

## Capítol 4. Mecànica del pols cardíac

El cor... quan es comprimeix i s'eixampla alternativament per a expulsar i admetre la sang, genera el pols o el batec que repercuteix en totes les venes palpitants del cos.

*(Diccionari de la llengua catalana)*

- 4.1 El cor, què és?
- 4.2 Les artèries i el pols
  - 4.2.1 La sang
  - 4.2.2 Els eritròcits
  - 4.2.3 Moviment de la sang i batecs
- 4.3 Velocitat de l'ona polsant
  - 4.3.1 Acceleració de la sang
  - 4.3.2 Dilatació de l'artèria
  - 4.3.3 Velocitat de propagació de l'ona polsant
  - 4.3.4 Elasticitat i edat
- 4.4 Reflexió de les ones polsants
- 4.5 Aneurisma
- 4.6 Circulació de la sang en la girafa i medicina còsmica
  - 4.6.1 Biologia còsmica
  - 4.6.2 Forces d'inèrcia
  - 4.6.3 Inèrcia i rigidesa dels vasos sanguinis
  - 4.6.4 Vestit antigravetat
  - 4.6.5 Animals "horitzontals"
  - 4.6.6 Les girafes hipertòniques
- 4.7 Mesurament de la pressió de la sang i de la velocitat del flux sanguini
  - 4.7.1 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode electromagnètic
  - 4.7.2 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de dilució de l'indicador
  - 4.7.3 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de la concentració d'oxigen
  - 4.7.4 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode ultrasònic
- 4.8 El color de la sang i la llei de conservació de l'energia
- 4.9 Física (conceptes)

## 4.1 El cor, què és?

El cor, quantes associacions evoca aquesta paraula que té tants sentits! Valor, ànim, esperit, caràcter, amor, afecte, centre d'una cosa, etc.

En el món primitiu ja es van adonar, en tallar els caps del bestiar en canal, d'un petit saquet muscular albergat en el centre del pit i que es contraïa rítmicament durant uns quants minuts en el cos de l'animal mort.

La simultaneïtat de la mort i l'aturada cardíaca va ser la causa de la identificació del cor d'una persona amb la seua ànima. Per això, ja en l'*Odissea* d'Homer trobem expressions com ara: "lamentar amb el cor", "omplir el cor de valor", "el desig del cor", etc.

El funcionament del cor es va començar a estudiar molt més tard. El 1628 el metge anglès Harvey va establir que el cor servia de bomba per a enviar sang pels vasos, i va calcular la quantitat de sang que hi envia el cor durant cada contracció. La massa de sang que el cor expulsa a les artèries durant dues hores supera considerablement la massa del cos humà. A partir d'aquest fet, Harvey va arribar a la conclusió que al cor, que fa de bomba hidràulica, retorna contínuament la mateixa sang.<sup>38</sup>

El descobriment de Harvey va provocar una discussió llarga i acalorada...<sup>39</sup>

*Q0) Quants litres de sang bombeja el cor per minut, a la vista del que diem més amunt?*

## 4.2 Les artèries i el pols

En l'actualitat, tot el món sap que el cor és una bomba que treballa en règim d'impuls amb una freqüència  $\approx 1$  Hz. Durant cada impuls, que dura uns 0.25 s, el cor d'una persona adulta té temps per a expulsar a l'aorta prop de  $0.1 \text{ dm}^3$  (0.1 litre) de sang (fig. 1).

*Q1) Explica per què parlem de dos temps, 0.25 i 1 s ( $1 \text{ Hz}^{-1}$ ).*

*Q2) Dedueix el valor esmentat de  $0.1 \text{ dm}^3$  a partir de les dades de la fig. 1 (i compara'l amb el resultat de la Q0).*

*Q3) Compara la massa de sang posada en moviment en dues hores amb la massa del teu cos.*

Des de l'aorta, la sang va cap als vasos més estrets, que s'anomenen *artèries*; aquestes transporten la sang a la perifèria.<sup>40</sup>

<sup>38</sup> Harvey va utilitzar com a model del cor una bomba especial que s'utilitzava per a evacuar aigua de les mines, i no una bomba ordinària amb vàlvules.

<sup>39</sup> ... ja que des del temps d'Aristòtil es considerava que el moviment de la sang en l'organisme es feia per afluència (formació contínua) i reflux (desaparició). Ni Descartes, tot i que estava conforme amb la teoria de la circulació de Harvey, compartia la seua opinió sobre el paper del cor en aquest procés. Descartes considerava el cor com el que avui es podria comparar amb una màquina de vapor o, fins i tot, amb un motor de combustió interna. Opinava que el cor era una font de calor que escalfava la sang durant el pas per l'interior, i la sang mantenia aquesta calor en tot el cos; creia també que aquesta calor, des de l'inici de la vida d'una persona, es concentrava en les parets del cor. Així, només entrar la sang en la cavitat cardíaca, començava a bullir d'immediat i, en forma de vapor, passava al pulmó, en què era refredada contínuament per l'aire. En el pulmó, "els vapors es condensaven i tornaven a transformar-se en sang".

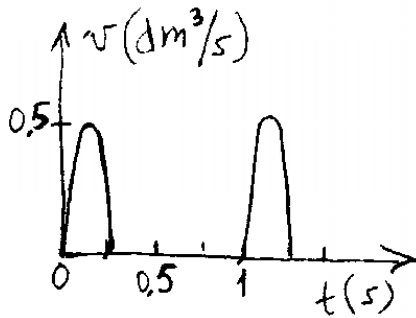


Fig. 1. Funcionament del cor considerat com una bomba. Velocitat de bombeig de la sang en funció del temps.

(Física) Freqüència és...  
i es mesura en...

### 4.2.1 La sang

La sang és una suspensió de diferents cèl·lules en dissolució aquosa. La major part de les cèl·lules de la sang són els eritròcits, que n'ocupen prop del 45% del volum; cada  $\text{mm}^3$  de sang conté vora 5 milions d'eritròcits. El volum ocupat pels altres elements (leucòcits i trombòcits) no supera un 1%. Dins els eritròcits trobem l'hemoglobina: un complex de la proteïna globina amb un grup orgànic (hemo) que conté un àtom de ferro. L'hemoglobina dóna el color roig als eritròcits (i a tota la sang), i l'aptitud de l'hemoglobina de combinar-se reversiblement amb l'oxigen assegura la gran capacitat de combinació de la sang amb oxigen<sup>41</sup>. Un litre de sang sense eritròcits pot combinar tan sols 3 ml d'oxigen (a pressió atmosfèrica), però un litre de sang normal és capaç de combinar-ne 200 ml. Aquesta aptitud és la que permet que la sang acompleixi la funció principal, la d'abastir d'oxigen les cèl·lules de l'organisme.

*Q4) En quants ordres de magnitud augmenta la capacitat de la sang de combinar oxigen gràcies als eritròcits?*

*Q5) Quina concentració d'oxigen en sang és possible?*

### 4.2.2 Els eritròcits

Els eritròcits són discos bicòncaus molt flexibles (fig. 2), tenen una membrana molt prima (7.5 nm) i contenen líquid, una dissolució quasi saturada d'hemoglobina. Tot i que el diàmetre dels eritròcits és de vora  $8 \mu\text{m}$ , aquests poden passar, sense destruir-se, per capil·lars que tenen un diàmetre de  $3 \mu\text{m}$ . En passar es deformen enormement, i s'assemblen a un casquet de paracaigudes, o s'enrotllen en forma de tub. Com a resultat, la superfície de contacte de l'eritròcit amb la paret del capil·lar augmenta mentre passa per aquest, (en comparació amb el moviment de l'eritròcit no deformat) i també augmenta la velocitat d'intercanvi dels gasos.

*Q6) Explica les dues afirmacions anteriors (augment de superfície de contacte i de velocitat d'intercanvi).*

Com expliquem l'aptitud dels eritròcits de deformar-se amb facilitat? Es pot demostrar que un cos de forma esfèrica té, per a un volum donat, la superfície mínima. Això significa que si l'eritròcit tinguera forma esfèrica, aleshores, per a qualsevol deformació, l'àrea de la membrana hauria d'augmentar. Per consegüent, també la flexibilitat dels eritròcits esfèrics es limitaria a la rigidesa de la seua membrana cel·lular. Però com que un eritròcit no té forma esfèrica, la seua deformació pot no estar acompanyada de variació de l'àrea de la superfície de la membrana i, com a conseqüència, l'eritròcit, sense dificultat –és a dir, sense sotmetre la membrana a tensions–, és capaç de prendre formes molt diverses.

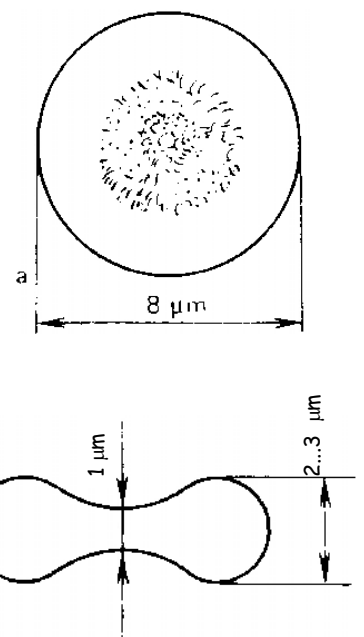


Fig. 2. Eritròcit: a) vist des de dalt; b) vista lateral.

Relació àrea-volum

<sup>40</sup> L'ètim grec de la paraula *artèria* significava 'conducció aeri'. Se sap que en els animals morts la major part de la sang es troba en les venes, o siga, en els vasos pels quals la retorna sang al cor. Per això, les venes dels cadàvers són inflades i les artèries, aplanades. Si fem un tall en una artèria, aquesta immediatament s'emplena d'aire i pren forma cilíndrica. Sembla que aquesta circumstància va originar el nom de conducció aeri d'aquest vas sanguini.

<sup>41</sup> Un dels científics que va estudiar el mecanisme pel qual la sang cedeix l'oxigen als teixits de l'organisme va ser Christian Bohr, pare del famós físic Niels Bohr. La relació que va descobrir entre la capacitat de la sang de combinar-se amb oxigen i la concentració dels ions hidrogen s'anomena efecte de Bohr.

(Física) El mòdul de Young és...  
i es mesura en...

S'ha descrit una malaltia hereditària de la sang (esferocitosis) en la qual els eritròcits tenen forma esfèrica i el seu diàmetre és d'unes 6  $\mu\text{m}$ . La membrana d'aquests eritròcits, durant el moviment pels capil·lars fins, sempre es troba en estat tens i amb freqüència es trenca. El resultat és que el nombre d'eritròcits en la sang dels malalts és més baix i tots pateixen anèmia.

Q7) A la vista dels paràgrafs anteriors, explica per què està tensa la membrana d'un eritròcit si la persona pateix esferocitosis.

### 4.2.3 Moviment de la sang i batecs

El moviment de la sang pels vasos és un procés bastant complicat. La paret de l'aorta, com totes les artèries, és molt elàstica; té un mòdul de Young  $E \approx 10^6$   $\text{N/m}^2$ , que és unes  $10^5$  vegades menor que el dels metalls.

Q8) A la vista de la definició de mòdul d'elasticitat de Young d'un cos,  $E$ , com la relació entre la tensió de tracció (la força que s'aplica per unitat de superfície del cos) i l'allargament del cos que provoca per unitat de longitud,

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{S} \quad (1)$$

per què és menys elàstic un material que té un mòdul de Young més gran?

Q9) Calcula quant s'estira un fil metàl·lic llarg del qual et penjes (inventa't les dades que necessites).

Per això, quan la sang entra en l'aorta, aquesta comença a eixamplar-se fins que l'afluència de sang cessa. Les forces elàstiques de la paret eixamplada de l'aorta tendeixen a fer-la tornar a les dimensions inicials i expulsen la sang a una part de l'artèria més allunyada del cor (el corrent invers està previngut per una vàlvula). Aquesta nova part de l'artèria s'eixampla i tot es repeteix de nou. Si la deformació de la paret de l'artèria es registra simultàniament en dos punts allunyats del cor, resultarà que aquesta deformació aconsegueix els valors màxims en diferents instants de temps. Com més lluny del cor estiga el punt de registre, més tard arribarà al màxim la deformació del vas. Per això, després de cada contracció del cor una ona de deformació es propaga al llarg de l'artèria i cap a la perifèria, igual que les ones es propaguen per una corda tensa pertorbada (com per una corda de guitarra) o per la superfície de l'aigua quan s'hi llança una pedra. Si posem un dit sobre l'artèria que es troba prop de la superfície del cos (per exemple, en el canell), percebem les ones com a batecs.

Hem d'assenyalar que la velocitat de propagació de l'ona de deformació d'un vas sanguini es diferencia considerablement de la velocitat de propagació d'una ona de compressió en la sang. La velocitat d'una ona de compressió en la

(Física) Una ona és...  
i es caracteritza per...

(Física) Velocitat de l'ona de deformació de l'artèria és...  
i es mesura en...

(Física) Velocitat de l'ona de compressió de la sang és...  
i es mesura en...

sang és igual a la velocitat de propagació del so, de centenars de metres per segon, mentre que les ones de deformació de les artèries recorren per segon no més d'uns quants metres.<sup>42</sup>

### 4.3 Velocitat de l'ona polsant

L'ona de deformació de les parets de l'artèria, que es propaga al llarg d'aquesta, rep el nom d'ona polsant. Es va mesurar la velocitat de propagació de l'ona polsant tan sols a principis del segle XX, quan van aparèixer els primers instruments enregistradors de resposta ràpida (sense inèrcia). El valor de la velocitat oscil·la de 5 a 10 m/s i supera en 10 vegades la velocitat mitjana del moviment de la sang pels vasos sanguinis.

Q10) Compara aquesta velocitat amb la d'un cotxe.

Q11) Per què es parla de dues velocitats?

Q12) Imagina una cadena de 100 m. Si estires bruscament un poc d'un extrem, quina velocitat és major: la de transmissió de l'estirada entre un extrem i l'altre o la velocitat a la qual es mou cada baula?

La velocitat de propagació de l'ona polsant depèn de l'elasticitat de la paret arterial i, per això, pot servir d'indici de la presència o no de malalties. Analtzem tot seguit, amb més detall, el procés de propagació de l'ona polsant i trobem l'expressió matemàtica per a la velocitat de propagació.

Q13) Per què intervé l'elasticitat arterial en la velocitat de propagació de l'ona de deformació?

Imaginem, fig. 3, que l'artèria té un diàmetre exterior  $d$  i té forma de cilindre molt llarg (per poder menysprear els efectes dels límits). Posarem que les parets del cilindre tenen un gruix  $h$  i estan fetes d'un material que té un mòdul de Young  $E$ . Suposem també que la pressió  $P$  de la sang en un punt que està a la distància  $x_0$  del cor varia amb el temps de la manera que mostra la fig. 4, i que  $\theta$  és la velocitat de propagació de l'ona polsant.

Q14) Explica què significa el temps  $x_0/\theta$  i què són  $\tau_1$  i  $\tau_2$  (fig. 4).

Si considerem que l'ona polsant es propaga al llarg del vas, sense esmorteir-se, a la velocitat  $\theta$ , aleshores la distribució de la pressió al llarg del vas tindrà la forma de la fig. 5. D'aquesta figura es desprèn que la sang, en un punt donat de l'artèria, es mourà només si a través d'aquest punt passa l'ona

<sup>42</sup> Es va aprendre a mesurar la freqüència, el ritme i l'amplitud del pols d'una persona molt abans de conèixer l'origen d'aquest pols. En el III mil·lenni a. de la n.e., l'emperador xinès Hoam-Tou i el metge de la cort Li-Pe es valien del registre del pols per a fer-ne un diagnòstic. La senzillesa de la mesura del pols (no hi ha necessitat d'instruments, tan sols un cronòmetre) el converteix en un dels principals indicis de l'estat de la salut, fins i tot en l'actualitat.

(Física) Inèrcia és...

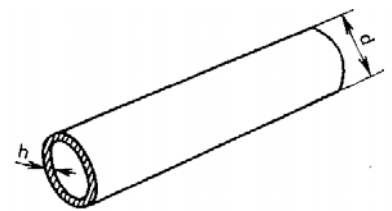
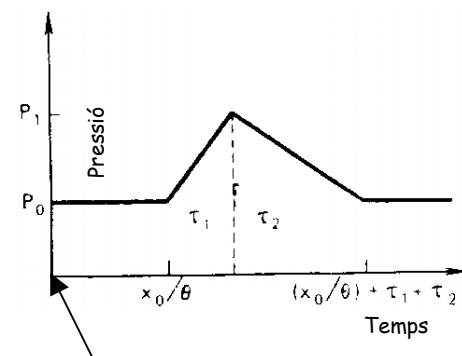


Fig. 3. Representació esquemàtica d'una artèria.

(Física) L'efecte dels límits és...



Començament de l'expulsió de la sang des del cor

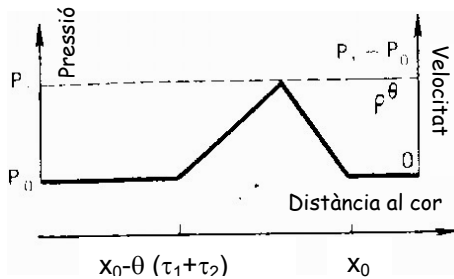
Fig. 4. Variació temporal (postulada en el model) de la pressió de la sang en un punt de l'artèria allunyat del cor a una distància  $x_0$ .

polsant. Un moviment d'impuls de la sang com aquest es dona en les artèries grans que ixen del cor, i en les quals es pot prescindir de l'extinció de l'ona polsant. Anem a veure la propagació de l'ona polsant en aquests vasos.

Q15) Explica per què el punt de baixada de la corba de les fig.4 i 5 està en  $(x_0/\theta) + \tau_1 + \tau_2$  i en  $x_0$ , respectivament, i no en  $x_0 + \theta(\tau_1 + \tau_2)$ .

### 4.3.1 Acceleració de la sang

Sobre la sang que es troba en l'etapa de pressió ascendent de la fig. 4 actua una força de compressió que accelera aquesta massa de sang. Calcula l'acceleració que provoca aquesta pressió. En l'instant de temps  $x_0/\theta$ , calculat des del començament de la contracció del cor, sobre la massa de sang que es troba entre les seccions transversals  $x_0 - \theta\tau_1$  i  $x_0$ , al llarg de l'eix de l'artèria, actuarà una força igual a la diferència de les forces de pressió aplicades a aquestes seccions transversals,



$$(P_1 - P_0) \frac{\pi d^2}{4} \tag{2}$$

Q12) Dedueix l'expressió anterior.

Com que la massa de sang que hi ha entre les seccions anteriors és igual a

$$\rho\theta\tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \tag{3}$$

Q17) Dedueix l'expressió anterior.

en què  $\rho$  és la densitat de la sang, resulta que, de la segona llei de Newton ( $F = m \cdot a$ ), és possible obtenir el valor de l'acceleració d'aquesta massa de sang,

$$a_+ = \frac{P_1 - P_0}{\rho\theta\tau_1} \tag{4}$$

Q18) Dedueix l'expressió anterior i comprova que és dimensionalment correcta.

Si menyspreem la velocitat de moviment de la sang, per ser petita en comparació amb la velocitat de propagació de l'ona polsant (com ja hem indicat en l'inici de la secció *Velocitat de l'ona polsant*), la massa de sang situada prop del punt  $x_0$  es mourà durant el temps  $\tau_1$  amb l'acceleració  $a_+$ ; després d'això, el moviment de la sang començarà a fer-se més lent, mentre que l'acceleració negativa corresponent ( $a_-$ ) actua durant l'interval de temps  $\tau_2$  de la fig. 4, podem deduir que arribarà a ser

$$a_- = \frac{P_1 - P_0}{\rho\theta\tau_2} \tag{5}$$

Fig. 5a. Distribució espacial de la pressió (eix esquerre) i de la velocitat de la sang (eix dret), al llarg de l'artèria, després d'un interval de temps  $x_0/\theta$  des del començament de l'expulsió de la sang des del cor cap a l'aorta. ( $\theta$ ) és la velocitat de l'ona polsant. Fixa't que la representació de la fig. 4 és en funció del temps i aquesta és en funció de la distància.

Moviment de la sang



Fig. 5b. Representació esquemàtica de la dilatació de l'artèria quan es propaga l'ona polsant.

El resultat és que durant l'interval de temps  $\tau_1$ , quan la pressió en el punt  $x_0$  va augmentant, la sang que es troba en aquesta zona eleva la velocitat des de zero fins a  $a \cdot \tau_1$ .

*Q19) Explica la diferència entre la velocitat  $\theta$  (de l'ona) i la velocitat  $a \cdot \tau_1$  o  $a \cdot \tau_2$  (de la sang)*

*(Física) La 2a llei de Newton indica que...*

*i serveix per a...*

En l'interval següent de temps  $\tau_2$ , la velocitat de la sang en el punt donat disminuirà en  $(P_1 - P_0) / (\rho \theta)$  i tornarà a zero.

*Q20) Mostra que el quocient  $(P_1 - P_0) / (\rho \theta)$  té dimensions de velocitat.*

Per això, la distribució de la velocitat al llarg del vas en el temps  $x_0 / \theta$  tindrà l'aspecte de la fig. 5.

### 4.3.2 Dilatació de l'artèria

Per quina raó augmenta el volum de sang que hi ha entre la secció que va del punt  $x_0 - \theta \cdot (\tau_1 + \tau_2)$  al punt  $x_0$ , en l'interval de temps entre  $(x_0 / \theta) - \tau_1 - \tau_2$  i  $x_0 / \theta$ ? L'augment es deu al fet que la quantitat de sang que arriba a aquesta porció de l'artèria supera la quantitat de sang que n'ix. La velocitat de la sang que abandona aquesta porció de l'artèria, durant aquest lapse, és igual a zero (no ix sang), però la velocitat de la sang que afluïx és distinta de zero, i el valor mitjà de la velocitat per a aquest interval de temps  $(\tau_1 + \tau_2)$  val

$$\frac{P_1 - P_0}{2 \rho \theta} \quad (6)$$

*Q21) Demuestra l'equació anterior.*

D'aquesta manera, durant l'interval de temps  $\tau_1 + \tau_2$ , la velocitat d'afluència de la sang a la porció de l'artèria esmentada anteriorment supera, en valor mitjà, la velocitat de reflux en el valor donat per l'eq. (6).

Com que la sang és pràcticament incompressible, l'augment de volum de l'artèria,  $\Delta V$ , es pot obtenir en multiplicar l'increment de la velocitat d'afluència sobre la velocitat de reflux, per l'àrea de la secció transversal del vas i per l'interval de temps:

$$\Delta V = \frac{P_1 - P_0}{2 \rho \theta} \frac{\pi d^2}{4} (\tau_1 + \tau_2) \quad (7)$$

*Q22) Comprova que l'expressió anterior té les dimensions correctes.*

D'altra banda, si considerem que el diàmetre de la porció eixemplada de l'artèria augmenta en  $\Delta d$  en valor mitjà, en comparació amb la part restant; aleshores, si menyspreem termes quadràtics  $(\Delta d)^2$  en comparació amb  $d \cdot \Delta d$ , tenim

$$\Delta V = \frac{\pi d \Delta d}{2} \theta (\tau_1 + \tau_2) \quad (8)$$

*Q23) Explica per què es poden negligir termes quadràtics.*

### 4.3.3 Velocitat de propagació de l'ona polsant

Quan igualem (7) i (8), obtenim l'expressió següent per a la velocitat de propagació de l'ona polsant

$$\theta = \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{\Delta d}} \frac{1}{4\rho} \quad (9)$$

(Física) Cinemàtica és...

Dinàmica és...

*Q24) Comprova que aquesta expressió té les dimensions correctes.*

En aquesta expressió, obtinguda a partir de les lleis de la cinemàtica i de la dinàmica del moviment de la sang pel vas, apareix la deformació relativa de les parets del vas,  $\Delta d/d$ , l'augment de la pressió de la sang en el vas,  $P_1 - P_0$ , i la densitat de la sang,  $\rho$ . La relació entre les primeres dues magnituds es pot trobar a partir de la llei de Hooke, la qual lliga la magnitud de la deformació relativa del material amb la força que provoca aquesta deformació, a través del mòdul de Young,  $E$ .

(Física) La llei de Hooke estableix que...

*Q25) Expressa matemàticament la llei de Hooke.*

L'expressió definitiva per a la velocitat de propagació de l'ona polsant és, doncs,

$$\theta = \sqrt{\frac{Eh}{d\rho}} \quad \text{velocitat de l'ona polsant} \quad (10)$$

*Q26) Comprova les dimensions d'aquesta expressió.*

Si suposem que  $h/d = 0.1$ ,  $E = 10^6 \text{ N/m}^2$  i  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ , l'expressió anterior dona el valor  $\theta \approx 10 \text{ m/s}$ , valor pròxim al valor mitjà mesurat experimentalment de la velocitat de propagació de l'ona polsant.

*Q27) Explica el valor de les magnituds anteriors i comprova que el càlcul és correcte.*

### 4.3.4 Elasticitat i edat

Investigacions anatòmiques demostren que la magnitud  $h/d$  varia poc d'una persona a una altra i, pràcticament, no depèn del tipus d'artèria. Per això, si tenim en compte el caràcter constant de  $h/d$ , es pot considerar que la velocitat de l'ona polsant varia tan sols quan canvia l'elasticitat de la paret de l'artèria; és a dir, el mòdul de Young,  $E$ . Amb l'edat, i també durant les malalties acompanyades d'un augment del mòdul de Young de la paret de les artèries (hipertensió i arteriosclerosi),  $\theta$  pot augmentar de 2 a 4 vegades en comparació amb l'estat normal (taula 1). Aquesta circumstància permet utilitzar la mesura de  $\theta$  per fer diagnòstics.<sup>43</sup>

<sup>43</sup> La fórmula (10) per a la velocitat de propagació de les ones polsants en les artèries va ser deduïda per primera vegada per l'anglès Young en 1809. Avui recordem Young per la teoria ondulatòria de la llum i, d'altra banda, perquè el mòdul d'elasticitat dels materials duu el seu nom. Però va ser també autor de treballs clàssics en el camp de la

Q28) Per què augmenta E amb l'edat? Per què augmenta, aleshores,  $\theta$ ?

Taula 1. Variació de la velocitat de propagació de l'ona polsant per la part toràctica de l'aorta d'una persona, en funció de l'edat i la pressió sanguínia mitjana.

	p (kPa) =	6.5	13	19.5	26
edat: 20-24	$\theta$ (m/s) =	3.3	3.6	4.5	5.7
36-42		3.5	4.9	6.7	8.9
71-78		4.6	7.6	11.1	14.7

### 4.4 Reflexió de les ones polsants

Com ocorre a totes les ones, les ones polsants de les artèries tenen la capacitat de reflectir-se en els llocs en què varien les condicions de propagació. Per a les ones polsants, aquests llocs són les zones de ramificació de les artèries (fig. 6a). L'ona reflectida en el punt de ramificació se suma a la primària i, com a resultat, la corba de variació de la pressió de la sang en el vas presenta dues crestes<sup>44</sup> (fig. 6b).

Q29) Fes aquest càlcul per a les dades de la fig. 6b.

De vegades, la corba de variació de la pressió en el vas sanguini té més de dos màxims, fet que indica el caràcter múltiple de reflexió de l'ona polsant.

L'ona polsant reflectida, igual que la primària, està acompanyada d'una deformació de la paret de l'artèria. Tanmateix, mentre que l'energia de deformació elàstica de les parets, creada per la propagació de l'ona primària, es transforma en energia cinètica de moviment de la sang des del cor cap a la perifèria, l'ona reflectida impedeix el flux normal de la sang. Per això, la reflexió de les ones arterials dificulta el funcionament normal del sistema de circulació sanguínia.

De què depèn l'amplitud de l'ona polsant reflectida? Suposem que l'ona polsant troba en el camí de propagació una ramificació igual a la de la fig. 6. En aquest cas, la variació  $\Delta P$  de la pressió en el lloc de bifurcació ha de ser igual a la suma de les pressions creada per les ones incident ( $\Delta P_{inc}$ ) i reflectida ( $\Delta P_{ref}$ ); és a dir,

$$\Delta P_{inc} + \Delta P_{ref} = \Delta P \tag{11}$$

És evident que la massa de sang que aflueix al lloc de bifurcació amb l'ona polsant<sup>45</sup> ha de ser igual a la suma de les masses que reflueixen amb les ones polsants per les artèries B i C, i podem escriure<sup>46</sup>

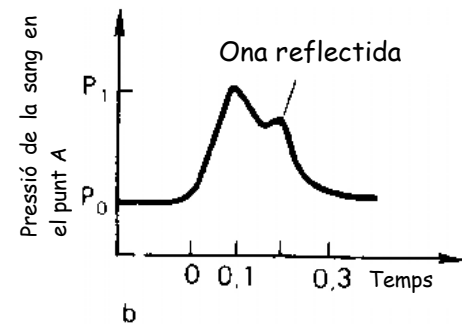
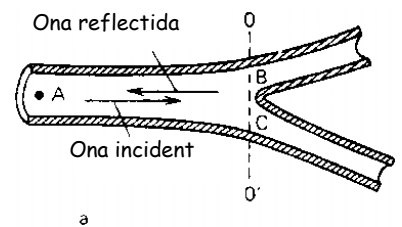


Fig. 6. Sorgiment de l'ona polsant reflectida en el lloc de la ramificació de l'artèria: a) tall de l'artèria ramificada; b) variació de la pressió arterial quan hi ha una reflectida.

teoria de la circulació de la sang. Young fou una personalitat extraordinària: als 2 anys sabia llegir i als 14 parlava a la perfecció 10 idiomes, tocava quasi tots els instruments musicals i tenia habilitats pròpies d'un artista de circ. Durant tota la seua vida va combinar dues professions: metge practicant i físic.

<sup>44</sup> A partir de l'interval entre els màxims en la corba de pressió, i coneguda la velocitat de propagació de l'ona polsant, és possible avaluar la distància que separa el punt de ramificació del punt de registre de la pressió.

<sup>45</sup> Recorda que l'ona polsant se superposa al moviment (flux) ordinari de la sang.

<sup>46</sup> Examinarem tan sols el transport de la sang per l'ona polsant; és a dir, no tenim en compte la component constant de la velocitat de moviment de la sang, ja que aquest moviment no influeix en el procés de reflexió de l'ona polsant.

$$M_{inc} - M_{ref} = M_B + M_C \quad (12)$$

en què  $M_{inc}$  i  $M_{ref}$  són les masses de sang transportades en una unitat de temps a través de la secció OO' de l'artèria A per les ones incident i reflectida, respectivament, i  $M_B$  i  $M_C$ , les velocitats de transferència de la massa de la sang per l'ona polsant al principi de les artèries B i C, respectivament. Com hem demostrat abans, fig. 5, i eq. (4) o (5), la variació de la velocitat de la sang quan passa l'ona polsant és igual a

$$\Delta v = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (13)$$

on  $\Delta P$  és la variació de la pressió durant la propagació de l'ona polsant. Per consegüent, la massa de la sang transportada per l'ona polsant en una unitat de temps a través de la secció transversal S del vas és igual a

$$M = \Delta v \cdot S \rho \quad (14)$$

*Q30) Explica l'expressió anterior.*

Si tenim en compte (13) i (14), l'expressió (12) es pot escriure així:

$$\frac{\Delta P_{inc}}{\theta_A} S_A - \frac{\Delta P_{ref}}{\theta_A} S_A = \frac{\Delta P}{\theta_B} S_B + \frac{\Delta P}{\theta_C} S_C \quad (15)$$

en què  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ , i  $\theta_C$  són les velocitats de l'ona polsant per les artèries A, B i C, respectivament, i  $S_A$ ,  $S_B$  i  $S_C$ , les seccions transversals d'aquestes artèries. Quan resollem les eq. (15) i (11) obtenim

$$\frac{\Delta P_{ref}}{\Delta P_{inc}} = \frac{\frac{S_A}{\theta_A} - \left( \frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right)}{\frac{S_A}{\theta_A} + \left( \frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right)} \quad (16)$$

D'aquest resultat es pot deduir que l'ona reflectida no està present si el numerador del segon membre en l'eq. (15) s'anul·la.

*Q31) Calcula el % reflectit per a  $d_A = 2.5$  cm,  $d_B = 1$  cm, i  $d_C = 1.5$  cm.*

Si considerem que la velocitat de propagació de l'ona polsant no varia després de la ramificació, ja que  $h/d$  i  $E$  romanen invariables, aleshores  $\theta_A = \theta_B = \theta_C$  i l'ona reflectida estarà absent a condició de què

$$S_A = S_B + S_C \quad (17)$$

Cal assenyalar que la major part de les ramificacions de les artèries grans satisfà en un grau o altre la igualtat (17), que requereix que la secció transversal del canal sanguini siga constant abans i després de la ramificació. Per tant, l'ona no pateix reflexió, normalment. Tanmateix, en alguns casos la igualtat (17) no es dona, i ara veurem què implica aquesta circumstància.

### 4.5 Aneurisma

Després de cada contracció del cor en l'aorta augmenta la pressió sanguínia<sup>47</sup>, les parets de l'aorta es dilaten i a través seu es propaga l'ona polsant. Aquesta dilatació rítmica de la paret es repeteix prop de  $10^5$  vegades al dia i 2500 milions de voltes, aproximadament, durant tota la vida.

*Q32) Explica d'on ixen els valors  $10^5$  o  $2500 \times 10^6$ .*

En principi, l'estructura de la paret de l'aorta és capaç de resistir aquests cops hidràulics rítmics. Tanmateix, en algunes ocasions, la paret de l'aorta no els suporta, comença a dilatar-se i forma un aneurisma. Una vegada iniciada, la dilatació tendeix a augmentar cada vegada més i, finalment, l'aneurisma es trenca i causa la mort. La probabilitat de formació de l'aneurisma augmenta amb l'edat.

El lloc on es forma habitualment l'aneurisma és la part abdominal de l'aorta, un poc per damunt la ramificació (fig. 7). L'aneurisma apareix en la zona de reflexió de l'ona polsant, on l'aorta es ramifica. Com hem demostrat abans —eq. (16)—, l'amplitud de l'ona reflectida és proporcional a la diferència entre l'àrea de la secció transversal del vas abans de la ramificació, i l'àrea de la secció total després de la ramificació. Amb l'edat, aquesta diferència augmenta per causa de l'estrenyiment de les artèries perifèriques. Com a resultat, s'incrementa l'amplitud de l'ona polsant reflectida, cosa que duu a una dilatació major de les parets de l'aorta en aquest lloc.

El creixement de l'aneurisma és una manifestació de la llei de Laplace, l'astrònom i matemàtic francès que va descobrir la relació entre la tensió  $T$  que dilata la paret del vas sanguini<sup>48</sup>, el radi  $R$  del vas, el gruix  $h$  de la paret del vas i la pressió  $P$  dins el vas

$$T = PR/h \tag{18}$$

S'utilitza amb més freqüència una altra notació de la llei de Laplace; en el primer membre s'escriu el producte  $T \cdot h$ , que és numèricament igual a la força que dilata la paret del vas per unitat de longitud. Si escrivim  $T \cdot h = T'$ , la llei de Laplace s'expressa així

$$T' = PR \tag{19}$$

A partir de la llei de Laplace observem que quan augmenta  $P$  ha d'augmentar també  $T$ , fet que ens porta a la dilatació de la paret i a l'increment del radi  $R$  del vas. Però com que resulta que el volum de la paret de l'aorta és constant, l'augment del radi de l'aorta ha d'estar acompanyat de l'aprimament de la paret. Per això, quan augmenta  $P$  també ha d'augmentar la relació  $R/h$ , fet que implica un creixement encara major de  $T$ , i així successivament. D'aquesta manera, qualsevol augment de la pressió arterial sembla que ha de provocar un creixement en allau de  $R$  i una disminució de  $h$ , que conduirà al trencament de l'aneurisma. Per què, aleshores, aquest fenomen es produeix en realitat molt rarament i, per general, tan sols en edat avançada?

<sup>47</sup> Ací i en endavant entenem com a pressió de la sang la diferència entre la pressió vertadera i l'atmosfèrica. Precisament aquesta diferència és la que dilata els vasos sanguinis i dóna la possibilitat a la sang de circular a través seu.

<sup>48</sup> La tensió es defineix com la relació entre la força aplicada i l'àrea de la secció transversal de la paret del vas,  $T = F/S$ , en la notació de l'eq. (1).

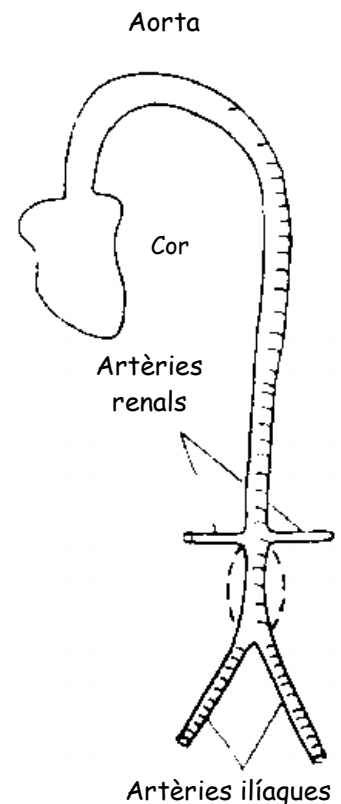


Fig. 7. Lloc de l'aparició de l'aneurisma de l'aorta (designat amb traços).

*(Física) Tensió és...  
i es mesura en...*

(Física) La llei de Laplace indica que...

La causa de l'aparició de l'aneurisma no és només l'increment de l'amplitud de la pressió arterial, sinó també el canvi de les propietats mecàniques de la paret arterial. L'aorta d'una persona té un diàmetre interior d'uns 2.5 cm, i el gruix de la paret és de 2 mm. Aquesta paret té cèl·lules amb dos tipus principals de materials elàstics: elastina i col·lagen. En la paret no dilatada del vas, les fibres col·lagenes no estan totalment redreçades. Per això, per a deformacions petites, l'elastina —que és de fàcil dilatació— determina l'elasticitat de la paret de l'aorta. En canvi, per a deformacions grans, les propietats mecàniques de la paret de l'aorta estan determinades pel col·lagen, que té una rigidesa molt major que l'elastina. Per aquesta causa, la dependència del radi de l'aorta respecte de la tensió  $T'$  que dilata les parets es pot aproximar mitjançant dues rectes i té la forma de la fig. 8. En edat avançada, les propietats del col·lagen varien, aquest esdevé menys rígid, i la paret de l'aorta arriba a ser fàcilment dilatada (veges la corba de traços i punts de la fig. 8).

A partir de les característiques elàstiques de la paret de l'aorta i de la llei de Laplace, podem trobar les variacions del radi del vas quan canvia la pressió sanguínia. Com que el valor de  $R$  està relacionat linealment amb  $T'$  per l'equació de Laplace (19) i, d'altra banda, s'ha de satisfer la relació  $R(T')$  que dóna l'elasticitat de la paret de l'aorta, resulta que, per a cada  $P$ , el valor corresponent de  $R$  es pot obtenir quan trobem l'ordenada del punt d'intersecció de la corba contínua (o, alternativament, la corba de traços i punts) en la fig. 8 amb la recta de traços. Quan augmenta  $P$ , la inclinació de la línia de traços disminueix i s'aproxima a la inclinació de la porció *col·làgena* de la corba contínua. Quan aquestes pendents arriben a ser iguals, no hi ha punt d'intersecció de les rectes (el valor de  $R$  creix amb desmesura), cosa que correspon al creixement en allau i al trencament de l'aneurisma.

Per a la gent jove es manifesta una inclinació així de gran de la recta de traços si la pressió és de prop de 130 kPa (1000 mm de Hg), valor que supera de 6 a 8 vegades la pressió arterial típica.

En les persones d'edat avançada la rigidesa de la paret de l'aorta pot disminuir quasi 5 vegades, i la pressió arterial pot elevar-se fins a 26 kPa (200 mm de Hg), cosa que fa més possible l'aparició i el trencament de l'aneurisma. En la gràfica 8 això correspon a la corba de traços i punts, que té major pendent en la zona de col·lagen.

*Q33) Comprova la relació entre els valors 130 kPa i 1000 mmHg esmentats en el text.*

## 4.6 Circulació de la sang en la girafa i medicina còsmica

### 4.6.1 Biologia còsmica

Qui no ha somiat a volar al cosmos i observar la Terra des del vast espai? Aquest somni, per desgràcia, només es pot convertir en realitat per a algunes persones. La professió de cosmonauta és molt complicada i també perillosa, tot i que milers de persones preparen el vol còsmic i resolen problemes relacionats. Una part considerable d'aquests problemes pertanyen a la biologia, al nou camp de la biologia còsmica.

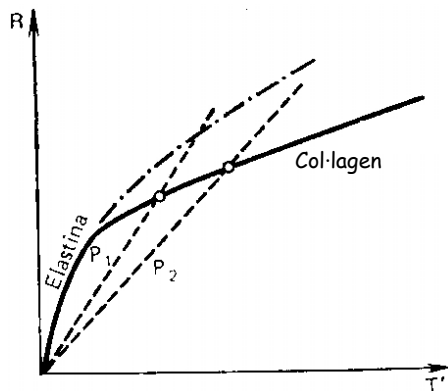


Fig. 8. Dependència entre el radi  $R$  de l'aorta i la tensió  $T'$  que estira les parets. La corba contínua en negre és la del material biològic. La corba a traços i punts correspon a edats avançades. La recta, per a cada  $P$ , és la llei (física) de Laplace.

La primera prova que ha d'afrontar el cosmonauta quan s'enlaira és l'acceleració a la qual és sotmès, amb la nau, quan pren velocitat ràpidament. Durant la posada en òrbita de la nau com a satèl·lit artificial de la Terra, i durant uns 5 minuts, sobre el cosmonauta actua una acceleració que pot variar d'1 g a 7 g. Podem dir que el pes del cosmonauta durant l'enlairament de la nau pot assolir un valor sèptuple. Les acceleracions també es fan sentir durant el retorn a la Terra, quan el cosmonauta entra en les capes denses de l'atmosfera. És natural que l'augment del pes del cosmonauta dificulti els seus moviments. Serà molt difícil alçar una mà, que haurà augmentat 7 vegades de pes, per a connectar un commutador del tauler de comandament. Per aquesta raó, en els períodes en què actuen sobrecàrregues és a dir, durant l'enlairament de la nau i durant la frenada, la majoria de les operacions relacionades amb el comandament de la nau han de ser automatitzades.

Tanmateix, la dificultat de moviment quan augmenta el pes del cosmonauta és només un dels aspectes —que se suporta amb facilitat relativa— de l'acció de les acceleracions en el vol còsmic. Són molt més perillosos els desplaçaments de molts teixits i d'alguns òrgans interns, que ocorren en la direcció de les forces d'inèrcia.

(Física) Forces d'inèrcia són ..

#### 4.6.2 Forces d'inèrcia

Com a exemple d'acció d'aquestes forces pot servir la caiguda dels passatgers en un autobús durant una frenada molt brusca. Les forces d'inèrcia estan dirigides en sentit oposat a l'acceleració del cos. En funció de la densitat dels òrgans interns, de la disposició i l'elasticitat dels lligaments amb els teixits envoltants, les forces d'inèrcia poden ocasionar diversos trastorns de les funcions de l'organisme.

És evident que la part més mòbil de l'organisme és la sang. Per això, les anomalies més importants durant l'acció de les acceleracions es produeixen en el sistema de circulació de la sang. Si l'acceleració està dirigida de la pelvis al cap, l'acció de les forces d'inèrcia provoca el reflux de la sang des dels vasos del cap i l'afluència als òrgans de la part inferior del cos. En resulten possibles trastorns de la vista i, fins i tot, desmaís. Si l'acceleració actua durant un minut amb aquesta orientació, el valor màxim no ha de superar 3 g si no es volen causar trastorns greus.

*Q34) En quant de temps has d'alçar (o baixar) una mà si vols provocar que patisca una acceleració d'1 g? I de 3 g?*

*Q35) A quina acceleració equival un colp de mà sobre la taula?*

#### 4.6.3 Inèrcia i rigidesa dels vasos sanguinis

Si les parets dels vasos sanguinis tingueren rigidesa absoluta, l'acció de les forces d'inèrcia no conduiria a la redistribució de la sang en l'organisme. Tots els efectes de les acceleracions en el sistema de circulació de la sang estan relacionats amb l'elevada extensibilitat de les parets dels vasos sanguinis; per aquesta extensibilitat, la variació de la pressió de la sang pot canviar el volum dels vasos sanguinis i també el volum de la sang que contenen.

Sabem que la pressió de l'aigua d'un recipient que es troba en el camp gravitatori de la Terra augmenta amb la profunditat, de manera que per cada 10 cm de profunditat la pressió s'incrementa en 1 kPa.

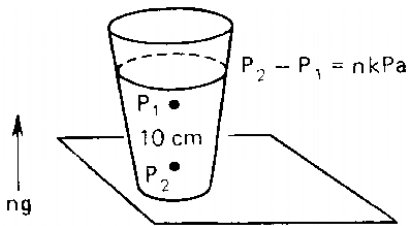


Fig. 9. Variació de la diferència de pressió hidrostàtica entre dos punts durant l'acceleració del líquid.

(Física) Acceleració 3g és...

*Q36) Comprova aquest valor (quina és la pressió atmosfèrica normal?)*

Si el recipient es mou amb l'acceleració  $ng$ , la pressió de l'aigua disminuirà en  $n$  kPa en la direcció del vector d'aquesta acceleració per cada 10 cm (fig. 9). La pressió arterial de la sang en una persona sana al nivell del cor és de 16 a 18 kPa, i en posició asseguda el cap està uns 40 cm per dalt el cor; per això, en absència d'acceleracions, la pressió de la sang en les artèries grans del cap va de 12 a 14 kPa, i resulta suficient per produir-ne la dilatació.

*Q37) Explica i comenta aquests valors de distàncies i diferències de pressió.*

Durant un moviment amb una acceleració de 3 g en direcció de la pelvis al cap, la pressió arterial en els vasos del cap disminueix en 12 kPa i arriba a ser, pràcticament, igual a l'atmosfèrica.

*Q38) Explica l'afirmació anterior (recorda que la pressió de la sang és, realment, una sobrepressió respecte de l'atmosfèrica).*

Els vasos sanguinis es desinflen i el flux de sang disminueix bruscament. Per això, per a aquestes acceleracions (3 g) les cèl·lules del cervell comencen a tenir escassetat d'oxigen, fet que condueix a la pèrdua del coneixement.

Per la mateixa raó, la pressió en els vasos de les extremitats inferiors creix durant les acceleracions orientades cap a dalt, i pot assolir 75 kPa per a 3 g.

*Q39) Explica el valor anterior.*

L'augment de la pressió arterial, més del quàdruple, provoca una dilatació desmesurada. El resultat és que el volum de la sang en les parts inferiors del cos augmenta, i en les superiors disminueix. A més a més, sota l'impacte de l'enorme pressió, a partir dels vasos de la part inferior del cos i a través de les parets d'aquests vasos, comença a colar-se aigua que penetra en els teixits circumdants. Aquest procés condueix a l'inflament dels peus, a un edema.

#### 4.6.4 Vestit antigravetat

Com és possible assegurar la circulació normal de la sang en un/a cosmonauta o en un/a pilot d'avió de propulsió a doll, durant l'acció de les acceleracions? La solució més senzilla és disposar la persona de manera que les seues dimensions en la direcció del vector d'acceleració siguin mínimes. En aquest cas, la pressió arterial en les diferents parts del cos es diferencia molt poquet i no hi haurà redistribució de la sang. Aquesta és la causa del fet que els cosmonautes s'enlairen i aterren en posició mig asseguda.<sup>49</sup>

Però què poden fer els pilots d'avions de propulsió a doll? Quan fan maniobres brusques, aquests no poden trobar-se en posició jaient perquè, en aquest instant, han de controlar l'aparell. El que fa el pilot és posar-se un vestit molt ajustat que continga aigua entre les capes interior i exterior. Així, durant les acceleracions la pressió de l'aigua en qualsevol porció d'aquest vestit variarà en el mateix valor que la pressió en

<sup>49</sup> És interessant recordar que els protagonistes de la novel·la de Jules Verne *De la Terra a la Lluna*, escrita en 1870, arriben a la mateixa conclusió (cal volar de costat, gitat). Podem considerar que en aquesta novel·la es van tocar, per primera vegada, els problemes principals de la medicina còsmica.

els vasos sanguinis pròxims. Per això, tot i que la pressió en el vas sanguini continuarà creixent, el vas ja no és dilatarà més. No es produirà una redistribució de la sang. Aquesta indumentària rep el nom de vestit antigravetat i s'empra amb èxit en cosmonàutica i en l'aviació supersònica.

La moda fa que els joves duguen pantalons texans estrets, roba anàloga al vestit antigravetat<sup>50</sup>.

#### 4.6.5 Animals "horitzontals"

La majoria dels animals de la Terra són "horitzontals", i el cervell i el cor, —dos dels òrgans més importants—, els tenen a un mateix nivell. Aquesta disposició és ben raonable ja que el cor no necessita fer un esforç addicional per a proveir de sang el cervell. Però els humans no som animals horitzontals. Per això, la nostra pressió arterial és relativament alta. Alguns ocells també són "hipertònics", com ara el gall; també és el cas de la girafa.

El cor dels animals típicament "horitzontals" no pot assegurar l'abastiment de sang al cervell, si la postura es desvia de la natural. Per exemple, si un conill o una serp es posen en posició vertical, podran perdre molt aviat el sentit a causa de l'anèmia del cervell.

#### 4.6.6 Les girafes hipertòniques

En l'organisme de la girafa es pot trobar una analogia<sup>51</sup> amb el vestit antigravetat. La necessitat que té la girafa de dur a la Terra un vestit còsmic s'explica per la seua estatura insòlita, que pot arribar a 5.5 m. El cor de la girafa es troba a una altura d'uns 2.5 m; per aquesta causa, els vasos sanguinis dels peus han de suportar l'enorme pressió de tota aquesta columna de líquid.

*Q40) Calcula la sobrepessió arterial que té una girafa en els peus.*

Què salva, aleshores, els peus de la girafa de l'aparició d'un edema? Entre els vasos dels peus de la girafa i la pell sòlida hi ha gran quantitat de líquid intercel·lular el qual, de la mateixa manera que l'aigua en el vestit antigravetat, prevé els vasos contra la dilatació excessiva. Però de quina manera pot pujar la sang al nivell del cervell en el cos de la girafa; és a dir, a 3 m per damunt el nivell del cor? Si la girafa tinguera al nivell del cor la mateixa pressió arterial que una persona, llavors la pressió al nivell del cap seria menor que l'atmosfèrica i la sang no podria circular a través del cervell. Per això no és estrany que la girafa siga *hipertònica*. La seua pressió arterial al nivell del cor pot assolir 50 kPa. Aquest és el preu que paga la girafa per l'estatura.

(Física) Pressió arterial és...  
i es mesura en...

*Q41) Demuestra l'afirmació segons la qual la pressió en el cap d'una girafa arribaria a ser menor que l'atmosfèrica si no fóra hipertònica.*

<sup>50</sup> Els metges diuen que el pantaló molt ajustat pot ajudar les víctimes d'accidents que pateixen traumes greus per baix de la cintura a evitar la caiguda brusca de la pressió arterial, cosa que passa, habitualment, durant la pèrdua de sang. En un cas, un jove de 22 anys va tenir en un accident automobilístic un trauma en la pelvis i en la part inferior de l'abdomen. El jove només sentia dolor en el lloc del trauma. El seu estat va romandre estable durant 25 minuts, fins al moment que el metge, per descobrir el trauma, li va llevar els pantalons texans, que estaven tan ajustats que va haver de tallar-los. Immediatament després, les cames i l'abdomen van començar a inflar-se pel flux de la sang, la pressió arterial en les extremitats superiors va disminuir fins a anul·lar-se i el jove va perdre el coneixement.

<sup>51</sup> Això no vol dir que la girafa siga un foraster còsmic!

## 4.7 Mesurament de la pressió de la sang i de la velocitat del flux sanguini

Un dels índexs principals del funcionament del cor és la pressió amb la qual impel·leix la sang als vasos. La pressió arterial es va mesurar per primera vegada pel clergue anglès Hailes en 1733.

Són interessants les circumstàncies que van portar Hailes al descobriment de la pressió arterial. Abans d'estudiar les forces que impulsen la sang dels animals a moure's, Hailes va dedicar uns anys a la investigació de les plantes i a veure què feia pujar la saba des de les arrels cap a les fulles dels arbres.<sup>52</sup> Com que es considerava que la saba de les plantes feia en l'arbre el mateix paper que la sang en l'animal, Hailes va començar a estudiar la circulació sanguínia.

Amb aquesta finalitat, va prendre un tub flexible i va connectar l'artèria femoral d'un cavall a un tub llarg de llautó col·locat en posició vertical i amb l'extrem superior obert. Quan va llevar el subjectador del tub de connexió, la sang va passar amb ímpetu de l'artèria al tub de llautó i va començar a omplir-lo fins a pujar prop de 2 m. La pressió de la columna de sang que es trobava en el tub de llautó s'equilibrava per la pressió arterial i corresponia a prop de 20 kPa.

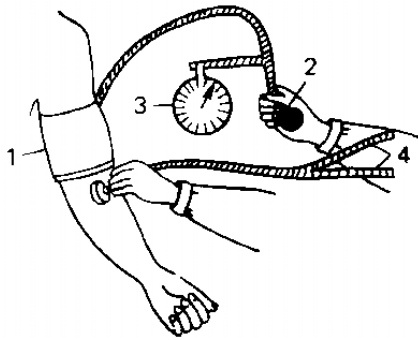


Fig. 10. Mètode de Riva-Rocci-Korotkov per a mesurar la pressió arterial d'una persona: 1, maniguet ple d'aire comprimit; 2, pera amb una vàlvula per a insuflar l'aire al maniguet; 3, manòmetre per a mesurar la pressió de l'aire; 4, fonendoscopi per a auscultar els tons de Korotkov.

### Q42) Explica aquesta afirmació.

El nivell de la sang en el tub de llautó no era constant, i oscil·lava amb la freqüència de les contraccions del cor entre els valors màxim (sistòlic) i mínim (diastòlic). La pressió sistòlica corresponia a la contracció del cor, i la diastòlica, a l'estat relaxat.<sup>53</sup>

El mètode proposat per Hailes<sup>54</sup> implicava una considerable pèrdua de sang, a més del risc per al pacient. Per aquesta causa, amb l'ajut d'aquest mètode es podia mesurar la pressió arterial sols en experiments amb animals. El desig de crear un mètode de mesura de la pressió arterial idoni per a una persona va induir el metge italià Riva-Rocci a inventar en 1896 un aparell que està en ús fins avui (fig. 10). Aquest aparell s'utilitza ordinàriament per a mesurar la pressió sanguínia en l'artèria humeral. Ja que l'artèria humeral amb el braç baixat es troba al nivell del cor, resulta que la pressió de la sang en aquesta artèria coincideix amb la pressió sanguínia en la part de l'aorta més pròxima al cor.

El mètode de Riva-Rocci es basa en la mesura de la pressió exterior necessària per a subjectar l'artèria. Amb aquest fi sobre el braç del pacient es posa un maniguet buit de goma i amb qualsevol bomba s'augmenta la pressió de l'aire en el mànec fins que desaparega el pols en l'artèria de l'avantbraç (en l'artèria radial). La pressió de l'aire en el mànec en el moment de desaparició de les ones polsants en l'artèria radial (quan en aquesta cessa el flux de sang) ha de ser igual a la pressió sistòlica de la sang.

En 1905, el metge rus Korotkov va modificar el mètode de Riva-Rocci de manera que oferira la possibilitat de mesurar també la pressió diastòlica de la sang. Korotkov va proposar auscultar les ones polsants de l'artèria radial amb l'ajuda d'un fonendoscopi.<sup>55</sup> Si la pressió de l'aire en el maniguet s'eleva per damunt de la pressió sistòlica per baixar-la després, lentament, amb l'ajuda d'una vàlvula especial,

<sup>52</sup> Va publicar el llibre *Estàtica de les plantes*.

<sup>53</sup> Hailes exposa el que hem vist en el segon tom del seu tractat *Hemostàtica*.

<sup>54</sup> Tanmateix, a Hailes no solament li va interessar el moviment dels líquids, sinó també el de l'aire. També en aquest àmbit les seues idees van trobar realització pràctica. Per a lluitar contra la calor sufocant en els locals tancats va proposar, per primera vegada, instal·lar ventiladors semblants a molins de vent.

<sup>55</sup> Aquest aparell consta d'una membrana sensible i dos maniguets flexibles que condueixen les vibracions acústiques cap a les membranes del timpà de l'oida.

aleshores a una pressió igual a la sistòlica apareixen sons característics. L'origen d'aquests sons, que es denominen *tons de Korotkov*, està relacionat amb el caràcter complex de propagació de l'ona polsant per l'artèria parcialment comprimida. Quan la pressió en el manigueta és menor que la diastòlica, l'artèria comença a deixar passar sang, sense cap obstacle, i els tons de Korotkov desapareixen. Per aquesta raó, la pressió en el manigueta corresponent a la desaparició dels tons de Korotkov es pren per pressió diastòlica.

Sovint, per a formar-nos una idea del funcionament del sistema cardiovascular, resulta insuficient mesurar les freqüències del pols i la pressió arterial. L'estat malaltís de qualsevol òrgan pot estar relacionat amb la disminució del flux de sang a través de l'artèria que abasta de sang aquest òrgan. En aquests casos, per a establir el diagnòstic correcte és necessari mesurar la velocitat del flux de sang a través d'aquesta artèria (és a dir, el volum de la sang que passa per l'artèria per unitat de temps). Un dels primers a investigar la velocitat de moviment de la sang pels vasos va ser el metge i físic francès Poiseuille. És interessant el fet que la llei que duu el seu nom –i que relaciona la velocitat de moviment del líquid a través d'un tub capil·lar amb el radi, longitud i gradient de pressió en el tub– va representar una generalització dels treballs experimentals fets per Poiseuille en els vasos sanguinis dels animals. Tanmateix, l'aplicació de la llei de Poiseuille per al mesurament del flux sanguini en les artèries d'una persona és pràcticament impossible, perquè en aquest cas és necessari conèixer el diàmetre interior de l'artèria, els valors de la pressió de la sang en dos punts de l'artèria i la viscositat de la sang. És evident que l'obtenció d'aquestes dades converteix aquest mètode en *cruent* i, amb freqüència, inaplicable.

(Física) La llei de Poiseuille indica que...

(Física) Inducció electromagnètica és...

(Física) Camp magnètic és...  
i es mesura en...

#### 4.7.1 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode electromagnètic

En l'actualitat, la velocitat del flux sanguini a través dels vasos es determina, en la majoria dels casos, amb dos mètodes: el mètode electromagnètic i el mètode de dilució de l'indicador. El mètode electromagnètic està basat en la llei de la inducció electromagnètica: si el vas sanguini es disposa en un camp magnètic de manera que el camp magnètic siga perpendicular a l'eix del vas, la sang (és a dir, el medi conductor), quan es mou al llarg del vas, creuarà les línies de força del camp magnètic i es generarà un camp elèctric. El vector d'intensitat del camp elèctric generat serà perpendicular al camp magnètic i a la velocitat de moviment de la sang, i el valor màxim de la diferència de potencial entre punts diametralment oposats del vas serà proporcional al producte de la velocitat del flux sanguini pel camp magnètic. Per això, si els paràmetres del camp magnètic no varien en el procés de la investigació, el valor de la FEM que s'hi registra resulta ser proporcional a la velocitat del flux sanguini a través del vas.<sup>56</sup>

(Física) Línies de força d'un camp són ..

(Física) Camp elèctric és ...  
i es mesura en ...

(Física) Diferència de potencial (ddp) és...  
i es mesura en...

<sup>56</sup> És important destacar que ja en 1832 Faraday, un dels creadors de la teoria electromagnètica, en l'intent de comprovar la validesa de la llei d'inducció electromagnètica per als líquids conductors, volia mesurar la diferència de potencial entre les vores oposades del riu Tàmesi, la diferència que s'hi genera quan flueixen les aigües en el camp magnètic de la Terra. En aquell moment Faraday no va aconseguir el seu propòsit, però 20 anys després el seu compatriota Wollaston, amb instruments anàlegs, va descobrir que la diferència de potencial entre les costes oposades del canal de la Mànega variava en correspondència amb els corrents de la marea.

(Física) Força electromotriu (FEM) és...

i es mesura en...

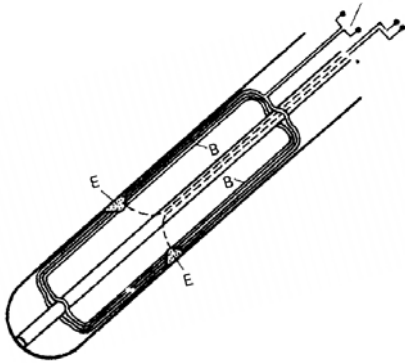


Fig. 11. Catèter proveït de captador electromagnètic de la velocitat del flux sanguini.

(Física) Els elèctrodes són...

Des de 1930 s'utilitza el mètode electromagnètic per a l'estudi de la velocitat del flux sanguini amb un catèter proveït de captador electromagnètic de velocitat de flux sanguini, fig. 11. Dins el catèter hi ha una bobina (B) que genera un camp magnètic dirigit perpendicularment a l'eix del catèter.

En la superfície exterior del catèter es disposen dos elèctrodes (E) per a mesurar la FEM que hi apareix. Els elèctrodes estan orientats de manera que la recta que els uneix siga paral·lela al pla de les espirals de la bobina. Un catèter d'aquest tipus té un diàmetre exterior d'1 o 2 mm i pot introduir-se en moltes artèries humanes sense canviar, pràcticament, la velocitat del flux de sang. Per regla general, el valor del camp magnètic d'aquests captadors és de vora  $10^{-3}$  T i, com a conseqüència, la FEM registrada, a velocitats ordinàries, no acostuma superar  $10^{-5}$  V. Tanmateix, tot i que el senyal de sortida del captador és molt petit, el mètode electromagnètic ha trobat, en l'actualitat, una àmplia aplicació en les investigacions clíniques i de laboratori.

#### 4.7.2 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de dilució de l'indicador

El mètode de dilució de l'indicador permet calcular la velocitat del flux sanguini a través del vas si es coneix la quantitat d'indicador (colorant o d'altra substància) introduït en la sang i la seua concentració en qualsevol punt del vas. En la majoria dels casos s'utilitzen com a indicadors diversos colorants inofensius per a l'organisme, el color dels quals es diferencia substancialment del color de la sang. En aquests casos, la concentració de l'indicador es determina de forma fotomètrica, mesurant la coloració del vas a contraluz. De vegades, el paper d'indicador el fa una dissolució fisiològica refredada de clorur sòdic. La concentració d'aquest indicador es pot avaluar a partir de la temperatura de la sang en el vas.

Imaginem un segment suficientment llarg d'un vas sanguini.  $F$  és la velocitat del flux de sang a través seu. Suposem que, amb la sang, se subministra l'indicador amb una velocitat  $I$ . Si  $c$  és la concentració de l'indicador en el segment del vas, tenim la relació següent

$$I = cF \quad (20)$$

que permet calcular  $F$  si coneixem  $I$  i  $c$ . Hem d'assenyalar que el mètode de dilució de l'indicador dóna dades correctes per a la velocitat del flux sanguini sols en el cas que l'indicador, quan abandona amb la sang el segment donat del vas, s'evacua de la sang (per exemple, pels ronyons). En cas contrari, la concentració de l'indicador en la sang augmentarà progressivament, i el càlcul de  $F$  per la fórmula (20) conduirà a resultats exagerats.

En la modificació més difosa del mètode, s'hi introdueix una quantitat coneguda d'indicador en el vas sanguini durant un lapse breu ( $\approx 1$  s). En aquest cas, la concentració  $c(t)$  de l'indicador en el vas ja no és constant, i varia anàlogament a com indica la fig. 12. Si la velocitat del flux sanguini a través del vas  $F$  es considera constant, aleshores, durant un temps  $\Delta t$  passarà al costat del captador una quantitat d'indicador igual a  $c(t)F\Delta t$ . La quantitat total d'indicador que passa pel vas junt al captador serà

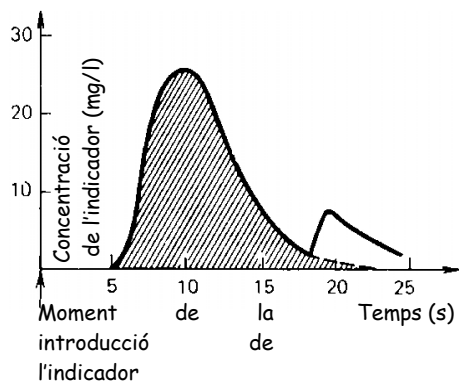


Fig. 12. Variació de la concentració de l'indicador en la sang després d'una sola injecció (àrea ratllada). La cresta més tardana en la corba de la dreta representa la segona aparició de la mateixa quantitat d'indicador, que ha fet la circulació completa.

$$Q = F \int_0^{\infty} c(t) dt \tag{21}$$

Si coneixem aquesta quantitat, obtenim F de

$$F = \frac{Q}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \tag{22}$$

en què el denominador és numèricament igual a l'àrea sota la corba en la fig. 12. El valor d'aquesta àrea podem trobar-lo per integració numèrica o, simplement, pesant la part de paper que es troba entre la corba  $c(t)$  i l'eix d'abscisses en la fig. 12.

### 4.7.3 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de la concentració d'oxigen

El mètode més antic d'estudi de la velocitat del flux sanguini, que també s'utilitza actualment, va ser proposat pel fisiòleg alemany Fick en 1870. Per a determinar la quantitat de sang  $F$  llançada pel cor en una unitat de temps (és a dir, la velocitat de flux de sang en tot l'organisme) Fick va mesurar la concentració d'oxigen en la sang arterial ( $c_A$ ) i venosa ( $c_V$ ), i també la quantitat d'oxigen  $Q$  consumida per l'organisme en una unitat de temps.

És evident que la quantitat d'oxigen obtinguda per l'organisme per unitat de volum de sang arterial és  $c_A - c_V$ . Si per l'organisme passen en una unitat de temps  $F$  volums de sang, la quantitat d'oxigen consumida per l'organisme per unitat de temps és  $Q = F(c_A - c_V)$ . D'altra banda, la magnitud  $Q$  es pot determinar en una persona si es mesura la concentració de l'oxigen en l'aire aspirat i així obtenim  $F$

$$F = \frac{Q}{c_A - c_V} \tag{23}$$

Tanmateix, hem de fer notar que el mètode de Fick només és aplicable per a investigar la velocitat del flux sanguini a través del cor.

### 4.7.4 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode ultrasònic

En l'actualitat ha obtingut gran difusió el mètode ultrasònic de mesura de la velocitat lineal del moviment de la sang. En aquest mètode es fa ús de l'efecte Doppler d'acord amb el qual la freqüència de les vibracions acústiques percebudes depèn de la velocitat del moviment de la font de so respecte al receptor acústic (veges el capítol 2n). En la fig. 13 s'il·lustra el muntatge corresponent per al mesurament de la velocitat de la sang. S'hi fan servir dos cristalls piezoelèctrics, l'un per a generar les vibracions ultrasòniques i l'altre per a mesurar l'ultrasò dissipat per la sang. Per regla general, la freqüència de l'ultrasò utilitzat es troba en l'interval d'1 a 10 MHz. Les partícules de la sang

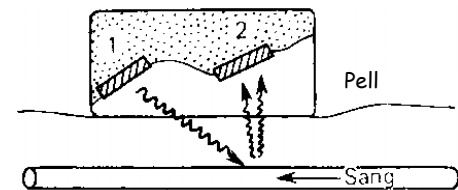


Fig. 13. Mètode ultrasònic de mesura de la velocitat de moviment de la sang pel vas: 1, emissor de l'ultrasò; 2, receptor de l'ultrasò. Les línies ondulades mostren esquemàticament la propagació de l'ona sonora des de l'emissor i des de les ones dissipades per la sang en moviment.

(Física) Ultrasons són ...

que dissipen l'ultrasò –i, per tant, serveixen de fonts secundàries, mòbils, d'aquest– són els eritròcits, que tenen unes dimensions de vora 5  $\mu\text{m}$ . Quan mesurem la diferència entre les freqüències de l'ultrasò emès i del dissipat per la sang, és possible calcular la velocitat del moviment de la sang, sempre que es coneguen la disposició del vas respecte al captador i la velocitat de l'ultrasò en el medi.<sup>57</sup>

(Física) L'efecte Doppler és...

(Física) La piezoelectricitat és...

Podem assenyalar que el mètode ultrasònic dóna la possibilitat de determinar només la velocitat lineal del moviment de la sang i no la velocitat del flux sanguini (veges el que l'hem dit a principi del capítol). Evidentment, aquesta última es pot calcular multiplicant la velocitat del moviment de la sang per l'àrea de la secció transversal del vas. Lamentablement, en la majoria dels casos, avaluar l'àrea de la secció transversal d'un vas sanguini amb suficient exactitud resulta difícil. En aquestes ocasions, el mètode ultrasònic pot proporcionar informació només sobre les variacions relatives de la velocitat del flux sanguini, si es considera que l'àrea de la secció transversal del vas roman invariable.

*Q43) Resumeix esquemàticament els mètodes anteriors de mesurament de la pressió de la sang.*

## 4.8 El color de la sang i la llei de conservació de l'energia

(Física) La llei de conservació de l'energia diu que...

La llei de conservació de l'energia va ser formulada amb precisió per primera vegada en 1842 pel metge i naturalista alemany Mayer. Les circumstàncies en les quals va ser descoberta resulten bastant insòlites. En 1840, Mayer, com a metge d'un vaixell, va emprendre una llarga navegació cap a l'illa de Java. El mètode de guariment més difós en aquella època era la sagnia, i el metge solia, doncs, observar la sang venosa dels malalts. Mayer va observar que quan més s'aproximava el vaixell a les càlides latituds tropicals, el color de la sang venosa dels mariners es feia més roja que a Europa. Aquest fet evidenciava que en la sang venosa d'una persona quedava més oxigen en les latituds meridionals que en les latituds del Nord. Evidentment, la concentració d'oxigen en la sang arterial era la mateixa per a les diferents latituds, i depenia tan sols de la concentració d'oxigen en l'atmosfera. Basant-se en aquesta circumstància, Mayer va arribar a la conclusió que una persona, en condicions de clima fred, consumia més oxigen. Per consegüent, per a mantenir la mateixa temperatura del cos quan feia fred es necessitava una oxidació major de productes alimentaris.

Tanmateix, Mayer comprenia que l'energia despresa durant l'oxidació dels productes alimentaris es consumia no sols per a mantenir la temperatura del cos constant, sinó també quan la persona feia treball mecànic. Aquest fet significava que havien d'existir relacions determinades entre la quantitat de calor generada en l'organisme i el treball mecànic que es feia durant un

<sup>57</sup> Tot i que sembla senzill el mesurament de la velocitat del moviment de la sang amb l'efecte Doppler, la seua utilització requereix l'aplicació d'aparells electrònics especials que permeten registrar variacions de freqüència de només 0.001% de la irradiada.

interval donat de temps. Mayer va deduir que a una quantitat determinada de calor havia de correspondre un valor determinat de treball mecànic realitzat.

La idea sobre l'equivalència de la calor i del treball va captivar Mayer immediatament. En una carta a un amic psiquiatra afirma:

"Aquesta teoria no pot considerar-se, de cap manera, obtinguda com a resultat d'una investigació sistemàtica. Després que jo, amb deler constant i perseverança, em vaig posar a estudiar la fisiologia de la sang durant el viatge a les Índies Orientals, les observacions sobre els canvis de l'estat fisiològic de la tripulació en les zones tropicals i sobre el procés d'aclimatació em van donar molt de material complementari per a discórrer... Si en la nostra època una persona vol aconseguir una comprensió clara dels problemes fisiològics, no podem passar sense el coneixement de la física...<sup>58</sup> Per aquesta raó m'he dedicat ací a la física, i he manifestat un interès tan viu pel problema en qüestió que poc m'interessa ja aquest apartat raconet de la Terra. Hi ha gent que, per aquest motiu, es pot riure de mi, però jo preferia romandre en el vaixell on podia treballar sense interrupcions i on diverses vegades em va sobrevenir la inspiració... Aquests temps han passat, però les comprovacions mentals posteriors d'aquesta idea... em deien que aquesta és la veritat que no sols s'intueix subjectivament, sinó que es pot demostrar també de manera objectiva".

D'ací endavant, la vida de Mayer va prendre un rumb infeliç. Van haver-hi moltes discussions sobre la prioritat en el descobriment de la llei de conservació de l'energia. Aquesta circumstància, i les contrarietats domèstiques, van afectar la ment del científic. En 1851 va ser internat en un asil per a boigs, i tot i que va eixir en passar un temps, la ment de Mayer va romandre anormal fins a la seua mort.

---

<sup>58</sup> El subratllat és meu (traductor/adaptador) per a fer-vos meditar en la necessitat i l'interès que té estudiar física en la carrera de Biològiques (i d'altres).

## 4.9 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r – 4t
Acceleració centrípeta	1r	magnitud
Acceleració	1r	Dinàmica
Acceleració	4t	Doppler (efecte)
Acceleració de la gravetat	1r	Eco
Adimensional (magnitud)	1r	Efecte Doppler
Agitació tèrmica	2n	Efectes dels límits
Amplitud d'oscil·lació d'una ona	2n	Elàstic (mòdul de Young)
Amplitud d'una ona	2n	Elàstic (mòdul de Young)
Àrea/volum (relació)	4t	Elàstica (esfera, pressió)
Àrea/volum i dimensions	3r	Elèctric (camp)
Bernouilli (llei, fluids)	3r	Elèctrodes
Caiguda lliure (temps de)	1r	Electromotriu (força, FEM)
Camp de força (línies)	4t	Energia (llei de conservació)
Camp elèctric	4t	Energia (principi de conservació)
Camp magnètic	4t	Energia cinètica
Canvi de fase en la reflexió	2n	Energia d'enllaç d'una molècula
Centre de gravetat	1r	Energia d'una ona
Centrifugadora	3r	Energia mecànica
Centrípeta (acceleració)	1r	Energia potencial
Cinemàtica	4t	Energia potencial
Coefficient de permeabilitat	1r	Esfera elàstica (fórmula de Laplace, diferència de pressió)
Coefficient de tensió superficial	3r	Esfera elàstica (pressió)
Cohesió (forces)	3r	Fase (Canvi en la reflexió)
Combustió	3r	FEM (força electromotriu)
Concentració de saturació	3r	Fluctuacions
Condensació, nuclis	3r	Fluids en règim laminar
Conservació de l'energia (principi)	1r	Fluids en règim turbulent
Conservació energia (llei)	4t	Força
Constant de temps (d'un procés)	1r	Força (línies d'un camp)
Convecció	1r	Força (resultant)
Decibel	2n	Força de la gravetat (pes)
Densitat	1r	Força de reacció
Densitat	2n	Força de resistència o fricció
Diferència potencial	4t	Força electromotriu
Difracció	2n	
Difusió	1r	
Dimensions d'una	1r	
		(FEM)
		Força resultant
		Forces de cohesió
		Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica)
		Fractals
		Fregament (força)
		Freqüència
		Freqüència
		Freqüència d'una ona
		Fricció (força)
		Fricció (llei de Stokes)
		Gas (pressió parcial)
		Gradient de pressió
		Gravetat (acceleració)
		Histèresi
		Hooke (llei)
		Inducció electromagnètica
		Inèrcia
		Intensitat d'una ona
		Laminar (règim, fluids)
		Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica)
		Laplace (llei)
		Límits (efecte dels)
		Línies de força d'un camp
		Longitud d'ona
		Llei de conservació energia
		Llei de Bernouilli (fluids)
		Llei de Hooke
		Llei de Laplace
		Llei de Newton (2a)
		Llei de Newton del refredament
		Llei de Poiseuille
		Llei de Stokes del fregament
		Magnètic (camp, inducció)
		Magnitud
		Magnitud (ordre)
		Massa
		Massa-volum d'un gas
		Mòdul de Young
		Mòdul elàstic de Young

Moviment tèrmic	2n	Refredament (Llei de Newton)	1r	Tèrmic (moviment d'agitació)	2n
aleatori				Tesla	4t
Newton (2a llei)	4t	Règim laminar (fluids)	3r	Transductor	2n
Newton (Llei del refredament)	1r	Règim turbulent (fluids)	3r	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r
Nuclis de condensació	3r	Relació àrea/volum	4t	Transmissió d'una ona	2n
Número adimensional	1r	Relació àrea/volum i dimensions	3r	Treball	1r
Ones sonores	2n	Relació massa-volum d'un gas	3r	Treball	3r
Ordre de magnitud	1r	Resistència (força)	1r	Turbulent (règim, fluids)	3r
Parcial (pressió)	1r	Resultant (força)	1r	Ultrasons	4t
Permeabilitat (coeficient)	1r	Resultant d'unes forces	3r	Variació sinusoidal	2n
Pes	1r	Saturació, concentració	3r	Velocitat	1r
Piezoelectricitat	4t	Segona llei de Newton	4t	Velocitat de propagació d'una ona	2n
Poiseuille (Llei)	4t	Sinusoidal (variació)	2n	Velocitat mitjana	2n
Potència	1r	So	2n	Velocitat ona compressió sang	4t
Potencial (diferència)	4t	Solubilitat	3r	Velocitat ona deformació artèria	4t
Potencial (energia)	3r	Soroll blanc	2n	Young (mòdul de)	4t
Pressió	2n	Stokes (Llei de fricció)	1r	Young (mòdul elàstic)	3r
Pressió (gradient)	2n	Substàncies tensoactives	3r		
Pressió arterial	4t	Superficial (tensió)	3r		
Pressió atmosfèrica	1r	Temps (constant de)	1r		
Pressió en una esfera elàstica	3r	Temps de caiguda lliure	1r		
Pressió parcial d'un gas	1r	Tensió	4t		
Principi de conservació de l'energia	1r	Tensió superficial (coeficient)	3r		
Radiació	1r	Tensoactives, substàncies	3r		
Reacció (força)	1r				
Reflexió d'una ona	2n				
Reflexió i canvi de fase	2n				