

## Velocidad de la onda del pulso medida con un prototipo experimental: bases para un estudio longitudinal

S. Graf \*, F. Pessana \*, D. Craiem \*, C. Galli \*, R. Armentano \*#

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires,  
Medrano 951 (C1179AAQ)  
Buenos Aires, Argentina.

Recibido el 7 de febrero de 2007 ; Aceptado el 20 de julio de 2007

### Resumen

Los estudios epidemiológicos y seguimientos clínicos son necesarios para cuantificar los parámetros estructurales y dinámicos de las arterias. Ellos son importantes predictores de enfermedades vasculares, que son un problema de salud que involucra aspectos sociales y económicos. La medición de la Velocidad de la Onda del Pulso es una técnica simple, confiable y reproducible, que puede ser determinada en forma no invasiva en pacientes ambulatorios. El propósito de este trabajo es describir un prototipo portátil desarrollado para medir la Velocidad de la Onda del Pulso en una población numerosa y analizar la posibilidad de emplearlo en un seguimiento clínico alejado.

**PALABRAS CLAVE:** RIGIDEZ ARTERIAL - ESTUDIO NO-INVASIVO - PREVENCIÓN CARDIOVASCULAR - ENFERMEDAD VASCULAR - EQUIPO PORTÁTIL

### Abstract

Epidemiological studies and clinical trials are needed to determine values of structural and dynamic arterial wall parameters. These are very important predictors of vascular disease that not only is a health problem but also is a social and economic concern. Pulse Wave Velocity is a simple, reliable and reproducible technique that can be determined non invasively in ambulatory patients. The purpose of this work is to describe a portable prototype developed to measure the Pulse Wave Velocity in a large sample of ambulatory patients and to analyse the possibility to be used in a clinical follow up.

**KEYWORDS:** ARTERIAL RIGIDITY - NON-INVASIVE STUDY - CARDIOVASCULAR PREVENTION - VASCULAR DISEASE - PORTABLE EQUIPMENT

\* Grupo UTN: Investigación y Desarrollo en Bioingeniería

# Centro de Procesamiento de Señales e Imágenes, Facultad Regional Buenos Aires-Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

## Introducción

Hay enfermedades de las arterias humanas que cursan con cambios estructurales capaces de modificar su función, en especial la de amortiguamiento de las ondas periódicas, que a razón de unos 1.25 Hz varían sus dimensiones a lo largo de toda la vida del individuo. Por otro lado, hay terapias que mitigan el proceso de endurecimiento vascular y por ello es importante controlar la evolución del mismo. Pero tal vez lo más importante sea descubrir los cambios de la rigidez arterial en forma precoz mediante la utilización de técnicas diagnósticas que permitan evaluar el estado de las arterias, que sean fáciles de utilizar, no invasivas y confiables (Armentano, 1994a; Armentano, 1994b).

Entre las distintas técnicas utilizadas para evaluar el daño vascular se encuentra la medición de la Velocidad de la Onda del Pulso, ampliamente utilizada en centros cardiológicos de avanzada y para la cual se precisa de desarrollos tecnológicos específicos que incluyen tanto Hardware como Software.

El objetivo del presente trabajo es describir un prototipo portátil desarrollado para medir la Velocidad de la Onda del Pulso en una población numerosa y analizar la posibilidad de emplearlo en un seguimiento clínico alejado. Asimismo, se resumirán los conocimientos existentes emanados de la utilización de la medición de la Velocidad de la Onda del Pulso.

## Antecedentes de mediciones de fenómenos biológicos

La Medicina es el "arte de curar con bases científicas" y para que dicha cura tenga lugar es imprescindible que exista un diagnóstico previo de la enfermedad, ya que en general los tratamientos son específicos para cada alteración en particular. Es a partir del Período Barroco que los médicos comienzan a complementar sus diagnósticos con la información que les daban dispositivos creados en otras áreas del conocimiento. Ejemplos de ello son el termómetro, desarrollado por Santorio Santorio y perfeccionado por Galileo Galilei, el cronómetro y la microscopía.

Ernst Heinrich Weber (1795-1878), aplicando la teoría ondulatoria de la circulación sanguínea y utilizando para ello modelos artificiales, demostró en 1850 que en las arterias las ondas esfígmicas se propagaban a mayor velocidad que el líquido sanguíneo. Ello fue incluido en su libro, escrito con la colaboración de sus hermanos: "Wellenlehre auf Experimente Gegrundet" (Laín Entralgo, 1995).

En el siglo XIX, con la invención de la quimografía, técnica de registro de presiones y desplazamientos,

los fenómenos biológicos son estudiados utilizando conocimientos originados en la física y nace así la bioingeniería. Hermann von Helmholtz (1821-1894) fue profesor de fisiología y patología en Königsberg, profesor de anatomía y fisiología en Bonn, profesor de fisiología en Heidelberg y finalmente profesor de física en Berlín (1871). Sus contribuciones abarcaron la óptica, la acústica, la termoacústica, la electrodinámica, la fisiología y la medicina. Helmholtz es considerado el padre de la bioingeniería, disciplina que posteriormente se encargaría de lo referido a desarrollos tecnológicos para el estudio de la fisiología y para reemplazar funciones perdidas (Lyons Petrucci, 1987).

Es en el siglo XIX que se realizan las primeras mediciones de la Onda del Pulso, una técnica simple que consiste en medir la velocidad con la que se desplazan los impulsos cardíacos a través de las arterias del cuerpo humano. Tigerstedt encontró valores de la Velocidad de la Onda del Pulso a los que consideraba normales y otros que se presentaban como alterados, que siguen vigentes en la actualidad. El desarrollo, tan antiguo y tan útil en el presente, no tuvo mayor trascendencia en su época, entre otras cosas porque no existía noción de la importancia que tenían en la salud entidades tales como la hipertensión arterial (von Frey, 1911).

Al presente se considera que la Velocidad de la Onda del Pulso tiene un alto valor predictivo y capacidad de pronóstico por encima de los factores de riesgo tradicionales (Blacher, 2003). Además, la determinación de la Velocidad de la Onda del Pulso es un índice de la rigidez parietal aórtica de gran valor, habida cuenta que en un seguimiento de 1045 pacientes se llegó a la conclusión que era un predictor independiente de eventos coronarios primarios (Boutouyrie, 2002).

## Medición de la velocidad de la onda del pulso

Hacia 1775, Euler, estudiando la propagación de la onda de presión arterial, especuló con que tenía una velocidad finita y por lo tanto mensurable. Mas adelante, en el siglo XIX, Moens y Korteweg modificaron la fórmula desarrollada por Euler y encontraron relaciones entre la velocidad de la onda de pulso, la densidad de la sangre ( $\delta$ ), el diámetro (D), la elasticidad (E) y el espesor (h) de la pared arterial:

$$V_{op} = \sqrt{\frac{E \cdot h}{D \cdot \delta}}$$

En el año 1922, Bramwell y Hill (Bramwell y Hill, 1922) relacionaron la Velocidad de la Onda de Pulso con la compliance arterial<sup>1</sup>:

$$VOP = \sqrt{\frac{dP}{dD} \cdot \frac{D}{2 \cdot \delta}}$$

Esta expresión resulta de interés en la clínica, ya que a partir de la densidad de la sangre, la Velocidad de la Onda de Pulso y el diámetro arterial medio ( $D_m$ ) es posible calcular la compliance arterial de los pacientes (Armentano, 1991) como:

$$C = \frac{1334 \cdot D_m}{2 \cdot \delta \cdot VOP^2}$$

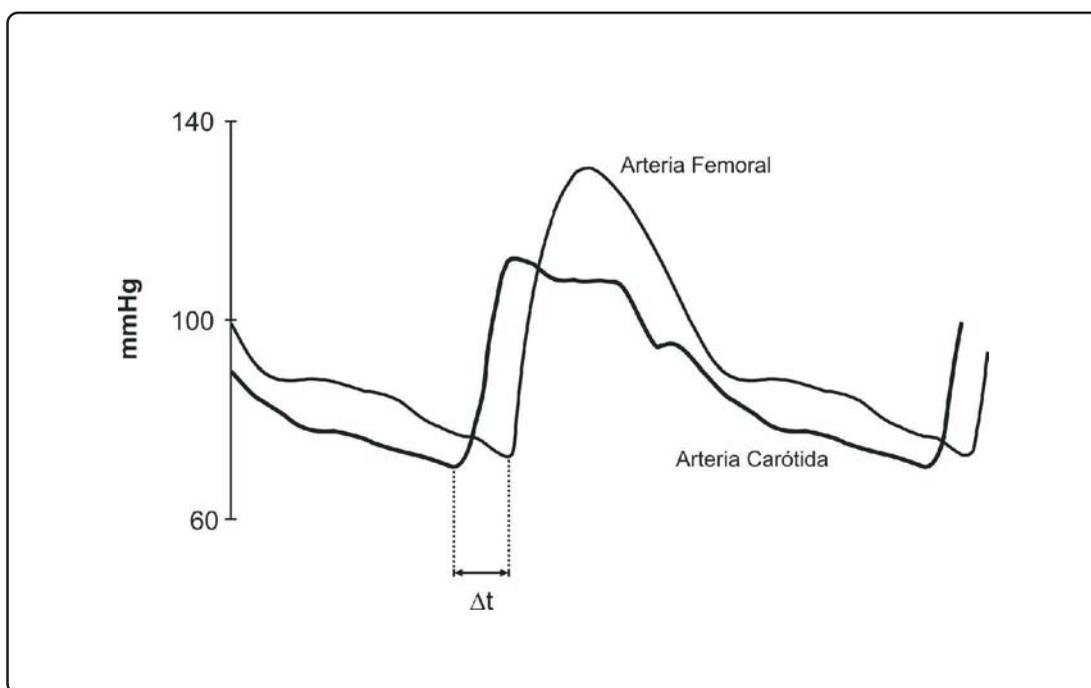
Método del desfasaje de tiempo o medición del "pie" de las ondas

El ventrículo izquierdo es la bomba cardiaca responsable de enviar sangre a todo el organismo a

través de las arterias. Es una bomba física y el pulso en ella generado sufre un retardo a medida que viaja a través del árbol arterial. En consecuencia, si se registra la onda generada por un solo impulso cardíaco en dos puntos diferentes de un mismo trayecto arterial se encontraría un desfasaje temporal. El mismo es mayor, en tanto la distancia entre ambos puntos lo sea. Por lo antes expresado, si se conoce el desfasaje temporal y la distancia entre los puntos de determinación de las ondas se podría conocer la Velocidad de la Onda del Pulso a partir de la siguiente fórmula:

$$VOP = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

en donde  $\Delta x$  es la distancia entre los puntos de obtención de las ondas y  $\Delta t$  el tiempo de desfasaje, tal como se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1. Un mismo latido cardiaco, a medida que avanza en la circulación sistémica es observado con un desfase en tiempo. También se producen cambios morfológicos. La Velocidad de la Onda del Pulso se obtiene midiendo el retardo ( $\Delta t$ ) entre los pies de ondas de presión arterial obtenidas a nivel carotídeo y femoral. Conociendo este tiempo, se lo relaciona con la distancia en metros entre los dos puntos de determinación de la onda del pulso (arterias carótida y femoral).**

<sup>1</sup> La compliance arterial (C; el término en castellano es complianza, pero es muy utilizado el término compliance, en inglés) se define como la variación de diámetro ante una variación de presión y se puede calcular derivando la señal del diámetro arterial respecto de la presión ( $C=dD/dP$ ).

Actualmente se emplean sensores especiales que permiten un estudio no invasivo y las señales obtenidas son digitalizadas por un conversor análogo/digital y almacenadas en el disco rígido de una computadora. Usualmente los trayectos arteriales más usados son los comprendidos entre la arteria carótida en el cuello y la femoral en el inicio de un miembro inferior. La distancia entre estos dos puntos se mide usando una cinta métrica, que se coloca encima de los lugares en los que se apoyaron los transductores.

Posteriormente, y usando distintas técnicas, se calculan los valores de la Velocidad de la Onda del Pulso usando las señales almacenadas.

El valor normal de la Velocidad de la Onda de Pulso se encuentra alrededor de los 7 m/s (metros por segundo) en personas normales y se halla aumentado en estados alterados.

### **Prototipo desarrollado en la Facultad Regional Buenos Aires**

Teniendo en cuenta los requerimientos que las técnicas diagnósticas deben reunir en la actualidad, se desarrolló un dispositivo electrónico para la medición de la Velocidad de la Onda del Pulso. Dicho sistema permite calcular el tiempo que demora la onda de presión en recorrer una distancia comprendida entre dos sensores de presión. Conociendo el valor de dicha distancia, el cálculo de la Velocidad de la Onda del Pulso se reduce a realizar el cociente entre ambos valores. El sistema consiste

en una PC provista de un software desarrollado bajo la plataforma Windows, conectada a través del puerto serie a un módulo de adquisición, al cual se le anexan dos sensores de presión (Figura 2).

Las señales son captadas mediante dos transductores mecanográficos de presión (respuesta en frecuencia de 0,04 - 300 Hz). El módulo de adquisición realiza el acondicionamiento y la digitalización de la onda de presión. La etapa de acondicionamiento está compuesta por un amplificador de instrumentación, un filtro notch de 50 Hz y un filtro antialiasing con una frecuencia de corte de 80 Hz. La etapa de adquisición es la encargada de digitalizar la señal y enviar los datos a través de una interfase RS-232 al puerto serie de la PC. Todo el proceso es manejado por un software, encargado además de realizar los cálculos.

Tal como se dijera anteriormente, la Velocidad de la Onda del Pulso se obtiene mediante el cociente entre la distancia entre los transductores de presión y el tiempo que tarda la onda en recorrer dicha distancia. Este tiempo se mide entre los puntos correspondientes al "pie" de cada señal de presión, ya que dicho punto corresponde al comienzo de eyección y se lo considera libre de reflexiones y distorsiones. El "pie" se define como el punto al final de la diástole, cuando se inicia el aumento de la pendiente del frente de onda (O'Rourke, 1982). Es por ello que, luego de ingresar manualmente el dato de la distancia entre sensores (medido superficialmente), el programa identifica todos los latidos válidos, y determina el pie de cada onda en forma automática.



**Figura 2. Prototipo de dispositivo para la determinación automática de la Velocidad de la Onda del Pulso desarrollado en la Facultad Regional Buenos Aires.**

Los valores son presentados luego en una ventana de diálogo junto con su valor medio y su desvío estándar, en donde es posible también eliminar algún valor no deseado. Por último, a modo de validación visual, el pie de cada onda se grafica junto a las ondas mediante una línea de puntos. Esto permite suprimir algún latido en el que se considere que la detección fue errónea (Ver Figura 3).

Para validar el sistema, se estudiaron 26 pacientes (Graf, 2000). Se colocaron a cada paciente los sensores en las arterias humeral y radial. Utilizando el sistema descrito anteriormente, las ondas de presión fueron digitalizadas a 1000 Hz durante un tiempo de 20 segundos y almacenadas en disco. Simultáneamente se registraron en papel continuo a una velocidad de 100 mm/s. Para cada latido se determinó, tanto en forma automática como manual, la separación temporal de las ondas de presión, así como el valor de la Velocidad de la Onda del Pulso.

La detección automática se realizó utilizando el programa, mientras que para la detección manual se procedió a reconocer los latidos en el registro en

papel. El método manual se caracteriza por encontrar el "pie" de la onda de presión mediante la intersección de la extrapolación hacia abajo de la parte ascendente de la onda de presión con la extrapolación de la última parte de la diástole de la onda precedente.

Los resultados mostraron que el desfase temporal de las ondas promedio medido en los 26 pacientes de  $53 \pm 12$  años (con un promedio de 5 latidos por paciente) fue de  $25,5 \pm 8,1$  ms para las mediciones realizadas con el programa y de  $25,4 \pm 8,6$  ms para el método manual, la Velocidad de la Onda del Pulso promedio fue de  $10,6 \pm 3,7$  m/s para el programa y de  $11,0 \pm 5,0$  m/s para el método manual, siendo no significativa la diferencia. El análisis de regresión lineal aplicado al desfase temporal medido por ambos métodos arrojó un coeficiente de correlación  $R = 0,9$ .

El prototipo fue también evaluado en personas voluntarias sanas, a quienes se midió la Velocidad de la Onda del Pulso entre las arterias carótida y femoral.

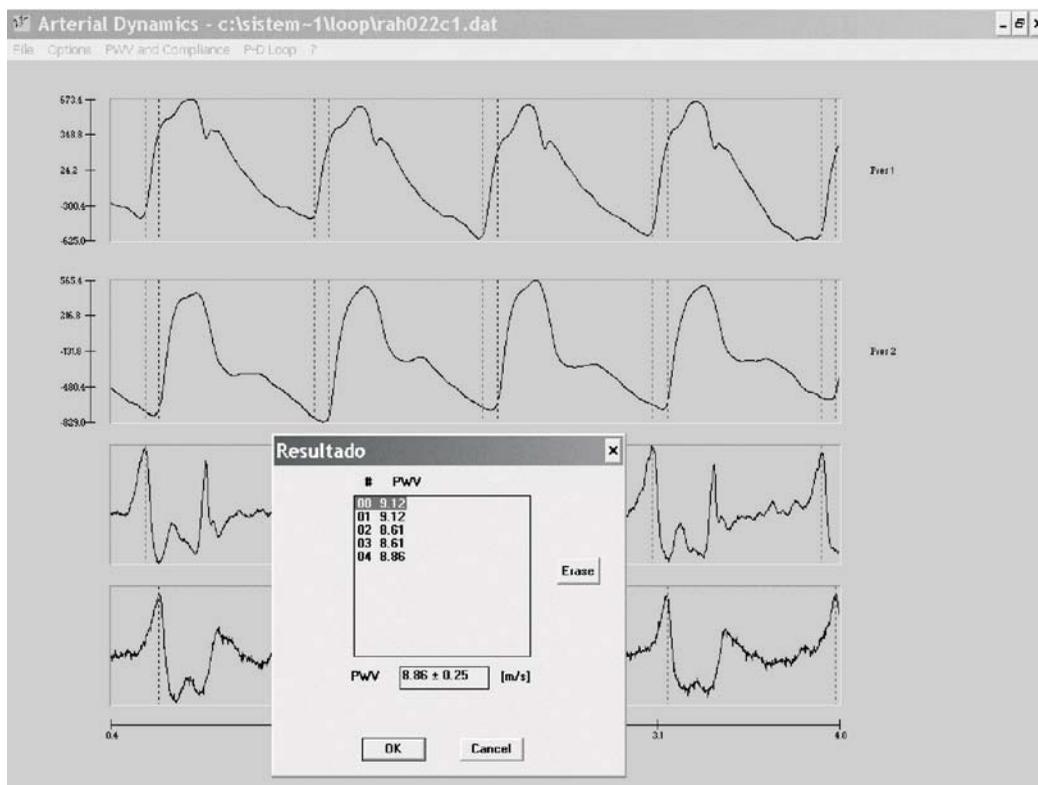


Figura 3: Pantalla del software en la cual se visualiza la identificación automática de los "pies" de cada onda así como los valores calculados de la Velocidad de la Onda del Pulso para cada latido.

## Comentarios

La utilización de métodos de diagnóstico complementarios es muy importante pero no suficiente para que redunde en un real beneficio en los pacientes afectados de patologías arteriales. Es preciso que la utilización de un dispositivo o técnica diagnóstica determinada demuestre que es capaz de reunir dos condiciones: sensibilidad y especificidad. La sensibilidad es la capacidad de un método de detectar una anomalía. Especificidad es la capacidad de un método de detectar lo que se desea estudiar y no otra cosa. Así existen casos en que un método es muy sensible, pero da positivo cuando hay alteraciones buscadas y también cuando se trata de las no buscadas. En el caso de la Velocidad de la Onda del pulso, Blacher y sus colaboradores (2003) publicaron los resultados obtenidos en 242 pacientes seguidos por un período de 78 meses. Esto significa que, en ese tiempo, efectuaban en forma periódica a los mismos pacientes la misma determinación de la Velocidad de la Onda del Pulso. El resultado es que se demostró por primera vez que la determinación de la Velocidad de la Onda del Pulso tenía un alto valor predictivo y una capacidad pronóstica por encima de los factores de riesgo conocidos.

Existen métodos directos e indirectos para determinar no invasivamente la Velocidad de la Onda del Pulso en pacientes. Los métodos indirectos requieren la medición simultánea de señales arteriales de diámetro, presión y/o flujo arterial, y la aplicación de modelos. Generalmente requieren de equipamiento sofisticado, que los torna poco prácticos para su uso clínico. Los métodos directos, por el contrario, resultan mucho más prácticos. El método directo más utilizado para determinar la Velocidad de la Onda del Pulso consiste en el registro simultáneo de dos formas de onda del pulso separadas por un trayecto arterial conocido. Se obtiene como el cociente entre la distancia entre dos sensores de presión y el tiempo que demora el frente de onda en recorrer los dos puntos (O'Rourke, 1982).

## Conclusiones

El prototipo desarrollado en la Facultad Regional Buenos Aires para la medición de la Velocidad de la Onda del Pulso está basado en el método directo del desfase temporal, que consiste en medir el intervalo de tiempo entre dos puntos característicos de las ondas de presión. Los puntos característicos se miden cerca del pie de la onda de presión, ya que el "pie" se encuentra relativamente libre de reflexiones. El sistema implementado se basa en el uso de dos sensores de presión debidamente acondicionados y un software bajo sistema operativo Windows encargado del cálculo automático. Para validar el método automático, se registraron las formas de onda de 26 pacientes, en la arteria humeral y braquial, simultáneamente en papel y en la computadora. El método manual se consideró

como gold Standard. Al contrastar el método automático contra el método manual, el análisis de regresión presentó altos coeficientes de correlación y una distribución normal del error, sugiriendo que las diferencias entre los métodos son aleatorias y no debidas a errores sistemáticos. Esto lo convierte en una herramienta útil, eliminando la variabilidad y la subjetividad inherentes en el análisis manual de las ondas del pulso de presión arterial.

Por otra parte, las mediciones de Velocidad de la Onda del Pulso realizadas entre las arterias carótida y femoral de los voluntarios mostraron que el prototipo es capaz de realizar determinaciones con valores que concuerdan con las características de una población normal. Se destaca la sencillez con la que se pudieron realizar los registros de los pulsos arteriales mediante los dos sensores adosados para tal propósito (Ver Figura 2). La obtención de los valores de la Velocidad de la Onda del Pulso correspondientes a múltiples pares de pulsos tomados en el mismo voluntario, fue automática y dio la posibilidad de eliminar aquellos latidos en los que hubiera defectos técnicos de sensado.

Dos son los estudios que se deben realizar a partir de la etapa actual: (a) un estudio de repetibilidad en una población sana, (b) un estudio longitudinal en una población en la que se asegure la posibilidad de contar con el voluntario a lo largo de años de seguimiento. El primer estudio (a) está destinado a demostrar que el dispositivo tiene la capacidad de medir siempre el mismo valor cuando el substrato (las arterias de los voluntarios estudiados) tiene valores que pueden ser cuantitativamente estimados (si son normales se supone que la Velocidad de la Onda del Pulso sería menor de 10 m/s). El segundo estudio (b) estaría mostrando la evolución de las características de las arterias del voluntario estudiado a lo largo del tiempo.

## Referencias

- ARMENTANO, R. L.; BAGLIVO, H.; CABRERA FISCHER, E. I.; SÁNCHEZ, R. (1994a) *Hipertensión Arterial Límitrofe (Borderline). ¿Es un estado prehipertensivo? Implicancias Clínicas y Pronósticas*, 1a. edición, p. 51. Buenos Aires, Centro Editor de la Fundación Favaloro.
- ARMENTANO, R. L.; CABRERA FISCHER, E. I. (1994b) *Biomecánica Arterial. Fundamentos para su Abordaje en la Clínica Médica*, 1a. edición, p. 161. Akadia, Buenos Aires.
- ARMENTANO, R. L.; SIMON, A. C.; LEVENSON, J.; CHAU, N. P. H.; MEGNIEN, J. L.; PICHEL, R. (1991) *Hypertension* 18, 657.
- BLACHER, J.; SAFAR, M.; GUERIN, A.; PANNIER, B.; MARCHAIS, S.; LONDON, G. (2003) *Kidney International* 63, 1852.
- BOUTOUYRIE, P.; TROPEANO, A. I.; ASMAR, R.; GAUTIER, I.; BENETHOS, A.; LACOLLEY, P.; LAURENT S. (2002) *Hypertension* 39, 10.
- BRAMWELL, J. C.; HILL, A. V. (1922) *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 93, 298.
- GRAF, S.; PESSANA, F.; ARMENTANO, R.; MASSARO, D.; MASANET, S.; CORNES, P.; MURAD, C. (2000) *Desarrollo de un Sistema para la Medición Automática de la Velocidad de la Onda del Pulso Basado en Microcontrolador*. Anales XVII Congreso Brasileño de Ingeniería Biomédica, Florianópolis, p. 915.
- LAÍN ENTRALGO, P. (1995) Tomo 5: Ilustración y Romanticismo. La Fisiología empírica alemana de 1800 a 1850. Versión Electrónica de: Historia Universal de la Medicina.. CD-ROM ISBN 978844580670-8. Masson S A. Madrid, España.
- LYONS, A. S., PETRUCELLI, R. J. (1987) *Medicine, an Illustrated History*, p. 521, edited by Walton Rawls. Abradale Press, Hong Kong.
- O'ROURKE, M. F. (1982) *Arterial Function in Health and Disease*. Churchill Livingstone, New York.
- VON FREY, M. (1911) Die Bewegung des Blutes un der Lynphe. En: *Physiologie, Zweite Auflage*, p. 66. Verlag von Julius Springer, Berlin.