

Incorporación del concepto de coeficiente de potencia extendido en modelos dinámicos de simulación de turbinas hidrocínéticas operando en canales de agua

Incorporation of the concept of extended power coefficient in dynamic simulation models of hydrokinetic turbines operating in water channels

Manuel Rico-Secades ^{a1*}, Antonio Javier Calleja-Rodríguez ^{a2}, Aitor Fernández-Jiménez ^{a3}, Eduardo Álvarez-Álvarez ^{a4}, Fher Said Macedo-García ^{b1}, Jaime Arau-Roffiel ^{b2}

^aUniversidad de Oviedo. Centro Universitario de Investigación y Desarrollo del Agua (CUIDA), Campus de Mieres 33600 Mieres, Asturias, Spain,

^bTecnológico Nacional de México, CENIDET, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

E-mail: ^{a1} mrico@uniovi.es, ^{a2} calleja@uniovi.es, ^{a3} fernandezaitor@uniovi.es, ^{a4} edualvarez@uniovi.es, ^{b1} d22ce017@cenidet.tecnm.mx, ^{b2} jaime.ar@cenidet.tecnm.mx

*Autor para correspondencia

Recibido: 24/07/2025

Aceptado: 20/10/2025

Publicado: 31/10/2025

Citar como: Rico-Secades, M., Calleja-Rodríguez, A.J., Fernández-Jiménez, A., Álvarez-Álvarez, E., Macedo-García, F.S., Arau-Roffiel, J. 2025. Incorporation of the concept of extended power coefficient in dynamic simulation models of hydrokinetic turbines operating in water channels. *Ingeniería del agua*, 29(4), 296-314. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.24365>

RESUMEN

El trabajo incide en el concepto de coeficiente de potencia extendido (C_{px}) desarrollado por los autores y que permite describir de forma correcta la capacidad de extracción de energía y sus límites para turbinas hidrocínéticas operando en canales de agua. En el trabajo se incorpora el concepto a un modelo dinámico de simulación del conjunto turbina-canal de agua (implementado en el simulador abierto y gratuito LTSpice) que permite predecir el funcionamiento del sistema con todos los elementos del sistema (elementos hidráulicos, mecánicos y electrónicos). Esta ponencia resume algunos de los conceptos desarrollados por los autores en trabajos previos y ofrece casos de uso que permiten hacer uso del modelo dinámico desarrollado el cual se pone a disposición de la comunidad académica en abierto.

Palabras clave | Límites del canal de agua; modelo LTSpice; coeficiente de potencia extendido; factor de bloqueo.

ABSTRACT

The work focuses on the concept of extended power coefficient (C_{px}) developed by the authors, which allows for the accurate description of energy extraction capacity and its limits for hydrokinetic turbines operating in water channels. The paper incorporates the concept into a dynamic simulation model of the turbine-water channel assembly (implemented in the open and free simulator LTSpice) that allows the operation of the system to be predicted with all the elements of the system (hydraulic, mechanical, and electronic elements). This paper summarizes some of the concepts developed by the authors in previous works and offers use cases that allow the dynamic model developed to be used, which is made available to the academic community in open access.

Key words | Water channel limits; LTSpice model; extended power coefficient; blocking factor.

INTRODUCCIÓN

El uso de turbinas hidrocinéticas en canales de agua es un tema de actualidad (Güney y Kaygusuz, 2010; Khan *et al.*, 2009; Palacios *et al.*, 2017; Romero-Menco *et al.*, 2022; Yuce y Moratoglu, 2015; Amezcua-García *et al.*, 2021) con gran impacto en microrredes eléctricas en muy diversas aplicaciones en lo que ha venido en denominarse “Kinetic Smart Grids – KSG” (Macedo-García *et al.*, 2023; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2018; Brun *et al.*, 2013; Goundar y Ahmed, 2014) y donde el efecto del bloqueo (Blanco-Marigorta y Gharib-yosry, 2021) tiene una gran relevancia operacional. La no existencia de modelos de simulación para representar la operación de estas turbinas en canales de agua (Macedo-García, 2023), motiva la propuesta de desarrollar un modelo completo de un sistema de generación de energía en base que permita la implementación del mismo con ayuda de un simulador genérico (en este trabajo LTSpice al tratarse de una herramienta gratuita de software libre) (Devices n.d., 2023; Rico-Secades, 2025). La Figura 1 ilustra de forma esquemática los objetivos completos del trabajo planteado.

A partir de los parámetros del canal de agua, sus dimensiones, velocidad de entrada y altura de la lámina de agua a la entrada del canal, se modela la potencia hidrocinética extraíble como suma de la energía cinética y energía de altura (potencial e hidrostática) disponible en la lámina de entrada de agua previa a la turbina. También se ha obtenido y modelado un *límite intrínseco teórico* para esta potencia extraíble de forma analítica a partir de las ecuaciones del sistema.

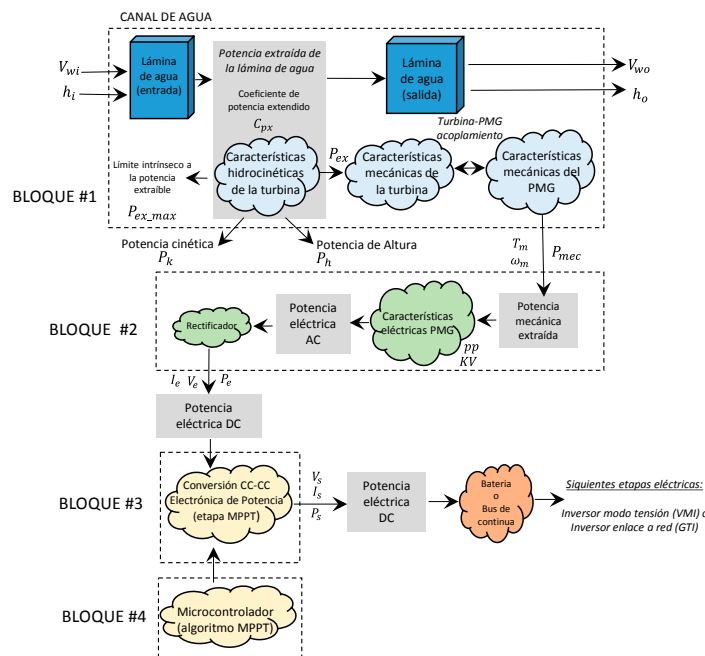


Figura 1 | Vista general de todos los elementos de un sistema de generación de energía basado en turbinas hidrocinéticas en un canal de agua.

La caracterización de la turbina hidrocinética se realizará a partir del denominado Coeficiente de Potencia extendido (C_{px}) que introduciremos y justificaremos en el trabajo para generalizar la modelización de la energía extraíble por la turbina al caso de un canal de agua, extendiendo de este modo el tradicional concepto de Coeficiente de Potencia (C_p) aplicado habitualmente a turbinas operando en campo abierto. En el trabajo se ofrece la obtención de este coeficiente de potencia extendido para distintas condiciones de bloqueo en el canal a partir de los valores del coeficiente de potencia tradicional (C_p).

El modelo hidrocinético propuesto, junto a los parámetros mecánicos básicos de la turbina, nos permitirán obtener la potencia mecánica extraída y aplicada al eje de la turbina de forma instantánea (Bloque #1). De una forma análoga, incluye las características eléctricas y mecánicas del PMG (Generador de Imanes Permanentes) que permitirá modelar la transferencia de potencia mecánica del eje de la turbina al eje del PMG y a su vez modelar la potencia eléctrica (alterna y trifásica) a la salida del PMG. Los parámetros clásicos pares de polos (pp) y ganancia de tensión (KV) del PMG han sido incorporados en la Figura 1.

A la salida del rectificador trifásico, la potencia eléctrica en alterna se convierte en potencia eléctrica en continua. A pesar de que el modelo completo del PMG y del rectificador están disponibles en LTSpice, el presente trabajo propone un modelo promediado más ágil del conjunto PMG-rectificador trifásico, considerando que las constantes de tiempo mecánicas e hidráulicas son varios ordenes de magnitud más lentas que las eléctricas y ello nos permite considerar la respuesta dinámica de los sistemas eléctricos instantánea frente a los mecánicos e hidráulicos (Bloque #2).

El trabajo se completaría con la incorporación de un modelo generalizado y promediado de la etapa de electrónica de potencia que representa al convertidor CC-CC que actúa como etapa MPPT electrónica (Bloque #3) y también con la incorporación del algoritmo de control de búsqueda del punto de máxima potencia (algoritmo MPPT) que en la práctica estaría realizado con ayuda de una etapa microcontrolador (MCU) (Bloque #4). El desarrollo y explicación de los bloques #2, #3 y #4 no están incluidos en este documento y se reservan para futuros escritos. En todo caso, los autores del trabajo ponen a disposición el modelo completo implementado en software libre y gratuito del sistema de generación de energía completo con todos sus elementos (hidráulicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos) así como de la implementación práctica de distintos algoritmos MPPT.

METODOLOGÍA

La energía intrínsecamente extraíble de un canal de agua

Con independencia del método utilizado para extraer energía del canal de agua (turbina o conjunto de turbinas), las dimensiones y características del propio canal de agua imponen limitaciones importantes a la cantidad de energía que se puede extraer del mismo (Patel *et al.*, 2019), que se derivan de las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del canal de agua y que han sido recopiladas en este trabajo.

Energía disponible y extraíble en un canal de agua

Consideramos un canal de agua de sección rectangular, donde la base del canal tiene una dimensión b y el fluido discurre a una velocidad de entrada V_{wi} y con una altura de entrada h_i . Siguiendo los desarrollos incluidos en el apéndice A, se puede disponer de una expresión analítica para la potencia disponible en una lámina de agua a la entrada del canal de agua, como suma de su potencia de altura y de su potencia cinética.

$$P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot V_{wi}^2 + \rho \cdot Q \cdot g \cdot h_i \quad (1)$$

La Figura 2 muestra como de la potencia disponible en la lámina de agua de entrada (P_i) se extrae una determinada potencia (P_{ex}) dejando a la lámina de agua con una potencia disponible a la salida menor (P_o). La suma de la potencia extraída (P_{ex}) y la de salida (P_o) debe de ser igual a la potencia disponible a la entrada en la lámina de agua (P_i).

$$P_i = P_o + P_{ex} \quad (2)$$

La velocidad y altura del agua a la salida (V_{wo} y h_o) se verán afectados.

De acuerdo con las expresiones obtenidas en el apéndice A para la potencia cinética y la potencia de altura de la lámina de agua, se puede plantear una expresión analítica para la potencia extraída por la turbina (P_{ex}) en función de velocidades y alturas de entrada y de salida de una lámina de agua antes del sistema de extracción de energía (entrada) y posterior al sistema de extracción de energía (salida).

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot (V_{wi}^2 - V_{wo}^2) + \rho \cdot Q \cdot g \cdot (h_i - h_o) \quad (3)$$

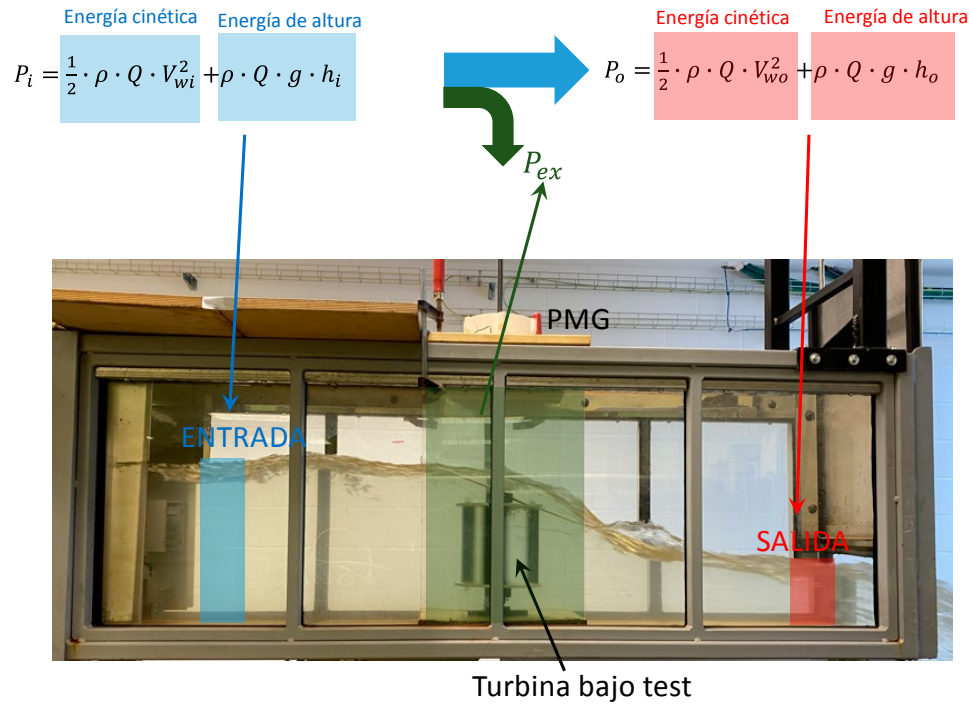


Figura 2 | Balance de Potencias: Potencia extraíble del canal de agua. Cortesía GIH-EP-Mieres.

Como el caudal es constante a lo largo del canal ($Q_{wi}=Q_{wo}=Q$) podemos obtener que $h_o = h_i \cdot (V_{wi}/V_{wo})$, teniendo que para condiciones de entrada constantes en la lámina de agua ($V_{wi}=cte$ y $h_i=cte$), la potencia extraída por la turbina (P_{ex}) tiene una relación analítica directa con la velocidad del agua después de la turbina (V_{wo}).

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot \left(V_{wi}^2 - V_{wo}^2 \right) + \rho \cdot Q \cdot g \cdot \left(h_i - h_i \cdot \frac{V_{wi}}{V_{wo}} \right) \quad (4)$$

Esta función está representada en la Figura 3 para unas determinadas condiciones de entrada constantes, siendo muy importante destacar que existe un límite intrínseco a la potencia extraíble por la turbina (P_{ex_max}) que se produce a una determinada velocidad de agua a la salida (V_{wo_opt}) y que está fijado únicamente por las características del canal de agua.

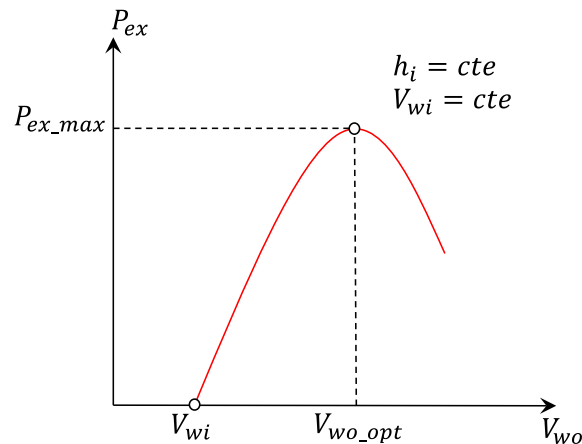


Figura 3 | Límite intrínseco a la potencia extraíble de un canal de agua.

El valor de esta potencia intrínseca extraíble máxima (P_{ex_max}) y su correspondiente velocidad de salida óptima (V_{wo_opt}) pueden obtenerse analíticamente sin más que igualar a cero la derivada de la P_{ex} respecto a la V_{wo} . Los detalles no han sido incluidos en el trabajo. Como resultado, se llega a la expresión analítica:

$$V_{wo_opt} = (g \cdot h_i \cdot V_{wi})^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

De forma equivalente se obtiene la altura de lámina de agua de salida óptima (h_{o_opt}) para la cual obtenemos el máximo P_{ex_max} previamente mencionado.

$$h_{o_opt} = h_i \cdot \frac{V_{wi}}{V_{wo_opt}} \quad (6)$$

Es interesante observar que a medida que extraemos energía de la lámina de agua, la potencia cinética aumenta y, por el contrario, la potencia de altura disminuye, pudiendo afirmar que en un canal de agua la energía la extraemos substancialmente de la potencia de altura de la lámina de agua. Resulta interesante enfatizar, como el número Froude (Fr) (para un canal rectangular como es este caso) en condiciones subcríticas ($Fr < 1$) a la entrada de la lámina de agua, llega a condiciones de flujo crítico ($Fr = 1$) en la lámina de agua de salida, para el punto de máxima extracción de energía (Figura 4).

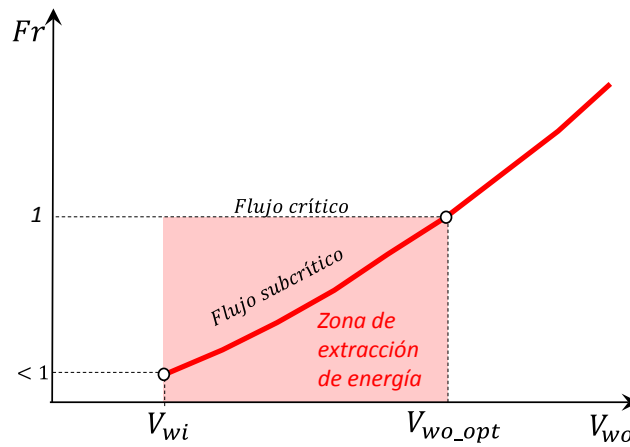


Figura 4 | Evolución de número de Froude (Fr) durante el proceso de extracción de energía.

Se dispone así de una expresión analítica para la potencia extraída máxima (P_{ex_max}) extraíble en un canal de agua en condiciones de entrada constantes.

$$P_{ex_max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot (V_{wi}^2 - V_{wo_opt}^2) + \rho \cdot Q \cdot g \cdot \left(h_i - h_i \cdot \frac{V_{wi}}{V_{wo_opt}} \right) \quad (7)$$

La expresión tiene una peculiaridad interesante que se recoge en la Figura 5, que es la existencia de un caudal óptimo de trabajo del canal para cada altura de entrada de la lámina de agua (h_i). Es decir, la máxima potencia extraíble por la turbina (P_{ex_max}) se maximiza, a su vez (es decir, un máximo de máximos), para una determinada velocidad de entrada del agua (V_{wi_opt}). Esto indica la existencia de un caudal óptimo para cada altura de entrada de la lámina de agua, que permitiría maximizar la potencia extraíble máxima del canal. Queda pendiente para futuros trabajos la posibilidad de obtener analíticamente este caudal óptimo (Q_{opt}), derivando la expresión analítica disponible de la P_{ex_max} respecto a la velocidad de entrada del fluido (V_{wi}) manteniendo constante la altura de entrada de la lámina de agua ($h_i = cte$).

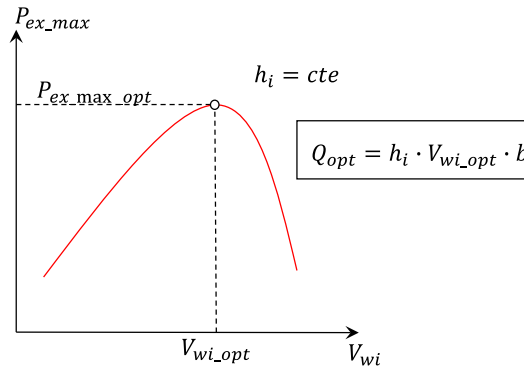


Figura 5 | Caudal óptimo del canal (Q_{opt}) para cada altura de lámina de agua de entrada (h_i).

Operación de la turbina hidrocinética en el canal de agua: El bloqueo

Es bien conocido que la potencia que se puede extraer mediante una turbina hidrocinética en un canal de agua aumenta notablemente en condiciones de bloqueo respecto a la obtenible en campo abierto (Blanco-Marigorta y Gharib-Yosry, 2021; Kinsey y Dumas, 2017), existen varios trabajos y experimentos que avalan esta afirmación bien conocida. La Figura 6 presenta una turbina pequeña en un canal de agua muy amplio, donde las condiciones de bloqueo son muy bajas, vemos que el área de la turbina ($A_{turbine}$) es mucho menos que el área del canal ($A_{channel}$). La misma Figura 6 muestra el mismo canal en condiciones de bloqueo muy elevadas, donde $A_{turbine}$ y $A_{channel}$ son comparables. En este trabajo utilizaremos el conocido factor de bloqueo (K_b) para poder cuantificar este grado de bloqueo de forma analítica.

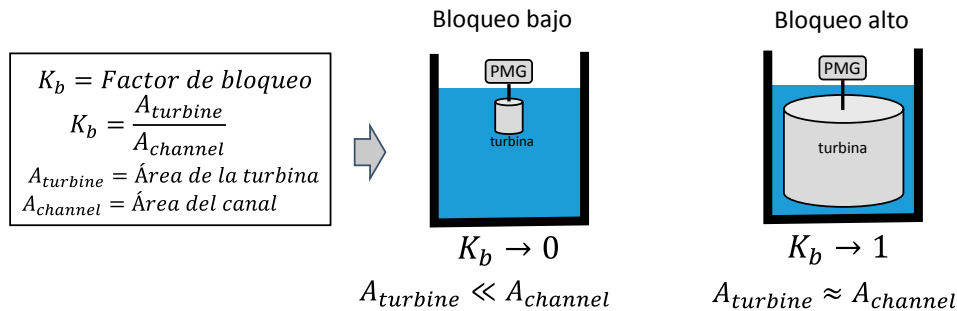


Figura 6 | El bloqueo en un canal de agua y el factor de bloqueo (K_b).

Si K_b es mucho menor que 1, el bloqueo es muy bajo y podríamos considerar la turbina operando en campo abierto (en la práctica se considera campo abierto para valores de K_b menores de 0.3). Por el contrario, si K_b tiende a 1 el bloqueo es elevado y las teorías de campo abierto dejan de ser de aplicación, al extraer energía principalmente de la energía de altura del fluido. Se sabe que, en los casos de bloqueo elevado, el coeficiente de potencia clásico (C_p) referido únicamente a la energía cinética del fluido y considerando únicamente el área de la turbina ($A_{turbine}$) pierde el sentido físico de eficiencia de la turbina que tiene en campo abierto. Los modelos disponibles habitualmente en los simuladores eléctricos clásicos (Simulink, PSIM y LTSpice) están basados en el uso de este coeficiente de potencia clásico (C_p) y pensados para campo abierto, encontrándonos con un vacío de herramientas de simulación para validación de sistemas de generación de energía en canales de agua, que es donde trata de situarse este trabajo. De la propia definición de este coeficiente se desprende en primer lugar que solo tiene en cuenta la potencia cinética del agua y además solo considera en su cálculo el área de barrido de la turbina ($A_{turbine}$).

$$C_p = \frac{P_{ex}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turbine} \cdot V_{wi}^3} \quad (8)$$

La Figura 7 muestra la habitual gráfica para el coeficiente de potencia tradicional obtenido para un canal de agua con un determinado factor de bloqueo (K_b), frente al convencional resultado obtenido en campo abierto o en condiciones de bloqueo muy bajas (K_b mucho menor que 1). Se observa en primer lugar el desplazamiento de TSR tanto en vacío (TSR_{no_load}) como en el punto de máxima potencia MPP (TSR_{opt}) hacia valores más elevados. Cuanto mayor sea el factor de bloqueo (K_b) mayor será el desplazamiento del TSR de operación de la turbina. Un segundo efecto es el importante aumento del coeficiente de potencia a medida que aumenta el bloqueo del canal, pudiendo superarse fácilmente los valores del conocido límite de Betz (Betz, 1920) con valores de bloqueo moderados (curva azul en la Figura 7) e incluso valores mucho mayores que la unidad con bloqueos elevados (curva verde en la Figura 7). Todo ello debido a que la energía extraíble en un canal de agua depende más de la energía de altura del agua que de la propia energía cinética del fluido, mucho menor en magnitud. Se hace necesario redefinir el coeficiente de potencia para su aplicación en canales de agua y no perder el sentido físico del mismo; por ello hemos introducido a efectos de modelado de la turbina el coeficiente de potencia extendido (C_{px})

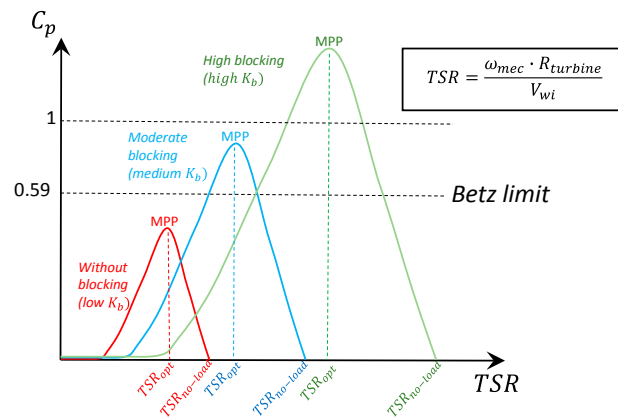


Figura 7 | El coeficiente de potencia clásico en un canal de agua con bloqueo.

Definimos el coeficiente extendido (C_{px}) como el cociente entre la potencia extraída por la turbina (P_{ex}) respecto a la potencia disponible en la lámina de entrada del canal (P_i); esto facilitará la realización del modelo de la turbina extensible a canales de agua, conservando además el sentido físico de este nuevo coeficiente de potencia extendido (C_{px}) como rendimiento de la extracción de energía, con lo cual para cualquier turbina sus valores están comprendidos entre 0 y 1. Además, debemos enfatizar, que al igual que sucede en la teoría de Betz (Betz, 1920) para campo abierto, en un canal de agua existe un límite a la potencia extraíble y, por lo tanto, existe también un límite para el coeficiente de potencia extendido (C_{px_max}) que se puede obtener analíticamente a partir de las dimensiones del canal, la altura y velocidad de agua a la entrada de mismo.

$$C_{px} = \frac{P_{ex}}{P_i} \quad (9)$$

$$\rightarrow C_{px_max} = \frac{P_{ex_max}}{P_i} \quad (10)$$

Llegados a este punto podríamos incluso cuestionar la propia denominación de “turbina hidrocínética”, cuando la turbina opera en un canal de agua, en la medida de que realmente no extraemos energía de la energía cinética de la lámina de agua sino de la energía de altura de esta. En el trabajo mantendremos la denominación de “hidrocínética” pero dejamos abierto a futuro una discusión sobre un posible calificativo más adecuado para este tipo de turbinas.

La Figura 8 ilustra como el coeficiente de potencia clásico (C_p) se ha evolucionado hacia este nuevo coeficiente de potencia extendido (C_{px}) que dependerá en cada momento de las condiciones de bloqueo del canal de agua. La curva del coeficiente de potencia clásico se puede obtener bien mediante simulación CFD (Contreras *et al.*, 2018; Espina-Valdés *et al.*, 2022; Gharib *et al.*, 2021; Meana-Fernández, 2017) bien mediante ensayo, pero siendo válida únicamente en campo abierto. En canales de agua con condiciones de bloqueo esta curva de rendimiento cambia y es distinta para cada valor de coeficiente de bloqueo con el que opere la turbina (K_b). Esta consideración es muy importante, ya que el coeficiente de bloqueo (K_b) puede cambiar dinámicamente en el

canal de agua simplemente al cambiar la altura de la lámina de agua de entrada (h_i), lo cual dificulta la realización de ensayos y la validación de estrategias de control y de operación de las turbinas dentro de canales de agua.

Se hace necesario disponer de una estimación dinámica e instantánea de los parámetros básicos de este nuevo coeficiente de potencia para cada condición de bloqueo dada en el canal de agua. Para ello este modelo se basa en los trabajos de Werle (Werle, 2010). La idea es realizar una aproximación del valor de la potencia extraída por la turbina en el canal de agua con bloqueo como si trabajara en campo abierto con la nueva velocidad de fluido equivalente que hemos denominado $V_{wi_of_eqv}$ (Figura 8). De esta forma, la potencia que extraería la turbina tanto en campo abierto como en el canal de agua en condiciones de bloqueo operando en ambos casos en el punto MPP, sería:

$$P_{ex_tur_mpp} = C_{p_mpp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turbine} \cdot V_{wi_of_eqv}^3 \quad (11)$$

Una primera aproximación a esta velocidad equivalente ($V_{wi_of_eqv}$) se deriva de la idea de que el caudal Q es constante en cualquier punto del canal de agua y el fluido debe aumentar su velocidad como consecuencia del área ocupada por la turbina y se obtiene por lo tanto una aproximación a la velocidad en la periferia de la turbina en flujo bloqueado (Werle, 2010).

$$Q = \text{constante} \rightarrow A_{channel} \cdot V_{wi} = (A_{channel} - A_{turbine}) \cdot V_{wi} \quad (12)$$

De donde puede obtenerse:

$$V_{wi_of_eqv} = \frac{V_{wi}}{1 - K_b} \quad (13)$$

Se puede calcular entonces el valor de coeficiente de potencia extendido en el punto de máxima potencia (MPP) (C_{px_mpp}).

$$C_{px_mpp} = \frac{P_{ex_tur_mpp}}{P_i} \quad (14)$$

De igual forma, también se puede realizar una estimación aproximado de los nuevos valores de TSR con bloqueo, tanto en vacío ($TSR_{b_no_load}$) y en el punto MPP (TSR_{b_mpp}), considerando esta nueva velocidad equivalente en campo abierto:

$$TSR_{b_no_load} = \frac{TSR_{no_load}}{1 - K_b} \quad (15) \quad \text{y} \quad TSR_{b_mpp} = \frac{TSR_{mpp}}{1 - K_b} \quad (16)$$

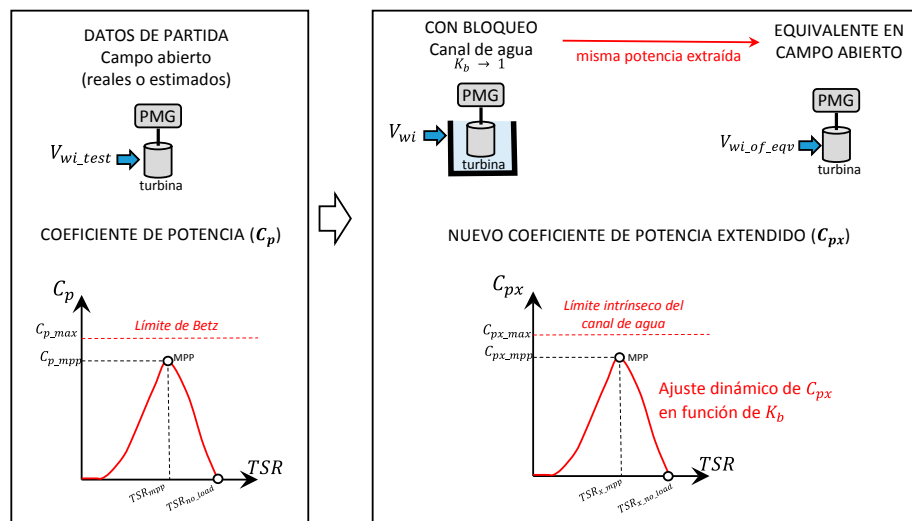


Figura 8 | El coeficiente de potencia clásico (C_p) respecto al extendido (C_{px}).

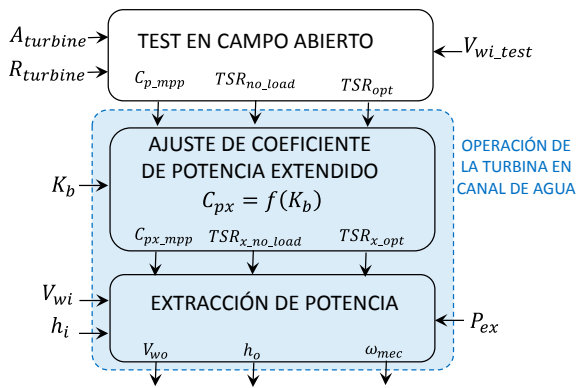
Como curiosidad hay que indicar que existe un valor del factor de bloqueo máximo (K_{b_max}) que nos permitiría teóricamente extraer la máxima potencia intrínseca del canal de agua. Se obtiene de la expresión que iguala la $P_{ex_tur_mpp}$ con la P_{ex_max} , es decir:

$$P_{ex_max} = C_{p_mpp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turbine} \cdot \left(\frac{V_{wi}}{1 - K_{b_max}} \right)^3 \quad (17)$$

En la práctica, la realización de un ensayo en campo abierto de una turbina hidrocinética, para obtener los parámetros básicos del coeficiente de potencia clásico (C_p) puede resultar en muchos casos de realización compleja. Es más realizable y sencillo estimar estos parámetros en un canal de agua de test, en condiciones de trabajo controladas. Así la Figura 9 recoge estas dos alternativas para la obtención de los parámetros básicos del coeficiente de potencia clásico (C_{p_mpp} , TSR_{mpp} , TSR_{no_load}), necesarios para realizar el ajuste del coeficiente de potencia extendido (C_{px}) en cualquier condición de bloqueo. Directamente mediante ensayo en campo abierto o indirectamente mediante ensayo en un canal de agua de test.

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA EXTENDIDO (C_{px})

(a) En campo abierto



(b) En canal de agua de test

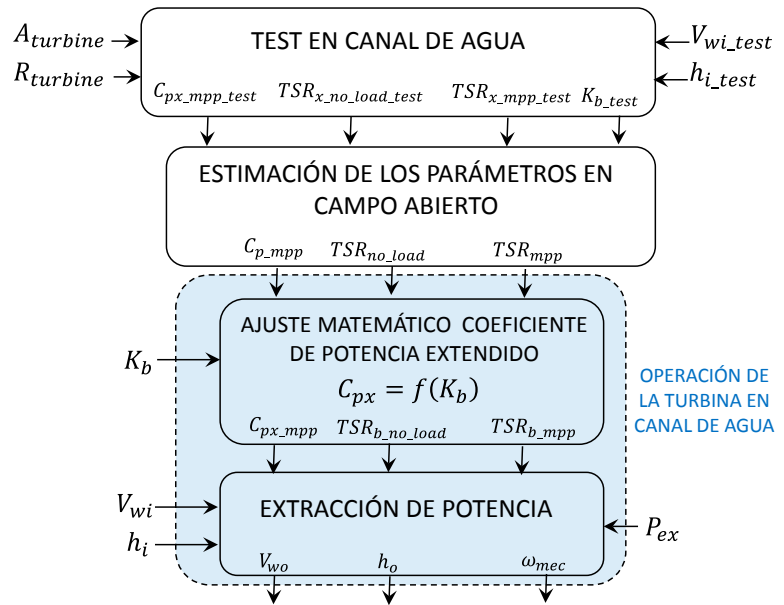


Figura 9 | Alternativas de obtención del coeficiente de potencia extendido (C_{px}).

El ajuste matemático de tipo exponencial implementado en el simulador para obtener la curva completa del coeficiente de potencia extendido C_{px} se recoge en la Figura 10. La función matemática de ajuste exponencial para el coeficiente de potencia extendido C_{px} ha sido propuesta por el propio grupo investigador motivada por la forma característica de los datos obtenidos en los ensayos en el canal de agua de distintas turbinas y ha sido validado mediante ensayos de laboratorio (Rico-Secades *et al.*, 2025). El ajuste de C_{px} incluye tanto la parte a la derecha del punto MPP (desde el punto de vacío hasta el punto MPP), como a la izquierda del punto MPP (desde turbina parada hasta el punto MPP).

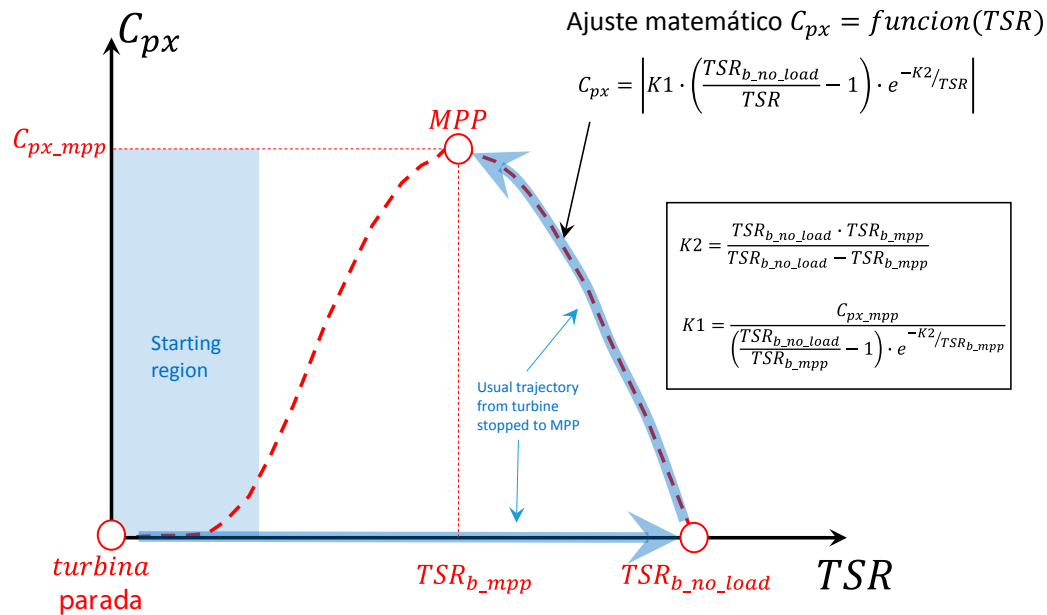


Figura 10| Ajuste matemático del coeficiente de potencia extendido (C_{px}) y trayectoria de arranque habitual.

RESULTADOS

Discusión de resultados

Para tener una idea de magnitudes respecto a las ecuaciones anteriores y validarlas con los resultados obtenidos, consideraremos un canal de referencia de ancho 0.5 m ($b=0.5$ m), altura de entrada de la lámina de agua de 1 m ($h_i=1$ m) y velocidad de entrada 0.3 m/s ($V_{wi}=0.3$ m/s). Así tenemos una potencia cinética disponible de 6.73 W y una potencia de altura de 1467 W, haciendo un total de aproximadamente 1474 W disponibles. Se puede apreciar que, dadas las bajas velocidades habituales del agua en los canales de agua, la potencia cinética disponible en la lámina de agua es normalmente mucho más pequeña que la potencia de altura disponible en la misma, hasta el punto de poder afirmar que la energía disponible es sustancialmente la de altura. También se obtiene analíticamente que la potencia intrínseca máxima extraíble del canal es de $P_{ex_max}=1013$ m/s. Esta potencia intrínseca máxima, se obtendría cuando la velocidad del agua de salida fuera de $V_{wo_opt}=1.433$ m/s y la altura de la lámina de agua a la salida fuera de $h_{o_opt}=0.209$ m. Esto introduce un límite físico teórico del 60.8% al coeficiente de potencia extendido ($C_{px_max}=0.608$). También tenemos que para una altura de lámina de agua disponible a la entrada ($h_i=1$ m) constante, la velocidad de entrada óptima sería de aproximadamente $V_{wi_opt}=1$ m/s lo que nos permitiría disponer de una potencia intrínseca extraíble de 1700 W (de los 3509 W de entrada, en estas hipotéticas condiciones).

Si ahora se introduce en el canal de agua una turbina de ancho 0.3 m y alto 0.7 m (factor de bloqueo $K_b=0.42$, relativamente bajo), que haya sido ensayada en campo abierto disponiendo de su coeficiente de potencia: $\text{TSR}_{no_load}=1.7$, $\text{TSR}_{mpp}=1.1$, $C_{p_mpp}=0.4$. Se estima el nuevo coeficiente de potencia extendido (C_{px}) para esta turbina para este factor de bloqueo K_b . Se obtiene la velocidad equivalente de trabajo en campo abierto para esta turbina $V_{wi_of_eqv}=0.517$ m/s. Esto conduce a una estimación de la potencia extraída por la turbina en el punto MPP de $P_{ex_tur_mpp}=5.78$ W que, a su vez, teniendo en cuenta la potencia disponible en el canal, tendríamos un valor para el coeficiente de potencia extendido en el punto MPP de $C_{px_mpp}=0.0039$ (o lo que es lo mismo un rendimiento máximo del 0.39%). Si hubiéramos trabajado con el coeficiente de potencia clásico para esta misma turbina nos encontraríamos con un coeficiente de potencia en el punto óptimo del 205 % ($C_{p_mpp}=2.05$) y sin sentido físico alguno.

La Figura 11 muestra como teóricamente se podría aumentar la potencia extraída por la turbina en el punto MPP hasta el límite físico que impone el canal de 1.013 kW, valor que se alcanzaría teóricamente con una turbina (o conjunto de turbinas) que trabajaran con un factor de bloqueo de $K_{b_max}=0.896$.

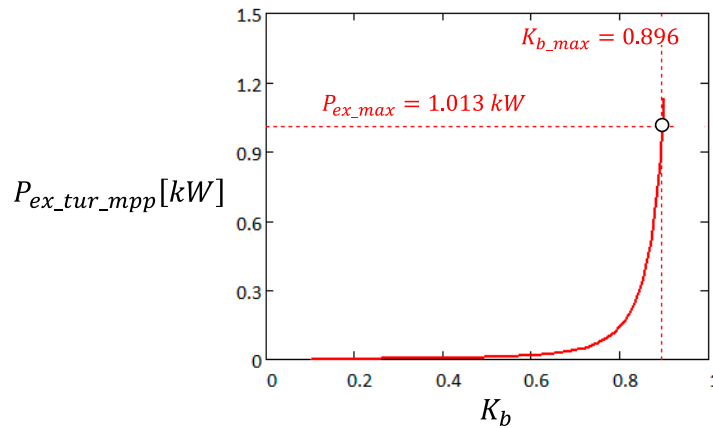


Figura 11 | Aumento de la potencia extraíble con el factor de bloqueo (K_b).

Implementación en modelo LTSpice

La Figura 12 recoge el modelo completo LTSpice implementado en forma de bloque utilizable en diferentes diseños. Al estar realizado en un simulador electrónico, todos los cálculos hidrocineéticos ligados a la turbina y al canal de agua se ofrecen en el modelo en forma de tensión. Así el modelo recibe dos entradas en tensión que representan la altura (h_i) y la velocidad (V_{wi}) en cada momento. Para el acoplamiento mecánico entre la turbina y el generador eléctrico (PMG) las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento mecánico de la turbina han sido adaptadas a un circuito eléctrico equivalente (ver Figura 13) donde:

- El momento de inercia de la turbina (J_t) se representa mediante un condensador ($C_{eqv}=J_t$).
- Las corrientes representan al par mecánico: En cada caso el par mecánico generado por la turbina, el par mecánico de arranque y más adelante el par eléctrico equivalente del PMG.
- Las pérdidas de rozamiento del eje de la turbina se representan por una resistencia de valor la inversa del coeficiente de rozamiento de los cojinetes de la misma (f_t).
- Las tensiones eléctricas representan velocidades angulares, así disponemos de la velocidad mecánica de giro del eje de la turbina (ω_{mec}).
- La potencia mecánica extraída por la turbina en cada momento (P_{ex}) se obtiene como producto de la velocidad mecánica angular (ω_{mec}) y el par mecánico aplicado al eje de la turbina (T_{mec}). Tensión y corriente respectivamente en el equivalente eléctrico.

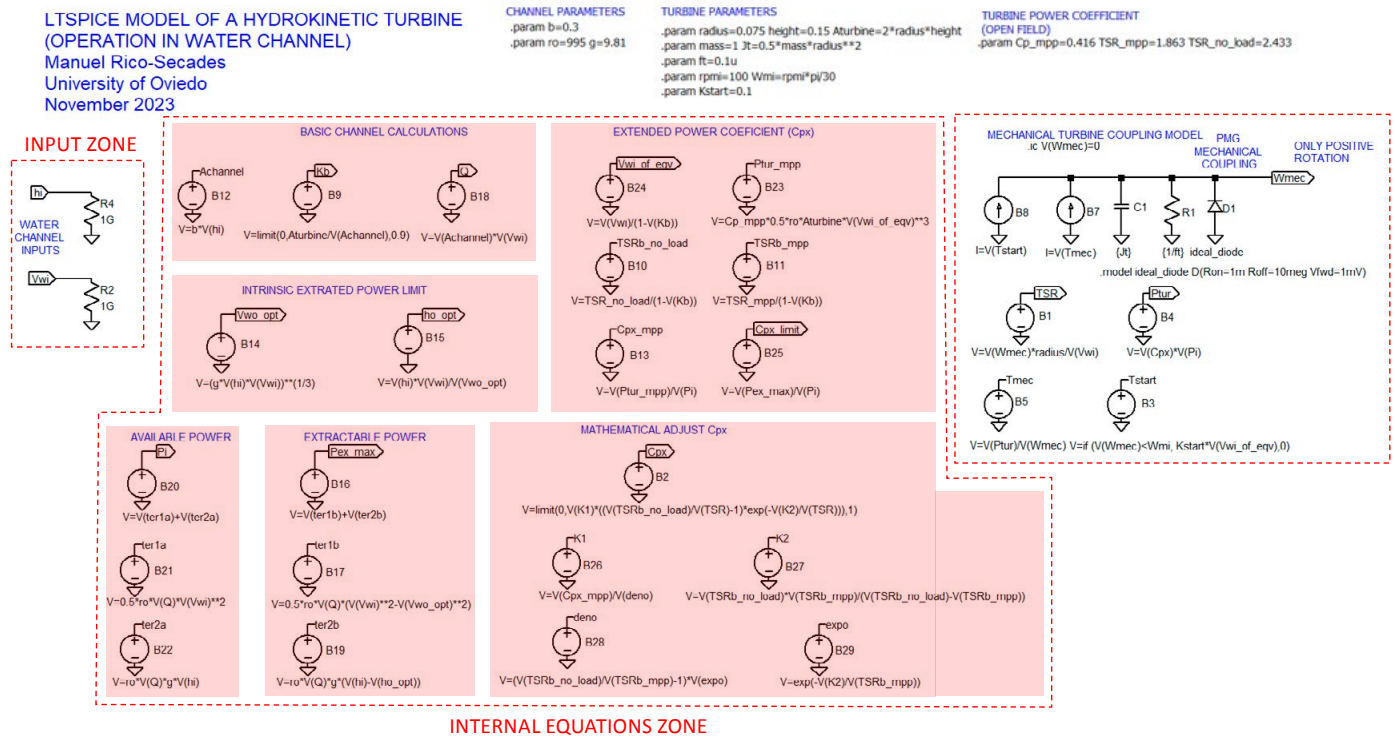


Figura 12 | Implementación del modelo desarrollado para turbina hidrocinética operando en un canal de agua.

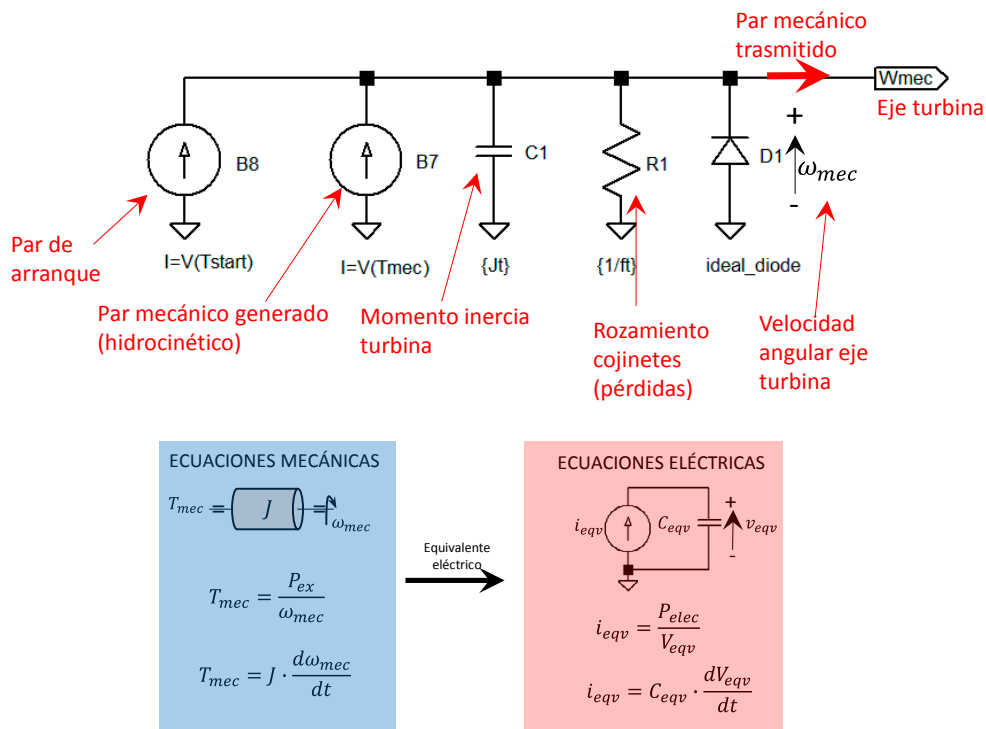


Figura 13 | Un detalle del modelado de la turbina mediante un equivalente eléctrico.

De esta forma, tanto las restricciones hidrocinéticas del canal de agua como el comportamiento mecánico de la turbina se representan conjuntamente en forma de un equivalente eléctrico de uso sencillo y funcional.

Ejemplos de uso del modelo LTSpice desarrollado

A modo de ejemplo de las posibilidades del modelo desarrollado, la Figura 14 recoge cuatro casos de uso, todos ellos con la altura de lámina de agua a la entrada de 0.3 m y una velocidad de entrada del agua de 1 m/s utilizada como referencia.

En el primer caso (caso 1), se modela el habitual ensayo de hacer girar externamente el eje de la turbina de agua. La tensión aplicada al modelo en ω_{mec} representa precisamente la velocidad angular mecánica de giro en el eje de la turbina en rad/s.

En el caso 2, se aplica una carga mecánica o freno mecánico gradual al eje de la turbina. El par mecánico aplicado a la turbina se representa como una fuente de corriente.

El caso 3 representa un disco de inercia con un momento de inercia J en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, el disco de inercia (o volante de inercia) se representa en el modelo eléctrico equivalente como un condensador de capacidad $C_{eqv} = J$ faradios.

Finalmente, el caso 4 representa un modelo simplificado de un generador de imanes permanentes (PMG) acoplado a un rectificador trifásico de salida. La tensión continua generada a la salida será proporcional a la velocidad angular mecánica ω_{mec} disponible en el eje de la turbina. La potencia eléctrica $P_e = T_e \cdot \omega_{mec}$ entregada a la carga se refleja en la parte mecánica por medio del par eléctrico demandado T_e representado por una fuente de corriente de acuerdo con el modelo desarrollado. Se reserva para futuros escritos la presentación detallada de este último modelo promediado, desarrollando de una forma más precisa el conjunto generador eléctrico con rectificador trifásico que tenga en cuenta elementos mecánicos (rozamiento y momento de inercia del rotor) y pérdidas en los devanados y componentes electrónicos.

CASOS DE USO DEL MODELO DE TURBINA DESARROLLADO

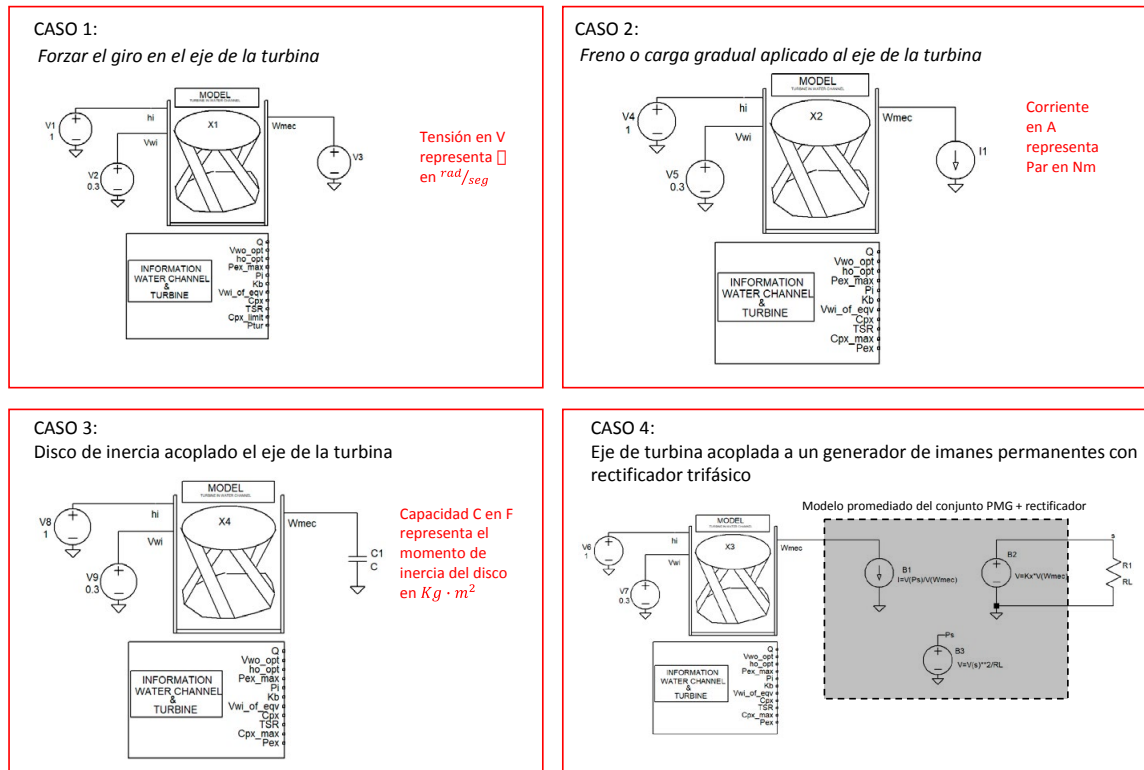


Figura 14 | Selección de cuatro posibles casos de uso del modelo desarrollado.

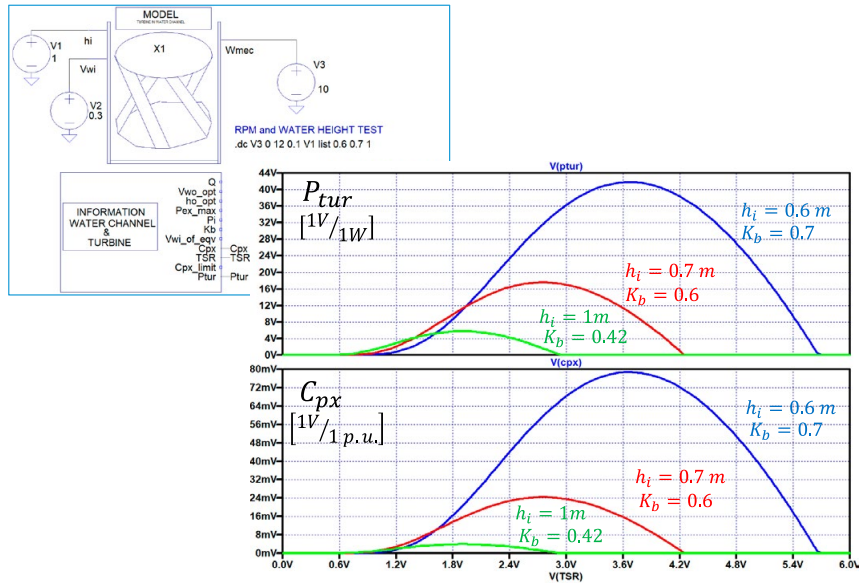


Figura 15 | Test 1 de validación: CASO 1. Forzar la rotación del eje de la turbina.

La Figura 15 muestra un resultado particular de uso del caso 1 de la Figura 14 anterior, utilizado como validación del modelo propuesto. El test representa un ensayo de un canal de agua con tres alturas distintas de lámina de agua a la entrada (0.6 m, 0.7 m y 1 m). Resulta interesante observar cómo al reducir la altura de la lámina de agua, el factor de bloqueo (K_b) aumenta y por lo tanto mejora la curva de rendimiento de la turbina operando sobre el propio canal de agua. Para realizar el ensayo, se hace girar el eje de la turbina en el canal de agua entre 0 rad/s y 100 rad/s recorriendo así la zona completa de trabajo TSR de la turbina. Se obtiene la potencia extraída (P_{ex}) en cada punto y también el coeficiente de potencia extendido (C_{px}) para cada condición de bloqueo del canal. Se observa el efecto del bloqueo, como al reducirse la altura de la lámina de agua desde la altura inicial de 1 m, aumenta la potencia extraída por la turbina (P_{ex}), a pesar de que la potencia disponible (P_i) es menor (es decir, aumenta notablemente el coeficiente de potencia extendido (C_{px})).

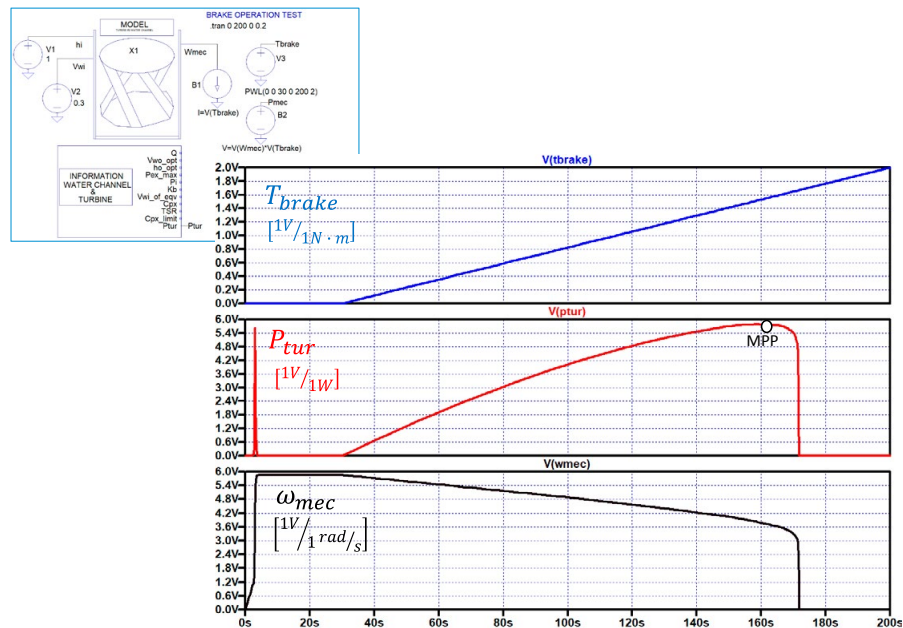


Figura 16 | Test 2 de validación: CASO 2. Freno aplicado al eje de la turbina.

De forma similar, la Figura 16 muestra un segundo ejemplo de validación basado en el caso 2 de la Figura 14. La turbina se deja arrancar en vacío (30 segundos) para posteriormente ir aplicando un par de frenado en el eje de la turbina hasta que esta se bloquea. Representaría en ensayo típico para obtener la curva de potencia de una turbina en un ensayo real. Se observa claramente como la turbina recorre todos sus puntos de trabajo, desde vacío pasando por MPP hasta el frenado total de la misma. Se aprecia también el detalle del arranque de la turbina, con un parte lineal inicial debido únicamente al par de arranque inicial hasta llegar a las rpm de arranque punto en el que entraría el efecto hidrodinámico modelado mediante el coeficiente de potencia extendido (C_{px}).

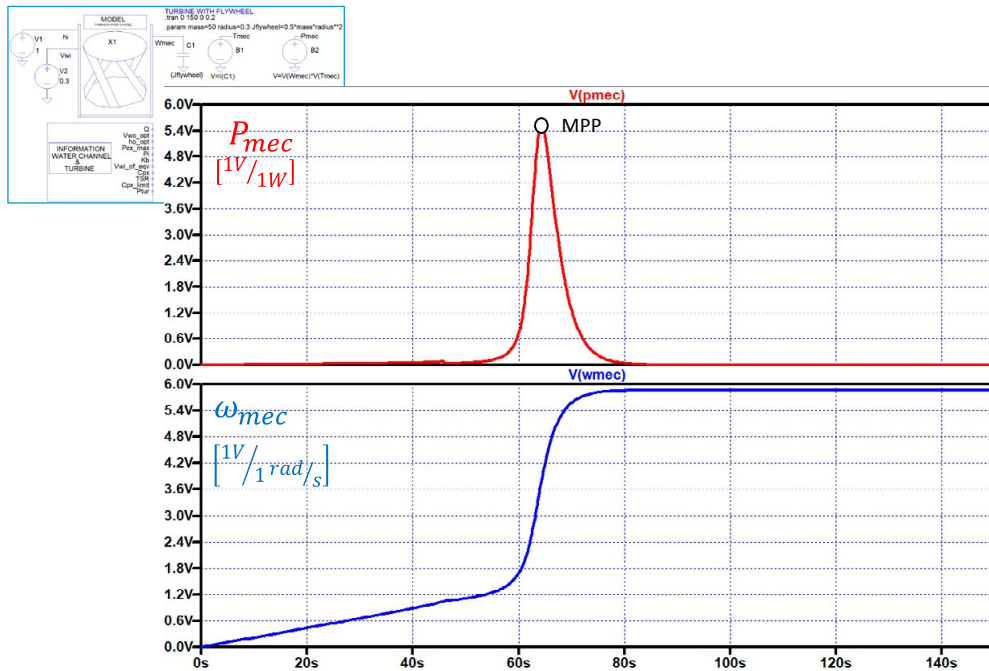


Figura 17 | Test 3 de validación: CASO 3. Arranque con disco de inercia.

Ya para finalizar, la Figura 17 muestra un último ensayo con el arranque de la turbina en el canal de agua con un disco de inercia de 50 kg y radio 0.3 m acoplado al eje de esta. Se observa la zona lineal de arranque de la turbina debida únicamente al par de arranque muy pequeño (primeros 40-50 segundos), hasta que el efecto hidrodinámico acelera el arranque llevando la turbina a su velocidad de funcionamiento en vacío. La turbina recorre su curva de potencia pasando por el punto MPP, similarmente a lo que sucedía en el caso 1 anteriormente mencionado.

Un ejemplo de uso del caso 4 de la Figura 14 no ha sido incluido en este documento por cuestiones de espacio, pero se incluye entre los ejemplos puestos a disposición en abierto en el repositorio Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17235499>.

DISCUSIÓN

El trabajo ofrece una herramienta gratuita y muy versátil para la simulación de turbinas hidrocinéticas operando en canales de agua en condiciones de bloqueo. La herramienta es susceptible de mejora mediante la incorporación de no idealidades no consideradas en el trabajo. El modelo propuesto también puede ser incorporado en otros simuladores populares (Simulink, PSIM, etc). La principal ventaja del modelo es que permite simular junto a los elementos mecánicos e hidráulicos todos los elementos eléctricos del sistema completo de generación de energía (ver Figura 1) incorporando el generador eléctrico (PMG) con incluso con sus correspondientes características mecánicas (momento de inercia y coeficiente de rozamiento del rotor del PMG), el rectificador trifásico, la etapa de electrónica de potencia de conversión CC-CC y control electrónico de microcontrolador (MCU) que conjuntamente representa la etapa electrónica de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado e implementado un modelo LTSpice que permite validar la operación de una turbina hidrocínética en un canal de agua. La primera utilidad práctica del trabajo realizado es la de poder evaluar el recurso energético disponible en canales de agua, de riego o similares donde el efecto de bloqueo es muy significativo. El modelo se ha implementado en el simulador LTSpice, que permite calcular los límites intrínsecos del propio canal de agua, permitiendo obtener dinámicamente el límite teórico y físico a la extracción de energía. Una segunda utilidad práctica del trabajo es la de permitir un diseño inicial de todos los elementos del sistema (hidráulicos, mecánicos, eléctricos, electrónicos y algoritmos) y realizar un prediseño inicial de toda la operación conjunta del mismo y la tercera utilidad práctica surge de la propia introducción del nuevo concepto de coeficiente de potencia extendido (C_{px}), con la implementación de un método dinámico para obtener este coeficiente a partir de los datos disponibles del clásico coeficiente en campo abierto (C_p) y también de forma inversa, mediante el ensayo de la turbina en un canal de agua, extrapolar el comportamiento de la misma en campo abierto. Las herramientas y modelos LTSpice desarrolladas se encuentran disponibles en formato abierto a disposición de la comunidad universitaria, recordando nuevamente que el simulador LTSpice es de uso totalmente gratuito (Repositorio Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17235499>).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al grupo de Electrónica de Potencia de La Escuela Politécnica de Ingeniería Industrial de Gijón (EPI-GIJON), al grupo de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Politécnica de Mieres (EP-MIERES) y al Centro Universitario de Investigación y desarrollo del agua (CUIDA), todos ellos pertenecientes a la Universidad de Oviedo por todas las facilidades aportadas para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Álvarez-Álvarez, E., Rico-Secades, M., Corominas, E.L., Huerta-Medina, N., Soler-Guitart, J. 2018. Design and control strategies for a modular hydrokinetic smart grid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 95, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.019>
- Amezqueta-García, A., Fernández-Pacheco, V.M., Álvarez-Álvarez E. 2021. Diseño de una metodología para cálculo de energía hidrocínética en estuarios: ejemplo de aplicación con el software IBER. *Ingeniería del agua*, 25(4), 271-286. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.16043>
- Betz, A. 1920. Das Maximum Der Theoretisch Möglichen Ausnutzung Des Windes Durch Windmotoren. *Zeitschrift Für Das GesamteTurbinenwes.* 26, 307-309.
- Blanco-Marigorta, E., Gharib-Yosry, A. 2021. Evaluación de una turbina hidrocínética de eje vertical para su uso en canales.” *Revista Dyna*, 96, 1-6.
- Brun, P., Terme, L., Barillier, A. 2013. Paimpol-Bréhat: development of the first tidal array in France. In *Marine Renewable Energy Handbook*. <https://doi.org/10.1002/9781118603185.ch9>
- Contreras, L.T., López, O.D., Lain, S. 2018. Computational fluid dynamics modelling and simulation of an inclined horizontal axis hydrokinetic turbine. *Energies*, 11(3151). <https://doi.org/10.3390/en1113151>
- Devices, Analog. n.d. LTSpice webpage. *Webpage*. Fecha de acceso: diciembre, 2023 (<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>).
- Espina-Valdés, R., Fernández-Jiménez, A., Fernández-Pacheco, V.M., Gharib-Yosry, A., Álvarez-Álvarez, E. 2022. Análisis experimental de la influencia del ángulo de torsión de los álabes de turbinas hidrocínéticas Darrieus helicoidales. *Ingeniería del Agua*, 26(3), 205-216. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17696>

- Gharib, A., Fernández-Jiménez, A., Álvarez-Álvarez, E., Blanco-Marigorta, E. 2021. Design and characterization of a vertical axis micro tidal turbine for low velocity scenarios. *Energy Conversion Management*, 237, 114-144. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114144>
- Goundar, J.N., Ahmed, M.R. 2014. Marine current energy resource assessment and design of a marine current turbine for Fiji. *Renewable Energy*, 65, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.036>
- Güney, M.S., Kaygusuz, K. 2010. Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2996-3004. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.016>
- Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E. 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823-1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- Kinsey, T., Dumas, G. 2017. Impact of channel blockage on the performance of axial and cross-flow hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*, 103, 239-254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.021>
- Macedo-García, F.S. 2023. Metodologías de diseño de sistemas de cosecha de energía hidráulica a partir del uso de microturbinas hidrocínéticas. Tecnológico Nacional de México/CENIDET.
- Macedo-García, F.S., Hernández-Orozco, I., Arau-Roffiel, J., Rico-Secades, M. 2023. Sistemas de cosecha de energía hidráulica con microturbinas hidrocínéticas, una alternativa de generación de energía para electrificación de casas rurales. In *1er Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Aplicada (CITCA-2023)*, edited by CENIDET. Cuernavaca - Mexico.
- Meana-Fernández, A. 2017. Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocínética. *V Jornadas de Ingeniería Del Agua*, 1, 1-4.
- Palacios, A., Peña N., Cervantes E., Güitrón A., López M. 2017. *Bases Para Un Centro Mexicano En Innovación de Energía Hidroeléctrica CEMIE-Hidro*, Palacios Fonseca, Jiutepec, Morelos, México.
- Rico-Secades, M., Calleja-Rodríguez, J., Fernández-Jiménez, A., Álvarez-Álvarez, E., Macedo-García, F.S., Arau-Roffiel, J. 2025. Design of a new hydrokinetic turbine simulation model based on the extended power coefficient concept. *IJEPES-International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 165. Abril 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110515>
- Rico-Secades, M. 2025. LTSpice model of Hydrokinetic turbine working in water channel. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17235499>
- Patel, V., Eldho, T.I., Prabhu, S.V. 2019. Velocity and Performance Correction Methodology for Hydrokinetic Turbines Experimented with Different Geometry of the Channel. *Renewable Energy*, 131, 1300-1317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.027>
- Romero-Menco, F., Rubio-Clemente, A., Chica, E. 2022. Turbinas hidrocínéticas tipo propela: una alternativa para la generación de energía eléctrica. *Revista UIS Ingenierías*, 21(3). <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022010>
- Werle, M.J. 2010. Wind turbine wall-blockage performance corrections. *Journal of Propulsion Power*, 26(6). <https://doi.org/10.2514/1.44602>
- Yuce, M.I., Muratoglu, A. 2015. Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 43, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037>

APÉNDICE A: ENERGÍA DISPONIBLE EN UNA LÁMINA DE AGUA DE UN CANAL DE AGUA.

Consideramos un canal de agua de sección rectangular, donde la base del canal tiene una dimensión b y el fluido discurre a una velocidad de entrada V_{wi} y con una altura de entrada h_i (ver Figura A1).

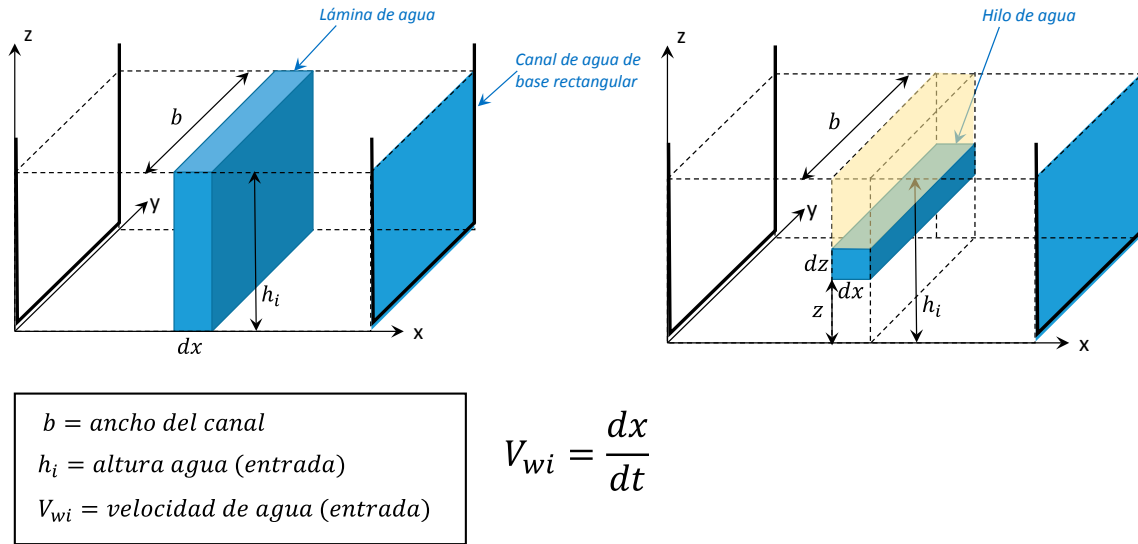


Figura A1 | Canal de agua, lámina de agua e hilo de agua.

El área de entrada de la “lámina de agua” (A_{wi}) así como en caudal de agua de entrada (Q) pueden obtenerse fácilmente:

$$A_{wi} = b \cdot h_i \quad (A1) \quad \text{y} \quad Q = A_{wi} \cdot V_{wi} \quad (A2)$$

Al ser el agua un fluido incompresible el caudal de agua se debe mantener constante en cualquier punto del canal, antes o después de la turbina. La caracterización de la energía cinética de la “lámina de agua” se ilustra gráficamente desde la misma Figura A1, de donde se obtiene la energía cinética de la “lámina de agua” (dE_{kws}):

$$dE_{kws} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dx \cdot b \cdot h_i \cdot V_{wi}^2 \quad (A3)$$

La caracterización de la energía potencial y de la energía derivada de la presión hidrostática de la “lámina de agua” se obtiene de forma similar a partir del denominado “hilo de agua”, elemento diferencial de altura constante z . La misma Figura A1 ilustra gráficamente el procedimiento empleado. Utilizando g como la aceleración de la gravedad ($g=9.81 \text{ m/s}^2$), la energía potencial de cada “hilo de agua” de altura z ($dE_{ww_potential}$) tiene la expresión:

$$dE_{ww_potential} = \rho \cdot b \cdot dx \cdot g \cdot z \cdot dz \quad (A4)$$

De forma similar la energía hidrostática (dE_{ww_hydro}) derivada de la presión hidrostática (P_{hydro}) del “hilo de agua”, se obtiene a partir de la presión que aplica la altura de agua ($h_i - z$) sobre cada “hilo de agua”:

$$P_{hydro} = (h_i - z) \cdot \rho \cdot g \quad (A5) \quad \rightarrow \quad dE_{ww_hydro} = (h_i - z) \cdot \rho \cdot g \cdot b \cdot dx \cdot dz \quad (A6)$$

La energía de altura del “hilo de agua” (dE_{hww}) se obtiene entonces como de suma ambas, la energía potencial ($dE_{ww_potential}$) con la energía hidrostática (dE_{ww_hydro}):

$$dE_{hww} = dE_{ww_potencial} + dE_{ww_hydro} \quad (A7) \quad \rightarrow \quad dE_{hww} = h_i \cdot \rho \cdot g \cdot b \cdot dx \cdot dz \quad (A8)$$

Como curiosidad hay que indicar que la energía de altura del “hilo de agua” es la misma para cada altura z , ya que cuando la energía potencial aumenta la de presión hidrostática disminuye siendo la suma constante.

Integrando se obtiene la energía de altura de la “lámina de agua” completa (dE_{hws}):

$$dE_{hws} = \rho \cdot b \cdot dx \cdot h_i \cdot g \cdot \int_0^{h_i} dz \quad (A9) \quad \rightarrow \quad dE_{hws} = \rho \cdot b \cdot dx \cdot g \cdot h_i^2 \quad (A10)$$

Se tiene así caracterizada la energía a la entrada (dE_i) en la “lámina de agua”, como suma de la energía cinética y la de altura disponible en la misma.

$$dE_i = dE_{kws} + dE_{hws} \quad (A11)$$

La potencia instantánea disponible en la “lámina de agua” de entrada (P_i) se obtiene derivando la expresión respecto al tiempo:

$$P_i = \frac{dE_i}{dt} \quad (A12)$$

Considerando que $V_{wi} = dx/dt$ y la definición del caudal de agua, una constante del canal $Q = h_i \cdot b \cdot V_{wi}$, se puede disponer de una expresión analítica para la potencia disponible en la “lámina de agua” a la entrada del canal, como suma de su potencia de altura y de su potencia cinética.

$$P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot V_{wi}^2 + \rho \cdot Q \cdot g \cdot h_i \quad (A13)$$