada no trataremos las etapas de calibración recomendadas por el fabricante para cada equipo en particular, la calidad y reproducibilidad del estudio, las indicaciones de los procedimientos y

la interpretación de resultados debido a que hay guías disponibles que contienen dicha información.

Características de los equipos

No es infrecuente que en nuestro medio aún coexistan aparatos con tecnología hoy considerada “del pasado” junto a otros que han incorporado las últimas innovaciones en materia de electrónica y de digitalización de señales.

Según el tipo de sistema electrónico

Esta es una vieja forma de caracterizar los equipos que surgió con el advenimiento de los transistores y con la posterior etapa de coexistencia de equipos a válvulas y transistorizados.

- Equipos a válvulas.
- Equipos transistorizados.

Los primeros ya no se fabrican, pero aún pueden hallarse en funcionamiento en algunos laboratorios. En general deben ser encendidos con cierta antelación a su utilización para lograr la estabilidad de sus componentes. Estos equipos utilizan corrientes eléctricas altas, del orden de los 100 - 150 voltios.

La tecnología electrónica logró reunir diversas válvulas en solo unos transistores, integrados y componentes de menor tamaño. Como resultado

de esto, se han logrado equipos compactos que se estabilizan más rápido y utilizan tensiones del orden de unos pocos voltios. Ejemplos: Gould, Physiograph, Hewlet Packard, Medical Graphics, Collins, Sensor Medics, etc.

La señal de estos equipos transistorizados suele llegar a un registrador gráfico sobre algún tipo de papel (tinta, termosensible) para su lectura; pero esa señal también puede ser llevada a un convertido analógico / digital (A/D) y de ahí ser guardada en una cinta magnética (formato PCM en cinta de video u otros) o en una computadora (PC) como se verá luego.

Todos estos equipos disponen de un preamplificador y un amplificador. En esencia, un preamplificador recibe la señal directamente del transductor y la acondiciona entregando una señal suficientemente elevada para excitar a un amplificador. Un amplificador es un dispositivo que magnifica lo que pasa a su través; es decir, es un dispositivo utilizado para aumentar el nivel operativo de una señal de entrada. En general entre ambos dispositivos se encuentran los filtros.

Según los sistemas de instrumentación

Una Señal es cualquier evento que lleve implícita cierta información, diferente de ruido. Sobre una línea eléctrica los datos se envían por modificación del voltaje o la intensidad que circula sobre la misma.

Sobre una onda los datos se envían por modificación de la frecuencia, la amplitud o la fase.

– Señales analógicas y digitales

Las señales de la naturaleza son analógicas (luz, sonido, energía). Tienen una variación continua. Pero las computadoras trabajan en forma discreta y no continua de manera que es necesario efectuar la conversión de las señales *analógicas en digitales*. Para poder ser interpretada por el hombre, se requiere la posterior **conversión digital a analógica**.

La digitalización consiste en realizar de forma periódica, medidas de la amplitud de la señal y presentarlas en formato binario. Surge entonces el concepto de muestreo. Si sobre una señal continua analógica, debo elegir muestras de puntos tomados regularmente (digitalización) lo ideal es que el número de muestras (puntos) sea el mayor posible. Pero esta estrategia puede requerir mucho espacio para guardar la información, por tal moti-

vo, se utiliza la mínima frecuencia de muestreo que permite reconstruir la señal original una vez digitalizada. El Teorema de Muestras lleva a la conclusión que para poder reconstruir una señal analógica, se requiere que la frecuencia con que se toman las muestras (frecuencia de muestreo) sea el doble de la máxima frecuencia espectral que pueda contener la señal.

Si la señal analógica es lenta (flujo en la boca bajo respiración tranquila, presión esofágica), una frecuencia de adquisición de datos de 60 Hz (60 puntos por segundo) será suficiente. Se asume que solo excepcionalmente habrá eventos de 30 Hz en esa señal analógica de presión. Ahora es posible clasificar las tecnologías de los equipos en:

- Tecnología analógica.
- Tecnología digital.

El sistema analógico tiene una morfología de onda o función continua, mientras que un sistema digital utiliza magnitudes que se representan mediante valores discretos y discontinuos en lugar de variables continuas.

La señal biológica origina un cambio de voltaje en el transductor que se puede apreciar en un monitor o puede mover una aguja inscriptora. Con la calibración adecuada es posible leer en términos de unidades de presión y no de voltios. De manera que mediante la tecnología analógica, el voltaje del transductor, sin mayores cambios, es leído en términos de una presión (Ej.: cm H₂O). En la tecnología digital, en cambio, el voltaje del transductor se *convierte* en bits de información (señal discontinua) que se pueden grabar en una cinta magnética (Vetter) o bien en una PC (Flux Med MBMed, Biopac, National Instruments, etc).

Si se usa una PC, la señal de voltaje del transductor en algún momento entrará al ya mencionado conversor A/D. Este es el núcleo central del sistema digital. Mediante programas adecuados la señal se puede analizar en la pantalla. Los sistemas digitales están reemplazando a los sistemas analógicos puros. Los sistemas de datos analógicos se utilizan cuando se requiere un amplio ancho de banda o cuando se puede tolerar poca exactitud. Los sistemas digitales se aplican cuando el proceso físico que en estudio varía poco (ancho de banda angosto) y cuando se necesita una exactitud alta y bajo costo por canal¹.

Un sistema de adquisición de datos analógico tiene algunos de los siguientes componentes (Figura 1). Esencialmente, la señal biológica es traducida a voltaje, acondicionada y amplificada. Finalmente es registrada en algún tipo de inscriptor. Los registradores multicanal analógicos tienen varios de estos sistemas independientes entre sí, que llegan a una vía final común que son las plumas sobre papel. Pero, a diferencia de los equipos digitales, cada canal es independiente del otro (algunos polígrafos para polisomnografía).

Un sistema de adquisición de datos digital es más complejo y sus partes están más interrelacionadas (llevan a cabo cálculos y a partir de ellos tomar decisiones sobre la señal de entrada). Las operaciones esenciales incluyen manipulación de señales analógicas, medición, conversión y manejo de datos digitales y programación, y control interno. Los sistemas digitales pueden ser de un solo canal o de varios y son, en general, más complejos que los analógicos.

Reiteramos que los sistemas digitales requieren convertidores para cambiar voltajes analógicos en números o cantidades digitales discretas. Inversamente, la información digital se puede convertir de nuevo en analógica, como voltaje o corriente, con lo cual puede utilizarse como una cantidad de realimentación que controla ciertos procesos industriales¹.

En muchos casos, la señal o información resultante puede requerir un procesamiento que generalmente está a cargo de un microprocesador, microcomputador o minicomputadora. En la Figura 2 se observa el esquema de un sistema digital de adquisición de datos. El sistema de adquisición de datos trabaja como sigue: Los transductores obtienen energía de la cantidad física a ser medida y producen una señal eléctrica. Esta señal es acondicionada (ancho de banda, nivel, impedancia y ruido). Luego, el multiplexor es responsable de la selección en el momento oportuno (requerido por el procesador) de una de las señales provenientes de los acondicionadores. Con el objeto de que la señal permanezca constante durante el tiempo de conversión, ésta es mantenida con el nivel que tenía al momento de su muestreo, mediante el dispositivo de retención, el cual actúa como una memoria analógica¹. Esta memoria analógica almacena datos en forma temporal, se encuentra antes de la entrada al convertidor A/D y permite el muestreo de múltiples señales en forma simultánea². Luego, el convertidor se encarga de llevar las señales analógicas presentes en el retentor, a forma digital de manera que puedan ser procesadas por el procesador. La información obtenida por éste, puede ser filtrada digitalmente y ser usada para controlar algún sistema, almacenada, mostrada o transmitida a lugares remotos.

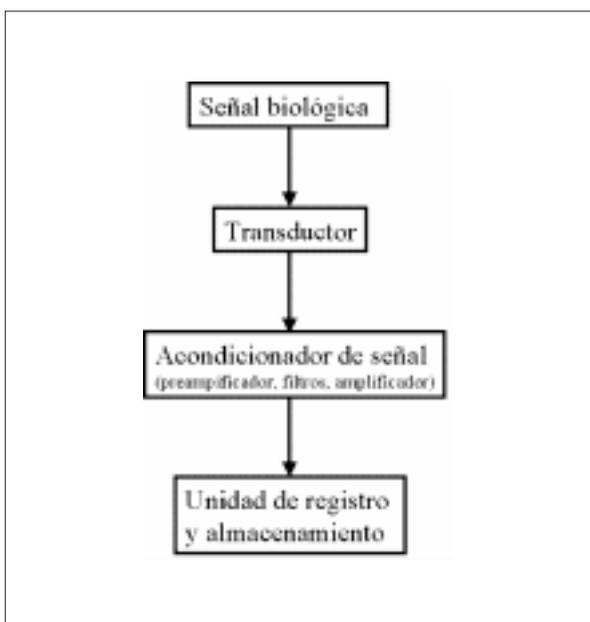


Figura 1: Sistema analógico de adquisición de datos.

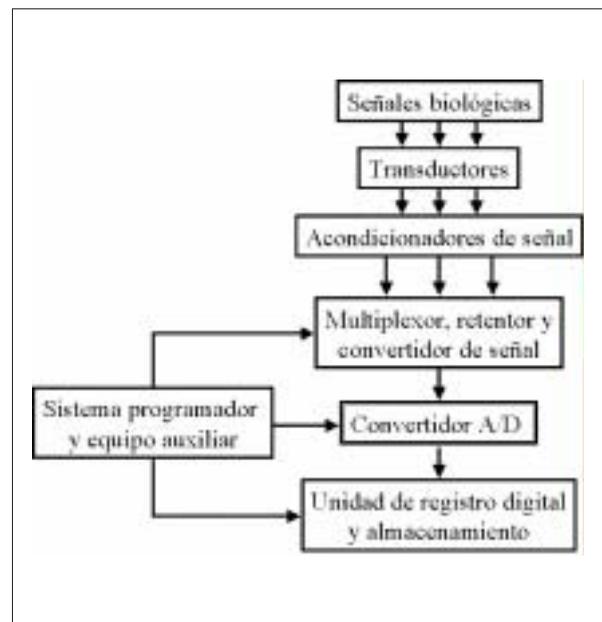


Figura 2: Sistema digital de adquisición de datos.

Pero estos sistemas digitales toman como calibración de referencia la que le indica el usuario: la referencia biológica de una magnitud física (presión de gases o de mecánica respiratoria, flujo, volumen, actividad eléctrica de un músculo, etc.). Si la calibración está mal hecha, los errores de interpretación y diagnóstico pueden ser muy graves. Pero digitalizados.

Equipos según la forma de calibración

De acuerdo a la forma de calibración, se dispone de equipos que “hacen todo solos” y de otros a los que se le debe dedicar algún tiempo antes de comenzar a usarlos. Según esto podemos clasificarlos en:

- Automáticos.
- Manuales.

Los equipos automáticos realizan en forma sistemática estas etapas mediante una rutina que tienen los dispositivos internos y no requieren calibraciones contra valores biológicos conocidos. Pueden tener dispositivos que avisan cuando la calibración se halla fuera de rango. Otros tienen una calibración de referencia que se acciona manualmente y entrega un voltaje conocido que origina una deflexión de la pluma. La magnitud de dicha deflexión puede ser modificada por el usuario para lograr el valor deseado. Ejemplo: algunos equipos para medir presiones mediante el catéter de Swan Ganz deben ser calibrados para lograr una deflexión de la pluma de 50 mm de altura que equivale a 50 mmHg de presión.

Otros equipos requieren calibraciones externas antes de cada uso. Por ejemplo los neumotacógrafos de los espirómetros requieren una calibración con un volumen conocido mediante una jeringa de volumen conocido (como las comercialmente disponibles de 3 litros de máximo que tienen además graduaciones intermedias). Los equipos manuales balanceo manual del transductor y luego deben calibrados mediante la exposición a presiones conocidas (columna de agua). Este aspecto es central para que los datos sean confiables y será ampliado luego.

Equipos según el sistema de registro

- Papel común con inscriptor a tinta.
- Papel termo sensible.
- Papel fotosensible.
- Monitor de rayos catódicos.

Los equipos que usan papel común son baratos y los repuestos de las plumas son de fácil disponibilidad. Los que usan papel termo sensible requieren una aguja que tiene alta temperatura. Se trata de un papel especial y tiene el inconveniente que con el tiempo la impresión puede borrarse (algunos tiras de informe de espirómetros). El papel fotosensible es decididamente poco práctico aunque fue muy usado en el pasado debido a la poca inercia del sistema inscriptor (gráficos de los vectocardiogramas). El monitor de rayos catódicos es muy útil para observar registros continuos, pero debe estar acompañado de un indicador numérico junto a la señal para tener una idea cuantitativa o bien un monitor numérico digital. Debido a que la lectura sobre la pantalla es poco precisa, suelen estar acompañados por algún tipo de registrador en papel para documentar el estudio.

Equipos según la versatilidad, aplicaciones y posibilidades de uso

- Aparatos destinados a fines específicos.
- Aparatos para múltiples propósitos.

Los aparatos para fines específicos tienen una denominación que los identifica: espirómetros, pletismógrafos corporales, saturómetros, capnógrafos, polisomnógrafos, etc. Están específicamente diseñados para una finalidad. Tienen transductores de presión, integradores de flujo, y otros sensores. Lamentablemente estos dispositivos rara vez pueden ser utilizados para otros usos que para los que fueron diseñados.

Un neumotacógrafo para realizar espirometrías, bien se lo podría utilizar para estudiar el patrón respiratorio durante varios minutos. De manera similar, los transductores de presión de los pletismógrafos y sus correspondientes amplificadores, podrían ser utilizados para medir presión intra gástrica y transdiafragmática o bien presión de oclusión bucal (P0.1). Pero esto es muy difícil en los aparatos automatizados cuyos programas están específicamente adaptados, en este ejemplo, a la rutina de espirometría o de pletismografía.

Por otro lado, los aparatos para múltiples propósitos tienen la posibilidad de registrar simultáneamente en varios canales diversas variables respiratorias y visualizarlas en el papel o lo que es mejor aún, permiten guardar la información en una PC. Estos equipos pueden adaptarse a las necesidades del usuario y al tipo de estudio. Sue-

len requerir una calibración más laboriosa de cada uno de los canales y los datos se obtienen en forma menos “automática”, pero con ellos se puede obtener un control total de la señal y, en algunos aspectos, sus posibilidades son enormemente más amplias. No reemplazan a los equipos para fines específicos. Ambos tipos de equipo cubren casi por completo las necesidades de un Laboratorio Pulmonar de cierta complejidad.

Dispositivos para medir presiones

Antes de entrar de lleno en el análisis de los transductores, es oportuno observar que se pueden medir diferentes tipos de presiones. En esencia, se refieren a valores absolutos o diferenciales. En física y disciplinas afines el término **presión**, también llamada **presión absoluta**, se define como la fuerza por unidad de superficie:

$$\text{Presión} = \frac{\Delta \text{ Fuerza}}{\Delta \text{ Area}}$$

En el Sistema Internacional de Unidades se mide en newton por metro cuadrado, unidad derivada que se denomina pascal. Además, en determinadas aplicaciones, la presión se mide no como la presión absoluta sino como la presión por encima de la presión atmosférica, denominándose presión relativa, presión normal, presión de *gauge* o presión manométrica. Consecuentemente, la presión absoluta es la presión atmosférica (presión que se mide con el manómetro). En la Figura 3 se aprecian estas diferencias³.

- **La presión absoluta** se mide con relación al cero absoluto de presión es decir, el vacío perfecto (puntos A y A').
- **La presión atmosférica** es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es de aproximadamente 760 mmHg absolutos (29.9 pulgadas) o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas) o 1013 milibares (hectopascas) y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.
- **La presión relativa** es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (en el punto B de la figura la presión relativa es igual a la presión atmosférica). El aumentar o disminuir la presión atmos-

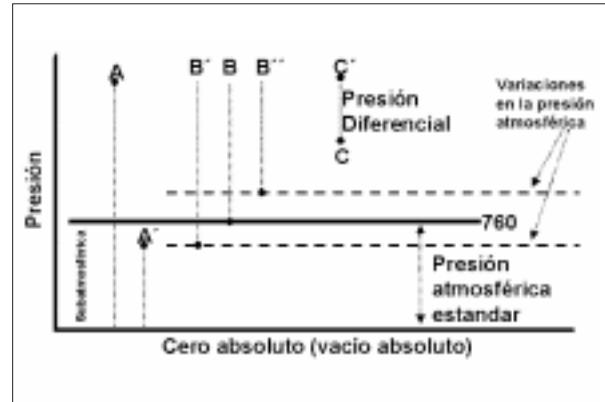


Figura 3: Diferentes tipos de presiones³.

férica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída puntos (B' y B''), si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.

- **La presión diferencial** es la diferencia entre dos presiones (puntos C y C').

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. *Es importante puntualizar que estas diferentes presiones se determinan con instrumentos diferentes*⁴.

En el laboratorio pulmonar la presión atmosférica relativa es utilizada para corregir los volúmenes pulmonares a condiciones BTPS. Las presiones negativas en realidad no existen, son presiones subatmosféricas. Cuando se habla de presiones de - 60 cmH₂O (o 44 cmH₂O; cmH₂O x 0.735 = mmHg) se entiende que esa presión está por debajo de la presión atmosférica, es decir la presión es en realidad de 760 - 44 = 716 mmHg. No es una presión negativa, es subatmosférica.

Los dispositivos para medir presiones se denominan manómetros. Hay diversas clasificaciones de estos instrumentos, nos interesan:

- Manómetros mecánicos
- Electromecánicos y electrónicos.

- Manómetros mecánicos

Los **manómetros mecánicos** de interés son los manómetros en U por ser considerados el patrón oro para calibrar nuestros transductores de presión, y los manómetros aneroides, sencillos y de bajo costo. Los manómetros aneroides (del griego a (sin) y neros (líquido) son también conocidos como barómetros de deformación de sólidos o barómetros elásticos porque utilizan la deformación

producida en un material por la presión del aire sobre un elemento elástico. Dentro de los barómetros elásticos se consideran:

- Cápsula de Vidi
- Tubo Bourdon.

La cápsula de Vidi es usada para medir la presión barométrica como instrumental meteorológico). El tubo de Bourdon es un tubo de sección cilíndrica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Tiene forma de media herradura cerrada en un extremo y en el otro está conectada a la fuente de presión que se va a medir, al cambiar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y hace que la herradura se abra o se cierre dependiendo de una mayor o menor presión y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora. Este sistema es la base del funcionamiento de los manómetros y vacuómetros para medir presiones estática máximas en la vía aérea así como para poner en línea con el circuito de respiradores (CPAP y otros para comprobar las presiones en la vía aérea).

Los manómetros de presión de tipo aneroides son simples, de bajo costo y muy accesibles pero no tienen la posibilidad de registro gráfico. Su principal limitación es la respuesta lenta a los cambios bruscos de presiones. Deflexiones de pocos milisegundos o picos bruscos y transitorios no suelen mover la aguja y por lo tanto no son detectados. Decididamente son útiles y prácticos para medir presiones bucales estáticas (Pimax, Pemax) que requieren una meseta de un segundo, pero son inaceptables para la prueba de sniff nasal (que considera el pico de presión). El control de calidad de estos manómetros se debe hacer mediante chequeos periódicos contra un patrón de presión conocido (manómetro en U).

- *Manómetros electromecánicos o transductores*

Los manómetros electromecánicos utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico. Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos: Transmisores electrónicos de

equilibrio de fuerzas, resistivos, magnéticos, capacitivos, extensométricos, piezoeléctricos. Su descripción excede los objetivos de este artículo.

Estos transductores son dispositivos diseñados para convertir la información original (fuerza de la contracción muscular, tensión tangencial de un músculo, presión resultante de la contracción de los músculos inspiratorios o espiratorios, etc.) en una señal eléctrica, la cual es más fácil de manejar. Es decir, es un dispositivo que convierte algún tipo de energía de entrada en una señal eléctrica de salida. Hay un transductor apropiado para cada tipo de respuesta que se quiere registrar (fuerza, presión, flujo, etc.).

Los transductores de presión suelen recibir para su funcionamiento una corriente eléctrica que le llega desde el preamplificador (denominada corriente de excitación del transductor, continua o alterna) al cual está conectado. La presión actúa sobre la membrana que se deforma y esto origina una corriente de salida del transductor que entra al equipo en forma de voltaje. Así, una señal física como la presión esofágica, bucal, etc. actúa sobre la membrana del transductor, y esto origina una deflexión que se puede leer en un registrador, osciloscopio, pantalla de computadora, pluma de un registrador de papel, etc.

Algunas preguntas sobre los manómetros aneroides y los transductores

Debido a que los equipos que se utilizan en nuestro laboratorio no son eternos, se debe comprobar su correcto funcionamiento. Algunos aparatos tienen sistemas de alarmas cuando la rutina de balanceo y calibración internas detecta fallas o se escapa de cierto margen de tolerancia admitido por el fabricante (Ej.: control de la composición de gases en aparatos para ejercicio). No todos los aparatos tienen este sistema de monitoreo.

- a) *¿Qué aparatos del laboratorio pulmonar tienen esta rutina incorporada y cuáles son los márgenes de tolerancia?*

Los transductores de presión no suelen tener controles de calidad internos y tampoco son eternos. Se descalibran, pierden la linealidad y se hacen menos sensibles a presiones extremas. Algunas marcas tienen una vida útil consignada por el fabricante.

Por todo esto, en todos los equipos que se usan en el laboratorio pulmonar es importante *comprobar* su correcto funcionamiento y no solo *asumirlo*.

b) *¿Qué se debe hacer para comprobar que los transductores funcionan correctamente?*

Se debe tener como idea central lo que se quiere medir y luego se debe decidir si es posible hacerlo con la tecnología disponible. Se ha decidido medir una determinada presión:

- *¿Es posible medirla con la tecnología disponible?*
- *¿Qué valores de presión se espera hallar, positivos, negativos, altos, bajos?*
- *¿Son presiones estáticas o dinámicas?*
- *¿Se espera medir una meseta o un pico?*

Si se dispone de transductores y manómetros:

- *¿Funcionan bien?*
- *¿Qué rangos de presiones son capaces de medir?*
- *¿Tienen una respuesta lineal?*
- *¿Cómo se los debe calibrar?*

Finalmente se dispone de todo el sistema (transductores, conectores, intermediarios, adaptadores, etc.) preparado para su uso:

- *¿Hay fugas de aire?*
- *¿Cómo se puede comprobarlas?*

En las próximas líneas se intentará dar algunas respuestas y se analizará el funcionamiento y calibración de los transductores. *¿Qué se debe tener en cuenta respecto a los transductores?* Esta pregunta es crucial porque define qué tipo de presiones podemos medir y qué tipo de estudios podemos realizar.

Según el tipo de fluido que está en contacto con la membrana del transductor:

- Transductores para medir presiones solo a través del aire.
- Transductores para medir presiones hidrostáticas.

Los transductores para medir únicamente presiones gaseosas suelen ser herméticos, sin posibilidad de acceso al domo debido a que teóricamente no hay que limpiarlos de ningún fluido líquido. Nunca deben llenarse de agua para medir presiones hidrostáticas debido a que si queda agua en su interior, la membrana se deteriora rápidamente por efectos de una reacción química en presen-

cia de oxígeno (oxidación). Ejemplos: Validyne MP 45 y Samborn 256 y 270 diferenciales.

En el segundo grupo se incluyen todos los transductores para hemodinamia derecha y monitoreo invasivo de la presión arterial. La membrana está aislada del líquido mediante un domo descartable (o no). Estos transductores también pueden ser usados para medir presiones en el aire, pero debe convenir retirar la pequeña membrana de plástico que la separa del domo.

Según las presiones que miden:

- Transductores para presión positiva.
- Transductores para presión negativa (subatmosférica).

Los estudios pulmonares a diferencia de los hemodinámicos, suelen generar presiones negativas. En algunos servicios son más accesibles los transductores de presión positiva (hemodinamia derecha con catéter de Swan Ganz). Si bien estos transductores están destinados a medir presiones positivas, tienen extendido su rango a valores de presión negativa (hasta 50 mmHg) y pueden ser usados para tal fin. Pero es conveniente chequear el valor máximo de presión negativa y la linealidad. Estos transductores (Ej.: ISOTEC Statham P23XL, MMT-MP 15) pueden ser usados para medir P_{imax} o P_{0.1} en pacientes que se hallan en UTI. Algunos transductores están diseñados específicamente para medir tanto presiones negativas como positivas con distintos rangos, son muy precisos y utilizados para estudios de mecánica respiratoria (Samborn 270, Validyne MP 45).

Según el rango de presión:

Es esencial definir los **rangos** de presión de cada transductor. Se debe saber hasta qué valor de presión nuestro transductor es útil, si tiene una respuesta lineal y a partir de qué valor pierde dicha linealidad. En un intento de ordenar algunos conceptos y en forma arbitraria, se puede dividir a los transductores según los rangos de presión que miden.

- Presiones bajas: ± 2 a 5 cmH₂O, útiles solo para neumotacógrafos.
- Presiones intermedias: 20 - 50 cmH₂O, útiles para P_{0.1}, Pes, Pga, Ptp.
- Presiones altas: ± 200 cmH₂O, útiles para P_{imax}, P_{emax}.

Según la referencia a otra presión:

- Respecto del cero atmosférico.
- Diferenciales.

Los primeros miden una presión negativa o positiva en referencia al cero. El cero se obtiene exponiendo la membrana del transductor a la atmósfera mediante una adecuada combinación de llaves de 3 vías. En los transductores diferenciales, la membrana se halla entre dos cámaras a las que se puede aplicar presión positiva o negativa. La diferencia entre ambas presiones origina un voltaje final único. Estos transductores se usan para medir: presión transdiafragmática, presión transpulmonar, flujo. Pero si una de las membranas se usa conectada a la atmósfera, pueden ser usados como transductores comunes. Los principios de la medición de la presión en forma diferencial se pueden observar en una columna de mercurio (Figura 4). Los transductores diferenciales tienen el mismo principio: existe un elemento mecánico que se deforma en dirección predecible de acuerdo a las presiones a ambos lados de una membrana. Estos dispositivos tienen una cavidad hueca separada por una membrana. La Figura 5 muestra su funcionamiento, las deflexiones individuales que ingresan al transductor (derecha e izquierda) y las resultantes de salida (centro). Las señales de baja presión de la fila inferior (2, 1 y 1 cmH₂O) bien pueden corresponder a las que pasan a través de un neumotacógrafo, separadas 1 cm una de otra, la deflexión central resultante de salida (adecuadamente calibrada) es el flujo.

Cero, balanceo, calibración y respuesta de frecuencia

Si no se ejerce ninguna presión sobre la membrana, la deflexión resultante se considera que es el **cero** de presión (presión atmosférica relativa = cero). De manera que el cero se obtiene comunicando la membrana a la atmósfera y aislando la fuente de presión que se quiere medir (considerar los diversos conectores y las llaves de 3 vías). La obtención del cero es el punto de referencia a partir del cual se medirá la magnitud de la deflexión y así, la presión resultante.

Hay equipos que no tienen ceros estables, pueden cambiar el equivalente a unos $\pm 1-3$ cm H₂O. Esto hace que las lecturas puedan ser erróneas. La manera de evitar errores es marcar frecuentemente ceros a lo largo del estudio. Esta rutina es indispensable si se quieren obtener datos confia-

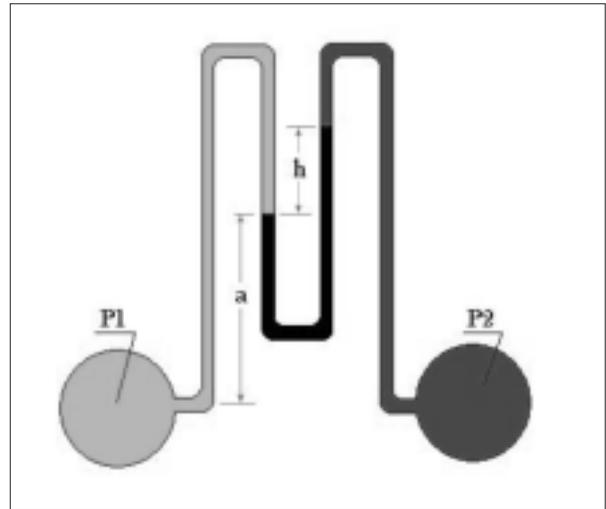


Figura 4: Manómetro diferencial⁵. La columna h (presión diferencial) es el resultado de la presión aplicada P1 y P2. Si la presión en P1 es de 100 y en P2 es de 80, h será de 20. Si P1 es de 100 y P2 es de -80, h será de 180.

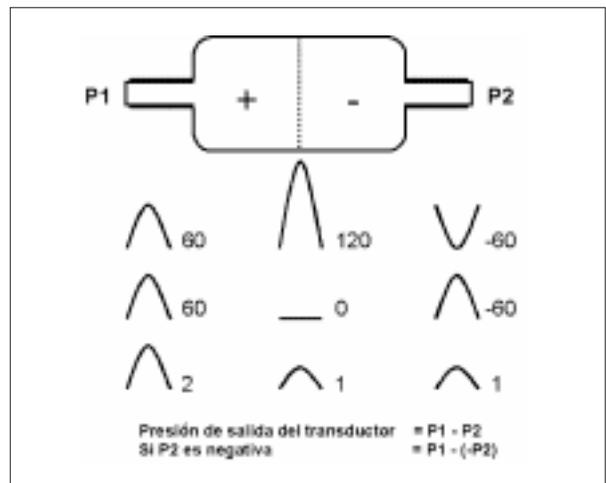


Figura 5: Esquema de un transductor diferencial. Las señales que entran del lado positivo (izquierda), producen una deflexión que mantiene el mismo sentido que la señal; con las señales que entran del lado negativo (derecha), la deflexión se invierte. La señal del centro es la resultante que sale del transductor y pasa al sistema preamplificador-amplificador.

bles en el caso de presiones bajas (presión de oclusión P0.1).

En los equipos que tienen la posibilidad de cambiar la sensibilidad (ganancia), cada cambio de la misma debe ir acompañada siempre de una determinación del cero. Esto es debido a que puede haber problemas de balanceo que se manifiestan al aumentar la sensibilidad. Esto cambia el cero.

Desde el punto de vista eléctrico, el **balanceo** del transductor significa efectuar un procedimiento mediante el cual si la presión de la membrana

es cero (obtenido comunicando el transductor a la atmósfera), el voltaje de salida debe ser cero así como la deflexión resultante en el registrador.

El procedimiento de balanceo se realiza con ciertas variantes que dependen del equipo. Pero todos en algún momento requerirán (en forma automática o no) que se exponga el transductor a la atmósfera para obtener el cero. En algunos equipos es suficiente el contacto de la membrana con la atmósfera para obtener el cero. En otros se debe balancear el transductor con algunos controles manuales. Si el balanceo no está adecuadamente realizado, habrá una presión inexistente que puede influir las mediciones o cambios de cero al cambiar la sensibilidad y los resultados obtenidos no serán correctos.

La **linealidad** del transductor es una propiedad poco explorada y su omisión puede generar errores irreparables en los datos obtenidos. Linealidad significa que el transductor debe ser capaz de registrar una presión que es proporcional a la aplicada.

La linealidad no debe confundirse con la **exactitud**. Esta última es la capacidad del transductor de producir una salida correcta respecto de la entrada. Es decir, si se aplica 10 cmH₂O se espera registrar 10 cmH₂O, si se aplica 20 cm H₂O se espera tener 20 cm H₂O y así hasta el valor de presión esperada. En la Figura 6 se observa una respuesta lineal y exacta (A) y otra lineal pero inexacta (B). En la figura el coeficiente de correlación (r) y el valor de la pendiente (*slope* o b) son de 1, mientras que en la figura B son de 1 y 0.9. Este último valor indica una subestimación del valor real de un 10% para todo el rango de presiones estudiado. Entonces:

- **Linealidad:** Es el grado en que la deflexión de entrada (presión aplicada) y el de salida (presión registrada) se aproxima a una línea recta. Está en relación con el valor r de la curva de regresión.
- **Exactitud o precisión:** Es el grado en que el valor medido se aproxima al valor correcto. Usualmente se expresa en porcentaje de error y está en relación con el valor b de la curva de regresión.

Patrón de referencia de presión conocida

El **patrón de referencia** debe ser más exacto y preciso que el aparato que se desea el sensor

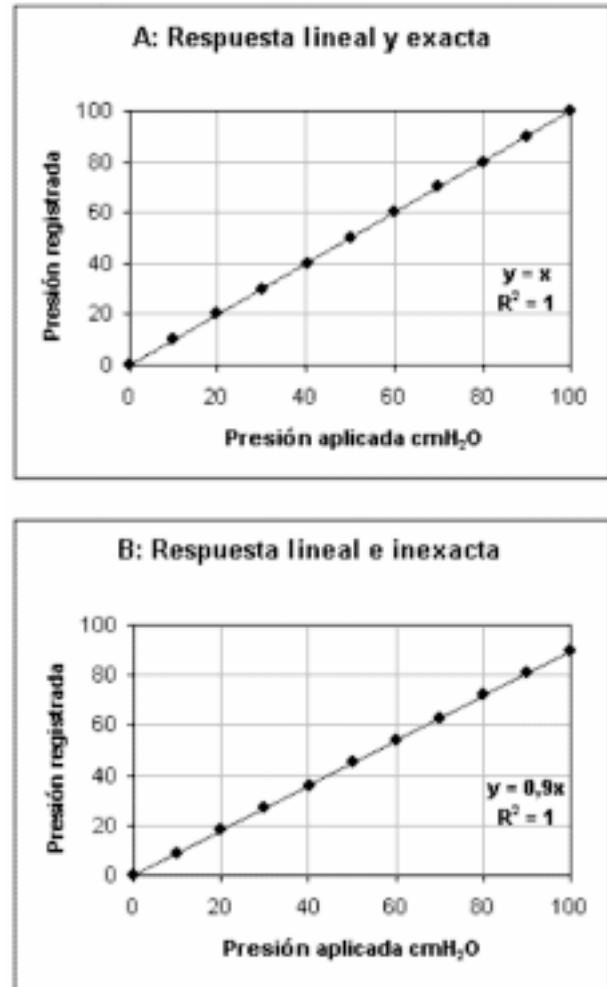


Figura 6: Curva de calibración de un transductor. Respuesta lineal y exacta (A) y respuesta lineal pero inexacta (B). Cuando la presión aplicada y la registrada son idénticas (A), la pendiente de la curva es de 1.0 ($x = y$); en la figura 6B, la presión registrada es un 10% menor que la aplicada ($y = 0.9x$). En ambos casos la correlación (o su coeficiente de determinación) es perfecta ($R^2 = 1$)

que se calibra. La calibración y la exploración de la linealidad requiere exponer al transductor o al manómetro a una presión conocida. El patrón oro para la calibración de presiones estáticas es la columna en U (Figura 7). Puede ser de agua (para precisa para el rango de bajas presiones) o de mercurio (práctica para presiones altas por arriba de media atmósfera). En el laboratorio pulmonar se trabaja en general con bajas presiones; las más altas corresponden a la P_{max} (no superiores a unos 200 cmH₂O). Se prefiere la columna de agua en lugar de la de mercurio, debido a que en caso de medir presiones bajas, el error de apreciación que se genera con la columna de mercurio es mayor (1.34 cmH₂O = 1 mmHg).

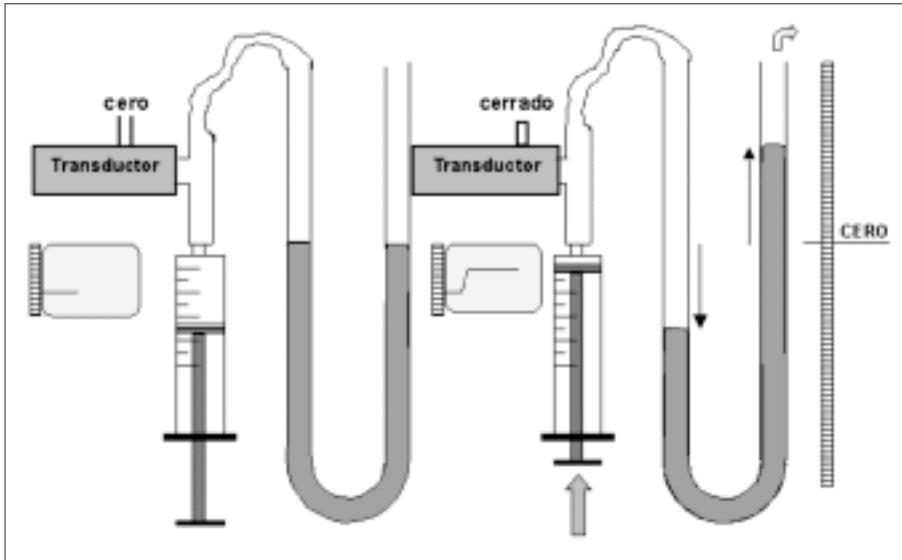


Figura 7: Columna de agua: Método de referencia Universal para calibrar presiones en forma estática. En el esquema de la izquierda se observa el transductor (y todo el sistema) conectados a la atmósfera (cero). Luego de aislar el transductor de la atmósfera, se aplicó una presión mediante una jeringa. La columna de agua se desnivela, la altura entre ambos niveles es el valor de la presión aplicada en cmH_2O . Todo laboratorio pulmonar debería tener una columna de agua.

Es importante mencionar que la columna de agua es útil para medir presiones en condiciones estáticas. No debe usarse para medir Pimax o Pemax directamente sobre la columna, debido a la oscilación remanente del agua al aplicar una presión en forma brusca. La columna de agua tiene muy pobre respuesta de frecuencia y mucha inercia. La columna en U es el patrón de oro de presiones y debería estar al lado de las más populares jeringas de calibración de volumen de los espirómetros. Antes de comenzar a medir, quedan algunas preguntas finales inherentes a todo el sistema de medición.

– *¿Cómo saber si el sistema es hermético?*

Muchos errores de medición en particular el hallazgo de presiones falsamente bajas, o ausencia de meseta de presión, es debido a la presencia de fugas en el sistema que comprende desde el transductor hasta el paciente, y pueden ocurrir en la membrana del transductor y el domo, los catéteres, las llaves de 3 vías, los conectores, las cintas adhesivas, mangueras, abrazaderas, alambres, etc.

El momento de la calibración es adecuado para chequear el sistema. Se sugieren los siguiente pasos a seguir:

1. Conectar el sistema a un extremo de la columna de agua.
2. Generar una presión (preferentemente alta) con una jeringa conectada al sistema mediante una

llave de 3 vías. Se arma una suerte de sistema en T donde con el equipo a chequear, la columna de agua y la jeringa.

3. Se debe mantener el circuito estable, el embolo de la jeringa no debe moverse y se debe observar si la columna de agua se mantiene estable. Si se mantiene luego de unos segundos, (se requiere un poco de paciencia, 10 a 15 segundos) el sistema es hermético.
4. Si la columna cae, esto es inaceptable y hay que solucionarlo. Se debe ajustar y a cambiar un componente por vez (si se toca todo y se arregla, ino se sabrá donde estaba la fuga!).
5. Se puede utilizar agua jabonosa para detectar pérdidas en las conexiones.
6. Si el sistema continúa perdiendo, se debe intentar minimizar la cantidad de conectores e intermediarios, y finalmente es oportuno probar *directamente* el transductor con la columna en U y las conexiones indispensables. Si continúa la pérdida, es posible que la membrana del transductor o el domo sean la causa de la fuga.

Una vez controlado el sistema de tubos y conexiones y habiendo comprobado que no hay fugas se puede pasar a chequear las ya mencionadas linealidad y exactitud de los transductores.

Se debe aplicar una *serie* de presiones para explorar estas propiedades. No es necesario efectuar esta prueba cada vez que se use el transductor. Es importante hacerlo una vez al adquirirlo y luego a intervalos regulares, una o dos veces en el año. La Figura 8 muestra diversas respuestas posibles de

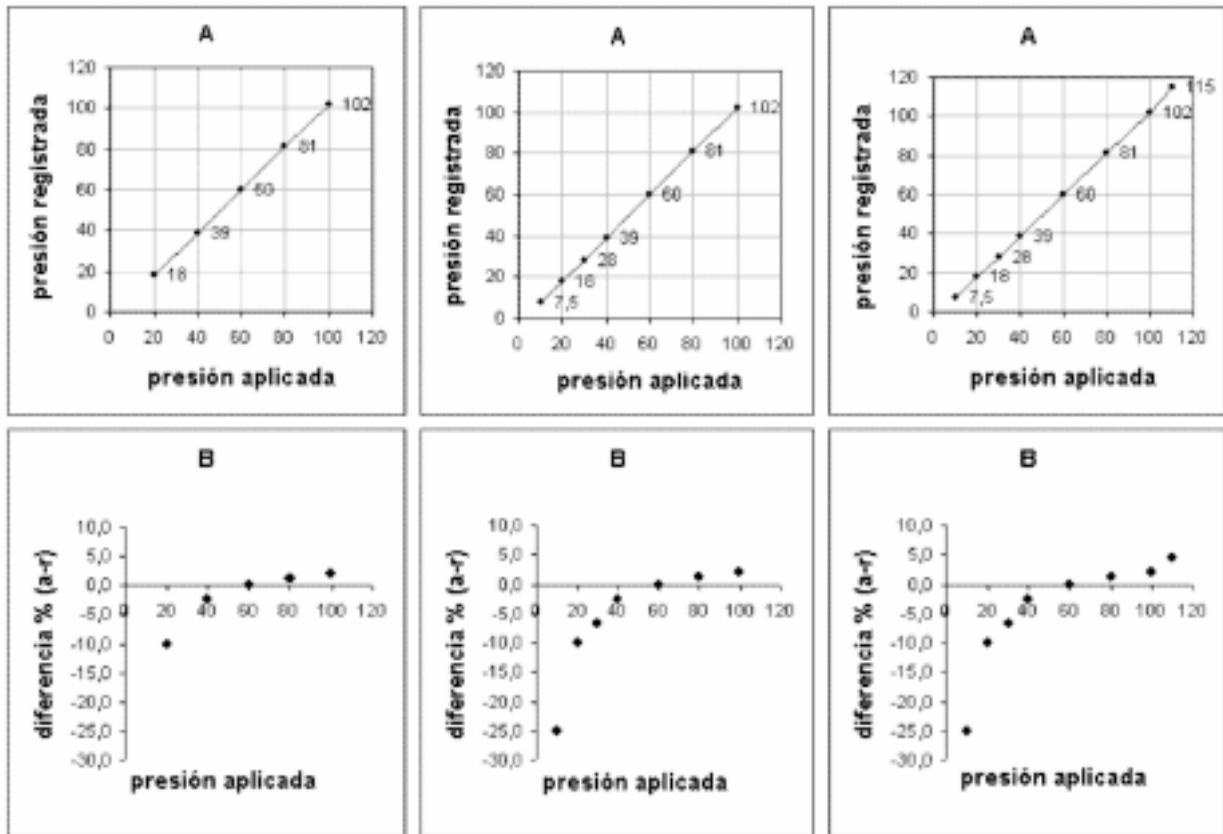


Figura 8: Evaluación de la linealidad y exactitud. A: gráficos XY de presión aplicada (X) vs. presión registrada (Y). La primera impresión es que existe una buena linealidad y exactitud. Pero algunos números colocados al lado de los puntos (valores de presión registrada) son diferentes de los correspondientes de presión aplicada. B: Los diagramas que muestran las diferencias entre la presión aplicada (a) y la registrada (r) en % de la aplicada son más ilustrativos. Se observan diferencias porcentuales respecto de la aplicada de aproximadamente -25 a 5 cmH₂O. Estas respuestas hacen inaceptables a los transductores para ser usados en el rango estudiado.

los transductores. Los diagramas que muestran las diferencias (B) son más demostrativos que los XY (A).

- **Respuestas lineares:** Cada aumento de presión se acompaña de un aumento exactamente igual de la deflexión o respuesta del transductor. Se muestra también una respuesta lineal pero inexacta (Figura 6 B).
- **Respuesta errática:** Los puntos de presión registrada están por arriba y por debajo de la presión aplicada (Figura 9A). Esta respuesta es inaceptable. Cualquier valor de presión puede dar una respuesta falsa tanto en más como en menos.
- **Respuesta curva:** Obsérvese que a valores cercanos a 100 cmH₂O la respuesta parece ser adecuada (Figura 9B). Si solo se calibra el 0 y el 100 cmH₂O, el sistema computado de calibración asumirá erróneamente que la respuesta es lineal.
- **Respuesta plana a altas presiones:** Es un hallazgo muy frecuente ya sea porque el trans-

ductor no funciona adecuadamente o porque se lo está exigiendo más allá del límite de presión recomendado (recordar el rango de presiones útiles para cada transductor). El análisis de la curva (Figura 9C) indica que puede ser razonable utilizarlo dentro del rango de presiones que mostró linealidad y exactitud (por seguridad, de 0 a 40 puede ser aceptable), pero se requieren chequeos periódicos más frecuentes para ver si no se está deteriorando.

- *¿Qué presión por arriba o por debajo de cero se deben aplicar?*

Se ha comprobado y no solo asumido que la respuesta es lineal y exacta. En lo sucesivo, luego de obtener el cero, se debe elegir una presión lo más cercana a la presión que se desea medir. Por definición, la presión que se debe utilizar debe estar algo por arriba de la máxima presión que se espera medir. Es decir, si se medirán presiones de has-

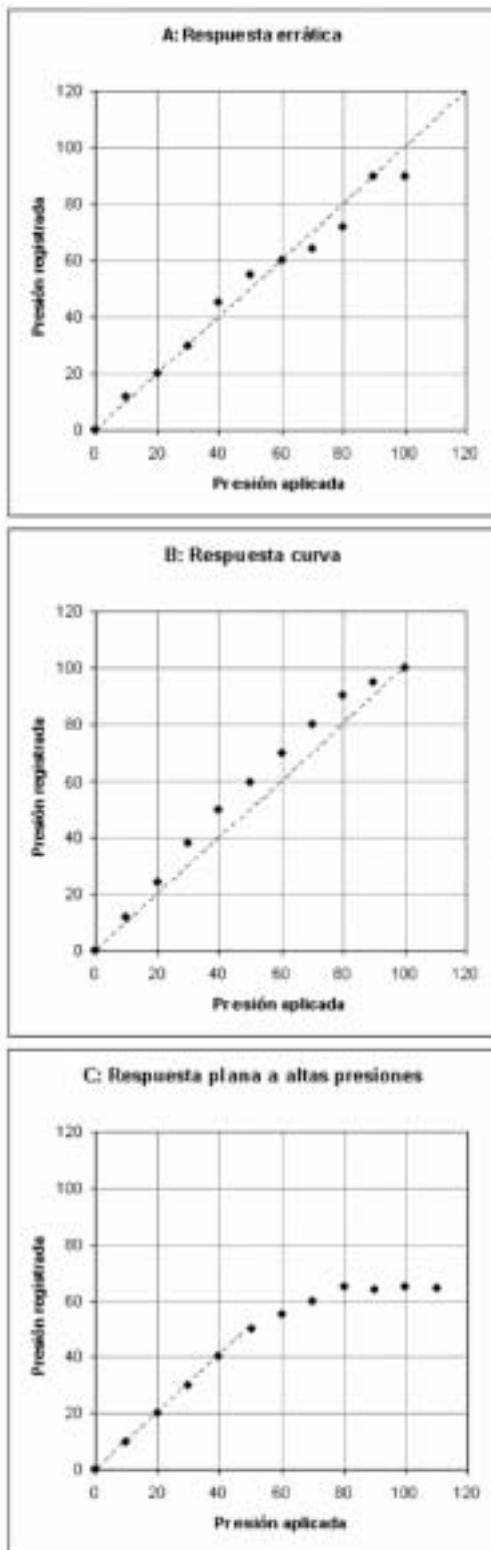


Figura 9: A: respuesta errática, los puntos caen por arriba y por debajo de la línea de identidad; B: los puntos caen por arriba de la línea de identidad. Para el caso de calibraciones en PC con *software* para tal fin, la calibración del punto cero y del punto 100 únicamente, dará información equivocada al programa que asumirá que la respuesta es lineal; C: la respuesta es lineal y exacta hasta los 50 cmH₂O, sin embargo, a partir de ahí comienza a aplanarse y por arriba de los 80 cmH₂O se hace plana.

ta unos 200 cmH₂O (por ejemplo la Pemax), se debe obtener el cero y luego una presión de unos -220 o -230 cm H₂O. Si el objetivo es medir la presión de oclusión bucal (P0.1), se obtendrá un cero y una presión de unos -20 cm H₂O.

– *¿Qué es respuesta de frecuencia de un transductor?*

El concepto de **respuesta de frecuencia** es una propiedad de los transductores y manómetros que podríamos definirla como la capacidad de responder adecuadamente a las variaciones rápidas de presiones. Es decir, si la fuente de presión que se quiere registrar aumenta la frecuencia de por ejemplo 1 Hz (2 picos por segundo) a 20 Hz, es posible que el manómetro aneroide no llegue a registrar todos los picos de presión porque el tiempo de respuesta de estos aparatos es lento. La consecuencia importante es que la presión pico disminuye falsamente.

También se puede ver la respuesta de frecuencia como la capacidad de responder ante presiones que son aplicadas por solo unas pocas décimas de segundos. Un manómetro aneroide no es capaz de registrar una presión de 70 cmH₂O aplicada durante 0.4 segundos. La inercia del sistema impide que la presión llegue a 70 en ese breve lapso de tiempo. Este problema no suele existir en los transductores ya mencionados pero hay unos dispositivos que se hallan en algunos sistemas de amplificación que se llaman *filtros* que pueden modificar sustancialmente la morfología de la curva de presión. El tema referido a los filtros y la respuesta dinámica de los transductores (muy importante en el sistema neumotacógrafo-transductor diferencial) merecen otro artículo.

Se han efectuado algunas consideraciones que se espera permitan obtener datos más confiables de los transductores disponibles: el cero, el balanceo, la linealidad y la calibración y la respuesta de frecuencia.

Un ejemplo de rutina de calibración de un transductor nuevo

Se ha adquirido (o encontrado en algún cajón) un transductor para medir presiones positivas. Su rango especificado en el manual es de hasta 150 cmH₂O. Se requiere explorar su linealidad y exactitud. Se tiene una columna de agua en U que es el patrón de oro. Se debe aplicar una serie de presiones para ver de qué manera responde el transductor.

En la Figura 10A se observa en el eje de X las presiones aplicadas según la lectura en la columna de agua. Se ha usado 20, 40, 60, 80 y 100 cmH₂O

(y se ha repetido dos veces para seguridad). En el eje de Y se observa la presión que registró el transductor y en la tabla se observan los números obtenidos. La primera impresión es que la linealidad es adecuada. Sin embargo, si se hacen las diferencias entre la presión aplicada y la medida, se observa que a una presión de 20 cmH₂O la diferencia es del 13%, la coincidencia es perfecta a 60 cmH₂O y el error es de -2% a 100 cmH₂O.

- *¿Se puede aceptar una diferencia del 13% a bajas presiones?*. Esta diferencia se halló a la presión de 20 cmH₂O. ¿Qué pasa por arriba o por debajo de este valor?. Se debe aplicar presiones de 10 y 30 cmH₂O. Esto se observa en la Figura 10B. Hay discrepancias a 10 cmH₂O (20%) y a 30 cmH₂O (12.8%).
- *¿Se puede aceptar una diferencia del -2% a altas presiones?* A 100 cmH₂O la diferencia fue de -2%. Se debe conocer qué ocurre a un valor superior. Se aplica 110 cmH₂O (Figura 10B) y se ve que la diferencia es de -1.85%.

Si se hace la ecuación de regresión para los datos de la Figura 10 A y B, se obtiene una excelente correlación (r = 0.99), pero esta ruta de análisis (recta de regresión) no es adecuada. Por todo lo

visto, el análisis de las diferencias (Figura 10), muestra que no hay linealidad y es evidente que este transductor no tiene una respuesta exacta: Por lo menos, sobrestima a bajas presiones y subestima a altas presiones.

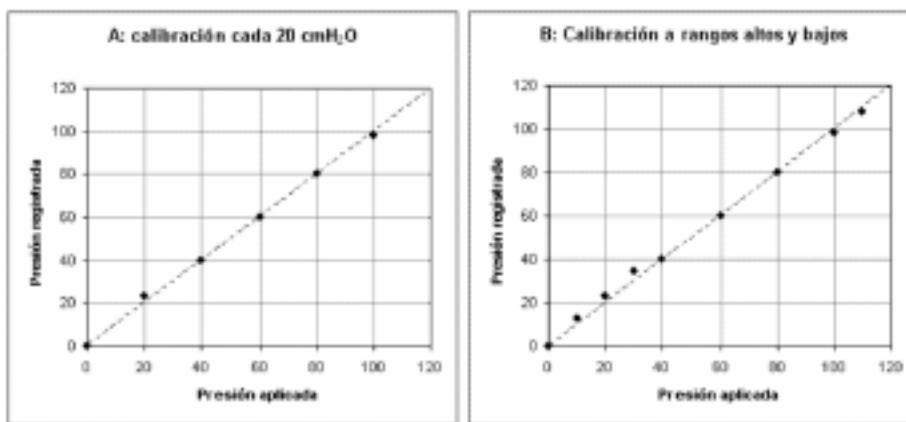
- *¿Sirve o no sirve este transductor?*

La respuesta depende, en parte, del error que se decida tolerar en las medidas. Si se acepta un error menor del 5% el transductor será útil de 40 a 110 cmH₂O. A bajas presiones el error global es de aproximadamente 15%. ¿Se está dispuesto a aceptar ese error?. Quizá se deba reservar este transductor para altas presiones y no debería ser utilizado para presiones bajas (P0.1). La decisión final es suya...

Conclusiones

No se puede asumir que la evidencia de la prueba es la prueba de la evidencia.

Se espera que la lectura de este artículo permita conocer algo más sobre los equipos con que se trabaja en un laboratorio pulmonar. Siempre es deseable *asegurar* y no *asumir* que los transductores *-y todos los equipos que utilizamos-* funcionan correctamente. Una vez cuantificado el error,



P. aplicada	P. registrada	diferencia %	P. aplicada	P. registrada	diferencia %
0	0	0,00	0	0	0,00
20	23	13,04	10	12,5	20,00
40	40	0,00	20	23	13,04
60	60	0,00	30	34,4	12,79
80	80	0,00	40	40	0,00
100	98	-2,04	60	60	0,00
			80	80	0,00
			100	98	-2,04
			110	108	-1,85

Figura 10: Estudio de linealidad de un transductor con la columna de agua. A: Con las presiones aplicadas cada 20 cm H₂O se detectan algunas discrepancias. B: Se estudian rangos intermedios, bajos y altos. A valores bajos hay sobreestimación, a valores altos hay subestimación. El error porcentual a valores altos es notablemente menor que a valores bajos.

se deberá decidir hasta qué valor se lo tolera para un propósito dado. La estadística no puede salvar los errores emanados de una inadecuada calibración de los equipos.

En todos los casos, una permanente *actitud crítica* en la etapa de adquisición de datos es, en opinión del autor, un indicador de la calidad del laboratorio pulmonar. Los datos adecuadamente obtenidos y confiables permiten mejores diagnósticos, posibilitan la comparación con otros laboratorios, reducen la dispersión de datos y por lo tanto el número de estudios y pacientes requeridos para hacer una publicación, y facilitan la proyección de estudios multicéntricos.

Bibliografía

1. Rodríguez IT. Sistemas de adquisición de datos, 2005, <http://www.monografias.com>, (noviembre de 2006).
2. Parada M, Escudero JL, Simón P. Apuntes de Instrumentación, Técnicas de Medida y Mantenimiento. Facultad de Informática y Estadística, Sevilla, 1998. <http://www.dte.us.es/personal/yuferat6.pdf> (noviembre de 2006).
3. Contreras MN. Presiones. <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml> (noviembre de 2006).
4. Instituto Tecnológico de Agua Prieta. Instrumentación. Tema 2.4, Medición de presión. <http://www.itap.edu.mx/carreras/ii/cursoslinea/INSTRUMENTACION/index.htm>, (noviembre de 2006).
5. Alfredobi. Manómetro diferencial. Abril de 2006, http://es.wikipedia.org/wiki/Man%C3%B3metro_diferencial (noviembre de 2006).