

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS  
INDUSTRIALS DE BARCELONA (UPC)**

*Institut de Cibernètica*

**NOVES TÈCNIQUES EN L'ANÀLISI DEL  
SENYAL ELECTROCARDIOGRÀFIC:  
APLICACIÓ A L'ECG D'ALTA  
RESOLUCIÓ.**

Autor: Raimon Jané Campos  
Director: Antonio Bayes

Juny 1989

# Capítol 1

## INTRODUCCIÓ

L'estudi del senyal electrocardiogràfic (ECG) obtingut mitjançant elèctrodes de superfície és una de les proves mèdiques més freqüents en l'exploració de l'activitat cardíaca.

El fet de ser una prova no invasiva, que facilita l'obtenció d'un senyal elèctric estretament vinculat a l'activitat del cor, li ha donat una gran significació en el diagnòstic de les cardiopaties.

L'aportació de la Bioenginyeria en l'anàlisi d'aquest senyal ha estat fonamental, tant en el disseny electrònic d'equips d'adquisició i monitorització com en l'aplicació dels ordinadors en el seu processat. La gran evolució de la tecnologia de les computadores, amb la disponibilitat dels microprocessadors a baix cost, la millora de les tècniques de processat digital de senyal i l'existència d'una instrumentació electrònica de més qualitat, han propiciat un gran avenç en aquest camp.

Aquesta nova situació ha permès el planteig d'aplicacions complexes en l'estudi de l'electrocardiograma convencional. Les més importants han estat: la configuració de monitors d'arrítmies intel·ligents (Thakor i altres, 1984; Tompkins, 1985) i l'aplicació de tècniques de Reconeixement de Formes, en un primer pas cap al diagnòstic automàtic (Belforte i altres, 1979; Udupa i Murthy, 1980; Skordalakis i Papakonstantinou, 1984). Així, des de la incorporació dels ordinadors als equips d'obtenció i enregistrament de l'ECG, que va provocar un gran impacte en la tecnologia i disseny d'aquests equips, l'anàlisi automàtica del senyal electrocardiogràfic ha estat un problema abordable.

Cal precisar, però, que l'anàlisi assistit per computadora de l'ECG convencional no aporta *per se nova* informació per al diagnòstic respecte a l'observada directament per un cardiòleg. Ara bé, la disponibilitat d'aquestes eines ha ofert la possibilitat d'obtenir molta més informació sobre l'activitat cardíaca que la detectada en els registres electrocardiogràfics convencionals.

En aquesta línia es troba l'Electrocardiografia d'alta resolució (ECGAR), que és un camp de recerca recent. Consisteix en la detecció i quantificació de potencials cardíacs de baixa amplitud, que no es poden captar amb els procediments de l'ECG convencional. L'ECGRA requereix el desenvolupament de tècniques de processat digital en el domini temporal i la realització de programes que permetin l'obtenció automàtica de l'activitat cardíaca de baixa amplitud. A més a més cal, per captar el senyal, la utilització d'una instrumentació biomèdica molt superior en prestacions a l'emprada habitualment.

Els treballs presentats fins ara consideren el cas més senzill de l'estimació dels potencials cardíacs vinculats a les ones d'amplitud més gran dins l'electrocardiograma. La majoria de les realitzacions existents són només aplicables, per tant, a les ones d'elevada relació senyal-soroll. Aquesta important restricció del problema no ha evitat notòries deficiències en la qualitat de les estimacions obtingudes. Així s'ha arribat a una baixa coincidència de resultats en certs estudis mèdics comparatius. Per aquest motiu, s'ha considerat la necessitat d'efectuar nous estudis en les tècniques de processat emprades, que millorin de forma important les prestacions de cadascuna de les etapes del tractament del senyal.

Els senyals d'interès en el camp de l'Electrocardiografia d'alta resolució, des d'un punt de vista de processat de senyal, mostren les següents característiques: ser de tipus transitori, posseir una baixa relació senyal-soroll i distingir-se per seguir la vinculació temporal impuls-resposta.

L'acurada estimació d'aquests senyals exigeix la selecció de tècniques de processat adients per recuperar les components deterministes d'interès, contaminades per soroll tant d'origen biològic com extern. Especialment, cal un reconeixement fiable de l'activitat corresponent a cada batec cardíac, així com la definició d'una precisa referència temporal en cadascun d'ells. Amb aquestes fases prèvies es poden aplicar les etapes de processat més escaients per a l'obtenció de potencials cardíacs de baixa

amplitud.

Els senyals electrocardiogràfics considerats en aquest treball tenen una forta vinculació amb el sistema biològic que els genera. Tot seguit s'introdueixen uns conceptes bàsics, respecte a aquests senyals i el seu origen, que són necessaris per a una millor comprensió d'aquest treball.

## 1.1 EL SENYAL ELECTROCARDIOGRÀFIC

L'origen d'aquest senyal està vinculat als potencials d'acció iònics, generats pel múscul cardíac. Per tant, el senyal ECG està relacionat directament amb les modificacions físico-químiques que succeeixen en el miocardi, quan es propaga l'ona d'excitació que origina la contracció del cor.

Els potencials d'acció es produeixen a les membranes cel·lulars, que canvien de polaritat durant la seva excitació. Així es passa d'una fase de repòs (polarització) a una d'activació (despolarització), per seguir a una fase de recuperació (repolarització), i arribar finalment a la situació inicial de repòs.

La propagació d'aquesta activació genera uns potencials positius en la superfície cel·lular davant de l'excitació, i negatius immediatament després. Això provoca la presència de nombrosos dipòls, creats amb la propagació de l'ona, que generen un camp elèctric variable.

Aleshores, considerant el cos com un conductor relativament uniforme, en qualsevol punt de la superfície es podrà obtenir una projecció de l'activitat elèctrica en aquella direcció. Per això calen uns sensors apropiats, coneguts amb el nom d'elèctrodes, que converteixen els corrents iònics en corrents elèctrics. En la pràctica clínica, s'utilitzen normalment combinacions de dos o més elèctrodes per obtenir un senyal electrocardiogràfic. Cal destacar que per a cada ubicació dels elèctrodes s'obtenen senyals diferents. Afortunadament existeix una normalització respecte al posicionament dels elèctrodes, que fa possible la interpretació i comparació de diagnòstics mèdics. Cadascun d'aquests conjunts d'elèctrodes rep el nom de derivació.

A continuació es presenta la configuració bàsica del senyal electrocardiogràfic, així com

les ones principals que el caracteritzen. Tot seguit es descriuen els sensors emprats per captar aquest tipus de senyal, així com les derivacions normalitzades que s'utilitzen habitualment.

### 1.1.1 Caracterització del senyal

El senyal electrocardiogràfic és la manifestació elèctrica associada a l'activitat del múscul cardíac. Per tant, presenta un comportament cíclic lligat a la recurrència dels batecs cardíacs.

Cadascun dels cicles consta d'una sèrie d'ones característiques, que representen unes fases concretes en l'activació de cada batec. Tradicionalment aquestes ones se les anomena, de manera seqüencial, per les lletres P, Q, R, S i T respectivament. En la figura 1.1 es mostra un fragment d'un senyal ECG convencional ideal, corresponent a un cicle cardíac complet, on s'indiquen les diverses ones, intervals i segments singulars.

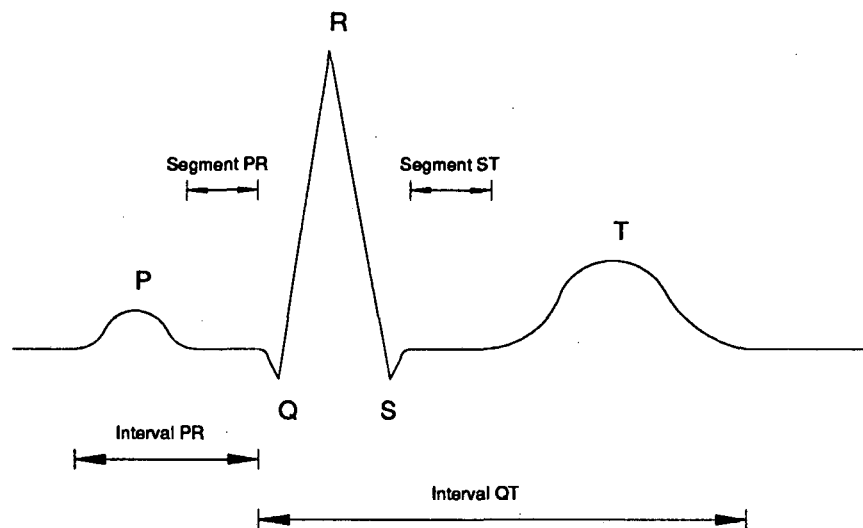


Figura 1.1: *Senyal ECG ideal, amb la indicació de les ones, intervals i segments que el caracteritzen.*

La relació d'aquestes ones amb l'activitat del cor és ben directa. Així l'ona P és produïda per la despolarització auricular. El segment P-R indica el temps de conducció

aurículo-ventricular. El conjunt d'ones Q, R i S -també designat com complex QRS-reflexa la despolarització ventricular. El segment S-T expressa el temps entre el final de l'activació ventricular i l'inici de la repolarització ventricular, que ve indicada pròpiament per l'ona T. També és d'interès l'interval Q-T, que representa tot el temps que el ventricle no és en repòs degut a l'activació o a la recuperació de les seves cèl.lules.

Aquesta informació que facilita el senyal ECG, pel que fa a l'activitat d'un batec, és molt important, però no l'única. Un altre aspecte interessant és l'anàlisi comparativa dels fragments del senyal corresponents a cada batec cardíac. L'estudi de la variabilitat en el temps de la forma del senyal, així com del ritme cardíac i dels intervals P-R i Q-T poden resultar molt significatius en el diagnòstic. També les aparicions de batecs que canvien sobtadament la seqüència normal, i reben el nom d'arrítmia, poden ser representatius de certes anormalitats cardíques.

Els aspectes descrits constitueixen les característiques més significatives en l'anàlisi de l'electrocardiograma convencional.

El cas de l'ECG d'alta resolució és diferent, ja que a més d'aquesta informació es pretén detectar una activitat cardíaca de baixa amplitud addicional que es troba oculta en l'ECG clàssic. En el següent apartat es donaran uns breus conceptes d'aquesta altra tècnica electrocardiogràfica.

Les característiques del senyal electrocardiogràfic convencional, des del punt de vista de processat de senyal, es detallen a continuació. El senyal ECG obtingut en la superfície del cos, mitjançant els elèctrodes, és un senyal de baixa amplitud (de l'ordre d'un mV) enregistrat de manera diferencial, amb una component de mode comú molt notable deguda principalment a les interferències de la xarxa elèctrica i als potencials d'*offset* dels elèctrodes.

Amb les característiques remarcades, resulta patent la necessitat de l'ús d'amplificadors d'instrumentació diferencials, amb un elevat rebuig de mode comú que augmenti notòriament l'amplitud del senyal ECG (al rang de Volt), i atenuï al màxim les components no diferencials.

L'amplada de banda dels senyals ECG s'estén fonamentalment entre contínua i 100 Hz, pel que fa referència a les components convencionals. Un interessant estudi de Thakor

i altres (1984) va analitzar la contribució de cadascuna de les ones característiques de l'ECG a l'espectre de tot el senyal. A la figura 1.2 es reproduïx la conclusió d'aquell estudi que pot ésser il·lustratiu per al present treball

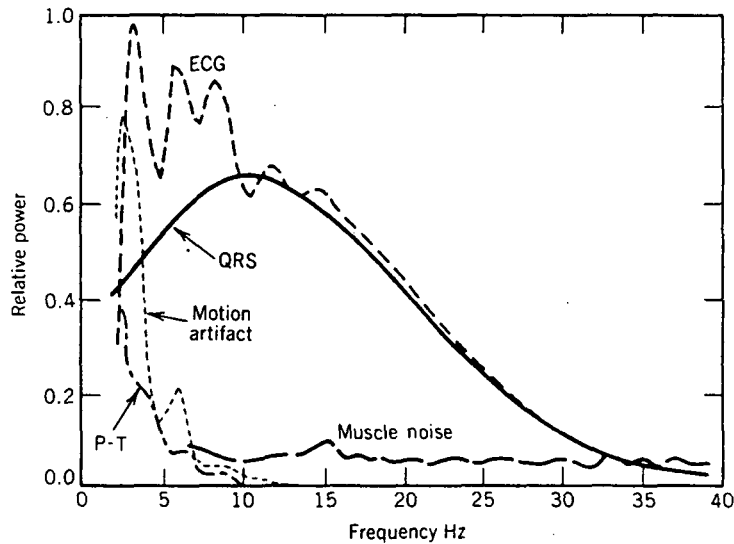


Figura 1.2: *Espectre del senyal ECG, i de les seves components. (Reproduït de (Thakor, 1984))*

### 1.1.2 Elèctrodes

Els elèctrodes són els elements sensors que permeten l'obtenció dels potencials generats en el cos. Per captar aquests senyals realitzen la transformació dels corrents iònics, que hi ha en els éssers vius, a corrents d'electrons necessaris per als equips electrònics.

Cal destacar que sempre cal, com a mínim, un parell d'elèctrodes per tal d'efectuar una mesura, ja que el senyal considerat serà sempre una diferència de potencial entre dos punts.

Els elèctrodes es poden classificar en polaritzables i no polaritzables (Webster, 1978). Els primers tenen un comportament fonamentalment capacitiu. Per això un corrent constant que circuli a través d'ells causarà un increment de tensió continuat (potencial

d'*offset*). Els elèctrodes no polaritzables, en canvi, s'aproximen a una resposta resistiva. En aquest cas amb un corrent constant generarà un potencial d'*offset* també constant.

Cap dels dos tipus és realitzable físicament, encara que és possible obtenir bones aproximacions. Així, mentre que els basats en metalls nobles responen pràcticament com elèctrodes polaritzables, els formats per Ag-AgCl s'aproximen acceptablement als no polaritzables.

En general els elèctrodes estan formats per una part metàl·lica, que fa pròpiament d'elèctrode, i d'un electròlit que és el que permet efectuar la transformació entre ions i electrons, al reaccionar amb l'elèctrode.

Un model elèctric que reproduïx bé la resposta dels elèctrodes al pas de corrents de diverses freqüències, està format per una resistència en sèrie que modelitza la resistència de l'electròlit, una resistència i un condensador en paral·lel que representen la interfície elèctrode-electròlit, i un potencial que indica la tensió que apareix al col·locar l'elèctrode en l'electròlit.

A més d'aquesta interfície elèctrode-electròlit, cal considerar la formada per electròlit-pell, que també es pot representar per un model elèctric de tipus similar.

Una situació interessant a tenir en compte és el comportament dels elèctrodes quan hi ha moviment del pacient, i provoca un desplaçament relatiu entre ambdues interfícies. Els elèctrodes de Ag-AgCl, que són el tipus més emprat per a aquestes aplicacions, presenten artefactes mínims causats pel moviment relatiu de la interfície elèctrode-electròlit. Per contra la interfície electròlit-pell provoca la majoria d'artefactes (Tam i Webster, 1977)

Totes les accions que es realitzin per tal de reduir les components resistives i capacitives, originaran una disminució dels possibles artefactes. En aquest sentit hi han estudis on s'ha observat l'efecte de l'abradió de la capa superficial de la pell, abans de la mesura dels biopotencials (Burbank i Webster, 1978), en la reducció dels artefactes de moviment.

Recentment s'han publicat estudis on es justifica que la preparació de la pell amb alcohol o fins i tot sense cap preparació pot ésser suficient en certes ocasions (Thakor i Webster, 1985).



Respecte a les configuracions físiques d'elèctrodes existeixen diverses aproximacions. D'entre elles destaquen les corresponents als elèctrodes de placa metàl·lica i als flotants.

Els elèctrodes de placa metàl·lica consisteixen en un conductor de metall, normalment de Ni-Ag, en contacte amb la pell. Utilitzen una pasta electrolítica per establir i mantenir el contacte. Els elèctrodes flotants intenten estabilitzar la interfície elèctrode-electròlit, amb una configuració geomètrica que la immobilitza. D'aquesta manera es minimitzen els artefactes de moviment, fixant la doble capa d'ions entre elèctrode i electròlit. Aquest tipus d'elèctrodes seran els habitualment emprats en aquest treball.

### 1.1.3 Derivacions normalitzades

El cor genera un camp elèctric que es pot modelitzar, de forma aproximada, com un vector de mòdul i direcció variable. Es desitja observar aquesta activitat cardíaca des de la superfície del cos. Per això, els cardiòlegs han estandarditzat determinats punts de mesura per a l'obtenció del senyal ECG, amb l'objectiu d'unificar els criteris de diagnòstic mèdic.

S'anomena derivació a la posició concreta d'un parell d'elèctrodes, o a una combinació de diversos elèctrodes a través d'una xarxa de resistències que corresponguin a un parell equivalent. Per extensió també es designa amb aquest terme el senyal obtingut amb els elèctrodes així situats.

A continuació es descriu breument el sistema de derivacions normalitzades considerat en aquest treball.

El sistema considerat és el de les derivacions del pla frontal, basat en el treball preliminar de W. Einthoven (1913). Aquest va representar una contribució fonamental en els inicis de la Cardiologia, degut al disseny d'un primer i rudimentari electrocardiògraf, basat en un galvanòmetre, que va fixar les bases per als equips actuals. Però l'aportació que més directament ha perdurat fins l'actualitat és la definició d'un sistema de derivacions. Les mesures en aquest sistema es van definir com les diferències de potencial entre els braços, i entre cada braç i la cama esquerra, com a mètode per a la reconstrucció de la magnitud i direcció del vector cardíac.

Els tres punts de mesura, formen l'anomenat triangle d'Einthoven, que es representa

a la figura 1.3. Les mesures bipolars dels potencials entre els vèrtexs del triangle, es coneixen com derivacions bipolars del pla frontal, i freqüentment es designen com les D1, D2 i D3.

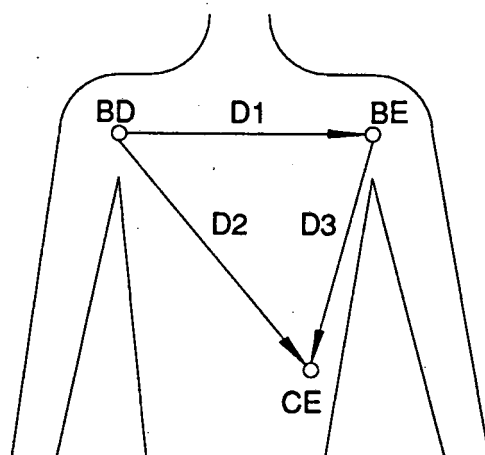


Figura 1.3: Derivacions del triangle d'Einthoven (D1, D2 i D3), corresponents al pla frontal.

Un altre conjunt de punts de mesures, conegut com derivacions unipolars augmentades (aVR, aVF i aVL), corresponen als potencials de cada vèrtex del triangle d'Einthoven respecte al promig dels altres dos.

Hi ha més conjunts de derivacions normalitzades molt emprades en el diagnòstic. Destaquen les derivacions precordials unipolars i les ortogonals. En aquest estudi, però, no s'empraran i per això s'omet la seva descripció.

## 1.2 L'ECG D'ALTA RESOLUCIÓ

El concepte d'electrocardiografia d'alta resolució (ECGAR), per contraposició a l'electrocardiografia convencional, representa el conjunt de tècniques emprades per a la detecció i quantificació de potencials cardíacs de baixa amplitud que no es poden reconèixer en l'ECG estàndard.

Una consideració més àmplia d'aquesta tècnica, inclou l'extracció de l'ECG convencional en situacions amb una elevada presència de soroll. Les aplicacions més

destacades són:

- el reconeixement de l'ECG fetal detectat en l'ECG maternal.
- la identificació del senyal ECG amb soroll de 50 Hz, de magnitud molt elevada.
- la recuperació de l'ECG ocult per les interferències generades per dispositius electroquirúrgics.

De totes maneres la concepció de l'ECGAR més freqüentment emprada, és l'enunciada en primer lloc. Això fa que el problema estigui molt més particularitzat, i per tant influencia el tipus de processat a realitzar. En aquest treball es considerarà aquesta definició quan s'utilitzi el terme d'electrocardiografia d'alta resolució.

L'ECGAR pretén la recuperació de l'activitat cardíaca de baix nivell present en els registres electrocardiogràfics, mitjançant l'ús d'un sistema d'enregistrament especial (guany elevat i baix nivell de soroll) i l'aplicació de tècniques de processat de senyals.

El gran interès clínic d'aquesta aplicació consisteix en la possibilitat d'obtenir mitjançant mesures de superfície, i per tant no invasives, l'activitat cardíaca de baixa amplitud. Tradicionalment, aquesta era captada per mitjà d'enregistraments intracardiàcs, obtinguts amb la introducció de catèters intracavitaris en el pacient.

El principal avantatge d'aquesta nova metodologia és l'obtenció d'informació equivalent, evitant l'alt cost que comporten els registres electrofisiològics invasius, tant pel que fa a l'estat del pacient i a la seva seguretat, com a les elevades despeses de les proves invasives.

Dos tipus de potencials, de gran interès clínic, han activat de forma decisiva l'impuls de tècniques d'electrocardiografia d'alta resolució. Aquestes són els potencials generats pel sistema de His-Purkinje, i els potencials ventriculars tardans.

Ambdós tipus de potencials presenten una gran significació pel diagnòstic de malalties cardíques.

En l'actualitat, l'estudi i desenvolupament de sistemes d'electrocardiografia d'alta resolució és un tema d'interès. L'aportació de noves tècniques i la millora de les existents, afavorirà els avenços en el reconeixement dels potencials des de la superfície.

La limitació actual fa que a hores d'ara les mesures invasives juguin encara un paper important.

Un cop plantejats els conceptes bàsics de l'ECGAR, es deixa pendent pel capítol 5 una descripció més detallada, així com una revisió històrica del tema. Aleshores es tractarà l'aplicació al processat de senyals ECG d'alta resolució.

## 1.3 DESCRIPCIÓ DELS OBJECTIUS DE LA TESI

Es presenta a continuació el propòsit de la tesi, així com els blocs en els que s'ha estructurat. Cal destacar que donat l'aspecte multidisciplinari del tema, s'ha considerat fonamental l'aplicació dels estudis teòrics a dades reals.

En aquest sentit la disponibilitat de senyals electrocardiogràfics reals, enregistrats a l'Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, ha permès assolir aquest objectiu. Cal remarcar que el present treball de recerca s'ha desenvolupat en el marc d'un projecte d'investigació, subvencionat per la CAICYT, i del conveni de col.laboració vigent entre la Universitat Politècnica de Catalunya i l'esmentat Hospital.

L'objectiu d'aquesta tesi consisteix en el disseny de mètodes i algorismes orientats al processat i anàlisi de senyals electrocardiogràfics d'alta resolució, que poden resultar també molt útils en el tractament automàtic de senyals ECG convencionals.

Amb aquest fi s'han considerat els següents aspectes:

a) Tècniques de detecció de senyals deterministes contaminats per soroll. En el segon capítol es presenta el tractament de l'ECG d'alta resolució com un problema en el camp dels processos aleatoris. Es descriu la tècnica emprada per a l'estimació dels potencials cardíacs, modelats com la part determinista del procés. Segons aquest enfocament es proposa una estructura del sistema de processat per a l'anàlisi del senyal, que ve desenvolupada en els posteriors capítols.

b) Detecció de complexos QRS en senyals ECG. El tercer capítol està dedicat a la detecció d'ones dins del senyal ECG, malgrat les seves variacions al llarg del temps i la contaminació per soroll d'origen biològic o extern. Es presenta un sistema de detecció particularitzat per als complexos QRS, que són el conjunt d'ones associades a l'activitat

de la contracció ventricular de cada batec cardíac. El sistema proposat es caracteritza per ser molt robust, detectant les ones en tot tipus de situacions. Es puntualitzen les aportacions fetes en aquest detector, tant en el disseny com en l'aplicació. La seva contribució resulta molt útil per a les posteriors etapes de processat.

c) Mètodes d'alineament per a senyals ECG. En el quart capítol es presenten uns mètodes d'alineament de senyals, orientats al cas dels ECG. En principi es fa una descripció general del problema, descrivint tot seguit els mètodes proposats amb un enfocament original. A continuació s'efectua un estudi de les prestacions d'aquests mètodes en simulació, així com aplicats a senyals reals. Finalment es descriuen els criteris d'aplicabilitat en situacions reals, comprovant el bon funcionament fins i tot per a senyals de baixa relació senyal-soroll.

d) Aplicació al processat de l'ECG d'alta resolució. El cinquè capítol està específicament orientat al processat de l'ECG d'alta resolució. Es presenta la metodologia seguida, que també inclou les etapes proposades i descrites en capítols anteriors. A continuació es mostra l'aplicació d'aquestes tècniques a l'obtenció de potencials cardíacs de gran interès mèdic, com són els potencials ventriculars tardans, o diferents potencials vinculats a altres ones de l'ECG.