

Generación mediante represas de mareas

Las represas de marea constituyen una forma de generación de energía renovable que aprovecha la diferencia de altura entre la marea alta y la marea baja. Funcionan como centrales hidroeléctricas, utilizando turbinas de tipo bulbo que permiten el paso bidireccional del agua (ver Figura 1). Un ejemplo emblemático es la planta mareomotriz de La Rance (Francia), que cuenta con 24 turbinas bulbo de 10 MW cada una [1]. Estas plantas pueden operar en modos unidireccional, bidireccional y con bombeo asistido.

Hill Chart y el comportamiento de la turbina

Las turbinas bulbo se caracterizan mediante curvas de operación conocidas como *Hill Charts* (ver Figura 2). Estos diagramas relacionan el rendimiento de la turbina (η) con el caudal específico (Q_{11}), la velocidad de rotación específica (n_{11}), y el ángulo de ataque de los álabes (β). La potencia mecánica extraída por la turbina puede expresarse como:

$$P_t = \rho g D^2 Q_{11} (n_{11}, \beta) \eta (n_{11}, \beta) (\sqrt{H})^3$$

Y el torque, como:

$$T_t = \rho g D^3 \frac{60 Q_{11} (n_{11}, \beta) \eta (n_{11}, \beta)}{2 \pi n_{11}} (\sqrt{H})^3$$

Donde:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}, \quad n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}}$$

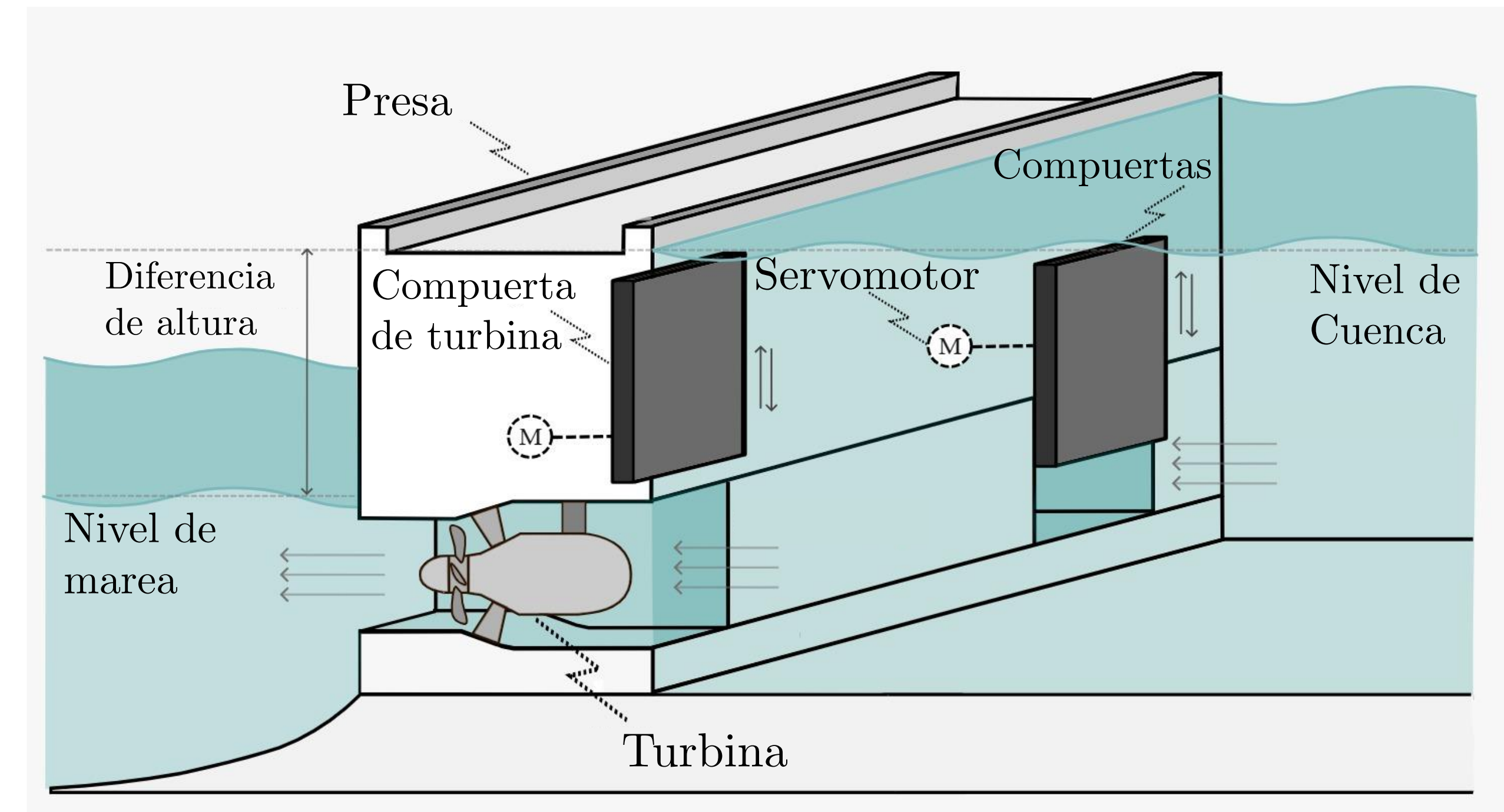


Figura 1: Esquema de represa por marea [2].

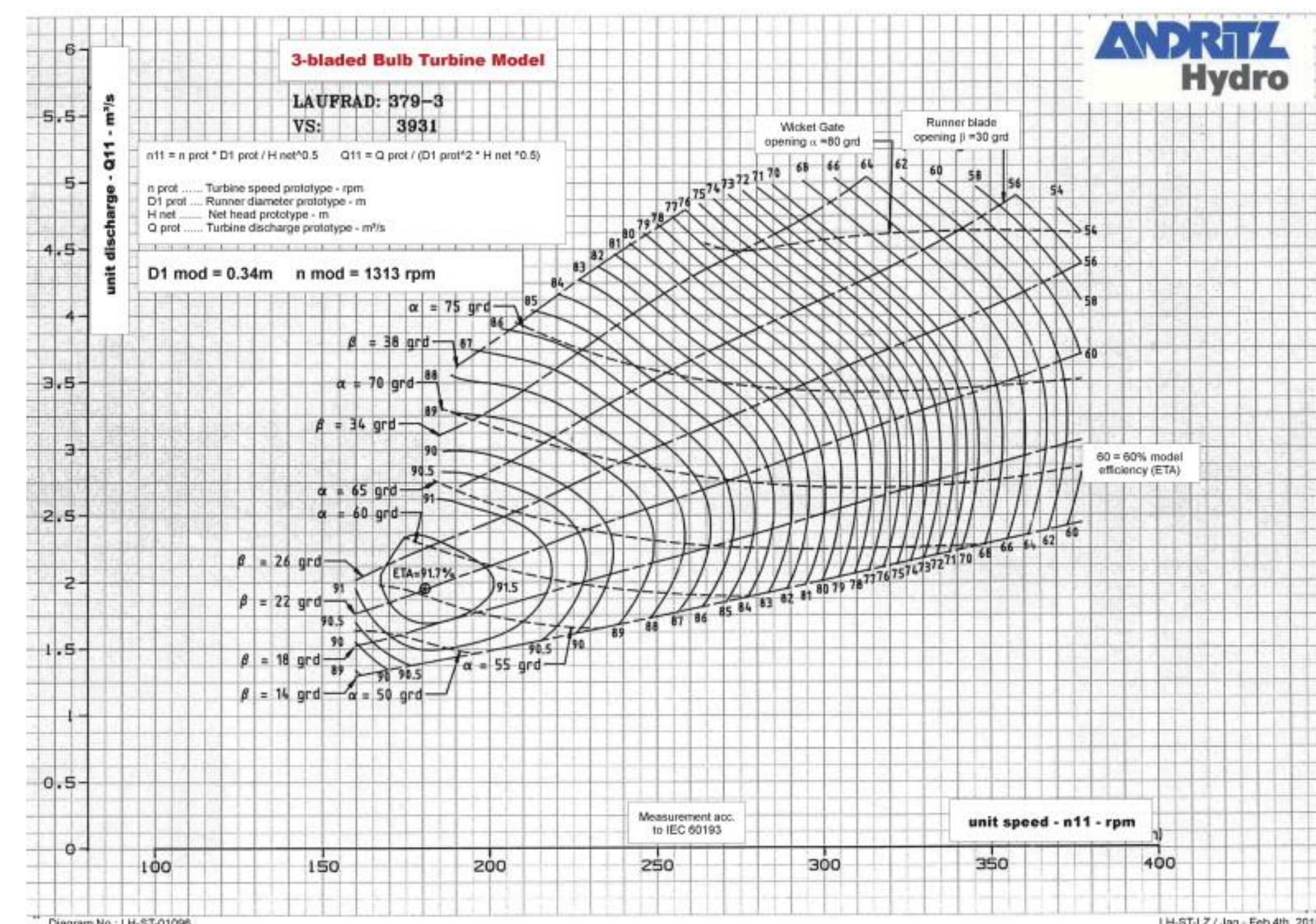


Figura 2: Hill Chart de la turbina bulbo utilizada [3].

Diseño del control

Se propone un sistema de control para turbinas bulbo instaladas en presas de marea, considerando el caso más simple de generación unidireccional y álabes fijos. El objetivo principal es maximizar la potencia generada ajustando la velocidad de rotación según las condiciones de marea. El modelo dinámico del sistema es:

$$J_{total} \dot{\Omega} = T_t - T_g$$

Donde T_g (torque del generador) es la variable de control, ya que puede ajustarse con una dinámica significativamente más rápida que la del sistema. La velocidad de referencia se construye a partir de:

$$\Omega_{ref} = \frac{\sqrt{H} n_{11maxP} 2 \pi}{D 60}$$

Resultados y discusión

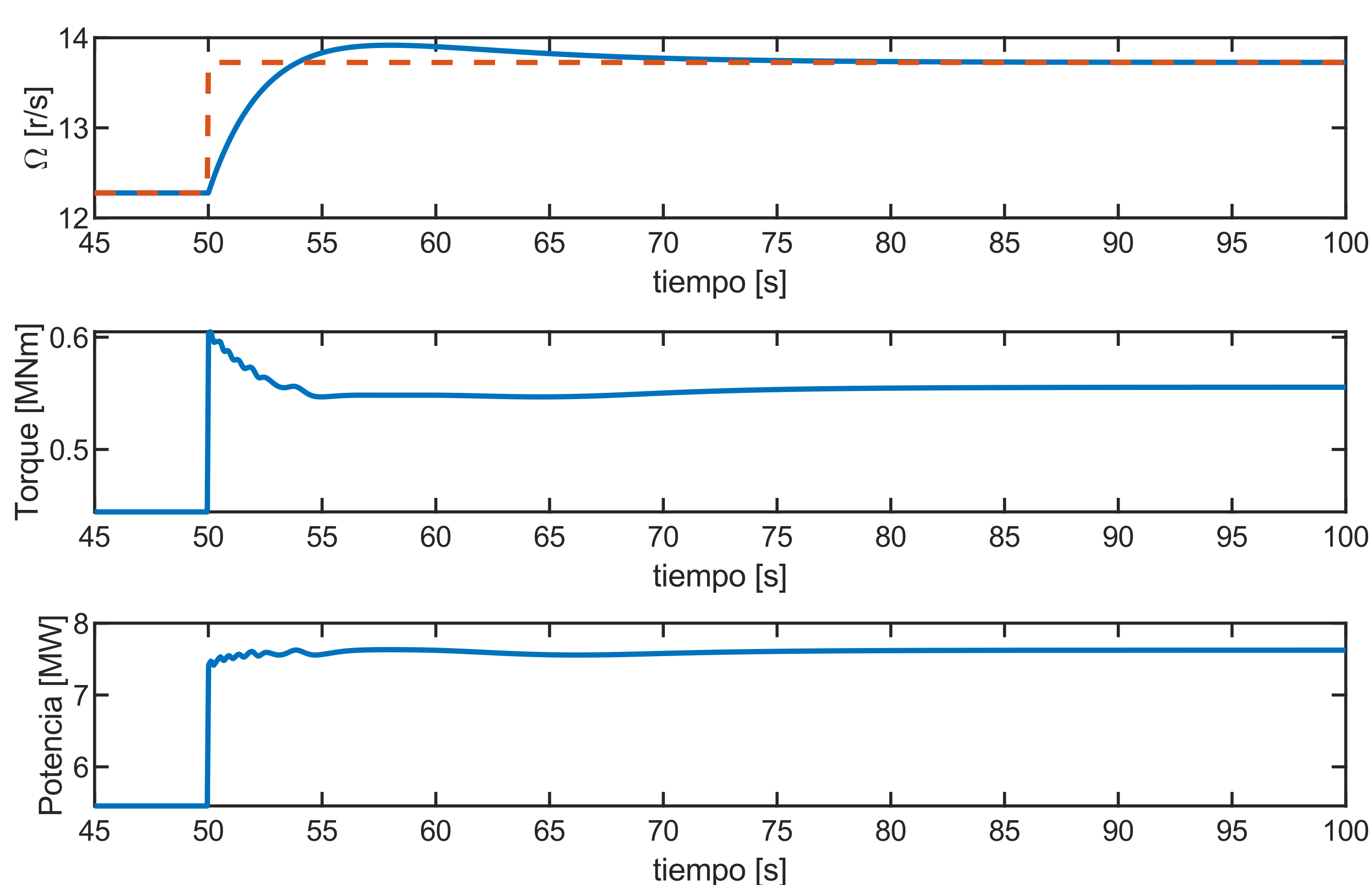


Figura 3: Resultado de simulación del modelo con PI sintonizado.

En la Figura 3 se muestra la respuesta temporal ante un cambio en la altura neta de $H = 4$ a $H = 5$, lo que implica una modificación en la velocidad de referencia. Los resultados indican que el sistema es capaz de seguir dicha referencia de forma eficiente y estable, logrando una extracción de potencia cercana al máximo teórico calculado mediante la expresión de P_t .

Conclusiones y trabajo futuro

Se modeló un sistema de generación con turbinas bulbo y se analizaron sus características mediante un *Hill Chart*. Se diseñó un control de velocidad variable que mejora la eficiencia operativa al adaptar la velocidad a las condiciones del recurso. Este enfoque sienta las bases para implementar un control supervisor que optimice las referencias de caudal o velocidad, maximizando la energía extraída y garantizando estabilidad bajo distintos escenarios.

Bibliografía

- [1]. Charlier, R. H. (2007). Forty candles for the Rance River TPP tides provide renewable and sustainable power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 2032-2057.
- [2]. Skierski, A., Faedo, N., & Ringwood, J. V. (2024). Optimisation and control of tidal range power plants operation: Is there scope for further improvement?. *Energy Conversion and Management*: X, 100657.
- [3]. Aggidis, G. A., & Feather, O. (2012). Tidal range turbines and generation on the Solway Firth. *Renewable energy*, 43, 9-17.