

Anàlisi de sèries temporals aplicada a la freqüència cardíaca en una prova d'esforç

Lluís Capdevila i Ortis

Àrea de Psicologia Bàsica. U.A.B.

RESUM

Aquest treball té per objectiu desenvolupar una eina estadística que permeti avaluar de manera continua la freqüència cardíaca en una prova d'esforç sobre una cinta ergomètrica, i comparar-ne l'evolució amb la d'altres corbes de freqüència cardíaca del mateix individu o d'individus diferents. Els resultats indiquen que totes les corbes de freqüència cardíaca, per als tres individus avaluats, presenten una forta autocorrelació entre les dades, i que totes segueixen el mateix model autoregressiu ARIMA (1, 1, 0). L'anàlisi de sèries temporals seguint models ARIMA és una tècnica adequada per a avaluar els efectes d'una intervenció sobre variables psicofisiològiques mesurades a intervals constants de temps, en dissenys de cas únic.

SUMMARY

This study aims to develop a statistical instrument that will facilitate the permanent evaluation of heartbeat frequency during strenuous exercise on an ergometric band, comparing its evolution with other frequency curves for the same individual and for different individuals. The results indicate that all heartbeat frequency curves (for the three individuals in question) have strong data correlation, and that all of them follow the same self-destructive ARIMA (1, 1, 0) model. The analysis of time

NOTA: Aquest treball ha estat realitzat gràcies a la col·laboració de l'equip mèdic del CEARE i, en part, gràcies a l'Ajut PB 86-0124 de la Direcció General de Investigació Científica i Tècnica del MEC.

relays on an ARIMA model is a suitable technique for the evaluation of the effects of an operation on psychophysiological variables measured at constant intervals of time, with single case systems.

Introducció

En la investigació experimental dins dels àmbits de la Medicina de l'Esport i la Psicologia de l'Esport és molt freqüent observar dissenys de grup on la principal eina estadística per a avaluar efectes d'alguna intervenció, és l'anàlisi de la variança o l'estudi de correlacions. En molts casos, els resultats d'aquestes anàlisis semblen suficients, però també moltes vegades poden portar a conclusions globals que no són aplicables a casos individuals. És a dir, pot esdevenir-se que a la realitat pocs subjectes de la mostra analitzada s'ajustin a la tendència mitjana observada en el grup (Capdevila i Cruz, 1987). En els últims anys, les diferències individuals observades a moltes variables que controlen la conducta de l'organisme han fet pensar en l'adequació dels dissenys de cas únic en el camp de la Psicologia de l'Esport (Bryan, 1987; Wollman, 1986; Zaichkowsky, 1980). Aquests tipus de disseny però, comporten el problema d'avaluar fiablement un canvi en les dades com un efecte real d'un tractament o intervenció (Kazdin, 1984). A més a més, l'anàlisi estadística per a dissenys de cas únic no és gens de familiar a la majoria d'investigadors en les ciències socials i conductuals (Kratovich, 1978).

Per una altra banda, s'ha observat en dissenys de cas únic que la freqüència cardíaca és una variable psicofisiològica que, mesurada a intervals

constants de temps, pot donar informació vàlida sobre l'evolució de l'esforç físic, comparant-la en diferents fases, com per exemple abans i després d'un entrenament físic o psicològic (Capdevila i Cruz, 1988a). També s'ha comprovat que, en situació controlada (una prova d'esforç en cinta ergomètrica), aquesta variable sembla seguir patrons sistemàtics que es poden ajustar a models matemàtics molt concrets. L'autocorrelació observada en les dades requereix d'un tractament estadístic especial que tingui en compte aquest fet, com l'ajustament de models ARIMA, i al mateix temps, fa inadequats certs tipus d'anàlisi de sèries temporals, com l'ajustament de corbes utilitzant el factor temporal com a regressor (Capdevila i Cruz, 1988b).

Fetes aquestes consideracions, el nostre objectiu en aquest treball és el d'aplicar una eina estadística a l'estudi de la freqüència cardíaca en una prova d'esforç sobre una cinta ergomètrica, que permeti avaluar de forma contínua aquesta variable i comparar la seva evolució amb d'altres corbes de freqüència cardíaca del mateix individu o d'individus diferents. La metodologia utilitzada és l'anàlisi de sèries temporals basada en models ARIMA (Box i Jenkins, 1970; Bowerman i O'Connell, 1979).

Mètode

Subjectes:

Tres atletes mig-fondistes d'élite, especialitzats en 800 i 1.500 metres.

Procediment

S'ha aplicat una anàlisi de sèries temporals segons models ARIMA a les corbes de freqüència cardíaca obtingudes per cada atleta en dues proves submàximes d'esforç, en una cinta ergomètrica. Entre ambdues proves hi havia un espai temporal de 5 setmanes en el qual s'entrenava a dos dels atletes en respectives tècniques de control de l'estrès, mentre que el tercer atleta no rebia cap intervenció. El disseny experimental, per tant, constava de tres etapes amb les següents característiques:

I. Carrera submàxima sobre una cinta ergomètrica. Es mesura la freqüència cardíaca cada 30 segons, en les següents etapes:

1. Tres minuts en repòs.
2. Tres minuts d'escalfament.
3. Vint minuts al 65% del consum màxim d'oxigen.
4. Tres minuts de recuperació.

II. Entrenament psicològic en el control de l'estrès (6 setmanes):

Subjecte 1: tècnica basada en el Condicionament Clàssic.

Subjecte 2: tècnica d'Inoculació de l'Estrès (Capdevila, 1987).

Subjecte 3: control (no rep cap tipus d'entrenament).

III. Segona carrera submàxima, d'identiques característiques que en la Fase I. Els Subjectes 1 i 2 apliquen l'entrenament psicològic.

Per a cada individu, l'anàlisi estadística de sèries temporals constava de dues etapes globals amb els següents elements:

I. Ajustament òptim d'un model ARIMA a la corba de freqüència cardíaca de la primera prova d'esforç.

- A) Anàlisi de l'autocorrelació de les dades.
- B) Identificació del model.
- C) Estimació de paràmetres.
- D) Validació del model.

II. Grficació del model ajustat a la primera prova d'esforç, amb la superposició de la freqüència cardíaca observada en la segona prova:

- Corba dels valors estimats per la freqüència cardíaca de la primera prova.
- Intervàl de confiança del 95% per a aquesta estimació.
- Freqüència cardíaca real observada en la segona prova.

D'aquesta manera, es poden determinar els punts on l'evolució de la freqüència cardíaca difereix significativament entre les dues proves.

Resultats

A la figura 1 es representen les corbes de freqüència cardíaca corresponents a les dues proves d'esforç realitzades pel Subjecte 1. La figura 2 representa el mateix pel Subjecte 2, i la figura 3 pel Subjecte 3.

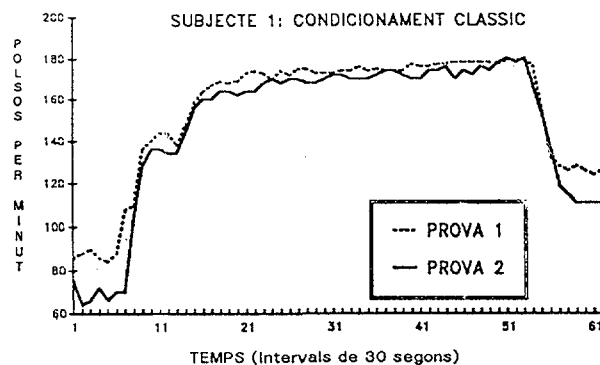


Figura 1. Freqüència cardíaca promitjada cada 30 segons en les dues proves d'esforç pel Subjecte 1.

Seguint els passos descrits per l'anàlisi de sèries temporals, s'observa en primer lloc que totes les corbes de freqüència cardíaca, per a tots els subjectes i en totes les proves, presenten una autocorrelació fortament significativa. Aquest fet justifica l'ajustament de models ARIMA a les dades, i a la vegada indica que les sèries temporals no són

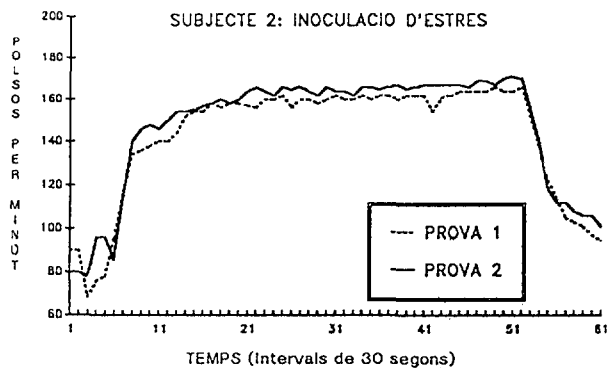


Figura 2. Freqüència cardíaca promitjada cada 30 segons en les dues proves d'esforç pel Subjecte 2.

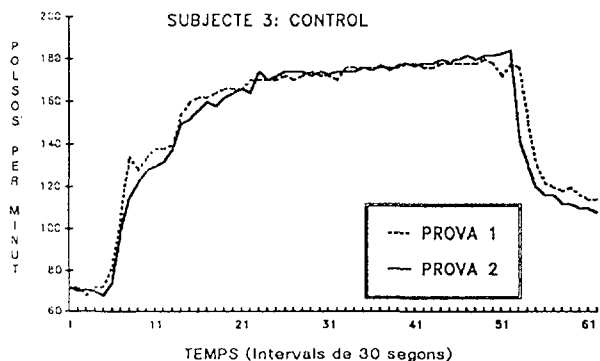


Figura 3. Freqüència cardíaca promitjada cada 30 segons en les dues proves d'esforç pel Subjecte 3.

estacionàries, és a dir, no tenen un valor mig ni una variància constants. Per aquest motiu hem de diferenciar cada sèrie temporal de freqüència cardíaca, i identificar el model que segueix a partir de l'estudi de l'autocorrelació i l'autocorrelació parcial de la sèrie diferenciada (Bowerman i O'Connell, 1979). Estudiant amb detall aquests elements es pot arribar a la conclusió que les sis corbes de freqüència cardíaca estudiades segueixen un model ARIMA (1, 1, 0), d'equació general.

$$Y_t = C + (1 + b_1) Y_{t-1} - b_1 Y_{t-2} + E_t$$

on Y_t representa el valor de freqüència cardíaca en el moment t , C és una constant i b_1 el paràmetre autorregressiu d'ordre 1).

A l'aplicar un model d'aquest tipus a les 6 corbes de freqüència cardíaca, els paràmetres estimats permeten establir les següents equacions per a cada individu:

PRIMERA PROVA	SEGONA PROVA
Subjecte 1 $Y_t = 1.39Y_{t-1} - 0.39Y_{t-2}$	$Y_t = 1.53Y_{t-1} - 0.53Y_{t-2}$
Subjecte 2 $Y_t = 1.43Y_{t-1} - 0.43Y_{t-2}$	$Y_t = 1.38Y_{t-1} - 0.38Y_{t-2}$
Subjecte 3 $Y_t = 1.46Y_{t-1} - 0.46Y_{t-2}$	$Y_t = 1.34Y_{t-1} - 0.34Y_{t-2}$

Nota: les constants no figuren a les equacions perquè en cap cas no són significatives.

La validació dels models es realitza mitjançant l'anàlisi de residuals. Un ajustament òptim hauria d'originar uns residuals sense autocorrelació (es pot avaluar a partir de l'índex Durbin-Watson, que hauria de valer 2 per a indicar independència total dels residuals) i amb tendència a valdre "zero" (amb un error estàndar ajustats a la freqüència cardíaca de la primera prova (per a calcular l'interval de confiança en la mateixa), realitzarem la validació per a tres dels models. La següent taula mostra alguns índexs d'interès per a analitzar els residuals dels models ajustats a la primera prova:

	Subjecte 1	Subjecte 2	Subjecte 3
Valor Mig Residuals	0.409	0.394	0.373
Error Estàndar Res.	5.966	6.192	6.459
Índex Durbin-Watson	2.119	2.082	1.930

En tots els casos, els residuals tendeixen al valor "zero" i no presenten cap estructura clara, amb absència total d'autocorrelació l'índex Durbin-Watson és proper al valor 2. Per tant, hem de suposar que els ajustaments són òptims i que no queda variabilitat important en les dades per explicar.

Un cop obtinguts els millors ajustaments, podem calcular l'interval de confiança del 95% corresponent a les estimacions que realitza el model per la freqüència cardíaca de cada individu en la primera prova. Aquests valors estan representats gràficament en les figures 4, 5 i 6, junt amb la freqüència cardíaca real mostrada per cada atleta en la segona prova.

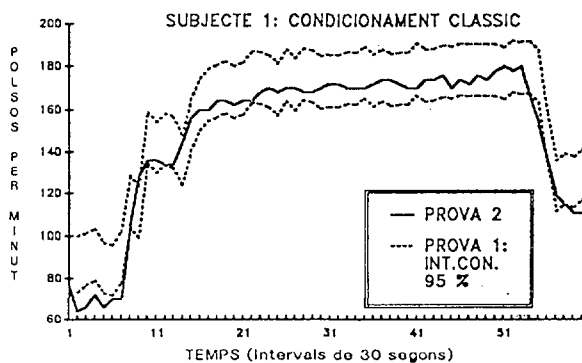


Figura 4. Freqüència cardíaca observada en la segona prova d'esforç del Subjecte 1, superposada a l'interval de confiança del 95% ajustat a la corba de freqüència cardíaca de la primera prova, segons un model ARIMA (1, 1, 0).

Amb l'ajut d'aquests gràfics podem analitzar en quins punts temporals la freqüència cardíaca observada en la segona prova està dins de l'interval estimat per la primera prova. Els límits d'aquest interval ens indiquen, en cada moment temporal, els valors de freqüència cardíaca a partir dels quals la segona prova difereix estadísticament de la primera (amb un nivell de significació inferior al 5%).

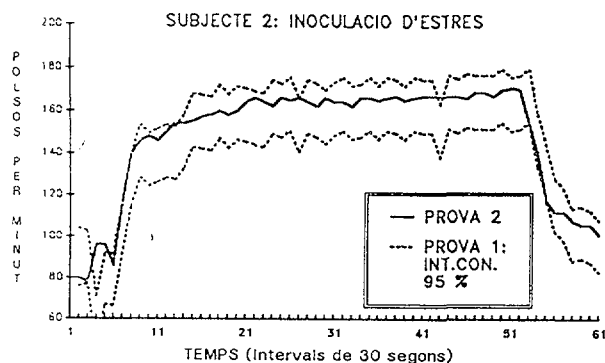


Figura 5. Freqüència cardíaca observada en la segona prova d'esforç del Subjecte 2, superposada a l'interval de confiança del 95% ajustat a la corba de freqüència cardíaca de la primera prova, segons un model ARIMA (1, 1, 0).

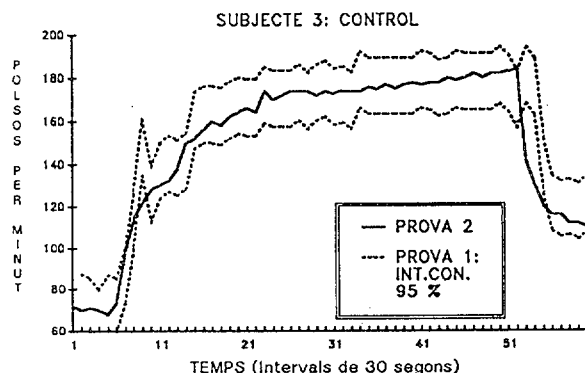


Figura 6. Freqüència cardíaca observada en la segona prova d'esforç del Subjecte 3, superposada a l'interval de confiança del 95% ajustat a la corba de freqüència cardíaca de la primera prova, segons un model ARIMA (1, 1, 0).

Analitzant la figura 4, veiem que el Subjecte 1 presenta nivells de freqüència cardíaca més baixos en la segona prova, només en els minuts de repòs previs i en els de recuperació posteriors a la prova d'esforç. En els 20 minuts a ritme constant, tots els valors de freqüència cardíaca estan dins l'interval.

Si observem la figura 5, es pot comprovar que el Subjecte 2 presenta valors puntuals de freqüència cardíaca més alts en els minuts de repòs de la segona prova, i també en algun punt de la carrera de 20 minuts.

A la figura 6, es pot observar que el Subjecte 3 manté els valors de freqüència cardíaca de la segona prova dins dels límits donats pel model ajustat a la primera prova, excepte en algun punt de transició entre etapes on varia la velocitat de la cinta ergomètrica.

Discussió

Centrant la nostra atenció en els resultats de l'anàlisi, podem constatar que totes les corbes de freqüència cardíaca, i per tots els individus, presenten una forta autocorrelació entre les dades, i és més, totes segueixen el mateix model autoregressiu ARIMA (1, 1, 0). Això ens fa pensar que la situació experimental utilitzada provoca un patró sistemàtic en la freqüència cardíaca de tots els individus: cada valor de freqüència cardíaca correlaciona positivament amb el valor presentat durant el període previ de 30 segons, presentant la corba completa una tendència mitja ascendent. Aquest patró possiblement ve determinat per l'esforç físic present en la major part del temps analitzat. Al tractar-se d'un esforç continu a una càrrega de treball constant, és lògic pensar que la freqüència cardíaca seguirà una evolució ascendent on cada valor ve determinat pels valors immediatament anteriors.

Al comparar les dues proves en cada atleta, les diferències que ens permeti detectar aquesta tècnica d'anàlisi es poden considerar com a efectes de la intervenció, en aquest cas, l'entrenament psicològic en dos dels atletes. Així, podríem dir que pel Subjecte 1 la tècnica de condicionament clàssic ha estat eficaç per a reduir els nivells de freqüència cardíaca previs a la prova i immediatament posteriors a la mateixa. La reducció anterior es podria explicar pels efectes relaxants que es pretenen aconseguir amb l'aplicació de la tècnica psicològica, mentre que la posterior podria ser la conseqüència de presentar, durant tota la segona prova d'esforç, nivells més baixos de freqüència cardíaca que en la primera prova (aquestes diferències no són significatives durant l'esforç, però podrien accentuar-se en el període de recuperació, com un efecte de no anar tan forçat durant la prova).

Pel Subjecte 2 es podria concloure que la tècnica d'innoculació de l'estrès utilitzada com a entrenament psicològic, no ha estat eficaç. Aquest atleta presenta un augment significatiu en la freqüència cardíaca, en dos punts del període de repòs de la segona prova respecte a la primera, i a més a més, tota la corba de freqüència cardíaca d'aquesta prova està molt pròxima al límit superior que ajusta el model per la primera prova.

Pel Subjecte 3, que fa les funcions de control, no s'observen canvis importants entre les dues proves. Les úniques diferències observables en la figura 6, corresponen als moments de transició entre el repòs i l'escalfament, i entre la carrera constant i la recuperació. Aquestes diferències no es poden tenir en compte perquè justament en aquests punts és on el model ajusta pitjor, donat el canvi bruscat en els valors de freqüència cardíaca com a efecte de l'inici i de la fi de l'esforç físic (notis que en aquells moments l'interval de confiança ajustat a la primera prova és molt més estret en tots els individus).

Un punt important a considerar és que la tècnica d'anàlisi utilitzada permet comparar estadísticament corbes de freqüència cardíaca en un mateix subjecte, tenint en compte l'evolució temporal de totes les dades. Amb el mateix disseny experimental, fent una anàlisi estadística convencional, podríem comparar els valors mitjans de freqüència cardíaca entre ambdues proves en cada etapa del procediment —escalfament, repòs, carrera constant, recuperació— tal com han fet alguns autors (Ziegler, Klinzing i Williamson, 1982). Això comporta el problema principal de pèrdua d'informació, al resumir els punts de dades a un sol valor mig (es perdria la seqüència temporal de les dades), i el problema de necessitar un nombre considerable de subjectes perquè es compleixin les condicions d'aplicació de l'anàlisi de la varianza.

Per aquests motius, hom creu que l'anàlisi de sèries temporals seguint models ARIMA, és adequada per a avaluar variables mesurades a intervals constants de temps, en dissenys de cas únic. Les variables psicofisiològiques com la freqüència cardíaca o les més estrictament fisiològiques com el consum d'oxigen sovint requereixen d'aparells sofisticats o de dissenys complicats, per a ésser avaluades. Això fa que es redueixi la possibilitat d'utilitzar gran nombre de subjectes: requereix de tècniques d'anàlisi especials que ho tinguin en compte i que a la vegada contemplin la naturalesa temporal d'aquestes dades.

Així mateix, la tècnica exposada també pot ser útil quan comparem evolucions de la mateixa variable en diferents subjectes, superposant les corbes de freqüència cardíaca observada en diferents subjectes a l'interval de confiança ajustat a la freqüència cardíaca d'un d'aquests subjectes escollit com a model. També podem utilitzar la tècnica per a comparar l'evolució mitja d'una variable entre els subjectes de diferents grups (en el nostre treball les dades podrien ser valors mitjans de tres grups diferents, enlloc de correspondre a tres individus).

No obstant, la tècnica té certes limitacions o desavantatges, entre les que podríem destacar les següents: A) la necessitat d'un nombre suficient de dades, recomanant-se un mínim de 50 observacions per a aplicar models ARIMA amb garanties (Bowerman i O'Connell, 1979) o inclús un mínim de 100 observacions (Box i Jenkins, 1970); B) la utilització d'una metodologia estricta al recollir les dades, ja que les corbes a comparar han de ser idèntiques quant al factor temporal i això suposa dissenys molt acurats i un control màxim sobre les variables estranyes; i C) l'escassa familiarització existent actualment amb aquestes tècniques d'anàlisi especials, diferents de les utilitzades per l'estadística convencional, que requereixen d'una formació adequada per part de l'investigador.

Referencies

BOWERMAN, B.L.; O'CONNELL, R.T.: Time series and forecasting. Belmont, California: Duxbury Press, 1979.
BOX, G.E.P. i JENKINS, G.M.: Time series analysis: Forecasting and control. San Francisco: Holden-Day, 1970.
BRYAN, A.J.: Single-subject designs for evaluation of Sport Psychology interventions. "The Sport psychologist", 1, 283-292. 1987.
CAPDEVILA, LI.: Influencia del entrenamiento psicológico en el rendimiento de deportistas de fondo con problemas de ansiedad (I). Revista de Investigación y Documentación sobre las Ciencias de la Educación Física y del Deporte (ICEFD), 3 (6), 17-29. 1987.
CAPDEVILA, LI.; CRUZ, J.: Tècniques d'avaluació de les variables psicològiques en l'Atletisme d'alta competició. IV Jornades de l'Associació Catalana de Psicologia de l'Esport. Lleida, 1987.
CAPDEVILA, LI.; CRUZ, J.: Coping strategies in an athlete: a pilot study. II European Meeting on Experimental Analysis of Behavior. Lieja, Bèlgica, 1988a.
CAPDEVILA, LI.; CRUZ, J.: Avaluació de l'eficàcia de l'entrenament psicològic. V Jornades de Psicologia de l'Acti-

vitat Física i de l'Esport, Esplugues de Llobregat, Barcelona, 1988b.
KAZDIN, A.E.: Análisis estadísticos para los diseños experimentales de caso único, 1984. En M. Hersen i D.H. Barlow (Eds.), Single case experimental designs (pp. 285-324). Nova York: Pergamon Press. Traducció Martínez Roca, Diseños experimentales de caso único, 1988.
KRATOCHWILL, T.R.: Single subject-research: Strategies for evaluating change. Nova York: Academic Press, 1978.
WOLLMAN, N.: Research on imagery and motor performance: three methodological suggestions. Journal of Sport Psychology, 8, 135-138. 1986.
ZAICHKOWSKY, L.D.: Single case experimental designs and sport psychology research, 1980. En C.H. Nadeau, W.R. Halliwell, K.M. Newell i G.C. Robertys (Eds.), Psychology of motor behavior and sport (pp. 171-179). Champaign, Illinois: Human Kinetics, 1979.
ZIEGLER, S.G.; KLINZING, J. i WILLIAMSON, K.: The effects of two stress management training programs on cardiorespiratory efficiency. Journal of Sport Psychology, 4, 280-289. 1982.

