

Eugène Bourdon y la evolución del manómetro

(*Eugène Bourdon and the evolution of the manometer*)

Simón Reif-Acherman¹ y Fiderman Machuca-Martinez

Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Recebido em 9/6/2009; Revisado em 1/10/2009; Aceito em 26/10/2009; Publicado em 26/3/2010

Eugène Bourdon es el casi desconocido inventor de uno de los instrumentos más conocidos por ingenieros en todo el mundo. El manómetro, o tubo de Bourdon, ha sido el equipo más utilizado para la medición de presión a escalas de laboratorio e industrial desde su introducción a mediados del siglo XIX. Su aparición en el mercado europeo, y casi inmediatamente después en el americano, se constituyó en el punto de partida para el paulatino pero firme reemplazo del por ese entonces muy común manómetro de mercurio por un elemento que respondía a la aplicación de un principio físico diferente. Su invención, para nada ajena a las usuales polémicas de prioridad de la época surgidas alrededor de importantes eventos científicos y tecnológicos, permitió subsecuentemente desarrollos en áreas relacionadas de instrumentación y control de procesos.

Palabras-clave: Eugène Bourdon, manómetro, historia, presión, instrumentación, control, barómetro, manómetro de mercurio.

Eugène Bourdon is the almost unknown inventor of one of the instruments most known by engineers around the World. From its introduction around the middle of XIX century, the Bourdon manometer or tube has been the most employed instrument for measuring pressure at laboratory and industrial scales. Its appearance in the European market, following by that in America, became a starting point for the gradual but firm replacement of the by then very usual mercury manometer through an element that worked based on a different physical principle. Its invention, oblivious to all the by then usual priority polemics around scientific and technological events, subsequently allowed developments in instrumentation and process-control related subjects.

Keywords: Eugène Bourdon, manometer, history, pressure, instrumentation, control, barometer, mercury manometer.

1. Introducción

Profesionales y estudiantes de todas las ramas de la ciencia y la ingeniería frecuentemente utilizan en el desarrollo de sus actividades equipos, modelos, teorías, o ecuaciones bautizadas con el nombre de la persona responsable, o de alguna manera involucrada en su diseño o formulación, pero poco o nada conocen de ella. El manómetro, o tubo de Bourdon, es un claro ejemplo de esta situación. En la actualidad, más de siglo y medio después de la construcción de su versión original, muy probablemente no existe otro equipo más ampliamente usado en laboratorios e industrias de procesos para la medición de presiones de toda clase de fluidos, en intervalos que alcanzan prácticamente las 6800 atm. Al cumplirse recientemente el segundo centenario del nacimiento de Eugène Bourdon, este artículo tiene como propósito revelar detalles poco conocidos de su vida y obra, pero ante todo las circunstancias generales del desarrollo de su manómetro metálico.

2. El estado del arte de los elementos medidores de presión antes de Bourdon

La idea general de manómetros (*μανός*, raro, distinto; *μέτρον*, medida) es mencionada por primera vez por el físico alemán Otto von Guericke (1602-1686), y el primer modelo específico parece probablemente haber sido empleado por el naturalista y geólogo suizo Horace Bénédict de Saussure (1740-1799). Su diseño, como el de todas las otras primeras versiones del instrumento, se basó en los mismos principios que caracterizaron el funcionamiento del barómetro, es decir las condiciones de equilibrio entre fluidos de diferentes densidades al interior de un sistema de vasos comunicantes.

La primera aplicación del barómetro en la medición de la variación de la presión o el peso del aire lo situó progresivamente como un instrumento de utilización casi exclusiva en meteorología. El interés en este nuevo instrumento no se limitaba, sin embargo,

¹E-mail: sireache@univalle.edu.co.

únicamente a los denominados filósofos experimentales de la época. La difundida aunque no ampliamente compartida errónea idea de mediados del siglo XVI, por la cual se creía que el uso del barómetro podía permitir la predicción de las condiciones climáticas, sin consideraciones adicionales tales como la temperatura y la dirección y fuerza de los vientos, entre otras, despertaba obviamente también la curiosidad de personas ajenas a la actividad científica. Las implicaciones del estado del tiempo en la salud humana y en diferentes tipos de actividades de la vida diaria tales como la agricultura, el transporte, y el comercio en general, ampliaban necesariamente el espectro de personas directa o indirectamente relacionadas con el instrumento. El significativo interés de la clase burguesa de la época, principalmente en Inglaterra y Francia, por disponer de un elemento en la vida diaria que les diera un toque de refinamiento intelectual acorde con una de los temas científicos de actualidad, incrementó la variedad de modelos fabricados y el número de personas, principalmente artesanos, dedicados a dicha labor [1]. Desde un punto de vista estrictamente técnico los principios de funcionamiento de todos ellos eran idénticos. La concentración de esfuerzos en temas como el llenado del tubo con mercurio sin dejar trazas de aire o vapor en su interior, la definición del punto preciso de lectura de los niveles irregulares de fluido, o su misma luminiscencia, desviaron durante mucho tiempo los intereses en la optimización de las técnicas de producción, lo cual se manifestó en una evolución extremadamente lenta [2].

Desde las primeras versiones surgidas del barómetro con los experimentos del físico y matemático italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) [3,4], y la observación de la relación entre la presión del aire atmosférico con la altitud por parte del matemático y filósofo francés Blaise Pascal (1623-1662) [5], este instrumento hizo uso de la tradicional columna de mercurio para la medición de la presión atmosférica. La utilización de este principio, que pareció ser suficiente por espacio de dos siglos, comenzó a evidenciar, sin embargo, notorias desventajas a partir de la primera mitad del siglo XIX.

A las evidentes limitaciones relacionadas con la dificultad para transportarlos, y la necesidad de realizar las lecturas en frágiles tubos de vidrio, se unieron otras propias de su cada vez mayor diversidad de usos. Entre éstas se destacaba la altura de las columnas de mercurio requeridas. Si presiones del orden de un bar correspondían a cabezas de mercurio de aproximadamente 0.76 m, magnitudes superiores requerían columnas prohibitivamente largas y por ende nada prácticas. La Fig. 1 ilustra las diferentes posibilidades de construcción para una caldera trabajando a diversas condiciones (Fig. 1a). Mientras para presiones bajas bastaba con un diseño usual (Fig. 1b); para otras razonablemente altas, modificaciones que incluían sistemas, formas o dimensiones diferentes, como por ejemplo la mostrada (Fig. 1c), resultaban indispensables [6].

Las dificultades asociadas con estas lecturas se incrementaban en ciertos lugares y circunstancias usuales, como por ejemplo a bordo de barcos en el mar en situaciones de tormenta, debido a los movimientos de traslación y rotación de la plataforma. Algunos inconvenientes actualmente aceptados, tales como la toxicidad, y problemas de manejo asociados con el mercurio y la disminución en la precisión de la lectura debida a los cambios en el volumen del mercurio con significativas fluctuaciones en temperatura, no eran, por la época, fácil y suficientemente reconocidos y cuantificados.

Diferentes desarrollos posteriores a los diseños originales solo lograron superar parcialmente estas limitaciones. En 1749 el geólogo y meteorólogo suizo Jean-André De Luc (1727-1817) eliminaba la necesidad de un depósito anexo de mercurio al construir el primer barómetro portátil de sifón [7]. Igualmente fueron ideados diseños especiales de barómetros marinos de alta precisión que protegieran la columna de mercurio durante las travesías [8].

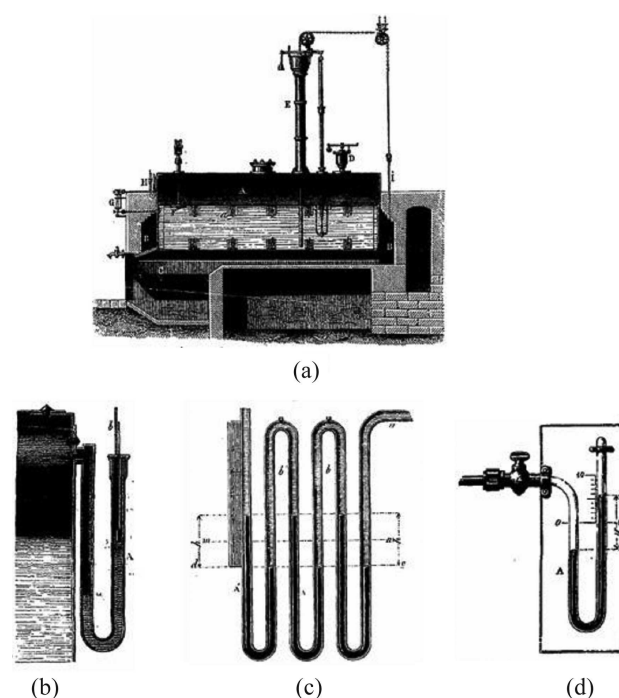


Figura 1 - Modelos de manómetro de columna de mercurio utilizados en una (a) caldera tradicional. De extremo abierto a (b) bajas presiones y a (c) altas presiones, (d) de extremo cerrado [6].

Por más de un siglo fueron propuestas modificaciones de distinta índole, privilegiando la protección del equipo y, por ende, el mejoramiento de la portabilidad por encima de otras consideraciones, incluso de su misma precisión. Las diversas construcciones planteadas incluían desde el uso de tubos de hierro para reemplazar las columnas de vidrio hasta la provisión de medios mecánicos para el llenado de mercurio cada que una medición fuera planeada. Otros diseños presentados en las primeras décadas del siglo XIX, incorporando la utilización de sustancias diferentes al mercurio, como

por ejemplo ácido sulfúrico coloreado, resolvían parcialmente los problemas asociados con el tamaño y la dificultad de transporte, pero fueron rápidamente discontinuados debido a la continua necesidad de calibración por virtud de la volatilidad de los líquidos utilizados. La modificación del sistema de tubo abierto por el uso de aire comprimido (Fig. 1d) eliminaba el problema de las elevadas dimensiones, pero reducía significativamente la precisión de las lecturas.

3. Bourdon y la introducción de los manómetros metálicos

La introducción en la primera mitad del siglo XIX del uso del vapor como la principal fuente de potencia en medios de transporte y procesos de producción promovió significativos cambios en los accesorios de medición utilizados. La utilización de calderas a alta presión para diversos propósitos motivó su adecuación, primero de manera individual, y luego por imposición oficial, con elementos que permitieran la medición de presión del vapor producido y el nivel de agua dentro de los equipos, y la instalación de las correspondientes válvulas de seguridad, tendientes a disminuir el cada vez mayor número de explosiones presentadas, con elevado número de víctimas.

La necesidad de acudir a otro tipo de elementos de medición basados en la aplicación de principios físicos diferentes se identificaba claramente cuando las ya mencionadas deficiencias de los tradicionales manómetros de mercurio de tubo abierto se hicieron cada vez más evidentes a las nuevas presiones. Descomunales columnas protegidas por armazones metálicos de hasta 6 m de altura empezaron a hacerse necesarias en locomotoras trabajando en intervalos entre 3 y 5,5 atmósferas, resultando cada vez más usuales las continuas pérdidas del fluido manométrico por súbitas aperturas de la válvula o movimientos en los barcos [9]. A ello debía agregarse la consecuente mayor conciencia respecto a la necesidad de realizar nuevas correcciones de las lecturas originales de este tipo de instrumentos, debidas principalmente a errores de escala, error cero, capilaridad, temperatura, y la llamada de gravedad, relacionada con la posición del equipo en latitud y altura respecto al nivel del mar.

La adjudicación en 1844 de una patente británica (No. 10,157) al abogado y científico aficionado francés Lucien Vidie (1805-1866) por la invención del primer barómetro mecánico, cambió definitivamente la historia de los elementos de medición de presión [10]. Vidie no tomó la patente a su nombre, sino que lo hizo por intermedio del representante principal de una agencia de patentes en Londres y París, de nombre Pierre Armand Lecomte de Fontainemoreau. Las versiones francesas (No. 12.743 y 1.149 de 1844 y 1846, respectivamente) y americana (N.º 4.702 de 1846) fueron las únicas concedidas con su nombre. El concepto del nuevo elemento hacía uso del efecto medible producido por la presión

sobre la forma de los metales debido a su elasticidad, reemplazando el uso del mercurio por un disco metálico previamente evacuado.

La idea no era del todo nueva. A lo largo del siglo y medio que precedió la presentación definitiva del instrumento, y comenzando por el filósofo y matemático alemán Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716), varios científicos habían sugerido la posibilidad de que cambios en la geometría de un disco metálico pudieran usarse para la medición de la presión atmosférica, sin que sus propuestas hubieran podido plasmarse exitosamente, principalmente por la imposibilidad de sortear las limitaciones técnicas existentes [11].

Las teorías establecidas de la época pronosticaban una imposibilidad de construcción de un equipo basado en este principio. Por un lado, las creencias relacionadas con la ligera porosidad de los metales conducían a pensar que no podía mantenerse vacío en una cámara metálica [12]. El otro factor era el límite real elástico de estos materiales o, en otras palabras, el porcentaje de esfuerzo total que podía ser continuamente ejercido sobre ellos sin perder su elasticidad. Unas memorias, publicadas el mismo año del desarrollo de Vidie y aceptadas por la Academia Francesa de Ciencias, indicaban la inexistencia de tal límite en metales [13]. De ser realmente así, cualquier fuerza por pequeña que fuese y actuando por suficiente tiempo, produciría una deflexión permanente.

Sin embargo Vidie, venciendo las dudas existentes, logró diseñar el así llamado barómetro anerode (del griego *a* sin, *neròs* húmedo; *eídos*: forma). El instrumento principal (Fig. 2) descrito en la patente consistía de una caja que contenía una cápsula metálica sellada, fabricada originalmente en bronce, de la cual algo de aire había sido retirado, creando un vacío parcial, y provista de un diafragma corrugado sostenido por una serie de 33 resortes helicoidales mantenidos en su base, y un elemento interior encargado del registro. El principio de funcionamiento es el cambio en la altura de la cámara metálica, la cual posee superficies flexibles. Pequeños cambios en la presión externa ocasionan expansiones o contracciones de la cápsula, las cuales son amplificadas por una serie de palancas mecánicas y registradas en el tablero del instrumento. Tanto en ésta como en sus siguientes patentes, Vidie propuso diseños alternos (como por ejemplo el mostrado en la Fig. 3), especificando para todos ellos su posible utilización con presiones diferentes a la atmosférica.

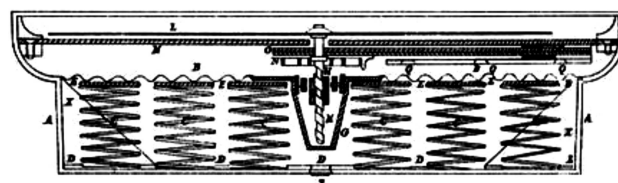


Figura 2 - Barómetro anerode de Vidie [9].

Debido a su insistencia en ir en contra de las teorías aceptadas por la Academia, el invento de Vidie no tuvo la recepción esperada en su país, y solo fue motivo de una pequeñísima mención en el órgano oficial de publicación [14]. Por su simplicidad, pequeño tamaño, resistencia, facilidad de instalación y precisión, la aparición del nuevo instrumento significó el inicio de la desaparición definitiva del barómetro de mercurio para usos industriales, hecho éste que vino a consolidarse solo dos décadas después. El barómetro tuvo mucho éxito en Inglaterra, especialmente entre montañistas y marinos, con ventas que superaron las 5000 unidades en los primeros años de producción, a diferencia de lo ocurrido en Francia, donde solo fueron adquiridas menos de un centenar de ellas. La caja de los primeros modelos fue fabricada en latón, con 11.4 cm de diámetro, modelo que rápidamente fue complementado por otros de mayor tamaño y la adición de termómetros de alcohol o mercurio para una completa predicción de las condiciones meteorológicas.

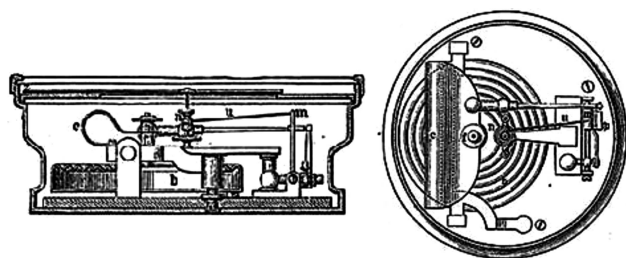


Figura 3 - Versión alterna del barómetro de Vidie [15].

Diversas modificaciones al diseño original de Vidie fueron propuestas en el lustro que siguió, para aplicaciones principalmente en locomotoras a vapor [10]. Las más importantes llegarían con el trabajo de Eugène Bourdon (Fig. 4). Hijo de negociante, y sin ninguna tradición familiar conocida en actividades científicas o tecnológicas, Bourdon desarrolló un gran interés por la elaboración de instrumentos de medición, muy probablemente relacionado con su temprana obsesión por las máquinas de vapor [16, 17]. Luego de trabajar en diferentes accesorios para calderas de vapor, los cuales incluyeron bombas de alimentación sin válvula de seguridad e indicadores de nivel [18], y después de varios intentos, Bourdon construyó en 1849 el que sería su principal aporte a la tecnología de la época: el manómetro metálico.

En Junio 18 de 1849 el Ministerio de Agricultura y Comercio del Gobierno Francés le concedió a Bourdon una patente por su trabajo titulado "Un sistema de manómetro sin mercurio denominado manómetro metálico, aplicable a barómetros y manómetros" (Fig. 5), la cual le permitía explotar su invención por un periodo de quince años. Las descripciones allí incluidas, posteriormente complementadas en un reporte presentado al Instituto de Ingenieros Civiles (ICE) de la Gran Bretaña [19], y otra publi-

cación [20], dan absoluta claridad respecto al principio de funcionamiento y versatilidad del instrumento. Después de explicar el efecto de la presión, tanto interna como externa, sobre la geometría de tubos metálicos en diferentes circunstancias, Bourdon plantea los principios de los cuales considera depende la acción del instrumento propuesto: las relaciones de proporcionalidad entre el espesor de un tubo aplanado dispuesto de manera circular y la variación de su radio de curvatura por un lado, y el desplazamiento de sus extremos y la magnitud de la presión aplicada por el otro. Basado en la confirmación experimental de estas relaciones, Bourdon presenta su primer modelo de manómetro con aplicación específica a la medición de la presión de vapor.



Figura 4 - Eugène Bourdon [16].

Las Figs. 6a y 6b representan diferentes vistas del instrumento. En la caja A se encuentra el tubo aplanado indicador de presión B, enrollado en una y media circunvalación. Su extremo inferior está unido a un pequeño accesorio *a* que parte de una llave de paso C conectada a la caldera de vapor por el tubo *b*. El otro extremo, libre y perfectamente cerrado, lleva una aguja *c* dispuesta sobre las divisiones de un dial *d* colocado en el interior de la caja. La vista exterior mostrada en la Fig. 6c revela una adición hecha por Bourdon con el propósito de comparar la presión momentánea con la más alta registrada por el instrumento durante un tiempo determinado. La aguja *e*, colocada en la parte anterior de la caja y utilizada para este propósito, es manipulada manualmente por el operario encargado.

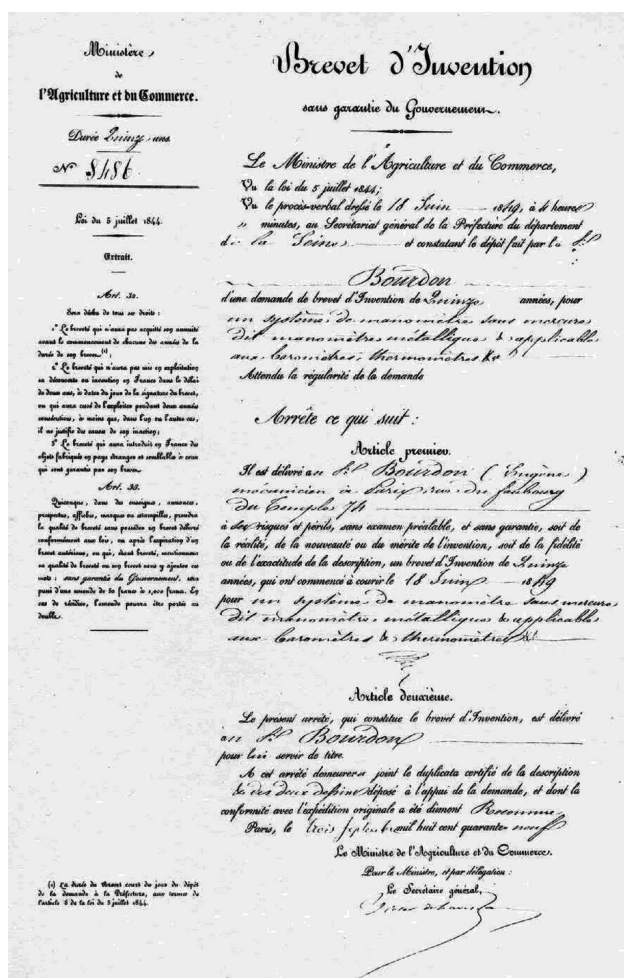


Figura 5 - Primera página de la patente del manómetro metálico de Bourdon (1849) [21].

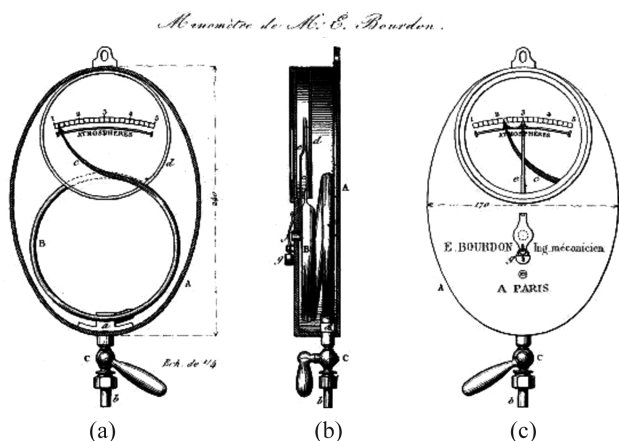


Figura 6 - Manómetro de Bourdon [19].

En los mismos documentos Bourdon incluyó modelos alternos y casi todas las modificaciones imaginables del diseño original para situaciones específicas. La Fig. 7, por ejemplo, ilustra la versión del manómetro portátil utilizado por los inspectores mineros de algunas provincias francesas encargados de la revisión y aprobación de licencias de funcionamiento de calderas y otros equipos de vapor a presiones de hasta 20 atm.

Aquí, el manómetro de Bourdon se acoplaba al equipo bajo supervisión, reemplazando la válvula de seguridad. Su funcionamiento era bastante similar al anteriormente descrito, teniendo como única diferencia la de que el tubo B solo hacía una vuelta, y que sus movimientos debían amplificarse para responder a las necesidades de sensibilidad y precisión. En este caso, la aguja indicadora *c* se montaba sobre un centro fijo de oscilación *e* como una palanca con brazos de longitud diferente, el más pequeño de los cuales se unía al extremo libre del tubo B por medio de una biela *f*. Así, cualquier movimiento del tubo, por pequeño que fuese, provocaba un desplazamiento bastante sensible del extremo de la aguja sobre una amplia escala.

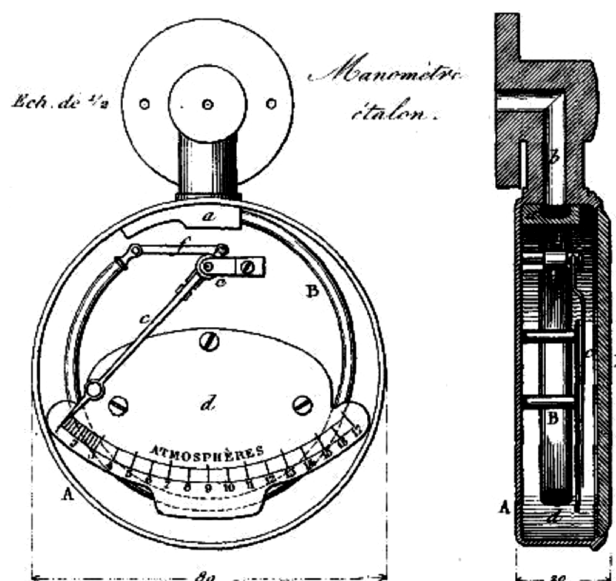


Figura 7 - Vistas frontal y transversal de un manómetro de Bourdon de referencia [22].

La Fig. 8, por su parte, muestra la adaptación del mismo manómetro para mediciones de vacío. En este caso, el tubo B se comunica con el recipiente por medio de una extensión unida internamente a la llave de paso C. Sus dos extremos cerrados, pero libres, se unen por medio de dos pequeñas bielas f a una palanca i provista de un sector dentado g , la cual, a su vez, está montada sobre un eje horizontal e . El sector dentado engrana con un pequeño piñón h montado sobre el mismo eje que la aguja indicadora c , amplificando así lo suficiente el movimiento de los extremos del tubo. Para calibrar el instrumento solo bastaba colocar el punto de referencia a la presión atmosférica del lugar, y trazar las correspondientes divisiones en la medida en que se aumentaba el vacío y los extremos del tubo B se aproximaban entre sí.

La versatilidad del instrumento propuesto era tal que su autor mostraba la posibilidad de utilizarlo incluso como termómetro si se llenaba el tubo curvado y aplanado con alcohol u otro líquido y se cerraba herméticamente. Los cambios en el volumen de la

cantidad de líquido, indicados por la aguja, podían fácilmente convertirse en un indicativo cuantitativo de la temperatura real. La mejor velocidad de respuesta obtenida con este tipo de instrumento se explicaba por la mayor rapidez en la transferencia de calor hacia el líquido en un tubo metálico que en uno de vidrio.

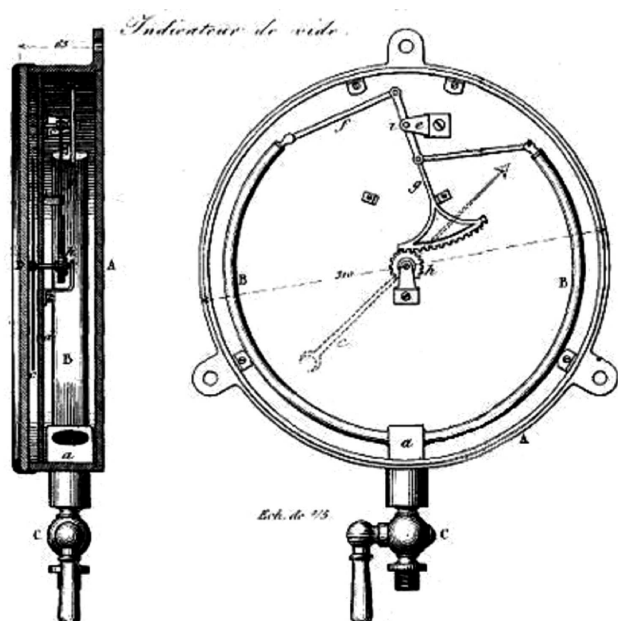


Figura 8 - Vista frontal y transversal de la versión adaptada del manómetro de Bourdon para la medición de vacío [22].

Bourdon explicó en reiteradas oportunidades que la idea para su diseño le había sobrevenido de manera casual cuando un empleado suyo había accidentalmente manipulado de manera equivocada el tubo de cobre cilíndrico de un serpentín curvado en forma de espiral para ser usado en una máquina de una lavandería. La maniobra había ocasionado un aplanamiento parcial de una porción considerable del tubo. En aras de resolver el problema y restaurar la forma del tubo, Bourdon cerró uno de sus extremos y conectó el otro a una bomba que permitiera la entrada de agua. El desenrollamiento del tubo, ocurrido de manera simultánea con la gradual recuperación de la forma cilíndrica de su porción aplanada, le sugirió la posibilidad de aplicar el mismo principio en la construcción de un manómetro.

Los desarrollos de Bourdon ocurrieron solo tres meses después de la publicación de una serie de tres artículos por parte de un ingeniero ferroviario alemán de apellido Schinz, en los que se describía una construcción similar que se venía usando desde dos años atrás en las compañías de trenes de ese país [23]. El citado instrumento hacía uso de un tubo elíptico enrollado en forma helicoidal, de tal forma que el pequeño eje de la elipse coincidía con el radio curvado en la línea de la hélice (Fig. 9). La diferencia entre los dos trabajos radicaba en el hecho de que mientras los desarrollos de Schinz se circunscribieron exclusivamente al uso del elemento de respuesta en forma helicoidal, los de Bourdon

hicieron uso del mismo principio pero con tubos que incluían una amplia variedad de formas y secciones.

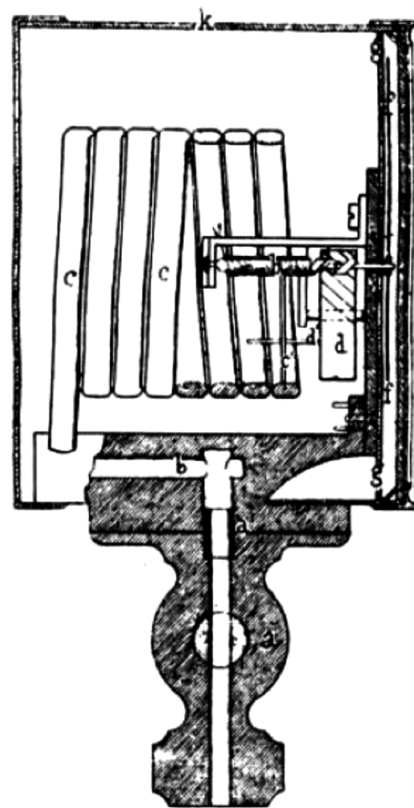


Figura 9 - Manómetro de Schinz [10].

No hay claridad histórica acerca de si los dos desarrollos ocurrieron de manera independiente, o si Bourdon conocía previamente los trabajos de su colega. El hecho concreto es que mientras los logros del uno alcanzaban un prestigio y reconocimiento que se volverían permanentes, los del otro muy pronto caerían en el olvido.

Este episodio no sería el único en despertar polémicas de prioridad alrededor del instrumento. La presentación de los manómetros de Vidie y Bourdon en la Gran Exhibición de Trabajos de la Industria de todas las Naciones celebrada en Londres en 1851, les había valido a ambos inventores el otorgamiento de la mayor distinción del evento, la Council Medal, pero simultáneamente había servido también para que el primero identificara tal similitud entre sus diseños y los de su colega, al punto que decidiera demandarlo por violación de derechos de autor. Después de diez años de una disputa legal, que incluyó tres largos juicios y dos apelaciones, Bourdon fue obligado por la Corte a reconocerle a Vidie perjuicios morales y materiales avaluados en 10,000 francos de la época. El triunfo de Vidie resultó pírrico, pues el período de su patente había expirado ese mismo año y su solicitud de renovación denegada [24].

4. Desarrollos posteriores

La construcción de las primeras líneas de ferrocarril en el segundo cuarto del siglo XIX en ciertas zonas de Alemania despertó el interés de técnicos de ese país en la fabricación de toda clase de accesorios y elementos de control. Dos modelos también metálicos plantearon algún tipo de rivalidad al de Bourdon. El primero de ellos se basaba en la deflexión de una simple lámina metálica de acero debida a la presión del fluido a medir (Fig. 10a). La presión del fluido a medir se comunicaba al elemento sensor por medio de una varilla D provista de un sello de caucho para evitar fugas, la cual a su vez actuaba a manera de pistón. La acción sobre una de las ramas del sector F, debida a la deformación de la lamina C, actuaba sobre el engranaje al doblarse, y repercutía en el sector dentado y un piñón G montado sobre el mismo eje de la aguja indicadora. El segundo diseño correspondía al conocido manómetro de diafragma (Fig. 10b), debido al desarrollo conjunto del fabricante alemán Bernhard Schäffer (1823-1877) [25] y su compatriota, el maestro en mecánica Franz Primavesi. Su asociación con Christian Friedrich Budenberg (1815-1883) permitió la constitución de la empresa Schäffer & Budenberg en Magdeburg, Alemania, dedicada a la fabricación de instrumentos de medición para uso en máquinas de vapor [26].

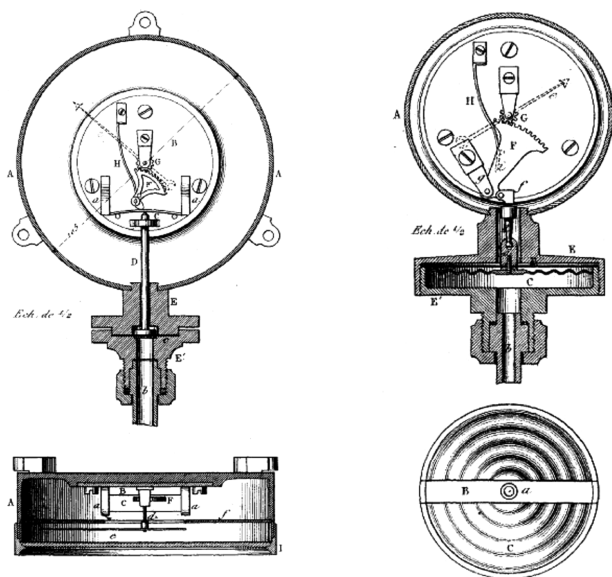


Figura 10 - Manómetro de (a) lámina metálica y (b) diafragma [22].

El elemento sensor del nuevo instrumento era un diafragma corrugado en acero fijo alrededor de toda su periferia. Al igual que el tubo de Bourdon, su principio de funcionamiento permitía la medición de la presión al trasladar la extensión de una deformación, en este caso la deflexión mecánica de la parte central del diafragma, a un mecanismo conectado a una aguja indicadora. La

mayor laboriosidad requerida en el mecanismo de amplificación de la señal de este modelo debido al menor límite disponible de movimiento permisible incidió en su nivel de aceptación a nivel industrial, forzando a Schäffer & Budenberg a fabricar elementos con base en el principio de Bourdon una vez culminó el plazo de explotación de la patente original de éste, aproximadamente en 1875.

En las décadas siguientes los esfuerzos se concentraron en la continua optimización de los manómetros de tubo y diafragma, de acuerdo con el permanente surgimiento de nuevas necesidades. Las aplicaciones ya no se limitaban exclusivamente a las máquinas de vapor estrictamente hablando, sino que incluían áreas relacionadas, como era el caso de los frenos continuos –a presión o a vacío– de los ferrocarriles, la iluminación con gas comprimido de los vagones, las transmisiones hidráulicas, la compresión de gases para diversos usos, etc. Las variaciones de temperatura fueron compensadas inicialmente de dos maneras, introduciendo un elemento bimetálico, o modificando la cantidad de gas al interior de la cámara del instrumento. Como consecuencia de los grandes desarrollos metalúrgicos uno de los tópicos más estudiados fue el referente a los materiales de construcción. [27] Del material propuesto por Bourdon en su patente original, tubos de latón o bronce, se pasó a otras posibilidades. Resultaba claro que la utilización de cobre puro resultaba inconveniente si se tenían en cuenta los requisitos de elasticidad para lecturas precisas y de resistencia a los esfuerzos en los intervalos de utilización. Aleaciones cobre con estaño (en una proporción variable entre 3.5 y 10%), y un contenido de fósforo que no superaba el 1% se convirtieron paulatinamente en los materiales preferidos, entre otras, por sus características de resistencia a la fatiga y al esfuerzo mecánico, así como a la corrosión. Los materiales construidos en la actualidad presentan alternativas adicionales (berilio-cobre, ‘Monel’ metal, acero inoxidable, entre otras), dependiendo del tipo de fluido y la presión para las cuales van a ser usados.

En su patente original Bourdon igualmente propuso un modelo de indicador (Fig. 11) basado en una idea previa sugerida por James Watt para su máquina de vapor, en la que su tubo curvado y aplanado sustituye el sistema cilindro-pistón. Un extremo del tubo se conecta con el cilindro de la máquina de vapor por medio del tubo B, mientras que el otro se une por un mecanismo mecánico a una liviana y larga palanca *gg'* que mueve un elemento *f* en su borde. El lápiz *i*, fijado al extremo superior de la palanca, registra sobre un papel H colocado sobre una placa vertical de latón. El mecanismo de movimiento de la placa incluye una serie de piñones, resortes y polea. El indicador, sin embargo, tuvo poca acogida comparado con otros aparatos considerados más precisos, como el mostrado en la Fig. 12, basados en un elemento del tipo cilindro-pistón.

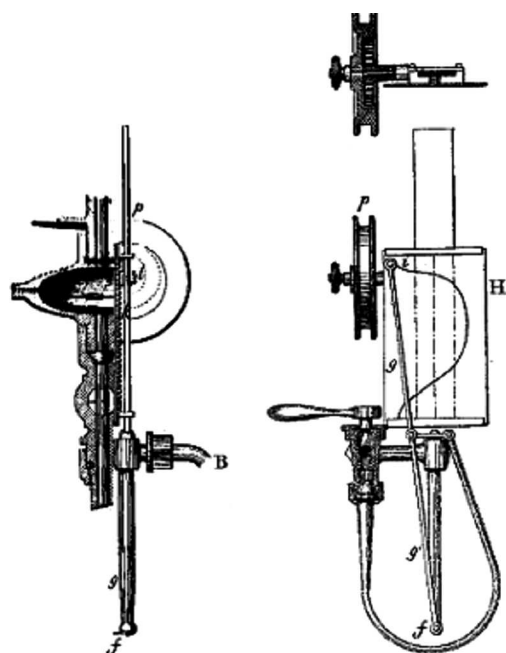


Figura 11 - Indicador de presión de Bourdon [19].

5. El legado de Bourdon

A lo largo de las casi cuatro décadas en las que Eugène Bourdon estuvo al frente de su taller de mecánica, y aun después de haberle cedido la dirección de éste a sus hijos Eduard y Charles, ambos ingenieros de Artes y Ma-

nufacturas, su talento creativo se plasmó en una gran cantidad de inventos de diferente índole, la mayoría de ellos relacionados con la máquina de vapor y sus accesorios. Pueden mencionarse, a manera de ejemplo, la caldera con hogar con circulación interna (Fig. 13a) y el mecanismo de medición y control de nivel de agua en los mismos equipos (Fig. 13b), entre otros [30-33]. Sin embargo, el más destacado, y tal vez el único que trascendió hasta nuestros días, fue el manómetro metálico de tubo que lleva su nombre.

La empresa fundada por él para producir y comercializar su invención, Bourdon Sedeme Company, posteriormente conocida como Bourdon-Haenni, y adquirida en el 2005 por la División de Automatización de Procesos del Grupo Baumer, se sitúa hoy en día entre aquellas con más altos estándares de calidad en la fabricación de instrumentos de medición en la más amplia gama de variables. Igual cosa sucede con su legendario rival, Schäffer & Budenberg, vendida por la familia propietaria a Burnfield PLC hace poco más de una década. Otras compañías de instrumentación, como por ejemplo el caso de Ashcroft, también crecieron a la zaga del talento de Bourdon. En 1852 el comerciante estadounidense Edgard Ashcroft compró a Bourdon los derechos de la patente de éste [34] para su país, abriendo de paso así, no solo un inmejorable mercado para el instrumento, sino la posibilidad de difundir definitivamente la utilización allí de la energía del vapor. El manómetro de Bourdon es hoy en día conocido en su país con el nombre de Ashcroft.

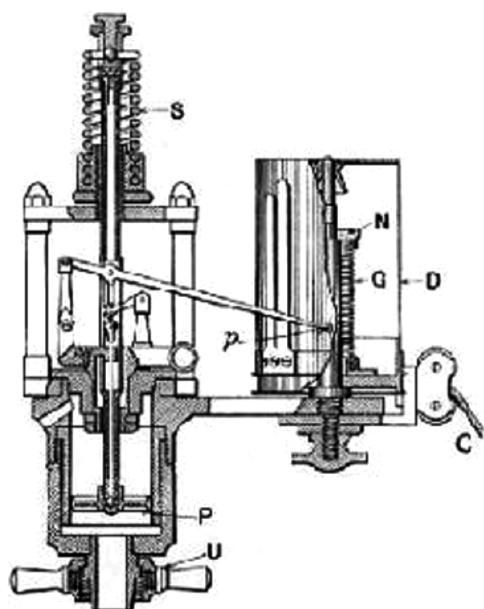


Figura 12 - Indicador de presión con base en el sistema cilindro-pistón [28, 29].



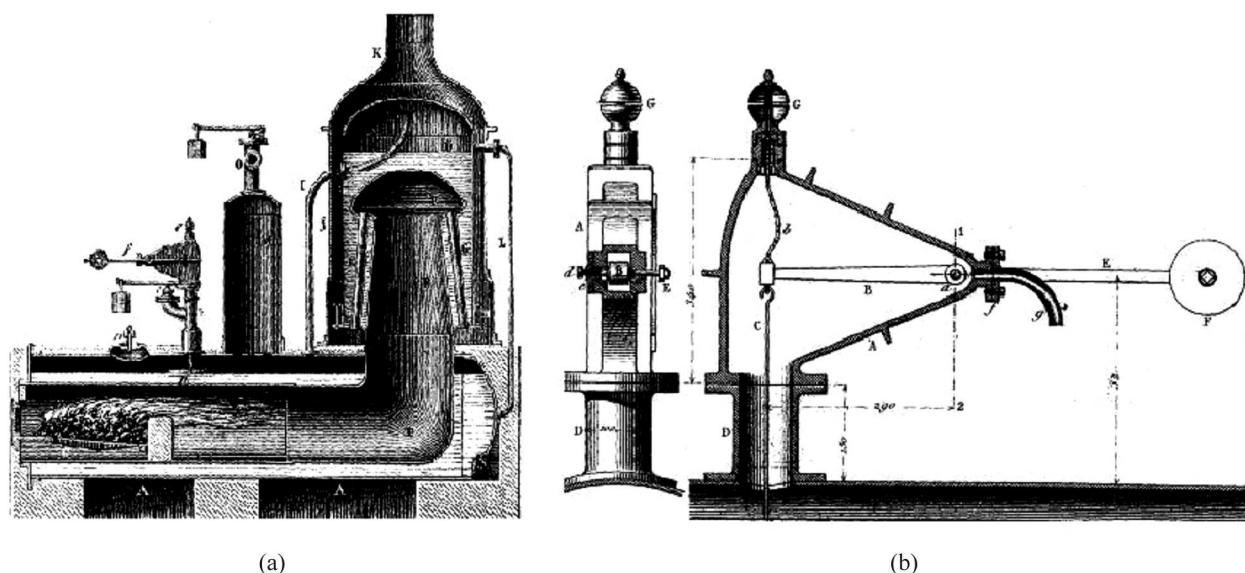


Figura 13 - Inventos diferentes de Bourdon (a) Caldera con hogar con circulación interna (b) Instrumento de medición y control de nivel [30].

En lo que se refiere específicamente al manómetro, la contribución del nuevo tubo de Bourdon a las mediciones de presión se evidencia no solo en el notable incremento de su rango de cubrimiento respecto al barómetro de mercurio y las consecuentes posibilidades de utilización en diferentes áreas, sino también en otros aspectos relacionados con la aplicabilidad comparativa de los instrumentos disponibles. Los evidentes problemas asociados con la muy posible contaminación del mercurio con diferentes sustancias con las cuales podía contactarse dependiendo de la utilización específica, la notable fragilidad del aparato debida entre otras a la inicialmente necesaria utilización de tubos de vidrio y los inconvenientes surgidos en la lectura de los diferenciales a partir del reemplazo de este material por mangueras plásticas debido a su paulatina decoloración con el uso, empezaron a encontrar en el nuevo elemento metálico flexible una importante solución.

El principio plasmado por Bourdon también encontró rápida acogida en disciplinas ajenas a las cuales para la cual fue originalmente diseñado. Médicos y fabricantes europeos principalmente, para citar un ejemplo, hicieron uso del tubo metálico en el diseño de equipos para la medición de la presión arterial. El manómetro aneroides introducido a comienzos del siglo XX por el médico alemán Heinrich von Recklinghausen (1867-1942) se constituyó en el primer modelo de la versión portátil del esfigmomanómetro y de los muy conocidos tensiómetros de la actualidad. [35-37]

Desde su invención, y hasta nuestros días, el manómetro de Bourdon es el instrumento medidor de presión de mayor uso en sistemas de bombeo, compresores, refrigeradores, líneas de distribución de vapor, etc., en una extensa variedad de industrias de procesos, resistiéndose exitosamente a su reemplazo por equipos electrónicos. En un cada vez mayor número de oca-

siones, el tradicional tubo curvado y aplastado forma parte integral de transmisores de balance de fuerza neumáticos, transformadores diferenciales, y sensores, entre otras utilidades, con características óptimas de repetibilidad y resolución.

Referencias

- [1] J. Golinski, in *The sciences in Enlightened Europe*, editeby by W. Clark, J. Golinski and S. Schaffer (University of Chicago Press, Chicago, 1999), p. 69-93.
- [2] M. Dumas, *Scientific Instruments of the Seventeenth and Eighteenth Centuries* (Praeger Publishers, New York, 1972), p. 58-59, 206-209.
- [3] R. Zouckermann, *Fundamenta Scientiae* **2**, 185 (1981).
- [4] W.E.K. Middleton, *ISIS* **54**, 11 (1963).
- [5] R. Zouckermann, *Physica A*, **24**, 133 (1982).
- [6] A. Armengaud, *Traité Théorique et Pratique des Moteurs à Vapeur, v. I* (Chez Lateur, Paris, 1861), p. 256-264.
- [7] P.A. Tunbridge, *Notes and Records of the Royal Society of London* **26**, 15 (1971).
- [8] A. McConnell, *Annals of Science* **62**, 83 (2005).
- [9] W.E.K. Middleton, *The History of Barometer* (Johns Hopkins Press, Baltimore, 1964), p. 373-375.
- [10] L.B. Hunt, *Journal of Scientific Instruments* **21**, 37 (1944).
- [11] W.E.K. Middleton, *The History of Barometer* (Johns Hopkins Press, Baltimore, 1964), p. 398-399.
- [12] C.S.M. Pouillet, *Éléments de Physique Expérimentale et de Météorologie, v. 1* (Chez Béchét Jeune, Paris, 1832), 2^a ed., p. 29-30.
- [13] G. Wertheim, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* **18**, 921 (1844).

- [14] E.L. Mathieu, A. Mauvais and H. Faye, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* **24**, 975 (1847).
- [15] Anonimo, *Meyers Konversations-Lexikon* **2**, 386 (1885-1892).
- [16] G. Tissandier, *La Nature* **593**, 289 (1884).
- [17] E.S. Ferguson, in *Dictionary of Scientific Biography, v. I*, edited by Ch. C. Gillispie (Charles Scribner's Sons, New York, 1975), p. 354-355.
- [18] H. Tresca, *Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils* **42**, 415 (1884).
- [19] E. Bourdon, in *Minutes of the Proceedings Institution of Civil Engineers* **11**, 14 (1852).
- [20] E. Bourdon, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* **37**, 65 (1853).
- [21] Site <http://www.freunde-alter-wetterinstrumente.de/> (consultada en Marzo 5 de 2008).
- [22] A. Armengaud, *Traité théorique et pratique des moteurs a vapeur, v. I* (Chez Lateur, Paris, 1861), p. 255.
- [23] R.C. Budenburg, *Measurement + Control*. **20**, 13 (1987).
- [24] W.E.K. Middleton, *The History of Barometer* (Johns Hopkins Press, Baltimore, 1964), p. 403-404.
- [25] H.G. Heinicke, B. Schäffer, *Magdeburger Biographisches Lexikon 2002*. <http://www.uni-magdeburg.de/mb1/Biografien/1410.htm> (consultada en Marzo 7 de 2008).
- [26] H.G. Heinicke, C. Budenberg, *Magdeburger Biographisches Lexikon 2002*. <http://www.uni-magdeburg.de/mb1/Biografien/1339.htm> (consultada en Marzo 7 de 2008).
- [27] W.E.K. Middleton, *The History of Barometer* (Johns Hopkins Press, Baltimore, 1964), p. 405-413.
- [28] Site <http://www.oldengine.org/members/diesel/Indicator/front.htm> (consultada en Marzo 23 de 2008).
- [29] Site <http://www.archivingindustry.com/Indicator/sourceinfo.htm> (consultada en Marzo 23 de 2008).
- [30] A. Armengaud, *Traité Théorique et Pratique des Moteurs a Vapeur, v. I* (Chez Lateur, Paris, 1861), p. 218 and 279.
- [31] G. Tissandier, *La Nature* **482**, 194 (1882).
- [32] E. Bourdon, *La Nature* **512**, 283 (1883).
- [33] E. Bourdon, *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* **94**, 229 (1882).
- [34] E. Bourdon, U.S. Patent 9,163 (August 3, 1952).
- [35] H. Evans, *Technology and Culture* **34**, 784 (1993).
- [36] A. Roguin, *International Journal of Clinical Practice* **60**, 73 (2006).
- [37] N.H. Naqvi and M.D. Blaufox, *Blood Pressure Measurement. An Illustrated History* (Parthenon Publishing, New York, 1998), p. 77-78.