

LA RECERCA
EN BIOENGINYERIA CARDÍACA I PULMONAR
A L'INSTITUT DE CIBERNÈTICA

per

P. CAMINAL - J. R. FARRÉ - R. JANÉ
Institut de Cibernètica (U.P.C. - C.S.I.C.)

SUMMARY

This paper presents the bioengineering research carried out at the Institut de Cibernètica the last years. We can remark the cardiovascular system simulation by hybrid computer, the prosthetic cardiac valves characterization, the His bundle electrogram on-line processing and different devices developed to explore the pulmonary function.

RESUM

En aquesta ponència presentem els treballs de recerca duts a terme els darrers anys a l'Institut de Cibernètica en el camp de la bioenginyeria. Cal destacar la simulació en computador híbrid del sistema cardíoc-vascular, l'anàlisi i caracterització de pròtesis valvulars cardíques i el processament automàtic de l'electrocardiograma del feix de His, dins l'àrea de la bioenginyeria cardíaca. La recerca en bioenginyeria pulmonar ha estat centrada en el diseny d'equips que col·laboren en l'exploració funcional pulmonar.

Introducció

L'Institut de Cibernètica és un centre de recerca de la Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.) i del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.). A l'Institut hi ha diferents línies de recerca, una de les quals és la Bioenginyeria.

La Bioenginyeria pot ésser definida com l'aplicació dels principis i les pràctiques de l'enginyeria a la solució dels problemes plantejats a la medicina clínica i a les ciències sanitàries en general.

La definició és deguda al Prof. LLAURADÓ, català pioner de la bioenginyeria a nivell internacional. Cal destacar en la definició el caràcter interdisciplinari d'aquesta àrea de coneixement, i la necessitat d'una estreta col·laboració entre els enginyers i els metges.

Tenint en compte la gran varietat de temes de recerca dins la bioenginyeria,

i a fi de no dispersar esforços, hem centrat els nostres treballs en la bioenginyeria cardíaca i pulmonar. A continuació presentarem alguns dels estudis duts a terme els darrers anys, així com els equips o instrumentació que hem desenvolupat.

Bioenginyeria cardíaca

1. *Simulació en computador híbrid del sistema càrdio-vascular*

El model proposat parteix de la configuració clàssica sobre simulació càrdio-vascular obtinguda per l'analogia entre un vas sanguini i una xarxa elèctrica R-L-C. El model ha estat millorat mitjançant la inclusió dels aspectes següents:

- a) Nou disseny de la circulació coronària.
- b) Millora de la contracció auricular i ventricular.
- c) Doble realimentació de control: freqüència i contractilitat cardíques.

Aquestes característiques permeten d'obtenir un model dinàmic especialment apte per a la simulació de patologies càrdio-vasculars. El model ha estat implementat físicament sobre un computador híbrid funcionant en temps real, aprofitant els avantatges del càlcul digital i la simulació analògica (FARRÉ, 1982). En el computador digital hom duu a terme el control del ritme cardíac i la generació de les ones de contractilitat, mentre que en el computador analògic hom duu a terme la simulació del model hemodinàmic, el control de la contractilitat i el condicionament de les ones de contracció cardíques.

El model hemodinàmic inclou les quatre cavitats cardíques, les vàlvules mitral, aòrtica, tricúspide i pulmonar, la circulació coronària, pulmonar, renal i mesentèrica, així com l'artèria caròtida i la circulació de les cames. Aquest model és implementat mitjançant 30 integradors, 24 multiplicadors, 24 sumadors i 120 atenuadors. Després de validar el funcionament del model en diferents condicions fisiològiques (en repòs, en exercici i en situacions anormals), els resultats obtinguts permeten d'afirmar que:

- a) la modelització proposada per a la contracció cardíaca és essencial si existeixen canvis de freqüència cardíaca.
- b) la circulació coronària incorporada permet la simulació del flux coronari sota qualsevol valor de la resistència estenòtica.
- c) la dinàmica del model deguda al control de la freqüència i la contractilitat facilita la simulació correcta del sistema càrdio-vascular.
- d) el model és suficientment versàtil per a poder desenvolupar-ne amb més gran precisió parts parcials, a fi d'obtenir millors resultats en les zones on interessa una més gran profundització puntual.

Amb aquest model han estat simulades diferents patologies càrdio-vasculars (FARRÉ *et al.*, 1983). L'embòlia pulmonar és simulada incrementant la resistència dels capilars pulmonars; l'estenosi mitral o la disminució de l'aportament venós,

incrementant el valor de la resistència de la vàlvula mitral o de la vena cava superior, respectivament. Han estat simulats també una hemorràgia arterial mitjançant shunt de la resistència arterial durant un període de temps, i diferents graus de comunicació interventricular, insuficiència aòrtica, etc. (fig. 1).

Els resultats obtinguts consisteixen en modificacions de les corbes de pressió i flux, alteracions de la freqüència cardíaca i contractilitat, etc., molt similars als observats a la pràctica clínica. El gran avantatge d'aquestes simulacions és que permeten d'estudiar els efectes sobre la fisiologia cardíoc-vascular de diferents cardiopaties, tot obtenint-ne els registres gràfics i els valors numèrics en temps real. Aquesta recerca ha estat duta a terme amb l'assessorament dels metges de la Unitat de Funció Càrdio-pulmonar de l'Hospital de la Santa Creu i Sant Pau.

2. Anàlisi i caracterització de pròtesis valvulars cardíques

En aquest treball han estat estudiats diversos aspectes de l'anàlisi i la caracterització de pròtesis valvulars cardíques biològiques; en particular la durada de vida de la funció valvular i les característiques hidrodinàmiques de resistència i reflux. Ha estat desenvolupat amb la col·laboració de metges del Servei de Cardiologia de la Residència Sanitària de la Vall d'Hebron.

Hom ha obtingut l'expressió analítica que determina la durada de vida mitjana a la fatiga en pròtesis trivalvars, després de corroborar l'experiència clínica que el desgast per fatiga és un dels principals factors que afecten la fallada per trencament en pròtesis biològiques. Ha estat necessari l'estudi dels esforços a què es troben sotmeses les pròtesis, aplicant el càlcul probabilístic dinàmic d'estructures al trencament per fatiga del vel valvular. L'expressió obtinguda és funció del senyal de pressió actuant, el radi valvular, el gruix i la configuració geomètrica dels vels, així com de les característiques del material utilitzat.

La teoria proposada ha estat comprovada mitjançant assaigs «in vitro» amb pròtesis de duramàter, sotmeses a molts diversos perfils i nivells de l'ona de pressió (CAMINAL, 1980). L'error inherent a la mesura del gruix del vel valvular, de l'ordre del 4 %, es converteix en una imprecisió del 14 % en la determinació teòrica de la durada de vida estimada. Els resultats dels assaigs accelerats són tots ells dins aquest marge respecte al valor teòric.

La determinació dels factors que influeixen en el desgast per fatiga, i la forma quantitativa en què afecten aquest deteriorament, representa una important aportació en l'estudi de pròtesis biològiques. Així permet de conèixer l'escurçament de vida que representa una confecció geomètrica no adequada, la no utilització dels gruixos correctes del material per a les mides vasculars grans, i els nivells de pressió elevats. L'anàlisi duta a terme permet la representació de nomogrames que faciliten l'elecció de la pròtesi per a cada pacient concret (CAMINAL *et al.*, 1982). Aquests gràfics informen del temps mitjà de vida a la fatiga per a diferents valors del radi valvular, gruix del vel, configuració geomètrica de la

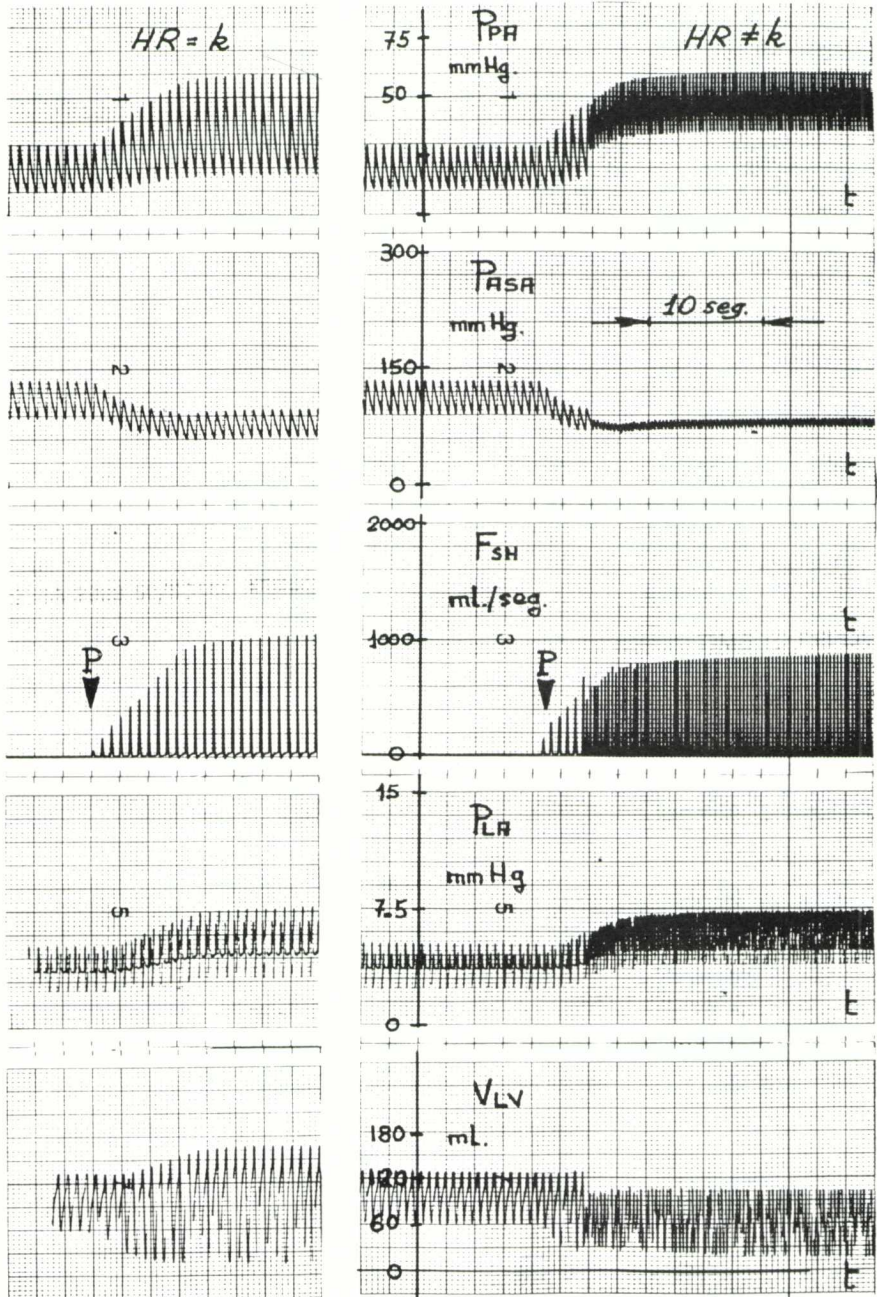


Fig. 1 - Perforació del septe cardíac en l'instant P, en condicions de ritme cardíac constant i amb control de ritme cardíac.

vàlvula, així com diferents situacions de l'ona de pressió a què pot ésser sotmesa la vàlvula en el pacient.

Els assaigs hidrodinàmics amb pròtesis de duramàter han presentat un nivell de reflux pràcticament nul. La característica diferència de pressió transvalvular-flux obtinguda és correcta. Els temps d'obertura i tancament són més curts que en les pròtesis mecàniques, i per això permeten un bon funcionament a freqüències cardíques més elevades.

Per a dur a terme l'experimentació indicada ha estat necessari el disseny i la construcció d'un duplicador de la funció cardíco-vascular (fig. 2). Els paràmetres que poden ésser modificats en aquest provador de vàlvules són el ritme cardíac, el temps parcial de sístole respecte al període total, el pic de pressió ventricular esquerra i la impedància del circuit arteriovenós. Mitjançant el control fluídic de la contracció ventricular, permet d'assajar pròtesis en posició mitral i aòrtica, i hom pot treballar tant en condicions fisiològiques com en assaigs de sobrepressió.

3. *Processament automàtic de l'electrocardiograma del feix de His*

El feix de His és un teixit celular específic, dins el cor, que condueix l'impuls elèctric de contracció des de les aurícules als ventricles. L'electrocardiograma del feix de His és enregistrat normalment mitjançant un catèter intracardíac que hom posiciona a prop de la situació del feix. Les lesions en el sistema de conducció d'impulsos cardíacs pot provocar casos greus que requereixen la col·locació de marcapassos. El diagnòstic per a la implantació d'un marcapàs, que requereix una exploració completa del sistema conductiu, resulta ajudat en gran manera pel processament automàtic de l'electrocardiograma del feix de His.

L'equip desenvolupat per a aquest procés automàtic (MAYER *et al.*, 1981), calcula en temps real els temps de conducció A-H i H-V a partir del registre de senyal (fig. 3), per a totes les exploracions efectuades en el pacient. L'equip consta de l'etapa de pre-processament analògic del senyal i de l'algorisme per a la detecció de les formes d'ona implementat en un microcomputador. Les accions efectuades en el pre-processament són tres: amplificació, filtratge de pas de banda i retallament, per tal d'adaptar el senyal de sortida dels amplificadors d'instrumentació existents a l'hospital a l'entrada del microcomputador. El nucli del subprograma principal duu a terme tres funcions: recerca de les deflexions A, H i V. La part més crítica de l'algorisme és la corresponent al càlcul dels inicis de A i V, ja que els mesuraments han d'ésser duts a terme amb un error màxim de ± 4 ms.

Aquest disseny basat en microcomputador és una solució econòmica al processament en temps real de l'ECG de feix de His, i permet la comunicació conversacional metge-sistema, la flexibilitat de variació dels algorismes de detecció i la rapidesa de l'operació. La sortida de resultats per pantalla presenta la informació corresponent a 20 cicles cardíacs: freqüència cardíaca, temps de conducció intranodal (AH), temps de conducció del sistema His-Purkinje (HV), i el valor

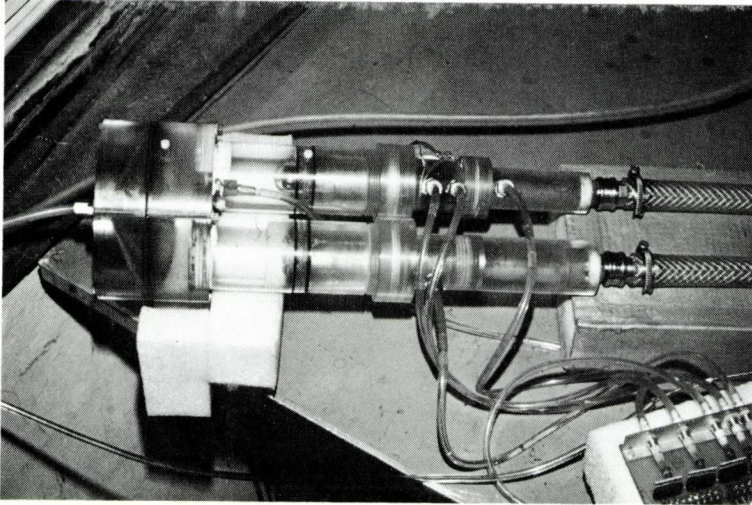


Fig. 2. - Duplicador de la funció càrdio-vascular per a assajar pròtesis valvulars cardíques.

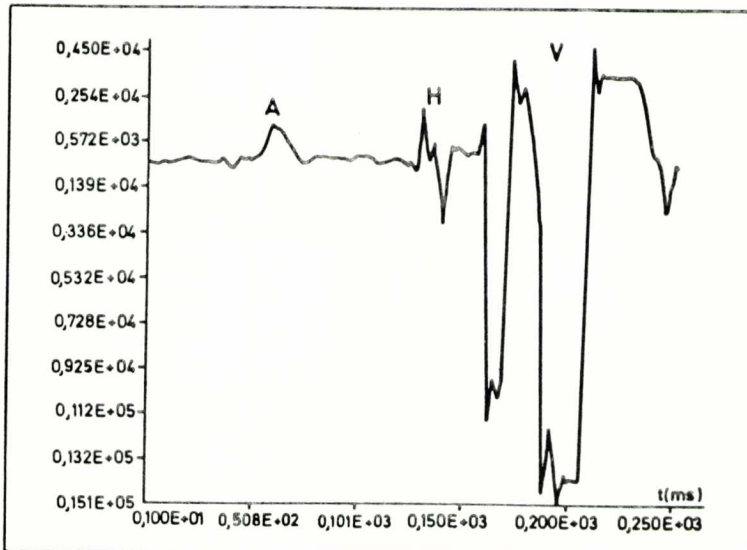


Fig. 3. - Registre de l'electrocardiograma del feix de His.

mitjà dels mesuraments, així com el senyal d'alarma en cas necessari. Aquest equip ha estat desenvolupat per al Servei de Cardiologia de l'Hospital de la Santa Creu i Sant Pau.

Bioenginyeria pulmonar

La recerca en bioenginyeria pulmonar també ha obtingut importants resultats, fruit de la col·laboració entre metges i enginyers, que poden ésser agrupats en temes d'assessorament tècnic en problemes concrets, d'una banda, i el disseny d'equips amb característiques específiques, d'una altra. Entre els primers cal destacar l'estudi analític i experimental del comportament d'una màscara d'oxigen i d'un espiròmetre sec de pistó, i la simulació en computador del sistema pulmonar. El disseny i desenvolupament de diferents equips ha col·laborat d'una manera eficaç en l'exploració funcional pulmonar. En aquesta àrea hom ha treballat conjuntament amb metges dels Serveis de Pneumologia i Aparell Respiratori de l'Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, Hospital Clínic Provincial, Ciudad Sanitaria Príncipes de España i Institut Territorial de Seguretat i Higiene en el Treball (CAMINAL *et al.*, 1981).

1. *Estudi analític i experimental del comportament d'una màscara d'oxigen i d'un espiròmetre sec de pistó*

L'estudi del comportament d'una màscara d'oxigen ha estat dut a terme per tal de conèixer els factors que contribueixen al fet que el pacient no inspi en realitat el percentatge d'oxigen que indica la màscara. Ha estat analitzat l'efecte Venturi en les màscares Ventimask, tot estudiant la influència de les seccions d'entrada de l'aire lateral i de la tovera d'entrada de l'oxigen sobre la fracció d'oxigen inspirat. La velocitat de l'oxigen que surt per la tovera crea una pressió subatmosfèrica en l'interior de la cambra que arrossega l'aire ambient, i dona diferents concentracions segons la secció lateral. Hom comprova que la fracció inspiratòria d'oxigen es manté constant, segons el principi de Bernouilli, mentre el règim sigui permanent.

Col·laborant en l'estudi de la qualitat dels mesuraments duts a terme amb un espiròmetre sec de pistó, han estat estudiats els efectes de la inèrcia del pistó i del fregament viscos en les parets del cilindre sobre la resposta dinàmica del sistema, per tal d'obtenir una resposta volum-temps més acurada.

2. *Disseny i desenvolupament de diferents equips*

2.1. *Calibrador de fluxos de gasos*

El disseny d'aquest equip ha sorgit per la necessitat de conèixer la precisió amb què duen a terme els mesuraments els espiròmetres i els pneumotacògrafs.

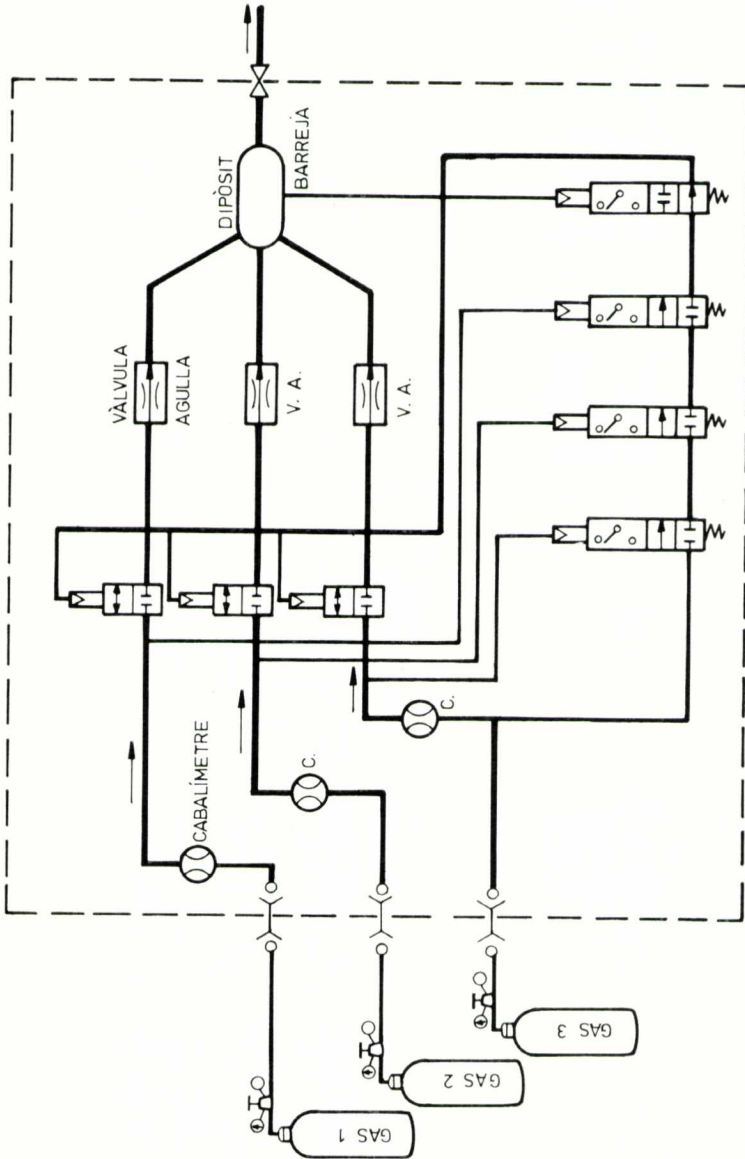


Fig. 4. - Diagrama de funcionament del mesclador de gasos per a ús clínic.

Permet de calibrar de 0 a 3 l/s, i de 3 a 12 l/s, amb una precisió de l'1 %. L'aparell calibrador pròpiament dit és connectat en sèrie amb l'instrument que hom desitja de calibrar, i amb l'element aspirador. Hi ha un regulador de tensió que permet de regular d'una manera contínua el flux que circula, des de 0 fins a 12 l/s. L'equip calibrador consta de dos cabalímetres de diafragma que produeixen una pressió diferencial, que és llegida en el manòmetre diferencial, funció del flux circulant. Els gràfics de calibració, o la taula equivalent, donen el valor del flux, per a cada valor de la diferència de pressió. Pel seu principi de funcionament aquest calibrador no canvia les seves característiques amb el temps.

2.2. Mesclador de gasos per a ús clínic

Aquest equip permet de mesclar tres gasos diferents, amb proporcions de cada gas del 5 % al 100 %. Al laboratori que disposa d'aquest equip li permet una certa autonomia respecte als fornidors de mescles comercialitzades, així com de poder dur a terme qualsevol tipus de mescla per a investigació. Mitjançant l'accionament de les vàlvules d'agulla hom regula el flux de cadascun dels tres gasos, que és llegit en els cabalímetres (fig. 4). Hi ha un sistema de vàlvules de seguretat per a assegurar un bon funcionament de l'equip, en funció de la pressió a les bombones alimentadores i la pressió en el dipòsit de mescla. El manual de funcionament indica les lectures que cal obtenir en els respectius cabalímetres per tal d'aconseguir la mescla desitjada.

2.3. Equips per al mesurament de la ventilació pulmonar i del ritme respiratori

Han estat dissenyats dos dispositius basats en tècniques diferents. El mesurador d'impedància transcutània toràcica consisteix en un generador de corrent constant que hom fa circular entre dos elèctrodes situats sobre el pacient. La caiguda de tensió entre els elèctrodes, convenientment filtrada i amplificada, permet de conèixer la impedància toràcica del pacient, que varia amb la respiració i amb l'existència de fluids intratoràcics.

Per a l'anàlisi de la partició toracoabdominal del volum ventilat ha estat dissenyat un magnetòmetre diferencial. Consisteix en l'enregistrament de les variacions d'intensitat d'un corrent elèctric induït per un camp electromagnètic en funció de la distància entre la bobina emissora i la receptora. Dos parells de bobines en col·locació antero-posterior permeten d'enregistrar les variacions dels diàmetres toràcics i abdominals. A diferència dels equips comercialitzats, aquest disseny manté la mateixa sensibilitat per a qualsevol distància entre les bobines. L'equip disposa d'un comandament per a ajustar la contribució relativa de les distàncies toràcica i abdominal sobre el volum ventilat pel pacient.

2.4. Mesurament de pressions inspiratòries d'oclusió

El dispositiu desenvolupat mitjançant vàlvula electromagnètica permet el mesurament de la pressió inspiratòria d'oclusió $P_{0,1}$, que dona informació sobre

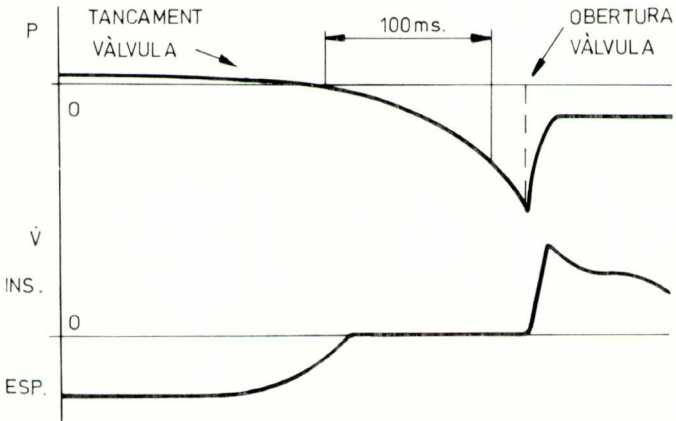
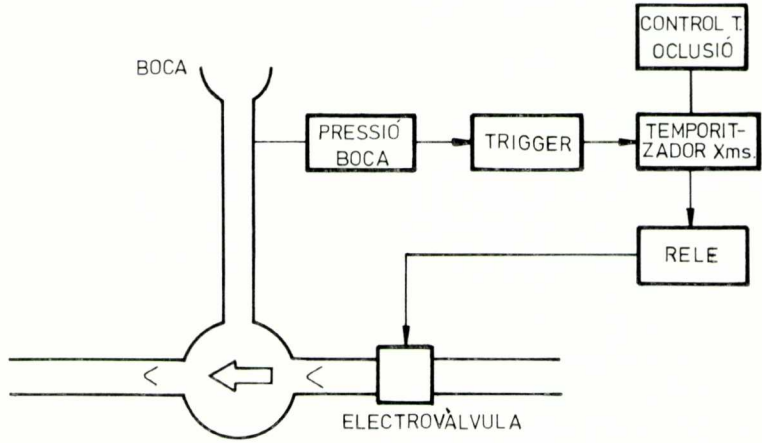


Fig. 5. - Mesurament de pressions inspiratòries d'oclusió.

l'estat dels músculs inspiratoris. Aquest dispositiu tanca la vàlvula durant l'expiració del pacient i, després de detectar el pas per zero de la pressió a la boca, manté la vàlvula tancada durant un temps regulable entre 100 i 200 ms, podent mesurar aquesta pressió d'oclusió. La figura 5 mostra un esquema del circuit electrònic dissenyat amb el temporitzador regulable i el relè d'amplificació del senyal que acciona la vàlvula. A la corba de fluxos apareix la zona de flux zero mentre l'electrovàlvula és tancada, i a la corba de pressions hom veu la lectura de la $P_{0,1}$.

Conclusions

A la vista dels resultats positius obtinguts, hom pot afirmar que existeix un gran camp de possibilitats per a la col·laboració eficaç d'enginyers i metges. La simulació en computador híbrid del sistema càrdio-vascular ha permès d'estudiar els efectes sobre la fisiologia càrdio-vascular de diferents cardiopaties, i hom ha pogut estudiar-hi casos extrems i la interacció de diferents patologies. L'anàlisi duta a terme de pròtesis valvulars cardíques orienta els assaigs que cal fer en les vàlvules, com a control de qualitat adequat, abans d'ésser implantades als pacients. El processament automàtic de l'electrocardiograma del feix de His resulta, d'altra banda, una gran ajuda per a l'exploració completa del sistema conductiu intracardíac. D'una manera semblant, els equips dissenyats i desenvolupats en el camp de la bioenginyeria pulmonar representa un ajut important en les exploracions de la funció pulmonar.

BIBLIOGRAFIA

- CAMINAL, P. (1980), *Análisis y caracterización de prótesis valvulares cardíacas biológicas: aplicación a las prótesis de duramadre*. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Barcelona.
- CAMINAL, P., FIZ, L. (1982), *Duramater heart valves test: Flow characteristics and fatigue life determination*. Biomaterials 1980, ed. G. D. Winter, J. Wiley and S. Ltd.
- CAMINAL, P. et al. (1981), *La bioingeniería aplicada a la exploración funcional pulmonar*. 2.ª Reunión Nac. de la SEPAR, Santander.
- FARRÉ, J. R. (1982), *Aportación a la simulación híbrida del sistema cardiovascular*. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Barcelona.
- FARRÉ, J. R., CREXELLS, C. (1983), *Computer simulation cardiac diseases based on a model with heart control*. Third Mediterranean Conf. Med. Biol. Eng., Portoroz.
- MAYER, A., FARRÉ, J. R., FERRER, J. (1981), *His-bundle electrogram on-line processing*. World Association for Medical Informatics, Estrasburg.