

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL RÉGIMEN DE FLUJO TRANSITORIO EN EL SISTEMA CARDIOVASCULAR HUMANO

Juan Mairal, Javier Murillo, Pilar García-Navarro

Tecnologías Fluidodinámicas (TFD) - I3A - Universidad de Zaragoza

Objetivos

- Obtener un modelo fluidodinámico del aparato cardiovascular al completo.
- Simular situaciones de **flujo transitorio** y cambios rápidos.

Desafíos

- Los modelos actuales están limitados a condiciones de flujo subsónicas.
- Es necesario modelar el comportamiento del fluido en el **corazón**, en **venas** y **arterias**, en las **válvulas venosas** y en los **lechos vasculares**.

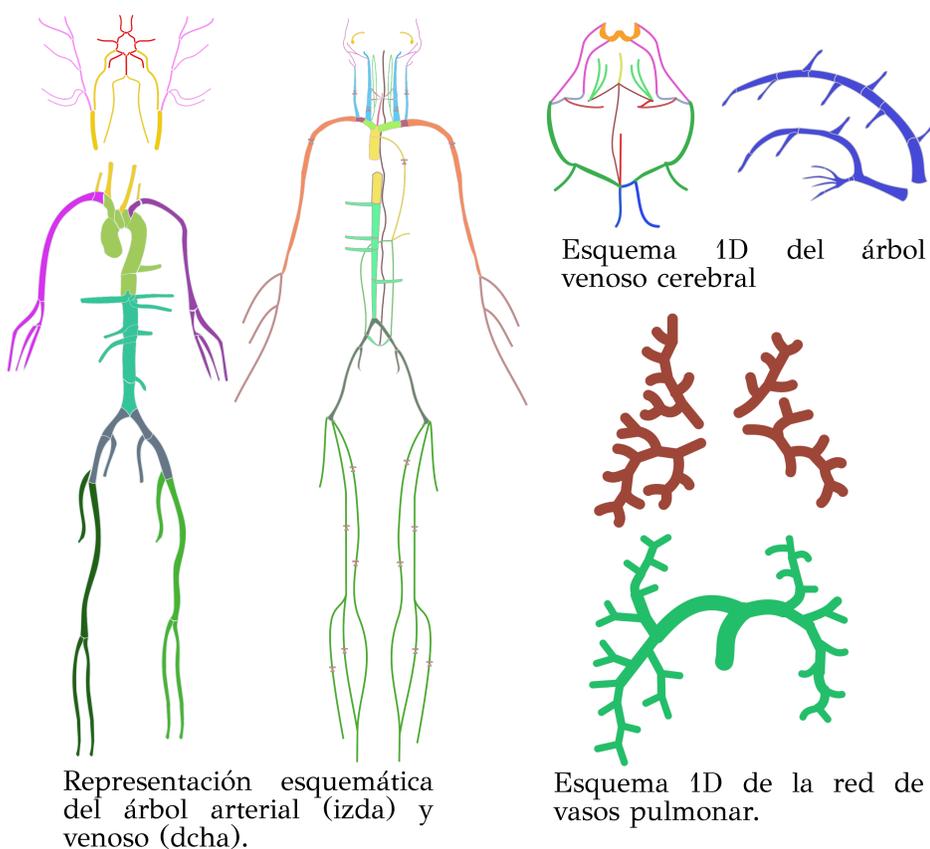
Metodología

Los vasos se representan como conductos unidimensionales de **área A** variable por las que circula un **caudal Q**. La conservación de masa y momento permite formular un sistema **hiperbólico**: [1]

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{G} \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{A}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{f}{\rho} - gA \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{pmatrix}$$

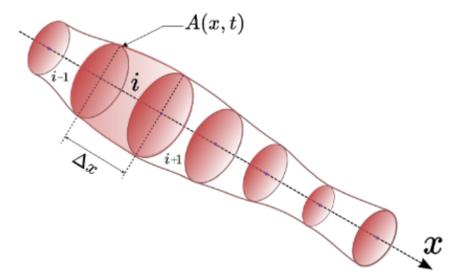
Gravedad ↗
↙ Presión ↘ Fricción

Dominio de cálculo [2]



Método numérico [1]

Las ecuaciones de los vasos se resuelven utilizando un método de volúmenes finitos explícito de primer orden.

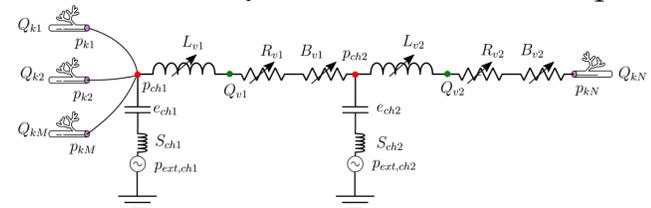


Condiciones internas [1]

Se imponen condiciones de contorno internas en las **uniones** de vasos y en las **válvulas** de las venas. Se resuelven sistemas no lineales iterativamente.

Modelos agregados [2]

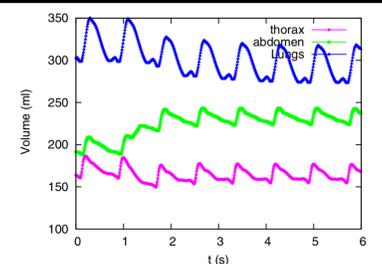
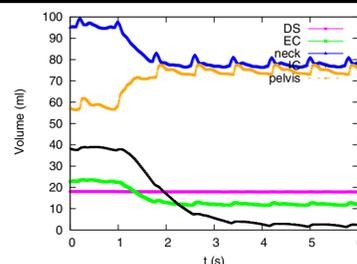
Se utilizan modelos agregados o 0-dimensionales para representar el **corazón** (diagrama) o los **lechos vasculares** que comunican arterias y venas a través de capilares.



Aplicación: Maniobra HUT (Head-up tilt) [1]

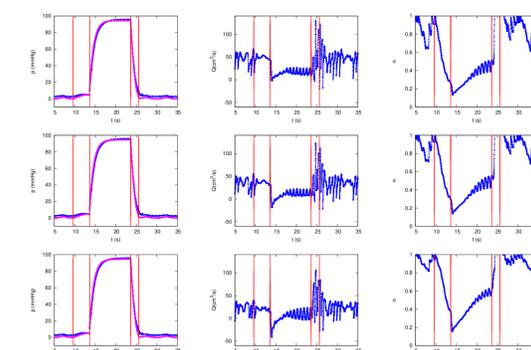
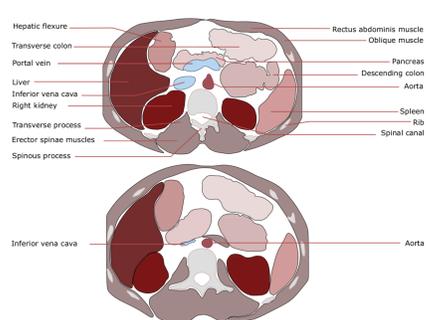
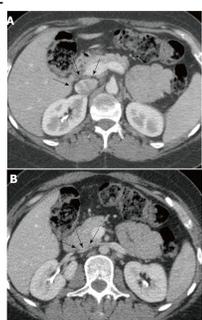
A partir de un estado estacionario (tumbado), se induce un estado **transitorio** llevando el cuerpo a posición vertical.

$$\alpha_T(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0.8 \\ \frac{\pi}{2}(t-1), & 0.8 \leq t \leq 1.8 \\ \frac{\pi}{2}, & t > 1.8 \end{cases}$$



Volumen de sangre en distintas zonas del cráneo, en el cuello y la pelvis (izda); en el tórax, el abdomen y los pulmones durante la maniobra HUT.

Aplicación: Maniobra de Valsalva



I: Inspiración forzada
II: Compresión
III: Inicio de la relajación
IV: Fin de la relajación

Resultado en distintos puntos de la vena cava inferior al simular la maniobra de Valsalva.

[1] MURILLO, Javier; GARCÍA-NAVARRO, Pilar. A solution of the junction Riemann problem for 1d hyperbolic balance laws in networks including supersonic flow conditions on elastic collapsible tubes. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no 9, p. 1658.
[2] MURILLO, Javier; GARCÍA-NAVARRO, Pilar. Numerical coupling of 0D and 1D models in networks of vessels including transient flow conditions. Application to short-term transient and stationary hemodynamic simulation of postural changes. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 2023, vol. 39, no 11, p. e3751.