

Bihotz bereziak, arreta berezia

Gure gorputza makina biziki osoa eta efizientea da; bihotza, makina horren motorra. Batzuetan, ordea, motorra berezitasunen batekin dator fabrikatik; adibidez, sortzetiko gaixotasunen batekin, jaiotzen diren 100 haurretatik 1ean gertatzen den bezala [1]. Horrek eragin zuzena dauka gorputzaren funtzionamenduan. Artikulu honetan, bentrikulu funtzional bakarrarekin jaiotako pertsonen odolaren zirkulazioaz arituko natzaizue, jariakinen mekanikaren ikuspuntutik.

Sistema kardiobaskularra oso egitura konplexua da, eta oinarritzko hiru osagaiak ditu: bihotza, odola eta odol-hodiak. Orokorrean, bihotzak odola ponpatzen du, eta odol-hodiek gorputzeko atal guztietara garraiatzen dute odola, berebiziko garrantzia duten hainbat funtzio betetzeko. Betebehar horien artean daude ehunetara elikagaiak eta oxigenoa eramatea, gaixotasunei aurre egitea eta abar bat. Bihotza gure motorra dela esan ohi da, eta, ur-ponpa bat balitz bezala, odola ponpatzen du zirkulazio-sistemara. Egiturari erreparatuz, bihotza bi zatitan banatu daiteke, ezkerrekoan eta eskuinekoan, eta bakoitzak aurikula eta bentrikulu bana ditu. Aurikulen eta bentrikuluen artean balbulak daude: balbula mitrala ezkerreko bihotzean eta balbula trikuspideta eskuinekoan. Era berean, bentrikuluen irteeran ere balbula bana dago: balbula aortikoa ezkerreko bentrikuluan eta birika-balbula eskuinekoan (ikus 1. irudia). Odola, halaber, oso jariakin berezia da. Haren bolumenaren % 55 fluidoa da, plasma —ia guztia ura da—, eta gainerako % 45a partikulaz osatuta dago —ia guztiak globulu gorriak dira—. Jariakin horren fluxuaren edo mugimenduaren —odol-fluxuaren— noranzkoa presio handiko guneetatik

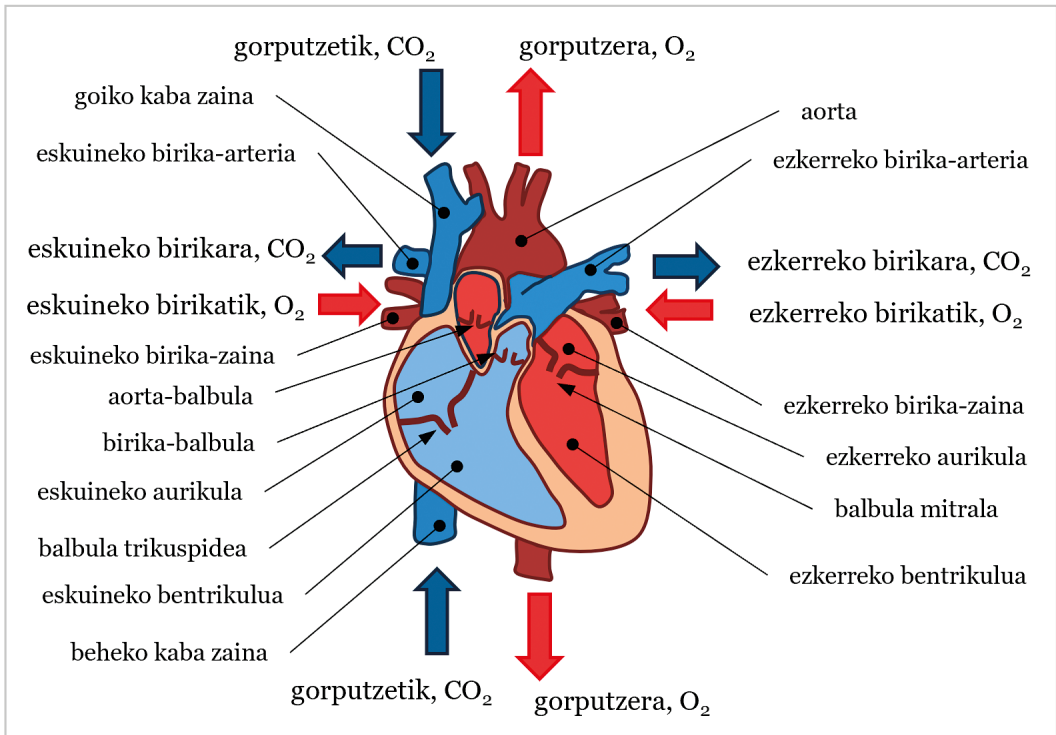
presio baxuagoko guneetarako da. Azkenik, hiru motatako odol-hodiak daude: arteriak, zainak eta kapilarrak. Arteriek odola bihotzetik gorputzera garraiatzen dute, zainek gorputzetik bihotzera, eta kapilarretan odolaren eta ehunen arteko elikagai eta gasak trukutzen dira. Azken datu hori presioaren ideiarekin lotuz, orokorrean odolak arterietan zainetan baino presio handiagoa du.

Sistema horretan, bihotz-taupadek markatzen dute odol-fluxuaren erritmoa. Modu sinplean, honela deskriba dezakegu odol-fluxuaren ibilbidea taupada bakoitzean (ikus 1. irudia). Bentrikuluen kontrakzioarekin, bentrikuluetako odolaren presioa handitzen da. Presio hori aortako eta birika-arterietako presioa baino handiagoa denean, balbula aortikoa eta birika-balbula irekitzen dira, eta odola ponpatzen da zirkulazio sistemikora eta biriketako zirkulaziora, hurrenez hurren. Zirkulazio sistemikoan, oxigeno-saturazio edo -kantitate egokia duen odola ponpatzen da ezkerreko bentrikulutik aorta arteriara. Handik, gorputzeko atal guztietara banatzen da kapilarretara iritsi arte. Bertan elikagaiak eta gasak trukutzen dituzte odolak eta



**Idatzi zuk zeuk
Gai librean atalean**

Gai librean aritzeko, bidali zure artikulua
aldizkaria@elhuyar.eus helbidera.



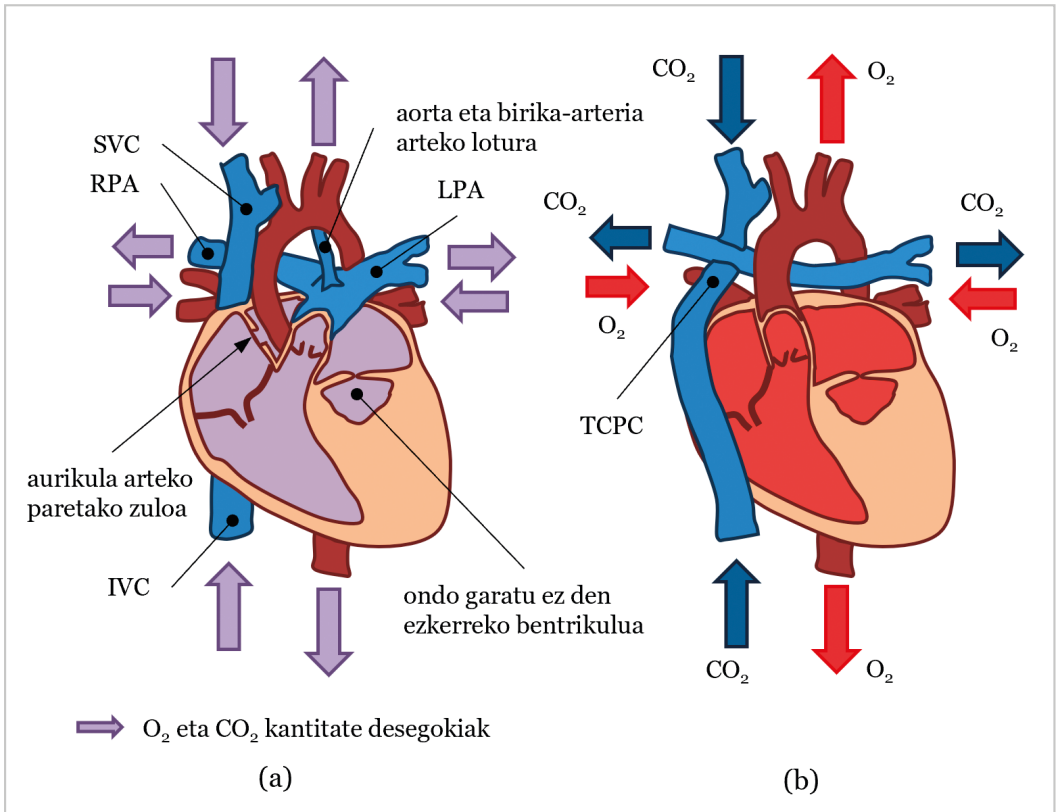
1. irudia. Gizakion bihotzaren atalak eta odol-fluxuaren noranzkoa gorputzerantz eta biriketara, eskematikoki.

ehunek. Finean, odolak oxigenoa ehunetan utzi eta karbono dioxidoa bereganatzen du. Gero, odola kapilarretatik zainetara igarotzen da, handik goiko eta beheko kaba zainetara (SVC eta IVC, ingelesezko *superior vena cava* eta *inferior vena cava*) eta, azkenik, eskuineko aurikulara. Biriketako zirkulazioan, aldiz, CO₂-a daraman odola eskuineko bentrikulutik ezker eta eskuineko birika-arterietara (LPA eta RPA, *left pulmonary artery* eta *right pulmonary artery*) bideratzen da, arterietatik biriketako albeoloetan dauden kapilarretara iritsi arte. Albeoloetan, odolak O₂-a hartuko du airetik, eta CO₂-a igorriko bertara. Kapilarretatik birika-zainetara igaroko da odola, eta ezkerreko aurikulara iritsiko da. Eskuineko eta ezkerreko aurikuletara iritsi den odola, balbula trikuspidetik eta mitraletik, bentrikuluetara pasatuko da, aurikuletako presioa bentrikuluetakoa baino handiagoa denean. Jarraian, hurrengo taupadarekin,

berririo hasiko da odol-fluxuaren ibilbidea; eta horrela etengabe. Zirkulazio-sistema horretan ondo bereizita daude zirkulazio sistemikoa eta biriketako zirkulazioa eta, hori dela eta, ondo bereizita daude O₂-kantitate handia duen odola eta CO₂-kantitate handia duena (ikus 1. irudia). Artikulu honetan odola nondik nora doan azaldu bada ere, bihotz-taupada bakoitzean hemen azalduko ez diren hainbat fase daude —uzkurdura isobolumetrikkoa, eiekzioa eta abar—. Haien azalpenak beste artikulu baterako emango luke.

Bentrikulu bakarreko pazienteak eta Fontan zirkulazioa

Jarraian, ezkerreko bihotzeko hipoplasiarekin jaio den paziente baten adibidea erabiliko dugu bentrikululu funtzional bakarra duen pertsona baten zirkulazio-sistema azaltzeko (ikus 2. irudia (a)).



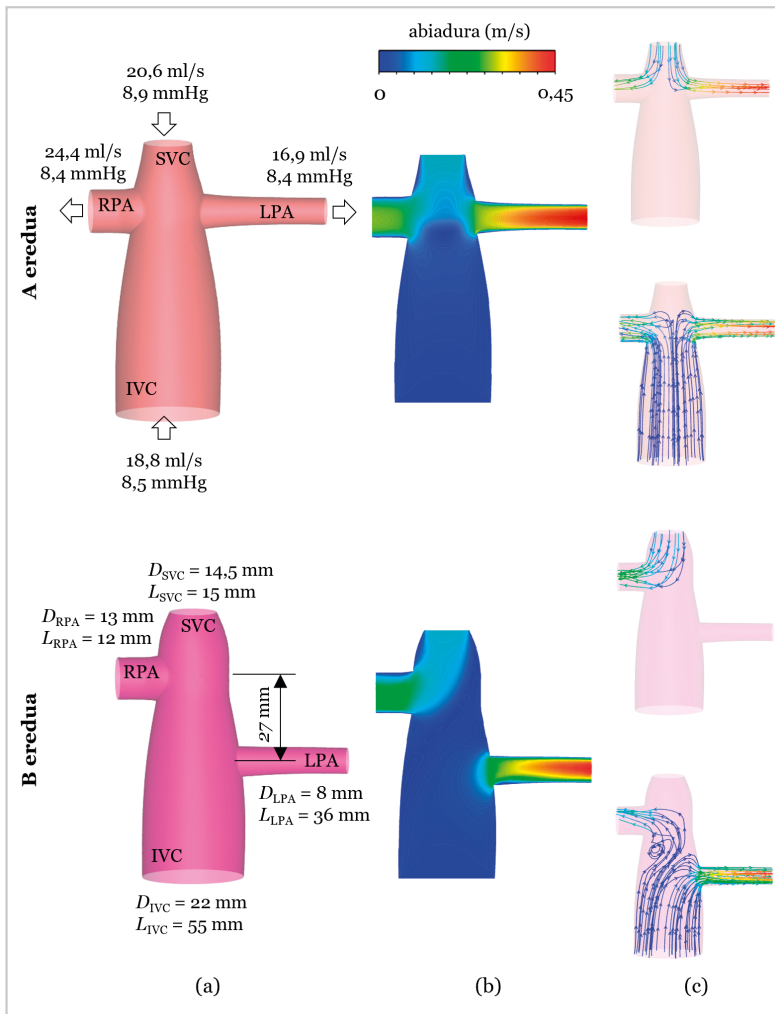
2. irudia. (a) Ezkerreko bihotzeko hipoplasia duen bihotza, eskematikoki. (b) Bihotza Fontan ebakuntzaren ondoren, eskematikoki. IVC: *inferior vena cava*, beheko kaba zaina. LPA: *left pulmonary artery*, ezkerreko birika-arteria. RPA: *right pulmonary artery*, eskuineko birika-arteria. SVC: *superior vena cava*, goiko kaba zaina. TCPC: *total cavopulmonary connection*, kaba zainen eta birika-arterien guztizko lotura.

Kasu horretan, ezkerreko bentrakulua ez da nahikoa garatu, eta ezin du odol ponpatu. Ondorioz, eskuineko bentrakuluak ponpatu behar du odola, bai biriketako zirkulaziora, bai zirkulazio sistemikora; azken horretara birika-arterien eta aortaren artean dagoen loturari esker. Gainera, aurikulen artean dagoen paretak zulatuta egon ohi da eta, horrenbestez, zirkulazio sistemikoa eta biriketako zirkulazioa ez daude ondo bereizita, bateko eta besteko odola nahastu egiten baitira (ikus 2. irudia (a)). Gauzak horrela, oxigenoa ez da modu egokian banatzen gorputzean zehar [2].

Paziente horien egoera hobetzeko asmotan, Fontan eta Baudet-ek 1968an ebakuntza bat diseinatu zuten, zirkulazio sistemikoa eta biriketako zirkulazioa bereizteko [3].

Bertan, zirujauak, iturginak balira bezala, gurutze-itxurako egitura bat sortzen dute odol-hodiekin. Izan ere, goiko eta beheko kaba zainak ezkerreko eta eskuineko birika-arterietara lotzen dituzte, *total cavopulmonary connection* edo TCPC deritzona eraikiz. Era berean, aorta bentrakulura lotzen dute (ikus 2. irudia (b)). Zirkulazio-sistema berri horri Fontan zirkulazioa deritzo.

Fontan zirkulazioan, taupada bakoitzean lan egiten duen bentrakuluak aortara ponpatzen du O_2 -kantitate egokiko odola, gorputzeko ehunetara iritsiko dena O_2/CO_2 trukea gerta dadin. Odol hori zainetatik TCPCra iritsiko da, eta kaba zainetatik birika-arterietara bideratuko da, bihotzetik pasa gabe. Horrela, CO_2 -a daraman odola biriketara



3. irudia. (a) A eta B ereduen neurriak (diametroak, D , eta luzerak, L) eta hodi bakoitzean paziente batean neurtutako odol-fluxua (ml/s) eta presioa (mmHg). A eredutik B eredura egindako aldaketa zehazten da: 27 mm mugitu da ezkerreko birika-arteria. (b) CFD simulazioen emaitzak abiadurari dagokionez. (c) CFD simulazioen emaitzak goiko eta beheko kaba zainetatik sartzen den odol-fluxuaren banaketari dagokionez. IVC: *inferior vena cava*, beheko kaba zaina. LPA: *left pulmonary artery*, ezkerreko birika-arteria. RPA: *right pulmonary artery*, eskuineko birika-arteria. SVC: *superior vena cava*, goiko kaba zaina.

eramango da, eta biriketan CO_2/O_2 trukea gertatuko. Azkenik, O_2 -kantitate egokia duen odola birika zainetatik bihotzera helduko da. Bihotzean, odola aurikulatik bentrikulura igaroko da, eta bentrikuluak aortara ponpatuko du odola. Ikus daitekeenez, zirkulazio sistemikoa eta biriketako zirkulazioa bereizita daude. Beste puntu garrantzitsu bat da Fontan zirkulazioan bentrikulu bakar batek egin behar duela biren lana, odolak zirkulazio sistemikotik eta biriketako zirkulaziotik igaro behar baitu, eta horrek modu nabarmenean handitzen du bentrikuluak egin beharreko lana.

Fontan pazienteen bizi-kalitatea hobetzeko bidea

Ebakuntza egin ostean —eta orduan soilik—, Fontan zirkulazioak modu egokian funtzionatzen duen aztertu behar da hainbat metrika aztertuz. Edonola ere, gaur egun posible da aurreikustea —heine batean— nolakoa izango den Fontan zirkulazioa. Hori egiteko moduetako bat da ordenagailu bidezko odol-fluxuaren simulazioak edo CFD (*computational fluid dynamics*) simulazioak erabiltzea [4]. Izan ere, jariatzen dinamikari aditua den bat —adibidez, ingeniari mekaniko bat— gai izango litzateke kirurgialariek elkarlanean TCPC optimoa diseinatzeko.

Horrela, kirurgialariak diseinu horrekin bateragarria den ebakuntza egingo luke, eta pazientearen zirkulazio-sistema egokia dela ziurtatuko luke.

Jarraian, CFD simulazioak erabiltzen dituen adibide bat ikusiko dugu. Horretarako, bi eredu aztertuko ditugu. Bata, benetako paziente baten TCPCan oinarritutako eredia (aurrerantzean, A eredia). Bestea, A eredia bezalakoa, baina ezkerreko birika-arteriaren lotura 27 mm beherago eginda (aurrerantzean, B eredia) (ikus 3. irudia (a)). Simulazioak egiteko, benetako pazientean neurtutako odol-fluxua (ml/s) eta presioa (mmHg) erabiliko dira, eta, emaitzak analizatzeko, bi ezaugarri aztertuko dira. Batetik, TCPCan gertatzen den odol-fluxuaren energia-galera. Energia-galeraren inguruan, gogoratu dezagun bentrakulu bakarrak egiten duela lana eta TCPCa kirurgialariak sortu duen egitura bat dela; lotura modu egokian egiten ez bada, energia-galera handia gerta daiteke. Bestetik, odol-fluxuaren banaketa birika-arterietan. Garrantzitsua da odol-fluxua modu orekatuan banatzea ezkerreko eta eskuineko birika-arterien artean, bakoitzera % 50 inguru. Era berean, garrantzitsua da modu orekatuan banatzea goiko eta beheko kaba zainetatik doazen odol-fluxuak bi birika-arterietan. Esaterako, garrantzitsua da ezkerreko birika-arteriara doan % 50 inguru horretatik erdia gutxi gorabehera beheko kaba zainetik datorrena izatea eta beste erdia goikotik datorrena izatea [4].

Simulazioen emaitzak 3. irudian (b eta c) ikus daitezke. Energia-galerari dagokionez, A ereduan % 2,6ko galdera gertatzen da, eta B ereduan, berriz, % 2,2koa. Badirudi B eredia, beraz, hobea dela, baina, kaba zainetatik doazen odol-fluxuaren banaketak aztertuz gero, ikus daiteke B ereduan goiko kabatik doan odol-fluxu guztia eskuineko birika-arteriara doala eta beraz ez doala goiko kabatik doan odol-fluxu ezkerreko birikara; eta horrek arazoak eman ditzake. Horrenbestez, egokiagoa da A eredia, nahiz eta

energia-galera handiagoa izan B ereduan baino —% 2,6ko energia-galera, dena den, oso txikitzat har dezakegu—.

Horrek erakusten du kirurgialariak sortutako TCPCaren geometriak eragina duela pazientearen zirkulazio-sisteman, eta ordenagailu bidezko CFD simulazioak erabilgarri izan daitezkeela TCPC optimoa diseinatzeko. Alta bada, ugariak dira bi diziplinak, ingeniaritza eta medikuntza, CFD simulazioen birtartez uztartzen dituzten elkarlanen adibideak. Esate baterako, aurreko artikulua batean azaldu zen gibeledoko minbiziaren aurkako tratamendu batean, erradioenbolizazioan, ingeniariaren lana garrantzitsua izan zitekeela [5].

Bukatzeko, azpimarratu behar da diziplinartekotasuna, orokorrean, oso garrantzitsua eta beharrezkoa dela esparru guztietan aurrerakuntzak gerta daitezkeen. Izan ere, diziplinartekotasuna aniztasuna da, eta aniztasuna, beti, aberastasuna. ●

Erreferentziak

- [1] Liu Y., Chen S., Zühlke L., Black G. C., Choy M., Li N. eta Keavney B. D. 2019. "Global birth prevalence of congenital heart defects 1970–2017: updated systematic review and meta-analysis of 260 studies". *International Journal of Epidemiology*, 48, 455–463.
- [2] Barron D. J., Kilby M. D., Davies B., Wright J. G. C., Jones T. J. eta Brawn W. J. 2009. "Hypoplastic left heart syndrome". *Lancet*, 374, 551–564.
- [3] Fontan F. eta Baudet E. 1971. "Surgical repair of tricuspid atresia". *Thorax*, 26, 240–248.
- [4] Slesnick T. C. 2017. "Role of computational modelling in planning and executing interventional procedures for congenital heart disease". *Canadian Journal of Cardiology*, 33, 1159–1170.
- [5] Aramburu J. 2018. "Gibeledoko minbiziaren borrokan indarrak batuz". *Elhuyar*, 329, 68–72.