

CIENCIA

La evolución de la tecnología fisiológica en medio siglo*

Dr. BRUNO GÜNTHER**

Con motivo de la muy honrosa designación como “profesor emérito” de la recientemente creada Facultad de Ciencias Biológicas, consulté -de acuerdo a una inveterada costumbre- el *Diccionario de la Lengua Española*, en su edición del año 1956, en el que textualmente se dice:

“EMÉRITO: vocablo de origen latino que se aplica a la persona que se ha retirado de un empleo o cargo cualquiera y disfruta de algún premio por sus buenos servicios”

A este propósito debo confesar que el mejor premio que alguna vez he recibido -después de más de 50 años de labor universitaria- ha sido el hecho de haber podido iniciar mis estudios en la Facultad de Medicina de la Universidad de Concepción en el año 1932 y de haber tenido como profesor de Fisiología al eminente y recordado maestro el Dr. Alejandro Lipschütz, insigne investigador y primer Premio Nacional de Ciencias, quien ejerció en mí tan poderosa influencia que decidí ya en aquel entonces dedicar el resto

* Discurso pronunciado con motivo de su nombramiento como Profesor Emérito en la Facultad de Ciencias Biológicas, de la Universidad de Concepción.

** Departamento de Fisiopatología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Concepción.

de mi vida a la docencia y a la investigación en el área de las ciencias fisiológicas. Debo reconocer también que esta decisión constituye una de las pocas determinaciones de las cuales nunca me he arrepentido.

Surge entonces la primera pregunta: ¿Qué se entiende por Fisiología? La respuesta no es tan obvia como podría parecer a primera vista, por cuanto el concepto de “Fisiología” ha tenido múltiples interpretaciones a lo largo de la historia.

Para la cultura de Occidente, el vocablo “Fisiología” es de origen helénico, por cuanto para los griegos dicho término significaba “*Estudio de la naturaleza*” (Fig. 1). Es evidente que dicha definición resulta ser dema-

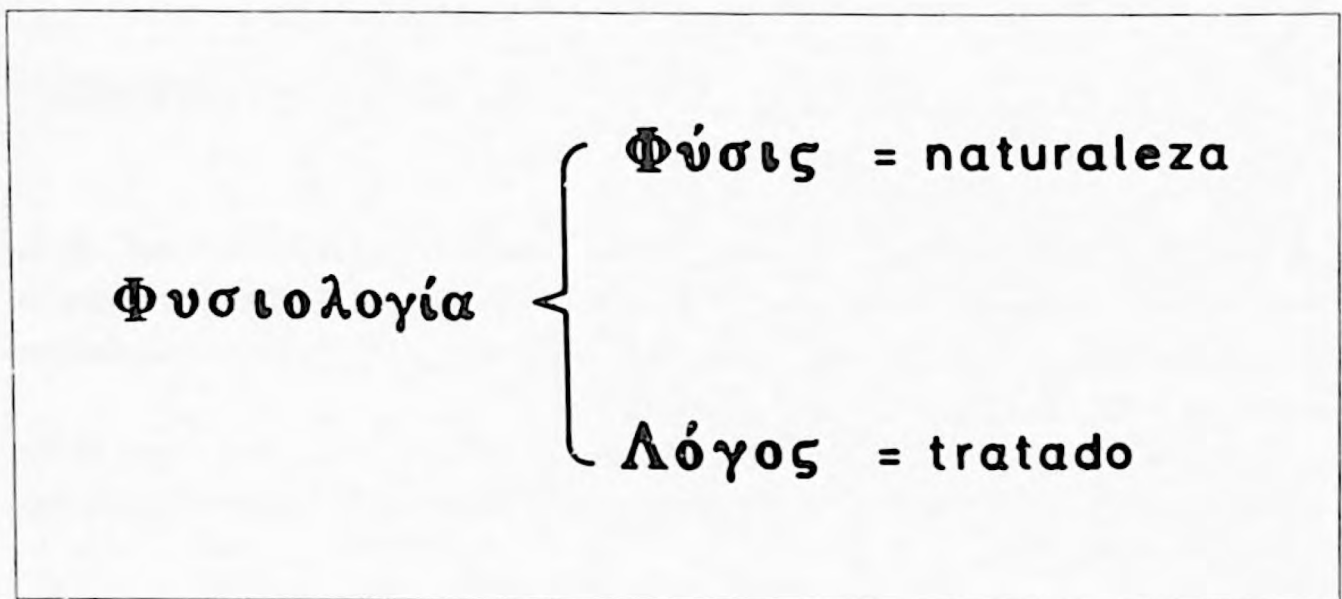


Fig. 1. La etimología griega del término “Fisiología”.

siado amplia, pues comprende a todas las ciencias naturales: Física, Astronomía, Geología, Botánica, Zoología, entre otras. No obstante, esta concepción esencialmente naturalista perduró -sin variación- hasta el siglo XVII, como lo confirma el hecho que en una obra de William Gilbert (1540-1603) sobre el magnetismo terrestre (*De magnete*, 1600) figure la palabra Fisiología en el subtítulo de la edición inglesa *On Magnetism: A New Physiology*, es decir, que para dicho autor el magnetismo de la tierra significaba el estudio de una “nueva fisiología”.

Por otra parte, en la cultura cinco veces milenaria de Oriente, el concepto de Fisiología se define mediante tres ideogramas (Noble, 1992) que repre-

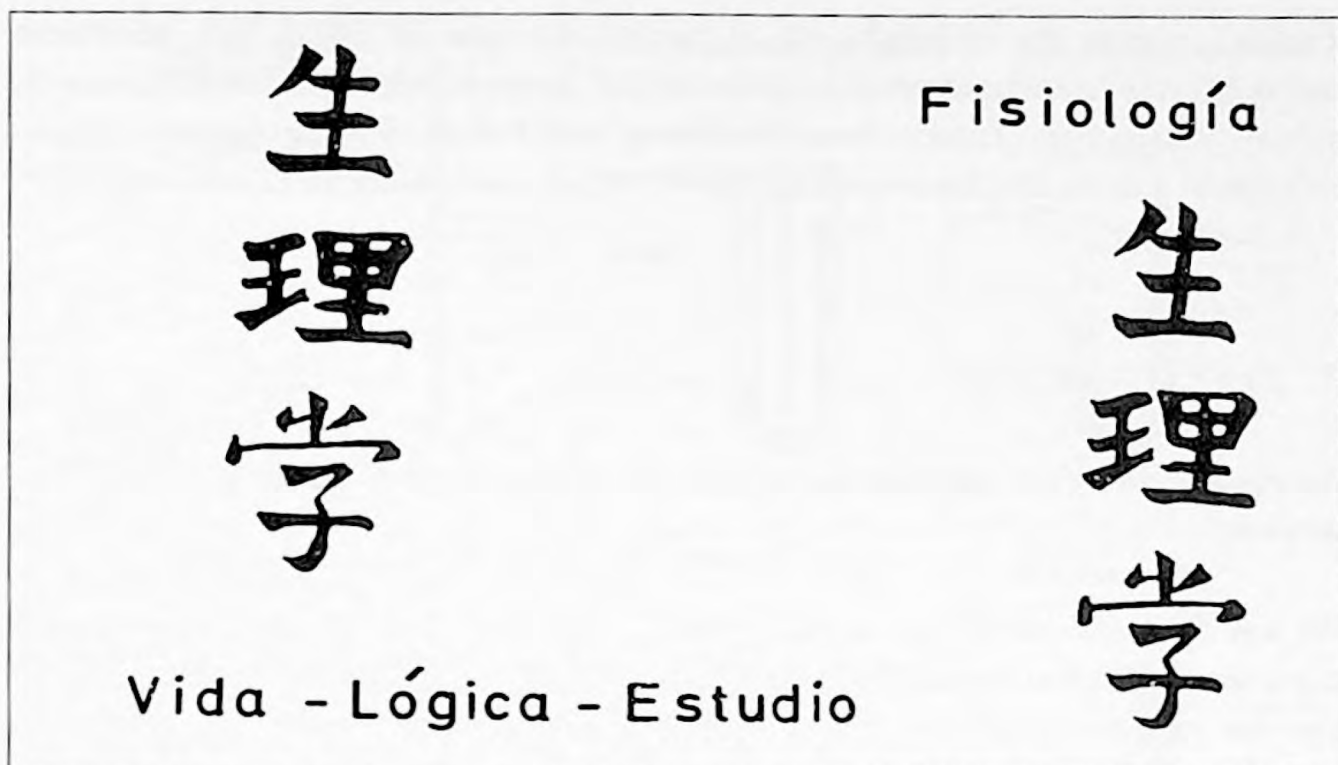


Fig. 2. Los tres ideogramas chinos que definen el concepto: Fisiología⁹.

sentan el tríptico VIDA + LÓGICA + ESTUDIO (Fig. 2); de modo que para los orientales, la Fisiología es el “*Estudio de la lógica de la vida*”. Resulta que también esta concepción de la Fisiología es amplísima, ya que la Fisiología incluiría, por ejemplo, el estudio del código genético, el que fue dilucidado por las geniales investigaciones de Watson y Crick en el año 1953, puesto que ellos descifraron la “lógica” de la transferencia de la información genética, que está codificada en la “doble hélice” de los cromosomas en los núcleos celulares, código que determina las características morfológicas y funcionales de todos los seres vivos.

La autobiografía del destacado fisiólogo mexicano el profesor J. Joaquín Izquierdo, lleva por título *Desde un alto en el camino*, a mi vez, también deseo hacer un “alto en el camino” para reflexionar sobre la evolución de la instrumentación fisiológica que he utilizado personalmente en el transcurso de los últimos cincuenta años.

Cuando me refiero a mi experiencia en la vida universitaria, deseo hacerlo en el sentido que le ha dado Wilhelm von Humboldt (1767-1835), el eminente estadista, filólogo, filósofo y primer rector de la Universidad de

Berlín⁷, quien ha insistido en el hecho de que el ideal del quehacer universitario se cumple cuando están estrechamente relacionadas la docencia y la investigación (*Einheit von Forschung und Lehre*). Por esta razón, deseo referirme a estas dos facetas de mi labor como universitario: la investigación y la docencia⁵.

I. INVESTIGACION

La evolución de los instrumentos para la medición directa de la presión arterial

En los últimos 50 años, lo más espectacular no ha sido el crecimiento exponencial de los conocimientos, sino el hecho que la metodología fisiológica ha evolucionado en forma sorprendente, aumentando la rapidez, la precisión y la fidelidad de los métodos de estudio de las más diversas funciones en los seres vivos. Afortunadamente, estos cambios tecnológicos son visibles y tangibles, de modo que una somera descripción basta para apreciar el progresivo perfeccionamiento de los métodos de estudio, con lo cual fue aumentando no sólo el bagaje de los conocimientos, sino -y sobre todo- la precisión y la fidelidad de la información obtenida en el laboratorio.

El progreso de las ciencias fisiológicas ha estado directamente relacionado con el perfeccionamiento de los instrumentos que se utilizan para medir con exactitud las variaciones de una determinada función en el transcurso del tiempo. Cuando la observación visual se hizo insuficiente, se inventó el microscopio; y para la medición exacta del "tiempo" fueron utilizados cronómetros y cronógrafos. Por otra parte, los termosensores de la piel (puntos de frío y de calor) fueron reemplazados por diversos tipos de termómetros; y en vez de los sensores táctiles y de presión de la piel humana se utilizaron diversos tipos de manómetros. Cabe destacar que, en todos estos transductores fisiológicos, la única dimensión física que es utilizada para medir es la variación de longitud (L), tanto vale esto para medir longitudes milimétricas como para seguir la evolución del tiempo en la esfera del reloj ($L = 2\pi r$), como también para medir la altura (L) de la escala termométrica, y finalmente para el registro gráfico de la presión arterial, que se mide por el desplazamiento (L) del índice del manómetro de mercurio o de la aguja inscriptora en un polígrafo.

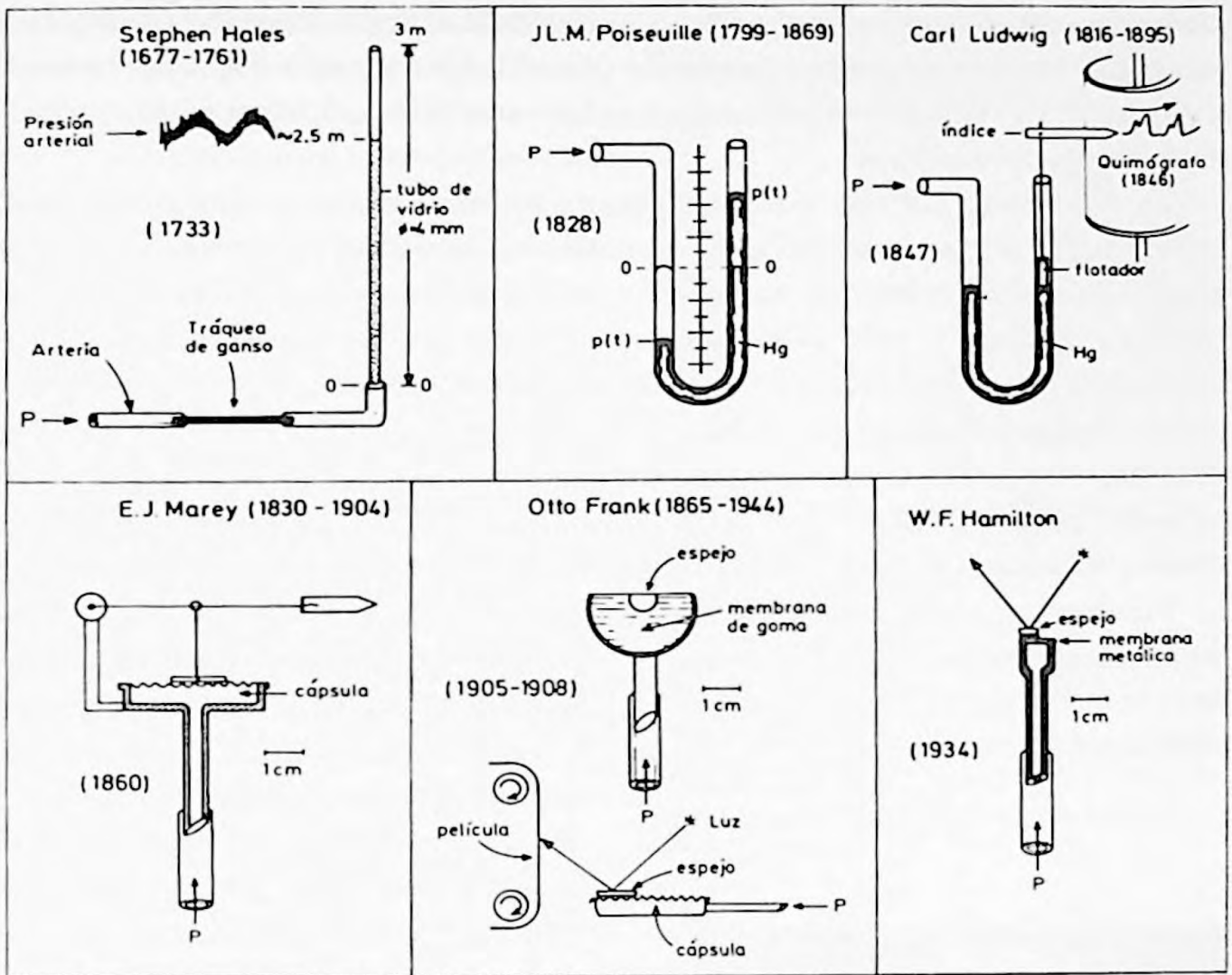


Fig. 3. Evolución de la tecnología fisiológica para la medición directa de la presión arterial sistémica: a) manómetro de sangre (Hales), b) manómetro de mercurio (Poiseuille), c) manómetro de mercurio con flotador e inscriptor en un quimógrafo (Ludwig), d) cápsula de membrana de goma delgada (Marey), e) cápsula de registro óptico (Frank), f) cápsula de registro óptico, con membrana de goma gruesa o con membrana metálica (Hamilton).

Como un paradigma se puede mencionar el inicio de la evolución de la Hemodinámica (Fig. 3), desde el día que el RP Stephens Hales (1677-1761) midiera por primera vez la presión arterial en un equino, lo que sucedió en el año 1733, utilizando para ello un simple manómetro de sangre. El físico y médico francés J.L.M. Poiseuille (1799-1869) inventó el manómetro en U de mercurio casi cien años más tarde (1828), y dos décadas después (1847), el maestro de la Fisiología experimental Carl Ludwig (1816-1895) introdujo el "registro gráfico" de la presión arterial de los animales de laboratorio, agregando un flotador al ya mencionado manómetro de mer-

curio e inventando el “quimógrafo”, cuyo cilindro rotatorio estaba recubierto por papel baritado, que era ahumado con el hollín de una llama de benzol y alcanfor, y el que servía para registrar las variaciones de la presión arterial en función del tiempo.

Es interesante señalar que éstos fueron los instrumentos de registro que se utilizaron durante casi un siglo en todos los laboratorios de Fisiología en el mundo entero, y los que yo utilicé como alumno, como ayudante, como jefe de trabajos, y más tarde como profesor, en los diversos cursos de Fisiología que se impartían en la Universidad de Concepción⁸. En cambio, para el registro de las pulsaciones -tanto arteriales como venosas- utilizábamos cápsulas con una delgada membrana de goma y con transmisión neumática, que habían sido inventadas por el brillante físico y fisiólogo francés Etienne-Jules Marey (1830-1904).

Finalmente, cabe señalar que todos estos instrumentos de registro eran de respuesta lenta, no-lineal, y que adolecían de múltiples defectos a causa de la inercia y de las oscilaciones secundarias que eran propias de los mismos instrumentos.



Fig. 4. *Stephen Hales*².

STEPHEN HALES

En nuestra época puede parecer muy extraño que un sacerdote (Fig. 4) haya incursionado -y con éxito- en el campo de las ciencias naturales. Empero, en el siglo XVIII, la “Edad de la Razón basada en la Fe”, no era algo fuera de lo común, en consideración a que el estudio de la naturaleza era nada más que otra forma para verificar la *sabiduría del Todopoderoso*, un razonamiento que repetidas veces aparece en los escritos de Stephen Hales (1677-1761). Además, es de interés mencionar que dicho autor expuso sus resultados experimentales en la “Royal

Society” de Londres, sociedad científica a la que se incorporó en el año 1717. Cabe destacar, además, que Hales carecía de una formación académica, ya sea en Anatomía o en Medicina, de modo que no pudo ser influenciado por los prejuicios de su tiempo². Estos experimentos de Fisiología Animal realizados por Hales se publicaron en 1773 bajo el título de *Haemastaticks*.

Analicemos ahora algunos detalles de uno de sus múltiples experimentos². En el mes de diciembre utilizó para sus ensayos una yegua vieja de 14 años de edad aproximadamente, la recostó en un lecho de paja y la inmovilizó mediante cordeles, los que fueron atados a una armazón de madera (Fig. 5). A continuación insertó

en la arteria carótida un trozo de tráquea de ganso, que hacía las veces de cánula arterial, y comunicó -mediante un tubo de bronce- dicha tráquea con un tubo de vidrio de 3 metros de largo y 4 mm de diámetro. Al soltar la ligadura arterial, la sangre se elevó rápidamente a una altura aproximadamente 2,50 metros por encima del nivel del corazón. Hales pudo observar fluctuaciones del nivel sanguíneo debido a la actividad rítmica del corazón (pulsaciones); también constató fluctuaciones más lentas, que son atribuibles a la influencia de la respiración y a los cambios del tono vasomotor. Lo más notable es que estos experimentos fueron realizados sin anestesia y sin anticoagulantes. Cabe recordar a este propósito, que la anestesia fue descubierta entre los años 1842 y 1847 por Long, Morton y Simpson, es decir, cien años más tarde.



Fig. 5. Stephen Hales y su ayudante, cuando por primera vez se midió directamente la presión arterial sistémica en un equino².

CARL LUDWIG

El profesor Carl Ludwig (1816-1895), de la Universidad de Leipzig (Fig. 6), fue junto a Claude Bernard (1813-1878), de París, uno de los creadores de la Fisiología Moderna, por cuanto en su instituto se formaron prácticamente



Fig. 6. *Carl Ludwig*²

moderna, por cuanto la mayoría de los descubrimientos en Fisiología y Farmacología fueron hechos utilizando este método de registro gráfico. Tanto es así, que mi maestro, el profesor Alexander Lipschütz, en su curso del año 1934, utilizó preferentemente este instrumental, casi cien años después de haber sido inventado⁸.

todos los fisiólogos de Europa, Estados Unidos y Japón. Ludwig fue un maestro de carácter muy bondadoso, de una generosidad sin límites y un inventor de nuevos instrumentos de registro.

La invención del manómetro de mercurio y del quimógrafo (Fig. 7) debe considerarse como una piedra angular de la Fisiología cardiovascular

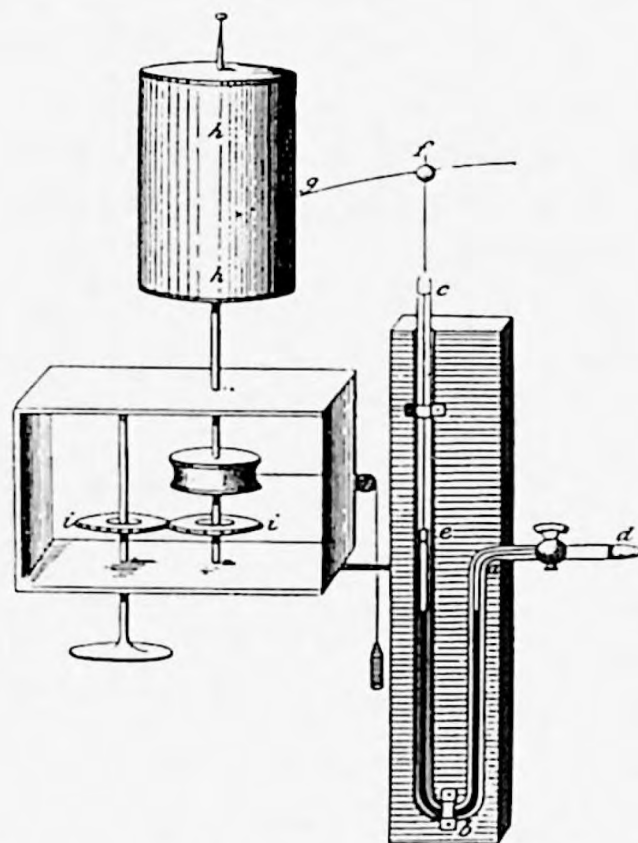


Fig.7. *Representación esquemática del manómetro de mercurio, con flotador y aguja inscriptora, además del quimógrafo inventado por Ludwig*².

OTTO FRANK

El profesor Otto Frank (1865-1944), además de inventar el método óptico para el registro de presiones y de volúmenes (Fig. 3), se caracterizó por la aplicación de la Física y de la Matemática en el análisis de las funciones del sistema cardiovascular (Fig. 8) y en particular a la dinámica del corazón de sapo, que más tarde fueron aplicados por E.H. Starling al corazón de mamífero (ley de Frank-Starling).

Un avance sustancial se logró cuando se reemplazaron los registros mecánicos por los registros ópticos (Fig. 3), y para lo cual se tomaron como modelo la membrana delgada de goma (cápsula de Frank, 1905) y la membrana gruesa de goma o una membrana metálica (cápsula de Hamilton, 1934); en este último caso el rayo reflejado se proyectaba sobre una película que se encontraba a 5 ó 6 metros de distancia, lo que en verdad significó un grave inconveniente técnico⁶. Este problema pudo ser resuelto mediante los rayos "laser", que fueron descubiertos en 1960, es decir, 30 años más tarde.

La evaluación cuantitativa (Fig. 9) de los diversos modelos de manómetro es posible mediante la ecuación de Frank, tal como se detalla en el Anexo I.



Fig. 8. Otto Frank².

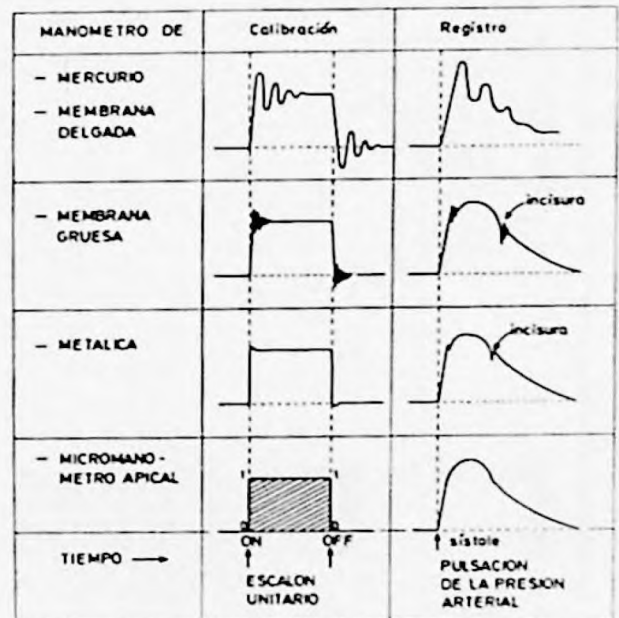


Fig. 9. Comparación de las respuestas de los diferentes modelos de manómetro en función del tiempo, cuando se les aplica un escalón unitario de presión, y se registra una pulsación de la presión arterial sistémica⁴.

Con la introducción de la electrónica se pudieron obtener registros satisfactorios, para lo cual se utilizó en la Fisiología el principio del puente de Wheatstone, ya sea en los manómetros capacitativos o resistivos (véase Anexo II para mayores detalles).

TRANSDUCTORES ELECTRICOS DE ULTIMA GENERACION

Finalmente, en el último decenio se ha podido fabricar "micromanómetros apicales" que permiten captar los cambios de la presión en la punta de la sonda cardíaca, de modo que la transmisión de la información no es hidráulica, ni neumática, sino eléctrica y a base de transductores en estado sólido, con lo que se logran registros instantáneos, lineales, sin inercia y sin artefactos secundarios (Fig. 10).

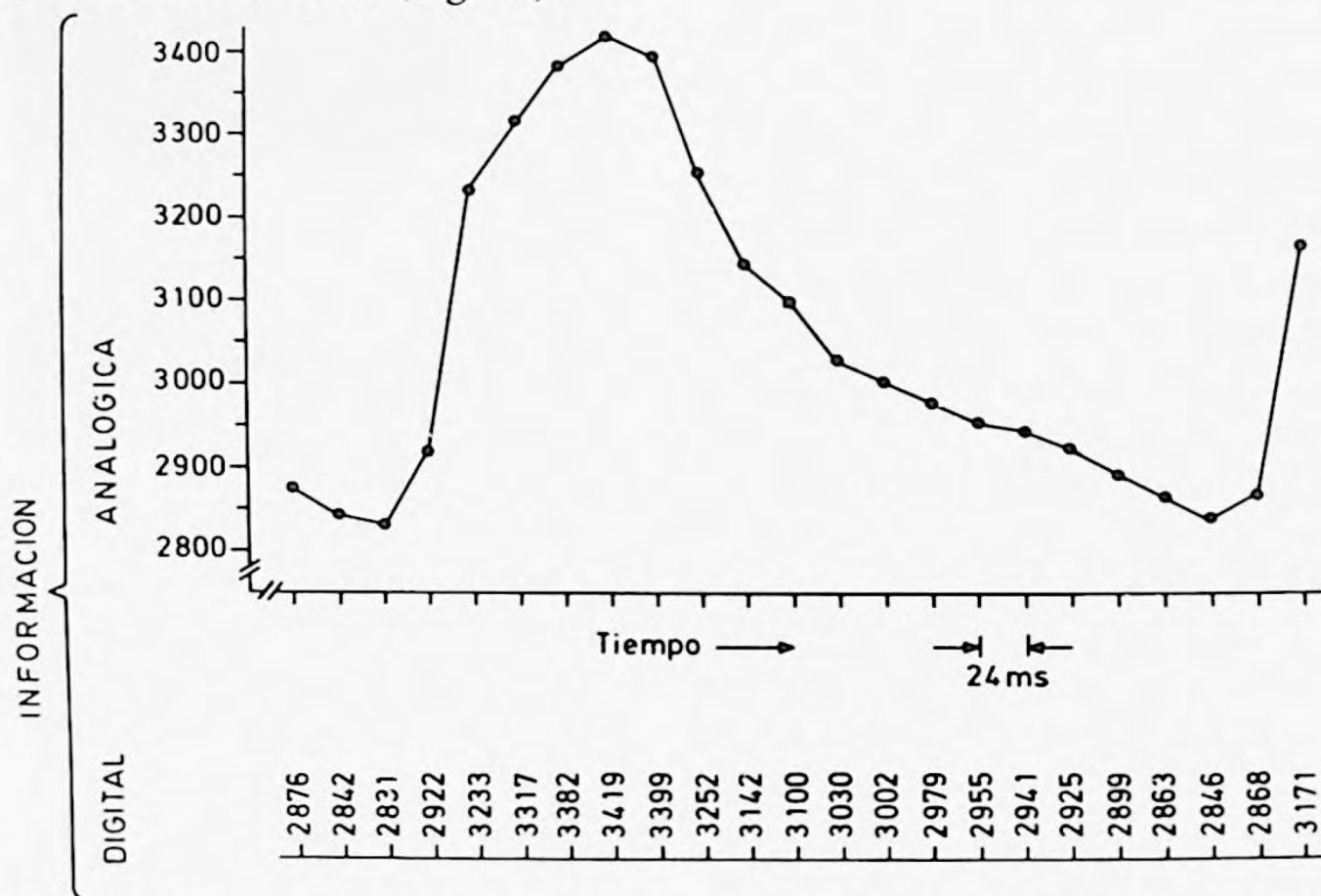


Fig. 10. El procesamiento digital y analógico de una pulsación de la presión arterial, registrada mediante micromanómetro apical (Millar) en la aorta torácica de un perro anestesiado. Todo el procedimiento es lineal, instantáneo (eléctrico), y sin artefactos. A la izquierda los valores numéricos (digital), los que aparecen instantáneamente en la pantalla del computador (PC), y a la derecha la reconstrucción gráfica (analógica) de dicha pulsación. El intervalo entre cada valor numérico es de 24 milisegundos, a razón de 42 cifras de presión arterial por segundo.

CONCLUSIONES

En síntesis, se puede afirmar que los instrumentos de registro de los fenómenos fisiológicos también “evolucionan” con el transcurso del tiempo, tal como lo han hecho todos los seres vivos de acuerdo a la teoría darwiniana, según la cual sólo “sobreviven los más aptos” (*survival of the fittest*). En el presente caso, sólo los instrumentos y las metódicas que dan resultados satisfactorios son los que se imponen (sobreviven) a la larga en los centros de investigación científica, tal como aparece resumido en la Tabla I, en cuya última columna se observa claramente que el progreso de la instrumentación fisiológica está asociado a una reducción progresiva de los cambios de volumen (ΔV) cada vez menores en los sistemas de registro de la presión arterial.

Tabla I. Sinopsis de la evolución de los métodos de registro de la presión arterial en los animales de experimentación.

Año	Autor	Manómetro de:	Desplazamiento de volumen (ΔV) en el sistema de registro para una presión de 100 mm Hg
1733	Stephen Hales	columna de sangre	17 ml
1828	J.L. Poiseuille	mercurio, tubo en U	≈ 3 ml
1847	C. Ludwig	mercurio, tubo en U con flotador e inscriptor	≈ 2 ml
1934	W.F. Hamilton <i>et al.</i>	método óptico, con espejo en membrana metálica	< 0.1 ml
1935	“Stratham” (USA)	“puente de Wheatstone” con resistencias y membrana metálica	0.05 mm ³
1985	“Millar” (USA)	“puente Wheatstone” con semiconductor como microtransductor	0.00 mm ³

II. DOCENCIA

Finalmente, desearía referirme a medio siglo de experiencia docente, que ha consistido en clases teóricas, seminarios y trabajos prácticos en el laboratorio. Por tradición las “clases teóricas” -amén de la consabida utilización de la pizarra- se ilustraban con la proyección de láminas y de diapositivas, que servían para complementar la materia expuesta por el profesor; en algunas ocasiones se proyectaban incluso excelentes películas científicas. Naturalmente, la mejor ilustración de la materia la constituía el “experimento de demostración” durante la misma clase, tal como lo aprendí de mi primer maestro, el profesor Dr. Alexander Lipschütz⁸. Por otra parte, los “seminarios de discusión”, con participación de docentes y estudiantes, eran de gran utilidad para analizar los problemas más difíciles y para aclarar las dudas que pudiesen tener los estudiantes sobre determinadas materias.

No obstante, el tema más polémico se refiere a la utilidad de los “trabajos prácticos” cuya realización significaba un gran gasto (animales de experimentación y reactivos), mucho tiempo para su ejecución y, en cambio, poco tiempo para el análisis de los resultados, todo lo cual se dificultaba aún más cuando el número de estudiantes por curso era excesivamente grande.

La tradición de los trabajos prácticos data del siglo pasado, cuando las dos más brillantes escuelas de Fisiología estaban bajo la dirección de Claude Bernard en París y de Carl Ludwig en Leipzig. Desde entonces, y en todo el mundo, se introdujeron los trabajos prácticos para los estudiantes, ejercicios cuyo número, calidad y complejidad podían variar notoriamente, dependiendo de la orientación y de los recursos de que se disponía en cada Universidad. Cabe señalar que esta más que centenaria tradición se ha mantenido hasta nuestros días. Empero, ¿existe una relación directa entre este esfuerzo docente y los resultados que se logran en el aprendizaje de las ciencias fisiológicas? En la actualidad hay serias dudas al respecto.

A.. TRABAJOS PRACTICOS “MODELO SMÖRGÅSBORD”

La exótica palabra “smörgåsbord”, que hemos utilizado para caracterizar a este modelo, corresponde a una comida típica en los países escandinavos, y que consiste en innumerables pequeñas porciones de alimentos de la más variada índole, como ser carnes, pescado, ensaladas, quesos, diversos tipos de

pan, té, café, leche y otras bebidas. Esta variada merienda se caracteriza, además, por un consumo *ad libitum*, por el hecho que se cancela una determinada suma, cualquiera que sea la magnitud del apetito del comensal. El smörgåsbord incita naturalmente a la bulimia, y el resultado muchas veces es que dicha experiencia culinaria termina con una dramática indigestión.

Algo semejante sucede con todo el ciclo de trabajos prácticos tradicionales, en los cuales sólo una vez se observa un determinado fenómeno fisiológico; en los próximos prácticos se presentan cada vez otras materias por estudiar. Al final del curso práctico, de esta secuencia multifacética, no se puede recordar con precisión qué era lo que realmente fue lo importante en cada caso. El resultado final es una “indigestión” de tipo docente.

En el afán de abarcar “toda” la materia, cada ejercicio práctico tiene que referirse forzosamente a un tema puntual, y no habrá tiempo para repetir algún experimento, ya sea para verificar un resultado o para corregir algún inconveniente técnico que se haya podido presentar en el transcurso del trabajo práctico; su duración, de algunas horas, también conspira en contra de la posibilidad de repetir algún ensayo.

Una pregunta trivial, y a este propósito, podría formularse así: ¿Alguien ha aprendido alguna habilidad particular realizando dicho acto *una sola vez*? Así, por ejemplo, cuando durante la primera infancia se aprende a hablar, a caminar, a nadar, a dibujar, a escribir, el niño no lo hace una sola vez, sino que más bien tiende a repetir estos complicadísimos ejercicios una y otra vez, para que al final -con gran esfuerzo y dedicación- logre dominar alguna de estas habilidades.

Este mismo razonamiento vale para el entrenamiento de un futuro atleta, que nada conseguiría si corre los 100 metros planos en la primera sesión, practica el tenis en la segunda, el salto alto en la tercera y, así, sucesivamente.

También en el aprendizaje de las artes sería inconcebible que un alumno practique el violín en la primera sesión; el piano en la segunda, y el oboe en la tercera.

Lo que en todos estos casos se requiere es la práctica de un solo deporte o de un solo instrumento musical, hasta que después de innumerables sesiones se logra dominar la técnica respectiva.

Si según el ideal universitario de W. von Humboldt se postula la “unidad de investigación y docencia”, y si la enseñanza de las ciencias fisiológicas se basa en los conocimientos adquiridos mediante la investigación científica original, es por lo tanto indispensable que el estudiante se familiarice con la

metódica científica, no sólo para comprenderla cabalmente, sino para que en el futuro pueda realizar trabajos de investigación con éxito y por sus propios medios. Pero si el estudiante nunca ha practicado esta metodología, difícilmente podrá comprender cuál es su verdadero significado en la vida profesional.

B. TRABAJOS PRACTICOS SEGUN EL MODELO: ARPA

En vez de una información caleidoscópica superficial, y de escasa consistencia, que es característica del aprendizaje según el modelo tradicional (smörgåsbord), nos parece preferible ensayar otro modelo de trabajo práctico, y que se puede caracterizar por la sigla ARPA.: *Aprendizaje por Resolución de Problemas Aplicados*

Desde hace dos años, en la Escuela de Ingeniería de esta Universidad, y por iniciativa del profesor Ventura Cerón, en colaboración con los matemáticos, profesores Hermann Alder y Ernesto Figueroa, se ha llevado a cabo un nuevo proyecto de docencia de acuerdo al modelo que ellos han caracterizado como ARPA. Hasta la fecha los estudiantes de ingeniería han ejecutado 40 proyectos de investigación, en los 6 cursos que se han organizado según esta nueva modalidad de enseñanza (Farías, 1992).

El proyecto ARPA consiste en:

- 1) Realizar un estudio sistemático de un tema específico, para lo cual se requiere obviamente paciencia, dedicación y espíritu de trabajo.
- 2) El aprendizaje de una metódica rigurosa de trabajo, tanto en la recolección de la información como en la confección de un protocolo detallado y que debe ser cumplido estrictamente, siendo lo esencial la "manipulación" de los instrumentos y de los diversos objetos durante el trabajo de laboratorio.
- 3) Estimular la imaginación y la inventiva en los estudiantes, ya sea para mejorar la técnica experimental o para proponer nuevas ideas y teorías acerca del problema en estudio.
- 4) Procesar la variabilidad de los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico.

- 5) Aprender a trabajar en equipo (*team-work*) y a discutir los resultados obtenidos de la observación directa de la naturaleza.
- 6) Redactar un informe sobre el trabajo realizado, experiencia que servirá también al estudiante para sus futuras publicaciones científicas.
- 7) Descubrir precozmente vocaciones científicas en los estudiantes, a fin de incrementar el número de científicos activos que la nación requiere para su desarrollo científico-tecnológico futuro.

INTERPRETACION DE LA SIGLA: "ARPA"

Como ya se mencionara, la sigla ARPA significa Aprendizaje por Resolución de Problemas Aplicados.

A. ¿Qué se entiende por Aprendizaje? De acuerdo al *Diccionario de la Lengua Española*, el hecho de "aprender" se refiere a "*adquirir el conocimiento de alguna cosa por medio del estudio o de la experiencia*". El énfasis debe ponerse en las palabras claves: 1) adquirir conocimiento, 2) alguna cosa, 3) estudio, y 4) experiencia.

- 1) El "*adquirir conocimiento*" significa un acto voluntario tendiente a incrementar la información acumulada por el sujeto hasta el momento.
- 2) Se aprende algo de "*alguna cosa*", es decir, que la "cosa" es un objeto del mundo circundante del cual se obtiene alguna nueva información, para lo cual el sujeto debe manipular (observar, oler, gustar, tocar, mover, etc.).
- 3) El método de aprendizaje es el "*estudio*" de las características físicas de la "cosa" estudiada, con énfasis en las características presentes, ausentes, y las variaciones de éstas, de acuerdo a las tablas preconizadas por Francis Bacon (1561-1620).
- 4) El vocablo "*experiencia*" señala que el sujeto debe experimentar con el "objeto", con el propósito de que a través de los órganos de los sentidos se informe de los cambios del objeto si éste es sometido a manipulaciones por parte del observador (apreciación de su masa, su volumen, su forma, su color, etc.).

En síntesis, el aprendizaje personal y activo se refiere entonces a la interacción entre el sujeto y la naturaleza misma, y no el aprendizaje pasivo del “discípulo” que aprende del “maestro” todo aquello que él dice o que él escribe en la pizarra, con total prescindencia de lo que esto significa en la vida real, es decir, en la naturaleza.

R P Estas dos letras se refieren a la **R**esolución de **P**roblemas. Es indudable que esta afirmación se refiere a una situación “ideal” que se persigue con este nuevo método de estudio, por cuanto en muchos casos el problema no se “resuelve” satisfactoriamente, y esto por múltiples causas: falta de tiempo para su estudio; instrumental inadecuado; exceso de variables involucradas, análisis matemático inoperante; métodos computacionales de insuficiente capacidad de procesamiento, entre otros muchos factores. Si la **R**esolución del **P**roblema (la meta) no se logra por alguna de las razones antes enumeradas, esto carece de importancia, pues lo esencial es “investigar” seriamente y aprender la metodología (el camino), a fin de progresar en el estudio del tema propuesto.

A La letra final se refiere al vocablo Aplicado, con lo que se desea insistir en el estudio de problemas de aplicación práctica, de la vida real (profesión específica), y para lo cual se requiere del laboratorio, en donde se estudian las variables de interés con el instrumental adecuado, mediante transductores de presión, de flujo, de temperatura, tensión, pH, pO₂, pCO₂, humedad, radiactividad, concentración, presión osmótica, etc.

Este nuevo programa (ARPA) relega entonces el aprendizaje frente a la pizarra a un segundo plano, quedando esto último como una herramienta auxiliar, y se descarta como único medio para alcanzar una “buena nota” en el examen escrito correspondiente.

Lo esencial es el *aprendizaje activo*, y no la *repetición pasiva* de lo que dijo el profesor, que se resume en el clásico: *Magister dixit*.

En resumen, las etapas de estos trabajos de investigación son las siguientes: 1) Recopilación bibliográfica; 2) Modelación del problema; 3) Análisis de métodos numéricos de solución; 4) Solución computacional; 5) Fase experimental; 6) Discusión de los resultados; 7) Conclusiones.

Los resultados obtenidos con el programa ARPA pueden resumirse como sigue:

- 1) Los estudiantes están satisfechos con este nuevo método de estudio, obteniendo una calificación promedio de más de 85 puntos (máximo = 100 puntos).
- 2) Es excelente la interacción entre los docentes y los estudiantes.
- 3) El ambiente de trabajo es grato y relajado; no existe el apremio que caracteriza al sistema tradicional.
- 4) Cada problema significa un desafío para todo el grupo de trabajo;
- 5) El enfoque es “holístico” por ser multidisciplinario; el método convencional es de naturaleza analítica o cartesiana;
- 6) La metodología del ARPA motiva notoriamente a los estudiantes, por cuanto no se realizan trabajos rutinarios, cuyos resultados se conocen de antemano.
- 7) Los docentes también aprenden, debido a que los resultados de los experimentos son muchas veces inesperados, y así pueden dar origen a nuevas líneas de trabajo.
- 8) El objetivo del trabajo experimental no es obtener una buena nota, sino aprender para llegar a ser un profesional competente y para resolver los problemas que se presentarán en el ejercicio de su profesión en el futuro.
- 9) Los estudiantes aprenden a colaborar (*team-work*), a discutir razonablemente, a tomar iniciativas, y a exponer públicamente los resultados alcanzados en sus investigaciones personales.

En síntesis, la investigación y la docencia se imbrican en el programa ARPA, y tal como lo afirma el gran físico de la Universidad de Princeton, John A. Wheeler:

One can only learn by teaching.

El reemplazo de los trabajos prácticos tradicionales por proyectos de investigación con resolución de problemas aplicados (ARPA), no puede ni debe hacerse en forma súbita, ni puede ser aplicado a todo un curso, sino que debería ensayarse en la práctica con un grupo reducido de temas (planta piloto), y una vez confirmadas las bondades del nuevo método de enseñanza, podría extrapolarse a todos los alumnos del curso. Este ensayo previo -en pequeña escala- es siempre aconsejable, por ser una práctica que es usual en Tecnología, desde el momento que los errores en el plan piloto o en el “modelo” son por lo general de costo reducido (esfuerzo, tiempo, dinero),

en cambio en el “prototipo” o ensayo a gran escala, el costo podría ser excesivamente grande. Esta recomendación se resume en el aforismo de L.H. Baekeland, que en su forma original dice:

Cummit your blunders on a small scale and make your profits on a large scale.

A propósito de “costos”, es de interés mencionar que éstos serán casi idénticos a los que se destinan en la actualidad a los trabajos prácticos tradicionales (equipo, reactivos, animales de experimentación). Empero, en muchos casos se podrían utilizar instrumentos que ya sean obsoletos, porque han debido ser reemplazados por nuevas metodologías, de este modo, las adquisiciones nuevas pueden reducirse a un mínimo, y además, las nuevas adquisiciones de instrumental pueden ser programadas para años sucesivos.

Así como en las más diversas carreras académicas se exige que los docentes realicen investigaciones científicas originales, así también los estudiantes deberían familiarizarse precozmente, ya durante sus estudios universitarios, con el método científico, para que éste se convierta en un hábito de trabajo, de modo que así egresarían como profesionales plenamente capacitados para realizar investigaciones propias, y estar capacitados para resolver cualquier problema con el que han de enfrentarse en la práctica profesional futura.

REFERENCIAS

1. Farías, O. (1992). *Método ARPA, una realidad al servicio de la educación en Ingeniería*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.
2. Fishman, A. P., Richards, D. W. (1964). *Circulation of blood. Men and ideas*. New York: Oxford University Press.
3. Franck, E. K. (1966): Physiological pressure transducers, *In: Methods in Medical Research* (R.F. Rushmer, ed.) Vol. II. Chicago: Year Book Medical Publishers (pp. 137-161).
4. Gauer, O. (1960). Kreislauf des Blutes *In: Lehrbuch der Physiologie des Menschen* (Landois-Rosenmann, ed.). München: Urban & Schwarzenberg (pp. 65-286).
5. Günther, B. (1991). “Cuatro personajes en busca de Universitas y un epílogo”. *Atenea* N° 162: 125-145.
6. Hamilton, W. F., Brewer, G. and I. Brotman. (1934). “Pressure pulse contours in the intact animal”. *Amer J. Physiol.* 107: 427-435.

7. Knoll, JH., Siebert, H. (1967). *Wilhelm von Humboldt: político y pedagogo*. Bad. Godesberg: Internationales.
8. Lipschütz, A., Pi-Suñer, J. (1934) *Curso práctico de fisiología*. Madrid: Morata (2 vols).
9. Noble, D. (1992). 32nd International Congress of Physiological Sciences, Glasgow. *News in Physiological Sciences*, 7: 48.
10. Reichel, H., Bleichert, A. (1966). *Leitfaden der Physiologie des Menschen*. Stuttgart: Enke(pp. 377-379).



ANEXO I

EVALUACION CUANTITATIVA DE UN MANOMETRO DE PRESION

¿Qué características debe tener un manómetro para ser considerado como satisfactorio?

- 1) El sistema de registro¹⁰ *no debe influir* en la función que se está investigando.
- 2) La *sensibilidad* (deflexión de la aguja del instrumento) debe ser adecuada para el propósito que se persigue.
- 3) La *calibración*, en lo posible debe ser *lineal*, es decir, que debe existir proporcionalidad entre la causa (presión) y el efecto (deflexión) del instrumento de registro (mecánico, óptico, eléctrico).
- 4) El valor *cero* (referencia) debe ser estable, y no debería desplazarse con el transcurso del tiempo, y
- 5) El sistema debe responder adecuadamente a los *cambios bruscos* de la variable en estudio (respuesta de alta frecuencia).

ACERCA DE LA CALIDAD DE UN MANOMETRO DE PRESION: ECUACION DE FRANK

Para evaluar cuantitativamente la calidad de un manómetro de presión¹⁰ se recomienda aplicar la ecuación de *Frank* (1865-1944), la que permite calcular la *frecuencia propia* (N) de todo el sistema de registro⁴, incluyendo la columna de líquido de la sonda que conecta el interior del vaso sanguíneo con el sistema de registro (cápsula):

$$N = (2\pi)^{-1} (E'/M')^{1/2} \quad (1)$$

donde

N = frecuencia propia de todo el sistema;

E' = módulo de elasticidad volumétrica;

M' = masa efectiva del sistema (suma de todas las masas parciales).

Por otra parte, la “*elasticidad volumétrica*” (E’) es función del cociente.

$$E' = \frac{\text{Cambio de presión } (\Delta p)}{\text{Cambio de volumen } (\Delta V)} \quad (2)$$

La “*masa efectiva*” (M’) de la sonda cardíaca o arterial es

$$M' = (Lg) / (\pi r^2) \quad (3)$$

en que

L = largo de la sonda cardiovascular;

r = radio de la sonda;

g = peso específico (densidad) del líquido que contiene la sonda y la cápsula; para el agua (g = 1.00); para la sangre (g = 1.05); y para el mercurio (g = 13.6)

Finalmente, conviene definir también la “*amortiguación*” del sistema de registro (4), la que se debe principalmente al roce causado por el desplazamiento del líquido de la sonda cardíaca cuando varía la presión (pulsaciones) en el interior de los vasos sanguíneos. Por cuanto la amplitud (A) de las oscilaciones es exponencialmente decreciente en función del tiempo, la amortiguación (Λ) se mide determinando la amplitud (altura) de dos oscilaciones sucesivas, de modo que

$$\Lambda = \ln (A_1/A_2) \quad (4)$$

donde

ln = logaritmo natural, cuya base es $e = 2.718...$

ANEXO II

FUNDAMENTOS DEL "PUENTE DE WHEATSTONE"

En el año 1843 el físico inglés sir Charles Wheatstone (1802-1875) ideó un circuito para medir con rapidez y precisión la magnitud de una resistencia eléctrica, para lo cual construyó un tetrámero resistivo (Fig. 11) al cual se aplica un voltaje determinado, y un galvanómetro (G) que sirve para medir el flujo de corriente a causa de la diferencia de potencial que se crea entre las dos ramas del circuito³.

Este mismo principio es utilizado en los electromanómetros de membrana metálica (Statham) y en el sensor del micromanómetro apical (Millar), tal como aparece en el circuito ilustrado en la Fig. 11.

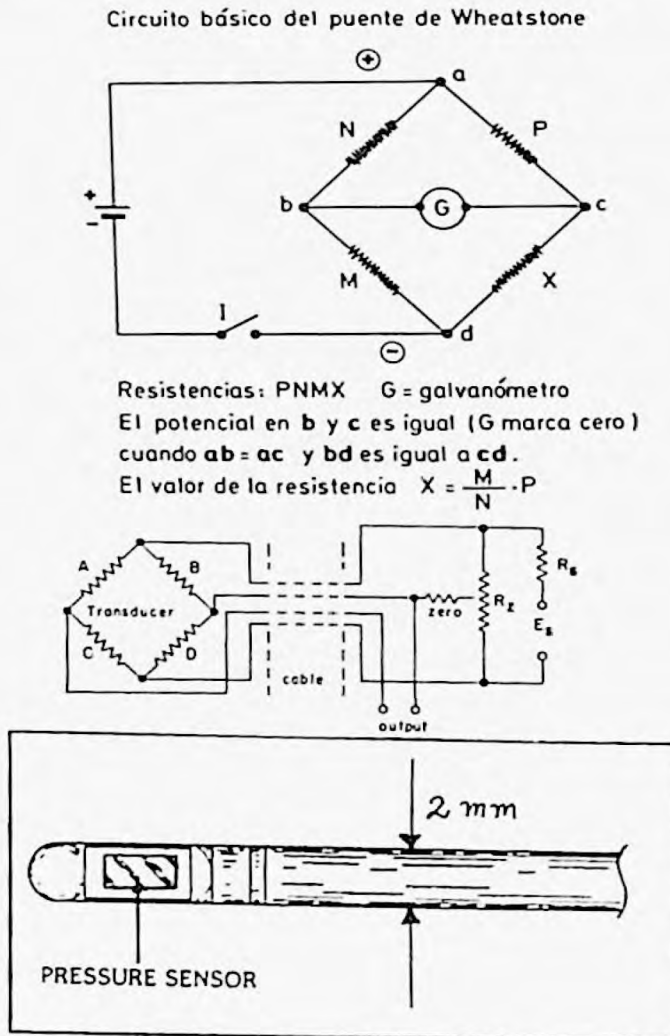


Fig. 11. Representación esquemática del "puente de Wheatstone", con indicación del transductor, del cable de comunicación, y del potenciómetro para el ajuste del valor cero³. En la parte inferior aparece el microtransductor apical (Millar) ubicado en el extremo de la sonda cardíaca, que tiene dos milímetros de diámetro externo.