

# Análisis Dinámico del Desplazamiento del Remero en la Fase Aérea del Remo de Banco Móvil

Abel Amado González Bernad

Abril 2025

## Abstract

En este trabajo se presenta una modelización física simplificada del desplazamiento del remero en la fase aérea del ciclo de remo de banco móvil. Se estudia la influencia de la cinemática del remero sobre la velocidad de la embarcación relativa al agua, proponiendo una ecuación diferencial ordinaria (EDO) que describe la dinámica del sistema remero+barco, con el objetivo futuro de optimizar la cinemática del remero para minimizar la pérdida de velocidad del conjunto.

## 1 Introducción

La fase aérea en el remo de banco móvil corresponde al desplazamiento del remero hacia popa para recuperar la posición de ataque. La correcta ejecución de esta fase resulta determinante para el rendimiento, dado que es el momento en el que la embarcación alcanza su máxima velocidad relativa al agua. Entender cómo los desplazamientos del remero afectan la velocidad del barco permite abordar su optimización desde una perspectiva físico-matemática.

## 2 Modelización Dinámica

Consideramos el sistema formado por remero y embarcación. Se definen las siguientes magnitudes:

- $m$ : masa del remero (puntual)
- $M$ : masa del barco (puntual)
- $v_{cm}$ : velocidad del centro de masas del sistema.
- $v_b$ : velocidad del barco relativa al agua.
- $v_r$ : velocidad del remero relativa al barco.

El rozamiento con el agua se modela como proporcional al cuadrado de la velocidad:

$$F_d = \frac{1}{2} C_s \rho A v_b^2 \quad (1)$$

El momento lineal del sistema es:

$$p = (M + m)v_{cm} = (M + m)v_b + mv_r \quad (2)$$

Y su derivada temporal, considerando sólo la fuerza de rozamiento, resulta:

$$\frac{dp}{dt} = F_d = (M + m)\frac{dv_b}{dt} + m\frac{dv_r}{dt} \quad (3)$$

Sustituyendo (??) en (3), obtenemos:

$$-\frac{1}{2}C_s\rho Av_b^2 = (M + m)\frac{dv_b}{dt} + m\frac{dv_r}{dt} \quad (4)$$

Lo que permite despejar la EDO de la velocidad del barco:

$$\frac{dv_b}{dt} = \frac{-1}{M + m} \left( m\frac{dv_r}{dt} - \frac{1}{2}C_s\rho Av_b^2 \right) \quad (5)$$

### 3 Cinemática del Remero

Se propone para la aceleración del remero una función polinómica:

$$\ddot{x}(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (6)$$

Con condiciones de contorno:

$$x(0) = 0, \quad x(T) = L \quad (7)$$

$$\dot{x}(0) = 0, \quad \dot{x}(T) = 0 \quad (8)$$

Integrando (6), obtenemos:

$$\dot{x}(t) = \frac{a}{4}t^4 + \frac{b}{3}t^3 + \frac{c}{2}t^2 + dt \quad (9)$$

$$x(t) = \frac{a}{20}t^5 + \frac{b}{12}t^4 + \frac{c}{6}t^3 + \frac{d}{2}t^2 \quad (10)$$

Aplicando las condiciones (7) y (8), se obtienen restricciones para los coeficientes:

$$0 = \frac{a}{4}T^3 + \frac{b}{3}T^2 + \frac{c}{2}T + d \quad (11)$$

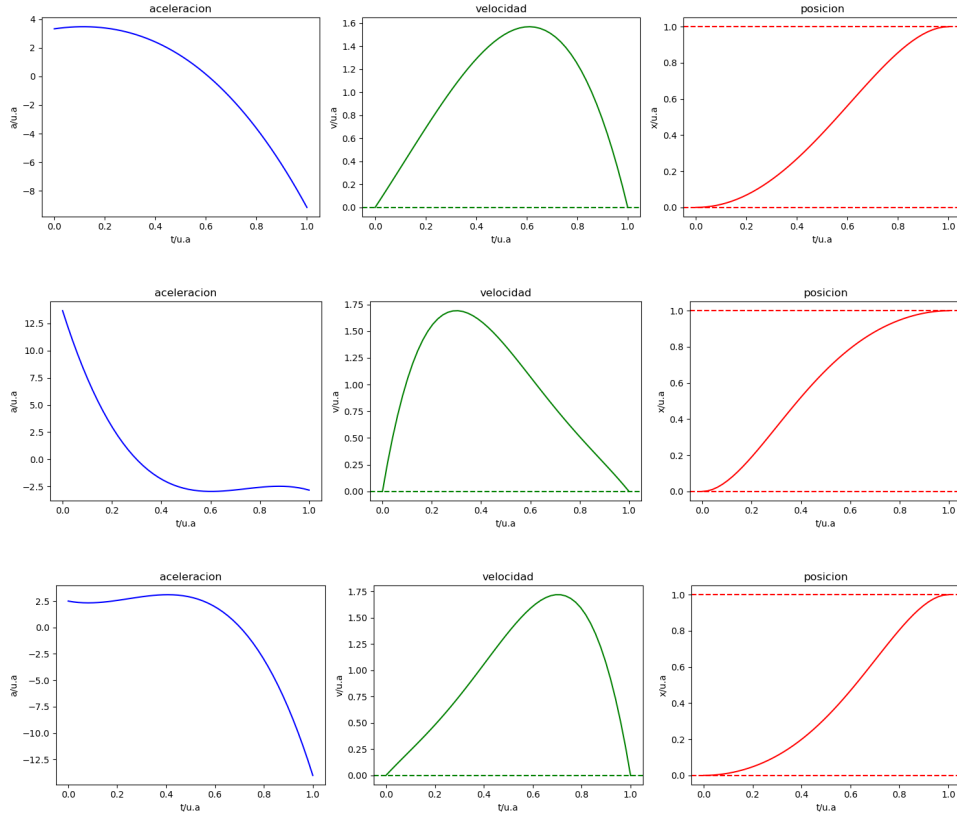
$$L = \frac{a}{20}T^5 + \frac{b}{12}T^4 + \frac{c}{6}T^3 + \frac{d}{2}T^2 \quad (12)$$

Resolviendo, se llega a:

$$c = - \left( \frac{12L}{T^3} + \frac{9}{10}T^2a + Tb \right) \quad (13)$$

$$d = - \left( \frac{T^3}{4}a + \frac{T^2}{3}b + \frac{cT}{2} \right) \quad (14)$$

De este modo, quedan como parámetros libres  $a$  y  $b$ , permitiendo ajustar distintas cinemáticas.



## 4 Acoplamiento Dinámico-Cinemático

Sustituyendo (6) en (5), resulta:

$$\frac{dv_b}{dt} = \frac{1}{M+m} \left( \frac{1}{2} C_s \rho A v_b^2 - m (at^3 + bt^2 + ct + d) \right) \quad (15)$$

La resolución numérica de (15) con la cinemática (6) parametrizada permitirá estudiar el efecto de diferentes estrategias de desplazamiento sobre la dinámica global.

TODO: Resolver esta ecuación y optimizar  $a$  y  $b$ .

## 5 Conclusión

Se ha establecido una modelización dinámica simplificada que permite estudiar el efecto de la cinemática del remero sobre la velocidad de la embarcación en la fase aérea. Este marco ofrece una base para, en futuras etapas, abordar problemas de optimización del desplazamiento a popa para reducir la pérdida de velocidad y mejorar el rendimiento.