

# *Freqüència cardíaca en temps real i per telemetria per a aplicacions aquàtiques*

## **Salvador Llana**

*Professor associat de Biomecànica a l'Institut Valencià d'Educació Física*

## **Arturo Forner**

*Investigador de l'Institut de Biomecànica de València*

## **Sabina Català**

## **Eric Delory**

*Becaris de l'Institut de Biomecànica de València*

## **J. Vicente Durà**

*Responsable de la secció de Material i Equipament Esportiu de l'Institut de Biomecànica de València*

## **Paraules clau**

**freqüència cardíaca, oximetria, natació, entrenament, transmissió electromagnètica**

## **Abstract**

*Heart rate recording is a very useful parameter for the control and planification of sport training. There exist various systems of cardiostachometers 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.*

## **Resum**

El registre de la freqüència cardíaca (FC) és un paràmetre molt útil per al control i la planificació de l'entrenament esportiu. Al mercat hi ha diversos sistemes de cardiostachometers miniatura dissenyats i fabricats per a ús en activitats físicoesportives. Tots es col·loquen al pit mitjançant una cinta elàstica, que proporciona una fixació insuficient per a la natació, especialment en els viratges, això obliga a utilitzar cinta adhesiva o altres sistemes de fixació "cruents".

El sistema desenvolupat a l'Institut de Biomecànica de València (IBV) permet registrar i enviar telemètricament la freqüència cardíaca a un ordinador personal on es pot mostrar en temps real i/o ser emmagatzemada per a posterior anàlisi.

D'aquesta manera, l'entrenador pot controlar la intensitat d'un entrenament i transmetre un *feedback* gairebé immediat al nedador.

El sistema consisteix en una pinça col·locada al lòbul de l'orella amb un emissor de llum vermella (LED) i una resistència depenent de la llum (LDR). La llum vermella passa a través del lòbul i és rebuda pel LDR. El fonament del sistema consisteix que l'atenuació de la llum vermella en el lòbul de l'orella està associada amb canvis en el contingut de la sang oxigenada, mètode anomenat "oximetria".

Per al sistema de telemetria es fa servir un modulador de senyal basat en un oscil·lador controlat per tensió (VCO) i un circuit comercial híbrid per a la transmissió. El càlcul de la freqüència cardíaca en temps real és possible gràcies a la utilització d'un filtre digital i al desenvolupament d'un algorisme per reduir el soroll.



## Introducció

D'entre les diferents variables fisiològiques utilitzades per al control de la càrrega de l'entrenament esportiu, l'anàlisi de la freqüència cardíaca (FC) és una de les més es-teses atès la seva senzillesa de registre i d'interpretació (Astrand i Rodhal, 1986; Wilmore i Costill, 1992).

Quan un esportista fa un treball físic a una intensitat compresa entre 120 i 180 batecs/minut s'observa una relació lineal entre la freqüència cardíaca, el consum d'oxigen i els nivells d'àcid làctic a la sang. Tanmateix quan la intensitat del treball provoca una freqüència cardíaca superior a 180 batecs/minut desapareix l'esmentada relació, amb la qual cosa deixa de ser útil per reflectir la intensitat del treball (Navarro i cols. 1993).

La problemàtica tradicional per registrar variables fisiològiques durant l'activitat esportiva està, per raons òbvies, magnificat en el medi aquàtic (Utsuyama i cols. 1988). Tanmateix, en els últims anys han aparegut al mercat diversos cardiocògrafs miniatura resistents a l'aigua, lleugers i de fàcil maneig. La majoria consten d'una unitat receptora-emissora que s'adapta al pit de l'atleta i un rellotge de polsera en el qual es calcula i mostra la freqüència cardíaca. Alguns d'aquests sistemes consten de pannel electrònic que, col·locat a la paret, mostra la freqüència cardíaca en temps real.

Tanmateix, la fixació al pit d'aquests "pulsòmetres" en la natació de competició és un problema encara no ben resolt; alguns nedadors senten certa incomoditat quan fan els moviments típics d'aquest esport, però el principal inconvenient radica que la utilització d'una cinta elàstica resulta ineficaz quant els nedadors fan el viratge, moment en el qual aconseguixen velocitats més grans, això ha obligat a fer servir cintes adhesives o d'altres sistemes de fixació "cruents". Una altra limitació d'aquests pulsòmetres és la impossibilitat que l'entrenador visualitzi l'evolució de la freqüència cardíaca amb el temps, en temps real (Navarro i cols., 1994).

El present article mostra un sistema desenvolupat a l'Institut de Biomecànica de València (IBV) sota el patrocini del Consejo

Superior de Deportes (CSD) i la col·laboració de la Real Federació Española de Natació (RFEN) i la Federació Valenciana de Natació (FNVN), que permet resoldre la problemàtica plantejada.

## Material i mètodes

El sistema desenvolupat es fonamenta en el fet que la sang actua com un filtre de l'espectre lluminós, especialment per a la llum vermella d'una longitud d'ona de 550 nanòmetres quan l'hemoglobina es troba saturada d'oxigen. Per això, a cada batec cardíac es modifica la llum filtrada per la sang. Això fa possible mesurar "el pols" (Giltvedt i cols., 1984) Aquesta tècnica de medicació s'anomena "oximetria".

Basant-se en aquest fenomen s'utilitza una pinça de disseny propi col·locada al lòbul de l'orella, tal com mostra la foto 1, i així queda un sistema emissor de llum vermella tipus LED (Light Emitter Diode) a un costat del lòbul, i un sistema receptor, que és un sensor fotosensible tipus fotoreistència (LDR), a l'altre costat (Fig. 1). De manera que quan la llum del lòbul està saturada d'O<sub>2</sub>, és a dir, a cada batec cardíac, el fotoreceptor rep menys llum i produeix una variació del senyal elèctric a la sortida del sistema.

La pinça està connectada al sistema principal per una mànega que porta quatre cables, dos d'alimentació del LED i dos que mesuren la tensió dels borns de la fotoreistència. Com s'ha esmentat, la variació de resistència dependrà de la quantitat de llum rebuda, i aquesta, de la fase del cicle cardíac.

Donada la sensibilitat del receptor a la llum, el conjunt orella-pinça es protegeix mitjançant una coberta rígida de PVC, que és opaca i lleugera (fotos 2 i 3). Aquesta coberta també compleix la funció de protegir davant possibles perturbacions mecàniques induïdes per moviments bruscos o cops.

Dels quatre mètodes possibles per transmetre telemètricament un senyal en el medi aquàtic (transmissió electromagnètica, transmissió per ultrasons, transmissió



Foto 1. Detall del sistema Pinça Emissor Receptor (PER).

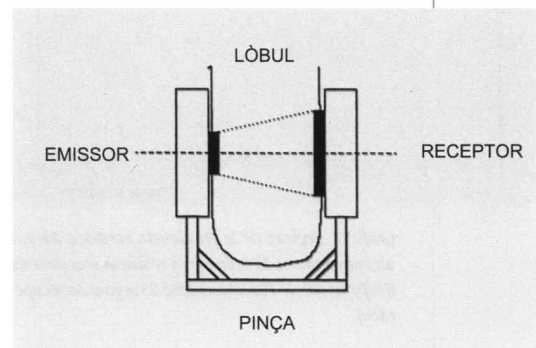
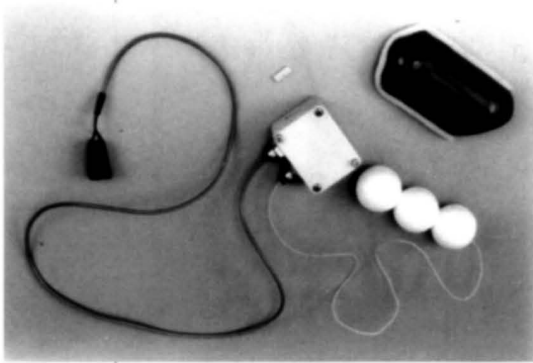


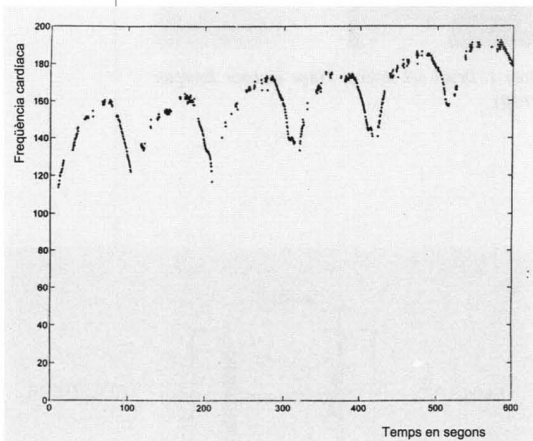
Figura 1. Esquema de la pinça amb l'emissor LED i el receptor LDR.



Foto 2. Tamany actual del pulsòmetre.



**Foto 3.** Els diferents elements de què consta el pulsòmetre.



**Gràfic 1.** Registre de la freqüència cardíaca durant un entrenament. El nedador va realitzar una sèrie de 8 repeticions de 100 metres amb 25 segons de recuperació.

per conducció elèctrica i transmissió per inducció magnètica) es van fer proves amb els mètodes d'inducció magnètica i de transmissió electromagnètica, la qual va ser la que va donar millors resultats.

Atès el sistema de transmissió seleccionat el nedador ha de portar una petita antena que sobresurti de l'aigua. Entre les dues opcions possibles, una antena rígida que sobresortís del nivell de l'aigua o una antena flexible que flotés gràcies a unes petites boles de suro es va optar per aquesta última, com es pot veure a la foto número 3, atesa la seva menor interferència amb la manera de nedar de l'esportista.

Per al sistema de telemetria es fa servir un oscil·lador controlat per tensió (VCO) i un circuit comercial híbrid per a la transmissió. El senyal és modulat per freqüència (FM) en comptes de ser modulada per amplitud (AM), a causa de la seva major relació potència de senyal/potència de soroll. El càlcul de la freqüència cardíaca en temps real és possible gràcies a la utilització d'un filtre digital i a un algoritme que calcula la freqüència cardíaca a partir del senyal rebut.

La recepció del senyal es fa amb un ordinador personal provist de les eines necessàries, és a dir, una targeta d'adquisició de dades i el programa de tractament del senyal. D'aquesta manera, a més a més de visualitzar el registre en temps real, les dades poden ser emmagatzemades per a la seva posterior recuperació i estudi.

### Resultats

Les primeres proves del sistema Pinça-Emissor-Receptor (PEA) van ser fetes al laboratori amb diverses persones de ambdós sexes, mides de lòbul i colors de pell diferents. Tot i que les diferències físiques dels subjectes ocasionaven una certa variabilitat en el senyal, sempre era possible tractar-la digitalment per obtenir la freqüència cardíaca. Aquest test preliminar es va fer sobre bicicleta ergomètrica i ahir es va fer un registre simultani de la freqüència cardíaca mitjançant un equip comercial (Cardiolife Nihon-Kohden). Els pics del complex QRS occurririen al mateix temps en ambdues senyals, la qual cosa va permetre validar el sistema.

Una vegada va ser comprovada la seva validesa es va procedir a comprovar la seva resistència a l'aigua mitjançant un test en piscina. El registre de la freqüència cardíaca va ser correcte mentre l'esportista nedava, únicament es va perdre el senyal durant els viratges, igual com passa amb la resta de sistemes comercial actualment al mercat (en aquests "s'enganya" a l'usuari en mostrar un valor de la freqüència cardíaca que en realitat no és altra cosa que la interpolació entre la freqüència

cardíaca anterior i posterior al viratge). La gràfica 1 mostra el registre de la freqüència cardíaca durant un entrenament consistent en una sèrie de 6 repeticions de 100 metres amb 25 segons de recuperació per part d'un nedador de nivell mitjà.

### Conclusions i discussió

En el mercat hi ha diversos equips capaços de registrar la freqüència cardíaca mentre l'esportista neda, però s'acostumen a presentar dos problemes importants. Per una banda no permeten graficar la resposta cardíaca en temps real i mitjançant telemetria a un ordinador personal controlat per l'entrenador, i per l'altra, acostumen col·locar-se en el pit amb la qual cosa la seva fixació resulta molesta i a vegades cruenta.

El desenvolupament tecnològic actual permet subsanar aquests problemes en col·locar l'emissor-receptor al lòbul de l'orella mitjançant una pinça i permetre, a més a més, visualitzar en temps real l'evolució de la freqüència cardíaca durant un entrenament gràcies a un sistema de telemetria i a la utilització d'un filtre digital i un algoritme específicament desenvolupat per reduir el soroll.

Fins aquí el present, però el futur immediat pot presentar desenvolupaments encara més sorprenents, per exemple, i a l'igual que els cronòmetres miniatura col·locats a les ulleres del nedador li permeten veure el seu temps de natació, no seria molt problemàtic col·locar un petit "display" a les ulleres del nedador de manera que tingués un *feedback* immediat de la seva freqüència cardíaca mentre neda.

### Agraïments

El present projecte ha estat possible gràcies a una subvenció del Consejo Superior de Deportes (CSD) i a la col·laboració de la Real Federación Española de Natación (RFEN) i la Federació Valenciana de Natació (FVN).



## **Bibliografia**

- ASTRAND, P. O.; RODAHL, K. (1986), *Textbook of Work Physiology. Physiological Bases of Exercise*. Ed. McGraw-Hill, 487-522.
- NAVARRO, F.; SANTIESTEBAN, J. M. (1993), *Parámetros Fisiológicos para el Control del Entrenamiento*. Gandia 26-28 de noviembre.
- GILTVEDT, J.; SIRA, A.; HELME P. (1984), "Pulsed Multifrequency Photoplethysmograph". *Medical & Biological Engineering and Computing* 22, 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*. Lleó 3-5 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), 881-884.
- WILMORE, J.H.; COSTILL, D.L. (1994) *Physiology of Sport And Exercise*. Ed. Human Kinetics, 214-236.