

Frecuencia cardíaca en tiempo real y por telemetría para aplicaciones acuáticas

Salvador Llana

Profesor Asociado de Biomecánica en el Instituto Valenciano de Educación Física

Arturo Forner

Investigador del Instituto de Biomecánica de Valencia

Sabina Català

Eric Delory

Becarios del Instituto de Biomecánica de Valencia

J. Vicente Durà

Responsable de la sección de Material y Equipamiento Deportivo del Instituto de Biomecánica de Valencia

Palabras clave

frecuencia cardíaca, oximetría, natación, entrenamiento, transmisión electromagnética

Abstract

Heart rate recording is a very useful parameter for the control and planification of sport training. There exist various systems of cardiachometers in miniature designed and specially made for their use in physical-sporting activities. All of them are placed on the chest by means of an elastic band, which provides an insufficient fastening for swimming, especially for the turns, so this forces us to use adhesive tape or other systems of "painful" fastenings.

The system developed in IBV (Biomechanical Institute of Valencia) allows us to record and send telemetrically the heart rate to a personal computer where we can show the actual time and/or be stored for its later analysis. In this way, the trainer can control the intensity of a training session and can send an almost immediate feedback to the swimmer.

The system consists of a peg placed on the ear lobe with a red light transmitter (LED) and a resistance depending on the light (LDR). The red light passes through the lobe and is received by the LDR. The grounds of the system consists in that the diminution of the red light in the ear lobe is associated with changes in the contents of oxygenated blood, a method known as "oxymetry".

For the system of telemetry we used a sign modulator based on an oscillator controlled by tension (VCO) and a hybrid commercial circuit for the transmission. The calculation of heart rate in actual time is possible thanks to the use of a digital filter and the development of an algorithm to reduce the noise.

Resumen

El registro de la frecuencia cardíaca (FC) es un parámetro muy útil para el control y la planificación del entrenamiento deportivo. Existen diversos sistemas de cardiocómetros miniatura en el mercado diseñados y fabricados para su uso en actividades físico-deportivas. Todos ellos se colocan en el pecho mediante una cinta elástica, que proporciona una fijación insuficiente para la natación, especialmente en los virajes, ello obliga a utilizar cinta adhesiva u otros sistemas de fijación "cruentos".

El sistema desarrollado en el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) permite registrar y enviar teleméricamente la frecuencia cardíaca a un ordenador personal donde se puede mostrar en tiempo real y/o ser almacenada para su posterior análisis. De esta manera, el entrenador puede controlar la intensidad de un entreno y transmitir un *feedback* casi inmediato al nadador. El sistema consiste en una pinza colocada en el lóbulo de la oreja con un emisor de luz roja (LED) y una resistencia dependiente de la luz (LDR). La luz roja pasa a través del lóbulo y es recibida por el LDR. El fundamento del sistema consiste en que la atenuación de la luz roja en el lóbulo de la oreja está asociada con cambios en el contenido de sangre oxigenada, método denominado "oximetría".

Para el sistema de telemetría se utiliza un modulador de señal basado en un oscilador controlado por tensión (VCO) y un circuito comercial híbrido para la transmisión. El cálculo de la frecuencia cardíaca en tiempo real es posible gracias a la utilización de un filtro digital y al desarrollo de un algoritmo para reducir el ruido.

Introducción

De entre las distintas variables fisiológicas utilizadas para el control de la carga del entrenamiento deportivo, el análisis de la frecuencia cardíaca (FC) es una de las más extendidas dada su sencillez de registro y de interpretación (Astrand y Rodahl 1986; Wilmore y Costill, 1992).

Cuando un deportista realiza trabajo físico a una intensidad comprendida entre 120 y 180 latidos/minuto se observa una relación lineal entre la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno y los niveles de ácido láctico en sangre. No obstante cuando la intensidad del trabajo provoca una frecuencia cardíaca superior a 180 latidos/minuto desaparece la citada relación, con lo que deja de ser útil para reflejar la intensidad del trabajo (Navarro y cols., 1993)

La problemática tradicional para registrar variables fisiológicas durante la actividad deportiva está, por razones obvias, magnificada en el medio acuático (Utsuyama y cols., 1988). No obstante, en los últimos años han aparecido en el mercado diversos cardiotacógrafos miniatura resistentes al agua, ligeros y de fácil manejo. La mayoría de ellos constan de una unidad receptora-emisora que se adapta al pecho del atleta y un reloj de pulsera en el que se calcula y muestra la frecuencia cardíaca. Algunos de estos sistemas constan de un panel electrónico que, colocado en la pared, muestra la frecuencia cardíaca en tiempo real.

Sin embargo, la fijación al pecho de estos "pulsómetros" en la natación de competición es un problema todavía no bien solventado; algunos nadadores sienten cierta incomodidad al realizar los movimientos típicos de este deporte, pero el principal inconveniente radica en que la utilización de una cinta elástica resulta ineficaz cuando los nadadores realizan el viraje, momento en que se alcanzan las mayores velocidades. Ello ha obligado a utilizar cintas adhesivas u otros sistemas de fijación "cruentos". Otra limitación de estos pulsómetros es la imposibilidad de que el entrenador visualice la evolución de la frecuencia cardíaca con el tiempo, en tiempo real (Navarro y cols., 1994).

El presente artículo muestra un sistema desarrollado en el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) bajo el patrocinio del Consejo Superior de Deportes (CSD) y la colaboración de la Real Federación Española de Natación (RFEN) y la Federación Valenciana de Natación (FVN), que permite solventar la problemática planteada.

Material y métodos

El sistema desarrollado se fundamenta en el hecho de que la sangre actúa como un filtro del espectro luminoso, especialmente para la luz roja de una longitud de onda de 550 nanómetros cuando la hemoglobina se encuentra saturada de oxígeno. Por ello, a cada latido cardíaco se modifica la luz filtrada por la sangre, siendo posible medir "el pulso" (Giltvedt y cols., 1984). Esta técnica de medición se denomina "oximetría".

Basándose en este fenómeno se utiliza una pinza de diseño propio colocada en el lóbulo de la oreja, como muestra la foto 1, quedando un sistema emisor de luz roja tipo LED (Light Emitter Diode) a un lado del lóbulo, y un sistema receptor, que es un sensor fotosensible tipo fotorresistencia (LDR), en el otro lado (fig. 1). De manera que cuando la luz del lóbulo está saturada de O₂, es decir, a cada latido cardíaco, el fotoreceptor recibe menos luz y se produce una variación de la señal eléctrica a la salida del sistema.

La pinza está conectada al sistema principal por una manguera que lleva cuatro cables, dos de alimentación del LED y dos que miden la tensión de los bornes de la fotorresistencia. Como se ha mencionado, la variación de resistencia dependerá de la cantidad de luz recibida, y ésta, de la fase del ciclo cardíaco.

Dada la sensibilidad del receptor a la luz, el conjunto oreja-pinza se protege mediante una cubierta rígida de PVC, que es opaca y ligera (fotos 2 y 3). Esta cubierta también cumple la función de proteger frente a posibles perturbaciones mecánicas inducidas por movimientos bruscos o golpes.

De los cuatro métodos posibles para transmitir teleméricamente una señal en el me-

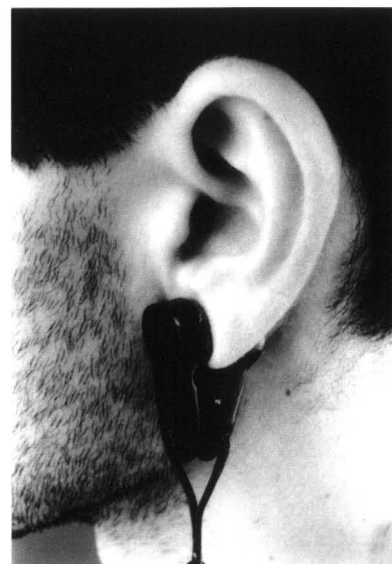


Foto 1. Detalle del sistema Pinza Emisor Receptor (PER).

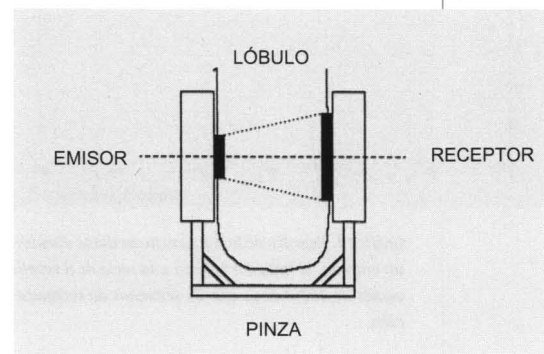


Figura 1. Esquema de la pinza con el emisor LED y el receptor LDR.

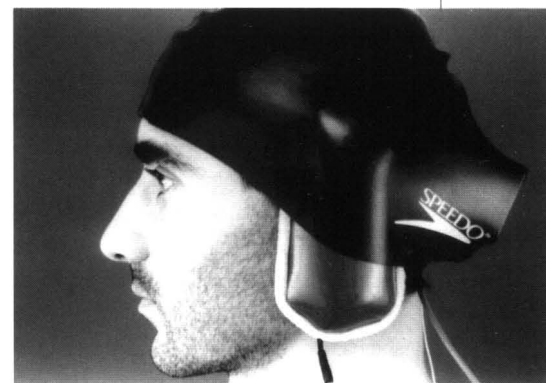


Foto 2. Tamaño actual del pulsómetro.

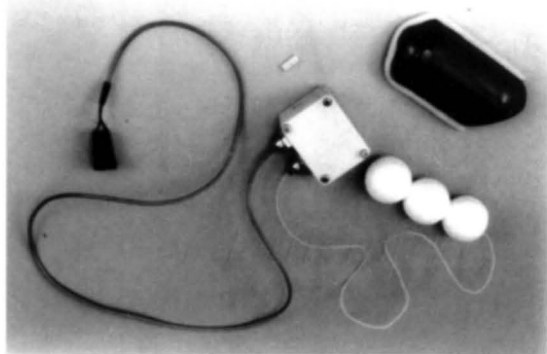
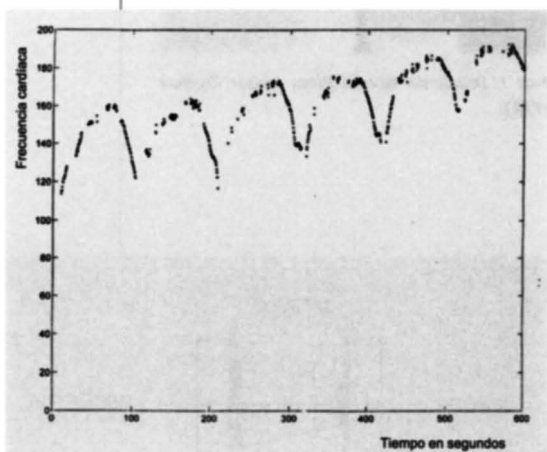


Foto 3. Los distintos elementos de que consta el pulsómetro.



Gráfica 1. Registro de la frecuencia cardíaca durante un entreno. El nadador realizó una serie de 8 repeticiones de 100 metros con 25 segundos de recuperación.

dio acuático (transmisión electromagnética, transmisión por ultrasonidos, transmisión por conducción eléctrica y transmisión por inducción magnética) se hicieron pruebas con los métodos de inducción magnética y de transmisión electromagnética, siendo esta última la que mejores resultados ofreció.

Dado el sistema de transmisión seleccionado, el nadador ha de portar una pequeña antena que sobresalga del agua. Entre las dos opciones posibles —una antena rígida que sobresaliera del nivel del agua o una antena flexible que flotara gracias a unas pequeñas bolas de corcho— se optó por esta última, como se puede ver en la foto nú-

mero 3, dada su menor interferencia con el nado del deportista.

Para el sistema de telemetría se utiliza un oscilador controlado por tensión (VCO) y un circuito comercial híbrido para la transmisión. La señal es modulada por frecuencia (FM) en lugar de ser modulada por amplitud (AM), debido a su mejor relación potencia de señal/potencia de ruido. El cálculo de la frecuencia cardíaca en tiempo real es posible gracias a la utilización de un filtro digital y a un algoritmo que calcula la frecuencia cardíaca a partir de la señal recibida.

La recepción de la señal se realiza con un ordenador personal provisto de las herramientas necesarias, es decir, una tarjeta de adquisición de datos y el programa de tratamiento de la señal. De esta manera, además de visualizar el registro en tiempo real, los datos pueden ser almacenados para su posterior recuperación y estudio.

Resultados

Las primeras pruebas del sistema Pinza-Emisor-Receptor (PEA) fueron realizadas en el laboratorio con varias personas de ambos sexos, de tamaños de lóbulo y colores de piel distintos. Si bien las diferencias físicas de los sujetos ocasionaban una cierta variabilidad en la señal, siempre era posible tratarla digitalmente para obtener la frecuencia cardíaca. Este test preliminar se realizó sobre bicicleta ergométrica, realizándose un registro simultáneo de la frecuencia cardíaca mediante un equipo comercial (Cardiolife Nihon-Kohden). Los picos del complejo QRS ocurrieron a la vez en ambas señales, lo que permitió validar el sistema.

Una vez fue comprobada su validez se procedió a comprobar su resistencia al agua mediante un test en piscina. El registro de la frecuencia cardíaca fue correcto durante el nado, únicamente se perdió la señal durante los virajes, al igual que ocurre con el resto de sistemas comerciales actualmente en el mercado (en estos se “engaña” al usuario al mostrar un valor de la frecuencia cardíaca que en realidad no es otra cosa que la interpolación entre la frecuencia cardíaca ante-

rior y posterior al viraje). La gráfica 1 muestra el registro de la frecuencia cardíaca durante un entreno consistente en una serie de 6 repeticiones de 100 metros con 25 segundos de recuperación por parte de un nadador de nivel medio.

Conclusiones y discusión

Existen en el mercado diversos equipos capaces de registrar la frecuencia cardíaca durante el nado, pero suelen presentar dos problemas importantes. Por un lado no permiten graficar la respuesta cardíaca en tiempo real y mediante telemetría a un ordenador personal controlado por el entrenador, y por otro lado, suelen colocarse en el pecho con lo que su fijación resulta engorrosa y muchas veces cruenta.

El desarrollo tecnológico actual permite subsanar tales problemas al colocar el emisor-receptor en el lóbulo de la oreja mediante una pinza y permitir, además, visualizar en tiempo real la evolución de la frecuencia cardíaca durante un entreno gracias a un sistema de telemetría y a la utilización de un filtro digital y un algoritmo específicamente desarrollado para reducir el ruido.

Hasta aquí el presente, pero el futuro inmediato puede deparar desarrollos aún más sorprendentes, y al igual que los cronómetros miniatura colocados en las gafas del nadador le permiten a éste ver los tiempos de nado, no sería muy problemático colocar un pequeño “display” en las gafas del nadador de manera que tuviera un *feedback* inmediato de su frecuencia cardíaca durante el nado.

Agradecimientos

El presente proyecto ha sido posible gracias a una subvención del Consejo Superior de Deportes (CSD), y a la colaboración de la Real Federación Española de Natación (RFEN) y la Federación Valenciana de Natación (FVN).



Bibliografía

- ASTRAND, P. O.; RODAHL, K. (1986), *Textbook of Work Physiology. Physiological Bases of Exercise*. Ed. McGraw-Hill, páginas 487-522.
- NAVARRO, F.; SANTIESTEBAN, J. M. (1993), *Parámetros Fisiológicos para el Control del Entrenamiento*. Gandía, 26-28 de noviembre.
- GILTVEDT, J.; SIRA, A.; HELME P. (1984), "Pulsed Multifrequency Photoplethysmograph". *Medical & Biological Engineering and Computing* 22, pp. 212-215.
- LLANA, S.; FORNER, A.; CATALÁ, S.; DELORY, E.; DURÁ, J. V. (1996), "Frecuencia cardíaca en tiempo real y por telemetría para aplicaciones acuáticas". *III Congreso Internacional sobre Entrenamiento Deportivo*. León, 3-5 de octubre.
- UTSUYAMA, N.; YAMAGUCHI, H.; OBARA, S.; TANAKA, H.; FUKUTA, S.; NAKAHIRA, J.; TANABE, S.; BANDO, E.; MIYAMOTO, H. (1988), "Telemetry of human electrocardiograms in aerial and aquatic environments". *IEEE Trans. on Biomedical Engineering* 35 (10), pp. 881-884.
- WILMORE, J.H.; COSTILL, D.L. (1994) *Physiology of Sport and Exercise*. Ed. Human Kinetics, pp. 214-236.