

Efectos de la relación de bloqueo por turbinas hidrocinéticas para el aprovechamiento energético en canales de riego

Effects of the blockage ratio due to hydrokinetic turbines for producing energy in irrigation channels

Javier Martínez-Reyes¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-2586>

Nahún Hamed García-Villanueva², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3708-9822>

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México,
javier.martinez@posgrado.imta.edu.mx

²Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México,
nahun.garcia@conagua.gob.mx

Autor para correspondencia: Javier Martínez-Reyes,
javier.martinez@posgrado.imta.edu.mx

Resumen

Con el fin de validar parte de la teoría asociada al cálculo de la potencia máxima aprovechable por turbinas hidrocinéticas mediante el uso de

discos porosos en un canal experimental, se analiza el efecto de la relación de bloqueo que generan las turbinas sobre la potencia hidráulica aprovechable en un canal. Dicho análisis se complementa con el estudio y caracterización de la forma en que se desarrolla la estela que se produce hacia aguas abajo y se comparan los resultados experimentales con los de un modelo numérico unidimensional.

Durante el desarrollo del estudio experimental se analizaron tres relaciones de bloqueo, para lo cual se mantuvieron fijas las variables hidráulicas en el canal experimental. Bajo estas condiciones, para caracterizar el comportamiento del flujo y obtener las componentes de la velocidad instantánea, se utilizó un velocímetro acústico Doppler, y para medir el empuje hidrodinámico sobre los discos se empleó una celda de carga.

Entre los principales resultados se encontró que la velocidad, dentro de la estela lejana, presenta una recuperación de 90% en aproximadamente 12 diámetros aguas abajo del disco. Es de resaltar que a esa distancia la intensidad de turbulencia fue de 8%, mientras que la intensidad de turbulencia media en la sección del canal donde se ubican los discos porosos antes de su colocación era de 5.7%.

Los coeficientes de potencia obtenidos para las distintas relaciones de bloqueo presentan un incremento de 59% entre la relación de bloqueo más baja $B_1 = 0.090$ y la más alta $B_3 = 0.197$. Las diferencias entre los coeficientes de potencia de las pruebas experimentales y de los máximos obtenidos con la teoría unidimensional son de 19.45% para el caso de $B_1 = 0.090$; 4.13% para $B_2 = 0.156$, y 0.84% para $B_3 = 0.197$. Así, y en términos generales, se encontró que con una relación de bloqueo del

orden de 0.20, los valores del coeficiente de potencia se asemejan a los máximos esperados de acuerdo con la teoría unidimensional, y que con valores inferiores a 0.10 de esta relación de bloqueo, dicho coeficiente cae alrededor de un 20% con respecto al máximo teóricamente esperado.

Palabras clave: canal, coeficiente de arrastre, coeficiente de potencia, disco poroso, energía, relación de bloqueo, turbinas hidrocinéticas.

Abstract

In this paper, the effect of the blockage ratio generated by the hydrokinetic turbines upon the obtainable hydraulic power in an open channel is analyzed in order to validate part of the theory related to the calculation of the maximum obtainable power by the hydrokinetic turbines, by using porous discs in an experimental open channel. This analysis is supplemented with the study and characterization of the way in which is developed the wake, that is produced downstream, and the experimental results are compared with those of a one-dimensional numerical model.

During the development of the experimental study, three different blockage ratios were analyzed, for which the hydraulic variables were kept fixed in the experimental open channel. Under these conditions, in order to characterize the behavior of the flow and obtain the components of the instantaneous velocity an acoustic Doppler velocimeter was utilized, to measure the hydrodynamic thrust on the discs a load cell was employed.

Among the main results it was found that the velocity in the zone of the far wake has a 90% recovery at approximately 12 diameters downstream from the disc. It is noteworthy that, at this distance, the

turbulent intensity was 8%, while the mean turbulence intensity in the section of the open channel where the porous discs are located, before its placement, it was 5.7%.

The power coefficients obtained for the different blockage ratios show a 59% increase between the lowest blockage ratio $B_1 = 0.090$ and the highest $B_3 = 0.197$. The differences between the power coefficients of the experimental tests and the maximums obtained with the one-dimensional theory are 19.45% for the case of $B_1 = 0.090$; 4.13% for $B_2 = 0.156$, and 0.84% for $B_3 = 0.197$. In general, according to the one-dimensional theory, using a blockage ratio of around 0.20 the values of the power coefficient are similar to the maximums expected, and by using lower values than 0.10, this coefficient falls by around 20% compared with the maximum theoretical coefficient.

Keywords: open channel flow, thrust coefficient, power coefficient, porous disc, energy, blockage ratio, hydrokinetic turbines.

Recibido: 13/12/2018

Aceptado: 12/09/2019

Introducción

México cuenta con una extensa red de canales de riego, cuya infraestructura corresponde a 49 160 km de canales, de los cuales 12 643 km son principales y 36 517 km secundarios; del total, 47% está revestido (Lomelí & Álvarez, 2014). En dichos canales, la energía hidráulica, especialmente la asociada con la velocidad del agua, puede ser empleada para generar electricidad utilizando turbinas hidrocinéticas, las cuales aprovechan al máximo la carga de velocidad del propio flujo. Para instalar este tipo de turbinas no se requieren grandes inversiones en obra civil, además de que se pueden ubicar en sitios cercanos al lugar donde se demande la energía, evitando con ello la instalación de grandes líneas de conducción eléctrica.

La teoría del disco actuador es la representación matemática de una turbina en cálculos de dinámica de fluidos. En dicha teoría, la carga en un rotor real se reemplaza por una distribución de presión en un disco permeable infinitamente delgado con el mismo diámetro. En su presentación más elemental, esta carga es uniforme y normal, con el disco colocado en un flujo axial, es decir, perpendicular a la dirección del flujo (Okulov & van Kuik, 2012).

La teoría unidimensional para el cálculo de la potencia máxima aprovechable en canales ha sido estudiada por diversos autores, que utilizan el concepto del disco actuador para emular los efectos de bloqueo que producen las turbinas (Garrett & Cummins, 2007; Houlsby, Draper, & Oldfield, 2008; Whelan, Graham, & Peiró, 2009), siendo Houlsby *et al.* (2008), los que proponen el modelo más completo, al grado que contempla el incremento en el tirante aguas arriba del disco y permite

utilizar elevados números de Froude. Estos autores muestran que, si se consideran los efectos de bloqueo de las turbinas y fronteras del canal cercanas (flujo restringido), el coeficiente de potencia puede superar el límite de Betz, que es $C_{p\text{máx}} = 0.593$; es decir, se supera el límite máximo de la potencia aprovechable de turbinas sin flujo restringido.

Diversos autores han realizado estudios de la influencia de la relación de bloqueo en el rendimiento de turbinas y en el desarrollo de la estela lejana, pero han utilizado modelos de dinámica de fluidos computacional CFD (Chime & Malte, 2014). Otros autores han hecho pruebas en canales experimentales con vallas rectangulares o arreglos de discos porosos en la sección transversal del canal (Myers & Bahaj, 2012). Sin embargo, no se han encontrado estudios experimentales con un disco independiente, que represente una sola turbina en el canal con distintas relaciones de bloqueo.

El estudio del comportamiento de la estela lejana aguas abajo de turbinas hidrocínéticas permite conocer la distancia óptima para la separación de turbinas en un conjunto de turbinas colocadas en serie, además permite caracterizar el efecto que tiene la relación de bloqueo en el aprovechamiento energético. Lo anterior es fundamental para establecer las bases para el dimensionamiento y la ubicación de este tipo de turbinas en canales.

El objetivo de este estudio es analizar y cuantificar el efecto que tiene la relación de bloqueo que generan las turbinas hidrocínéticas en la potencia hidráulica aprovechable en un canal. Para ello, se comparan los resultados experimentales utilizando discos porosos con los obtenidos en un modelo numérico unidimensional para el cálculo de la potencia máxima

aprovechable. Además, se caracteriza la forma en que se desarrolla la estela que se produce hacia aguas abajo, analizando las curvas de recuperación de velocidad y de intensidad de turbulencia; ello, como una herramienta de orientación para aprovechar el potencial energético en canales de riego mediante el uso de turbinas hidrocinéticas. Esto permitirá seleccionar tanto las dimensiones como la ubicación óptima de las mismas y, en los casos de interés, determinar la distancia mínima de separación de una turbina respecto a otra al ser colocadas en serie.

Materiales y métodos

Se realizaron pruebas en un banco experimental, con la finalidad de examinar el comportamiento del flujo en canales y el rendimiento máximo de turbinas para distintos escenarios de bloqueo utilizando discos porosos. Además, se analizaron los cambios en la región de la estela lejana por efecto de la inclusión de discos porosos en el fluido, y la consecuente y posible aparición de ondas gravitatorias de superficie en los canales.

Cálculo del coeficiente de potencia de una turbina hidrocínética de flujo axial, en función de la relación de bloqueo

Para calcular el coeficiente de potencia teórico de una turbina hidrocínética, en función de la relación de bloqueo del canal, se utilizó la teoría unidimensional (Houlsby *et al.*, 2008). A continuación se presenta parte del planteamiento teórico para el cálculo del mismo.

En la Figura 1 se representa una turbina en un canal abierto mediante el uso del concepto de disco actuador. Se identifican cinco secciones: (1) aguas arriba, lejos de la turbina; (2) inmediatamente aguas arriba de la turbina; (3) inmediatamente aguas abajo de la turbina; (4) aguas abajo, lo suficientemente lejos de la turbina donde la presión puede ser tratada de nuevo como uniforme (aunque la velocidad no lo sea), y (5) aguas abajo, lo suficientemente lejos como para que el flujo tenga velocidad uniforme (Houlsby *et al.*, 2008).

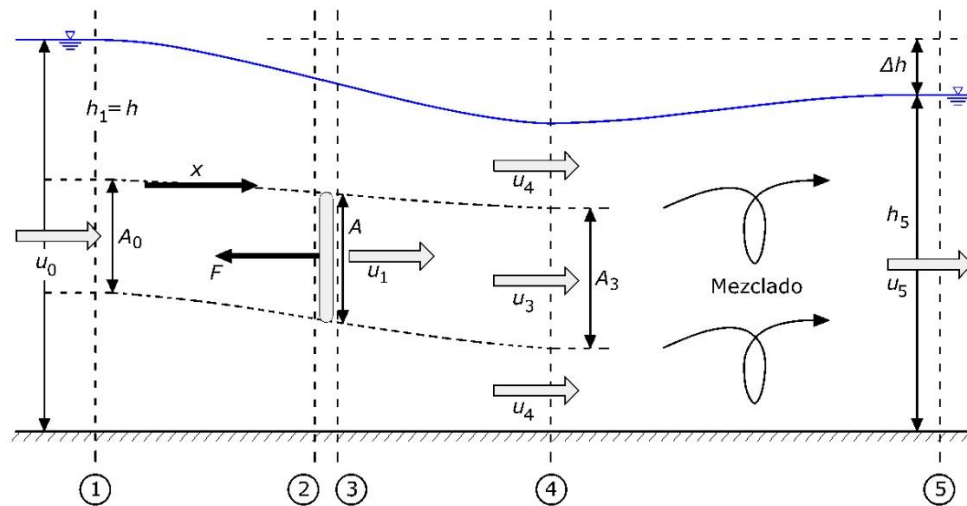


Figura 1. Representación de una turbina en un canal abierto. Fuente: (Houlsby *et al.*, 2008).

Se asume que en las secciones 1, 4 y 5 la presión es hidrostática, las dimensiones aguas abajo del flujo no son fijas, pero existe relación entre dimensión y velocidad, y entre dimensión y fuerza de presión (Houlsby *et al.*, 2008).

El desarrollo de las ecuaciones (1) a (11) se ha tomado de algunos fragmentos de Houlsby *et al.* (2008).

Aplicando la ecuación de Bernoulli en la sección 1 y 4 (en la región del flujo desviado), como entre las secciones aguas arriba y aguas abajo de la turbina y, además, aplicando la condición de equilibrio de fuerzas en la turbina, resulta:

$$F = \frac{\rho u_0^2 B b h_1}{2} (\tau^2 - \alpha^2) \quad (1)$$

donde:

B : relación de bloqueo.

b : ancho del canal en m.

h_1 : carga hidrostática en la sección 1 en m.

F : fuerza de empuje hidrodinámico en la turbina/disco en N.

u_0 : velocidad media del flujo aguas arriba de la turbina/disco en m/s.

α : constante que relaciona la velocidad media del flujo en la estela aguas abajo de la turbina/disco u_3 , con la velocidad u_0 .

ρ : densidad del agua en kg/m³.

τ : constante que relaciona la velocidad media del flujo fuera de la estela del tubo de corriente (en la región del flujo desviado) aguas abajo de ubicación de la turbina/disco u_4 , con la velocidad u_0 .

Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento entre las secciones 1 y 4:

$$\frac{1}{2}g(h_1^2 - h_4^2) - Bh_1 \frac{u_0^2}{2}(\tau^2 - \alpha^2) = u_0^2 h_1 B \beta (\alpha - 1) + u_0^2 h_1 (1 - B\beta)(\tau - 1) \quad (2)$$

donde:

g : constante de aceleración de la gravedad en m/s².

h_4 : carga hidrostática en la sección 4 en m.

β : constante que relaciona la velocidad media del flujo en la ubicación de la turbina/disco u_1 con la velocidad u_0 .

Además, haciendo uso de la relación de continuidad:

$$h_4 = Bh_1 \frac{\beta}{\alpha} + h_1 \frac{(1-B\beta)}{\tau} \quad (3)$$

y llevando a cabo algunas combinaciones y reacomodos algebraicos se obtienen:

$$B\beta \frac{(\tau-\alpha)}{\alpha\tau} = \frac{\tau-1}{\tau} - \frac{u_0^2}{2gh_1} (\tau^2 - 1) \quad (4)$$

y:

$$B\beta(\tau - \alpha) \left(4 + \frac{(\tau^2-1)}{\alpha\tau} \right) = 2B(\tau^2 - \alpha^2) + \frac{(1-\tau)^3}{\tau} \quad (5)$$

Despejando β de la Ecuación (5) se llega a la solución:

$$\beta = \frac{2(\tau-\alpha) - \frac{(\tau-1)^3}{B\tau}}{4 + \frac{(\tau^2-1)}{\alpha\tau}} \quad (6)$$

El número de Froude aguas arriba es:

$$F_r = \frac{u_0}{\sqrt{gh_1}} \quad (7)$$

Dividiendo 6 y 4 para eliminar β y después de un reordenamiento algebraico, se obtiene una ecuación de cuarto grado en τ :

$$\frac{F_r^2}{2}\tau^4 + 2\alpha F_r^2\tau^3 - (2 - 2B + F_r^2)\tau^2 - (4\alpha + 2\alpha F_r^2 - 4)\tau + \left(\frac{F_r^2}{2} + 4\alpha - 2B\alpha^2 - 2\right) = 0 \quad (8)$$

El coeficiente de arrastre C_T está definido como:

$$C_T = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho B b h_1 u_0^2} \quad (9)$$

Combinando la Ecuación (1) con la Ecuación (9) se tiene:

$$C_T = (\tau^2 - \alpha^2) \quad (10)$$

El coeficiente de potencia C_p se expresa como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho B b h_1 u_0^3} \quad (11)$$

Además, la potencia extraída del flujo por la turbina es $P = F u_1$ (Whelan *et al.*, 2009) y al sustituir en la Ecuación (11) resulta:

$$C_p = \beta(\tau^2 - \alpha^2) \quad (12)$$

El parámetro utilizado con más frecuencia para representar la pérdida de velocidad en la zona de la turbina es el factor de inducción axial (Whelan *et al.*, 2009):

$$a = 1 - \frac{u_1}{u_0} \quad (13)$$

donde:

a : factor de inducción axial.

Y dado que $u_1 = \beta u_0$ se tiene:

$$a = 1 - \beta \quad (14)$$

El procedimiento para el cálculo del coeficiente de potencia en cada relación de bloqueo, utilizando la teoría unidimensional, es el presentado por Houlby *et al.* (2008) y se muestra a continuación:

- a) Se especifican los valores de ρ , g y h_1 ; se ha considerado h_1 como el tirante en el canal.
- b) Se calcula el número de Froude aguas arriba con la Ecuación (7)
- c) Se calcula la relación de bloqueo B con la Ecuación (15)

$$B = \frac{A}{b h_1} \quad (15)$$

donde:

A: área de barrido de la turbina/disco en m².

d) Se propone un conjunto de valores de α , los cuales deben estar dentro del rango $0 \leq \alpha \leq 1$, y para cada uno de ellos se obtiene τ mediante la solución de la Ecuación (8).

e) Se calcula β con la Ecuación (6), tal que $\tau > 1$ y $1 > \beta > \alpha$.

f) Se calcula el coeficiente de arrastre C_T con la Ecuación (10).

g) Se calcula el coeficiente de potencia C_p mediante la Ecuación (12). Con estos valores se genera una curva de C_p vs α , y se elige el valor máximo de C_p para obtener el coeficiente de potencia máximo $C_{p\text{máx}}$.

Pruebas experimentales con distintas relaciones de bloqueo

Las pruebas se llevaron a cabo en un canal experimental de sección rectangular, con una longitud de 5.0 m, ancho de 0.245 m y altura de 0.50 m (ver Figura 2).



Figura 2. Canal experimental de sección rectangular.

Los discos porosos, que se colocan en el interior del canal, se manufacturaron en poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés), utilizando una impresora 3D. Tienen un espesor de 4 mm y porosidad de 34%, que es la relación entre área abierta y cerrada del disco. Los poros u orificios tienen un diámetro de 3 mm y están separados 5.3 mm de manera equidistante. Es de resaltar que esta configuración ya ha sido utilizada en otros estudios experimentales (Xiao, Duan, Sui, & Rösger, 2013).

Para el presente estudio se adoptó una separación entre la base inferior de los discos porosos y el fondo del canal de $0.2 h$ (0.06 m), donde h representa el tirante en el canal. Esta separación asegura que el disco se encuentre ubicado en una zona lo suficientemente lejana al fondo, esto es, en regiones donde los gradientes de velocidad no son elevados, y en consecuencia no existen grandes variaciones con respecto a la velocidad media del flujo (Figura 3).

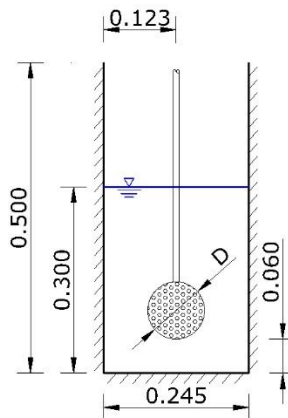


Figura 3. Ubicación del disco poroso en la sección transversal del canal experimental.

El gasto de 37 l/s corresponde al máximo que se puede hacer circular por el canal experimental. Las pruebas se efectuaron con tres discos porosos de diferente diámetro, esto permitió hacer estudios del flujo para distintas relaciones de bloqueo. A través del análisis unidimensional propuesto por Houlby *et al.* (2008), se calculó el coeficiente de potencia C_p para distintos valores de factor de inducción axial a de una turbina hidrocínética de diámetro equivalente al disco actuador. Las condiciones hidráulicas y los diámetros usados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones hidráulicas y geométricas para el cálculo del coeficiente de potencia.

Variable	Valor	Unidades
ρ	998.2	kg/m ³
h	0.265	m
b	0.245	m

u_0	0.570	m/s
Fr	0.354	
D_1	0.092	m
D_2	0.121	m
D_3	0.136	m

El disco poroso más pequeño, el de 92.0 mm de diámetro, tiene una menor relación de bloqueo y ha sido utilizado en pruebas experimentales de otros autores (Xiao *et al.*, 2013). El disco más grande, es decir, el de 135.7 mm de diámetro, fue el que proporcionó la mayor relación de bloqueo dentro del estudio y con la que se logró verificar la teoría unidimensional propuesta por Houlsby *et al.* (2008); el de diámetro intermedio, de 120.8 mm, se seleccionó buscando que la curva de coeficiente de potencia *versus* factor de inducción axial se encontrase equidistante entre las dos curvas asociadas con los discos anteriores (véase Figura 4).

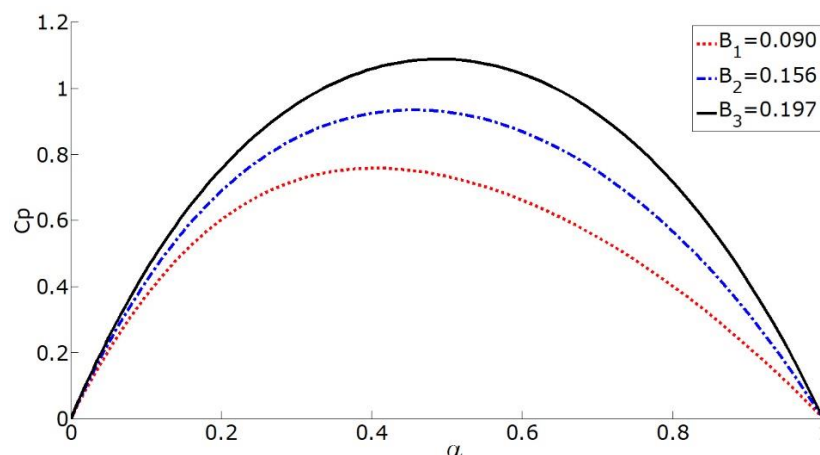


Figura 4. Coeficiente de potencia C_p vs. factor de inducción axial α , para los experimentos con $h = 0.265$ m.

La Figura 5 muestra los discos porosos fabricados con diámetros $D_1 = 92$ mm, $D_2 = 120.8$ mm y $D_3 = 135.7$ mm.

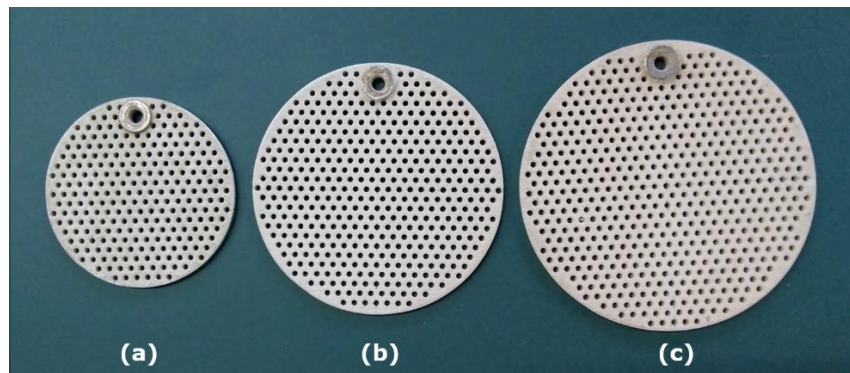


Figura 5. Discos porosos de diámetros: a) $D_1 = 92.0$ mm; b) $D_2 = 120.8$ mm, y c) $D_3 = 135.7$ mm.

En pruebas preliminares para los distintos diámetros de disco, con las mismas condiciones hidráulicas (mostradas en la Tabla 1), y utilizando los discos porosos $D_1 = 92.0$ mm y $D_2 = 120.8$ mm, no se presentaron ondas gravitatorias de superficie notablemente visibles hacia aguas abajo del disco, contrario a lo que sucedió con el disco $D_3 = 135.7$ mm, ya que se visualizó con claridad dicho fenómeno (Figura 6).



Figura 6. Ondas gravitatorias de superficie utilizando un disco poroso
 $D_3 = 135.7$ mm.

Debido a lo ya expuesto se optó por incrementar el tirante en el canal, conservando el gasto utilizado. De esta manera, las nuevas condiciones con las que se realizaron los experimentos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones hidráulicas para el cálculo del coeficiente de potencia con distintas relaciones de bloqueo, incrementando el tirante en el canal.

Variable	Valor	Unidades
ρ	998.2	kg/m ³
h	0.300	m
b	0.245	m
u_0	0.503	m/s
Fr	0.293	
D_1	0.092	m
D_2	0.121	m

D_3	0.136	m
-------	-------	---

Los nuevos resultados, derivados de la aplicación de la teoría unidimensional para los tres discos, para el caso más favorable, muestran que es posible incrementar el coeficiente de potencia con el disco de $D_3 = 135.7$ mm, con una relación de bloqueo $B_3 = 0.197$, en un valor cercano a $C_{p\text{máx}} = 0.985$. Para el disco con diámetro $D_1 = 92.0$ mm y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$, el coeficiente de potencia máximo resultó $C_{p\text{máx}} = 0.732$, valor superior al límite de Betz ($C_{p\text{máx}} = 0.593$). Con el disco con diámetro $D_2 = 120.8$ mm y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$, el coeficiente de potencia tiene un valor cercano a $C_{p\text{máx}} = 0.872$, siendo una magnitud intermedia entre las de los dos anteriores coeficientes de potencia máxima (Figura 7 y Tabla 3).

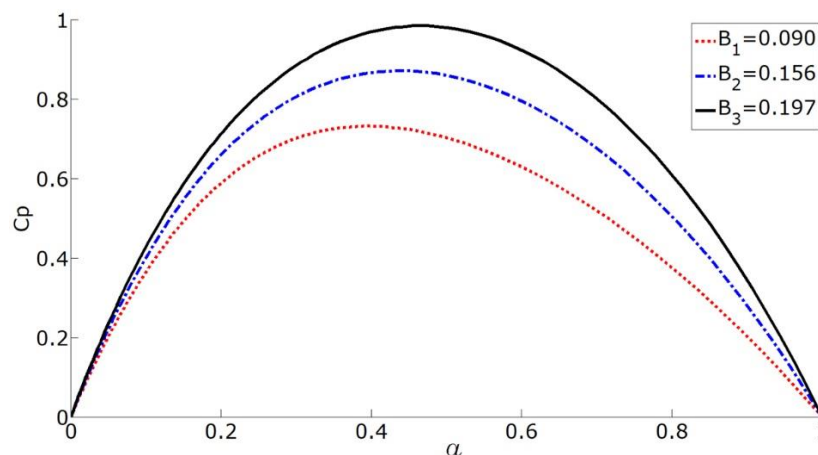


Figura 7. Coeficiente de potencia C_p vs. factor de inducción axial α , para los experimentos en el canal experimental.

Tabla 3. Coeficiente de potencia máximo para distintas relaciones de bloqueo utilizando la teoría unidimensional propuesta por Houlsby *et al.* (2008).

Diámetro del disco (mm)	Relación de bloqueo B	Factor de inducción axial a	Coeficiente de potencia máximo $C_{p\text{máx}}$
92.0	0.0904	0.399	0.732
120.8	0.1564	0.440	0.872
135.7	0.1976	0.466	0.985

En todos los casos se analizaron perfiles de velocidad en la vertical, a lo largo de la línea central del canal, con separaciones de 3, 6, 9, 12 y 15 diámetros aguas abajo del disco.

Se utilizó un velocímetro acústico Doppler (ADV) para medir las componentes de la velocidad instantánea en las direcciones (x, y, z), con un espaciamiento en la vertical de 1 mm aproximadamente y una longitud total del volumen de medición de 1 cm. Para disminuir el tiempo empleado en las mediciones, se realizaron en intervalos de 1 cm con datos y otro centímetro sin datos. La frecuencia de muestreo fue de 100 Hz, con un tiempo total de medición de 30 s, teniéndose así un total de 3 000 muestras en cada punto de análisis (a cada milímetro). El perfil de velocidades inicia desde 0.60 cm a partir del fondo del canal hasta una altura de 23.5 cm.

Antes de la interpretación y análisis de los datos obtenidos con el ADV, se eliminaron los valores atípicos en los puntos; para tal fin se utilizó

el método propuesto por Goring y Nikora (2002), y modificado por Mori, Suzuki y Kakuno (2007).

Recuperación de la velocidad en la estela lejana

Al instalar turbinas en serie es importante conocer la distancia mínima a la que es recomendable colocar la siguiente turbina aguas abajo (Xiao *et al.*, 2013), para aprovechar al máximo el espacio disponible, sin que esto afecte significativamente el desempeño de las mismas. Al respecto, entre los principales factores que influyen en la potencia generada por las turbinas hidrocínicas se encuentran la velocidad del flujo y la intensidad de turbulencia en la zona donde se ubica la turbina (Maganga, Germain, King, Pinon, & Rivoalen, 2010). Por esta razón es importante conocer el efecto que tiene incrementar la relación de bloqueo tanto en la recuperación de la velocidad en la estela lejana como en lo que corresponde a la intensidad de turbulencia. Para identificar tales elementos, en este estudio se hizo un conjunto de pruebas en el canal experimental.

Para conocer la recuperación de la velocidad en la estela lejana con distintas relaciones de bloqueo se estudiaron los discos con las características señaladas en la Tabla 2. Los discos se instalaron a una distancia de 2.0 m respecto a la entrada del canal y se colocaron en la línea central de éste, con separación respecto al fondo de 6 cm. Los

perfiles de velocidad se midieron a lo largo de la línea central del canal, en la dirección vertical; esta zona es la más adecuada para analizar el efecto de recuperación de la velocidad e intensidad de turbulencia en la estela, al ser la condición más desfavorable que presenta el cono de la estela.

Como ya se comentó, se utilizó un gasto $Q = 37$ l/s, con un tirante de 0.3 m, presentándose una velocidad media en el flujo de $u_0 = 0.503$ m/s; número de Froude $Fr = 0.293$. La intensidad de turbulencia media en la sección resultó ser $IT = 5.7\%$. Los números de Reynolds en función del diámetro del disco fueron $Re_1 = 46\ 276$ para $D_1 = 92.0$ mm; $Re_2 = 60\ 762$ para $D_2 = 120.8$ mm, y $Re_3 = 68\ 257$ para $D_3 = 135.7$ mm.

Xiao *et al.* (2013) definen el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu} \quad (16)$$

donde:

D : diámetro del disco poroso en m.

Re : número de Reynolds.

ν : viscosidad cinemática del agua en m^2/s .

Cálculo de la intensidad de turbulencia

La intensidad de turbulencia es una escala que caracteriza la turbulencia, expresada como un porcentaje. De acuerdo con Panton (2005), la intensidad de turbulencia se puede expresar con la Ecuación (17):

$$IT = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{u_0} \quad (17)$$

donde:

IT : intensidad de turbulencia en %.

u' , v' y w' : componentes de fluctuación de velocidad en las direcciones x , y , z , respectivamente, en m/s.

La intensidad de turbulencia media propia del canal se puede obtener de los datos del perfilado de velocidades en la vertical. Al superponer en una gráfica los perfilados generados con los datos obtenidos utilizando el velocímetro acústico Doppler ADV, en las gráficas de intensidad de turbulencia se presentan ciertos patrones que no corresponden a lo esperado en el fenómeno físico. Esto se debe a que la señal de ruido varía de forma parabólica con un mínimo alrededor del punto justo llamado "sweet spot", ubicado a 50 mm del transductor. Los haces receptores de la señal sólo convergen en el punto justo y en la región de divergencia se reduce el tamaño de la zona muestreada a partir del punto justo; esto genera una reducción en la calidad de los datos. Sin embargo, en la región, entre aproximadamente 43 y 61 mm por debajo del transductor se puede recoger por lo usual la información de velocidad

más fiable (Thomas, Schindfessel, McLelland, Creëlle, & De Mulder, 2017).

Otros trabajos señalan que el punto justo se ubica a unos 52 mm abajo del transductor. En esta zona, la región superpuesta de los haces acústicos del ADV es la más grande (Koca, Noss, Anlanger, Brand, & Lorke, 2017). Se concluye entonces que se debe seleccionar el punto con menor señal de ruido, que corresponde a un mínimo local.

Debido a ello, en las curvas de intensidad de turbulencia se aplica un filtrado de datos, seleccionando los mínimos locales de cada perfilado para construir una gráfica representativa del fenómeno.

Cálculo del coeficiente de potencia utilizando datos experimentales

Para medir el empuje hidrodinámico sobre los discos, se utilizó una celda de carga de 9.806 N, que recibe el empuje del disco mediante un vástago unido a un carro deslizante; la celda de carga tiene una precisión de 0.00196 N (ver Figura 8). Se midió en los tres discos porosos y se realizaron cinco repeticiones de la medición del empuje, con un total de 17 010 muestras en cada medición.



Figura 8. Dispositivo para medir el empuje hidrodinámico sobre un disco poroso.

Para obtener el empuje neto en los discos, se midió el correspondiente al vástago y luego se le restó al ensamble total (vástago y disco).

De acuerdo con Harrison, Batten, Myers y Bahaj (2010), el coeficiente de arrastre se calcula con la Ecuación (18):

$$C_T = \frac{F}{0.5\rho u_0^2 A} \quad (18)$$

Debido a las dificultades para medir la velocidad media en la zona donde se ubica el disco poroso u_1 , por limitaciones del velocímetro acústico Doppler utilizado, el cálculo aproximado de β se determinó a través de la aplicación de la teoría unidimensional propuesta por Houslyby *et al.* (2008). De esta forma, una vez estimado el valor de C_T , se determinó el valor del factor de inducción axial a correspondiente, así como el de β , con lo que se logró calcular el coeficiente de potencia.

Resultados y discusión

Pruebas experimentales con distintas relaciones de bloqueo

La intensidad de turbulencia media, en la sección donde se ubican los discos, que es representativa del canal, se determinó a partir de datos del perfilado de velocidades en la vertical. Para las pruebas sin disco poroso sumergido resultó un valor promedio de 5.70%. En la Figura 9 se muestra un mapa de curvas de intensidad de turbulencia para la sección transversal del canal, donde se colocaron los discos porosos. Se

obtuvieron valores cercanos a 8% tanto en el fondo del canal como en parte de la superficie libre.

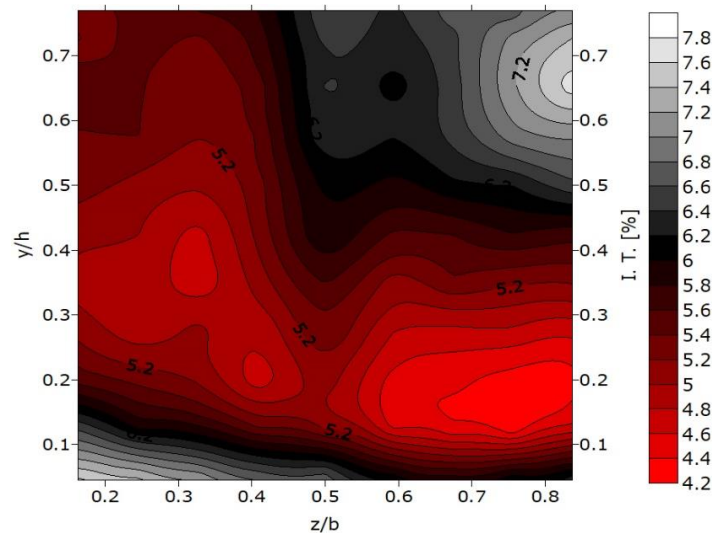


Figura 9. Intensidad de turbulencia en la sección del canal donde se ubican los discos porosos (sin disco).

Recuperación de la velocidad y la intensidad de turbulencia en el canal con un disco poroso de $D_1 = 92.0$ mm de diámetro y una relación de bloqueo $B_1 = 0.090$

En la Figura 10 se muestran los resultados de las mediciones de los perfiles de velocidad para $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido en el fluido.

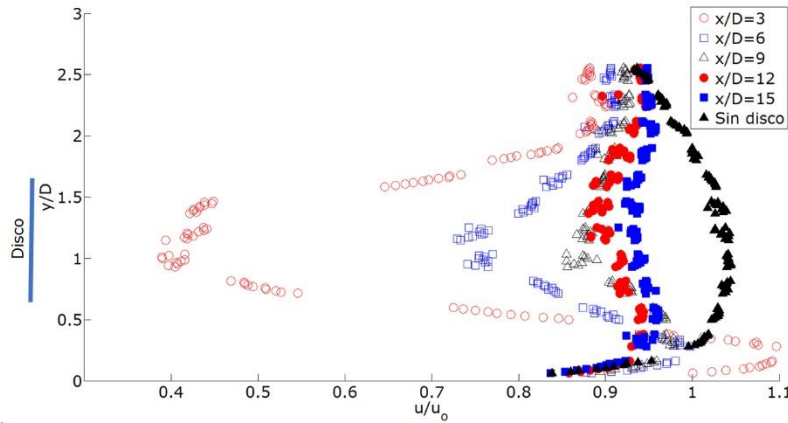


Figura 10. Perfiles de velocidad para $x/D = 3, 6, 9, 12,$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido. Disco poroso de 92.0 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$.

Con los datos de los perfiles de velocidad medidos en la vertical, se generó un mapa de curvas de velocidades (Figura 11). Considerando los valores de los puntos ubicados al centro del disco, con respecto al fondo del canal $y/D = 1.15$, la recuperación de la velocidad en $x/D = 3$ es de 40% ; para $x/D = 12$ se tiene una recuperación de 90% .

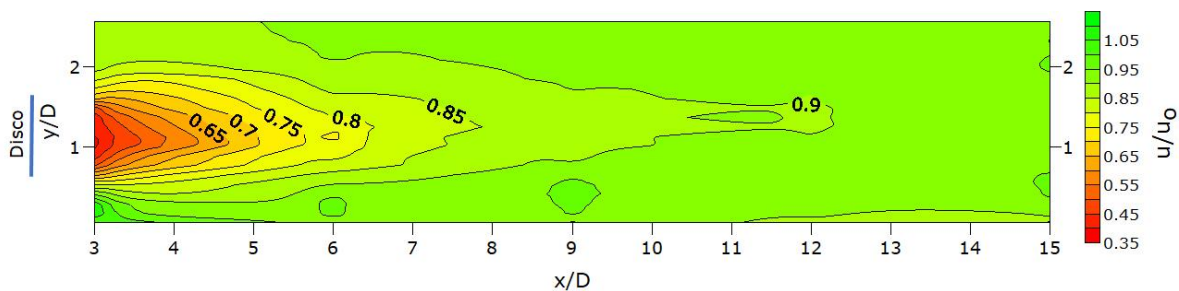


Figura 11. Mapa de curvas de velocidad. Disco poroso de 92.0 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$.

Los perfiles de intensidad de turbulencia en el canal para $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de intensidad de turbulencia sin sumergir el disco en el fluido se muestran en la Figura 12. Como se observa en tal figura, la superposición de los perfilados generados con los datos obtenidos utilizando el velocímetro acústico Doppler ADV presenta ciertos patrones que no corresponden a lo esperado en el fenómeno físico.

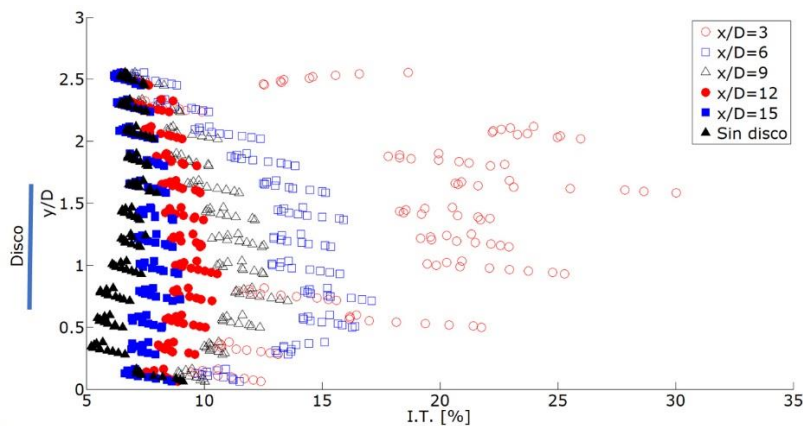


Figura 12. Intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 92.0 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$.

Aplicando el filtrado de datos a los perfiles de intensidad de turbulencia se generan los gráficos mostrados en la Figura 13.

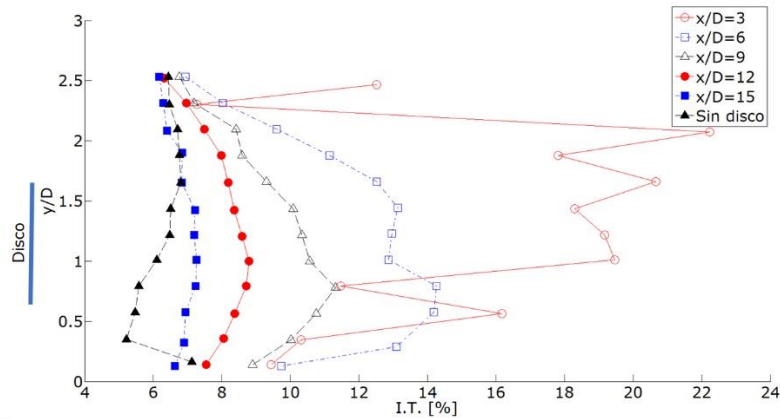


Figura 13. Filtrado de datos aplicado a las intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 92.0 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$.

La intensidad de turbulencia al centro del disco $y/D = 1.15$ presenta valores en $x/D = 3$ cercanos a 20% ; para $x/D = 12$, los valores son de un 8% , siendo en general los valores más altos de intensidad de turbulencia en cada perfil de velocidades medido (Figura 14).

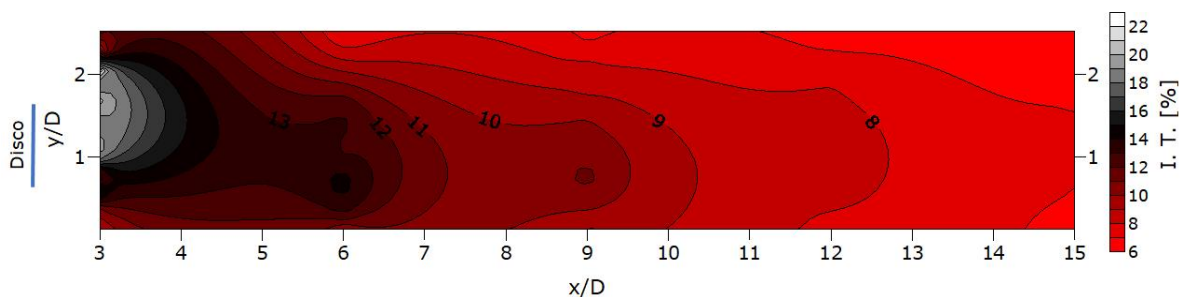


Figura 14. Mapa de curvas de intensidad de turbulencia. Disco poroso de 92.0 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_1 = 0.090$.

Recuperación de la velocidad e intensidad de turbulencia en el canal con un disco poroso de $D_2 = 120.8$ mm de diámetro y una relación de bloqueo $B_2 = 0.156$

Los resultados de las mediciones de los perfiles de velocidad en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso se muestran en la Figura 15, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido en el fluido.

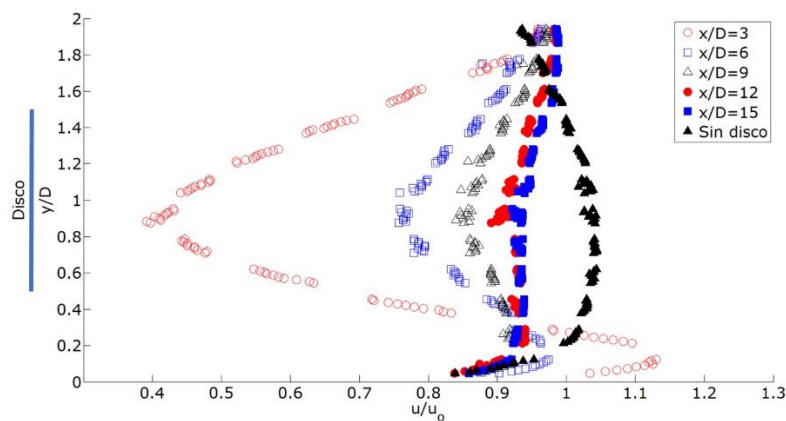


Figura 15. Perfiles de velocidad para $x/D = 3, 6, 9, 12,$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido. Disco poroso de 120.8 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$.

En la Figura 16 se muestra un mapa de curvas de velocidades generado con las mediciones de los perfiles de velocidad en la vertical. Para $y/D = 1.0$, que corresponde a la altura del centro del disco, la recuperación de la velocidad en $x/D = 3$ es de 40%; para $x/D = 12$, se presenta una recuperación de 92%.

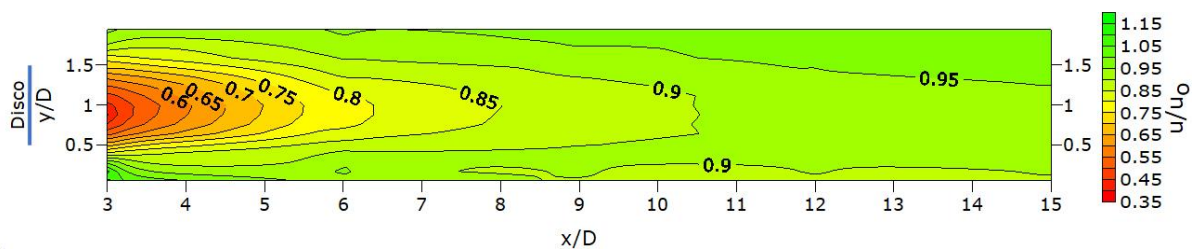


Figura 16. Mapa de curvas de velocidad. Disco poroso de 120.8 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$.

Los perfiles de intensidad de turbulencia en el canal para $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de intensidad de turbulencia sin sumergir el disco en el fluido se muestran en la Figura 17.

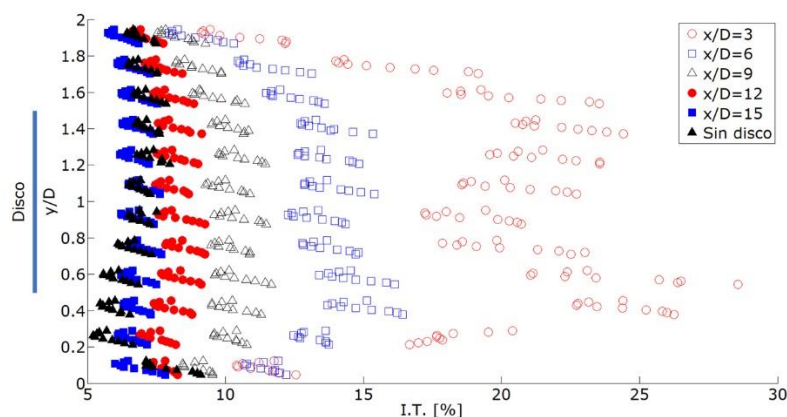


Figura 17. Intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 120.8 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$.

Aplicando el filtrado de datos a los perfiles de intensidad de turbulencia se generan los gráficos mostrados en la Figura 18.

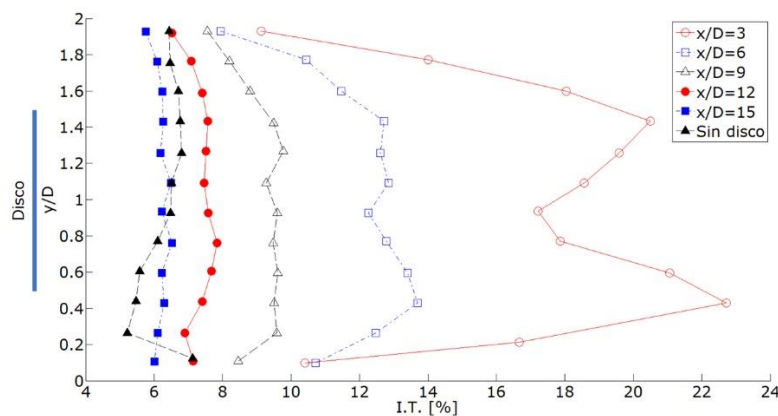


Figura 18. Filtrado de datos aplicado a las intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 120.8 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$.

En $y/D = 1.0$ correspondiente al centro del disco, la intensidad de turbulencia presenta valores en $x/D = 3$ cercanos a 18% ; para $x/D = 12$, cerca de 8% (Figura 19).

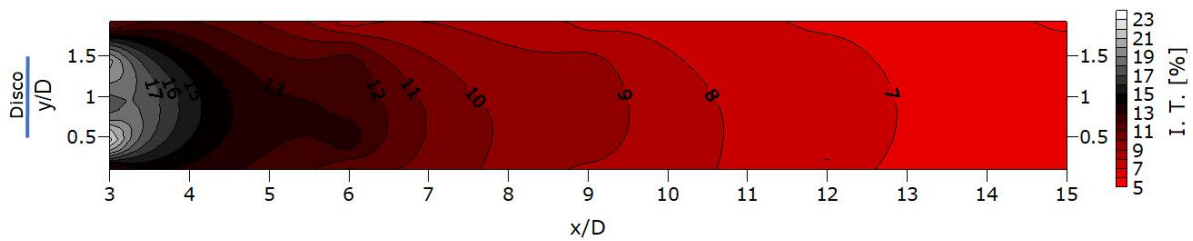


Figura 19. Mapa de curvas de intensidad de turbulencia. Disco poroso de 120.8 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_2 = 0.156$.

Recuperación de la velocidad y la intensidad de turbulencia en el canal con un disco poroso de $D_3 = 135.7$ mm de diámetro y una relación de bloqueo $B_3 = 0.197$

En la Figura 20 se muestran los resultados de las mediciones de los perfiles de velocidad para $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido en el fluido.

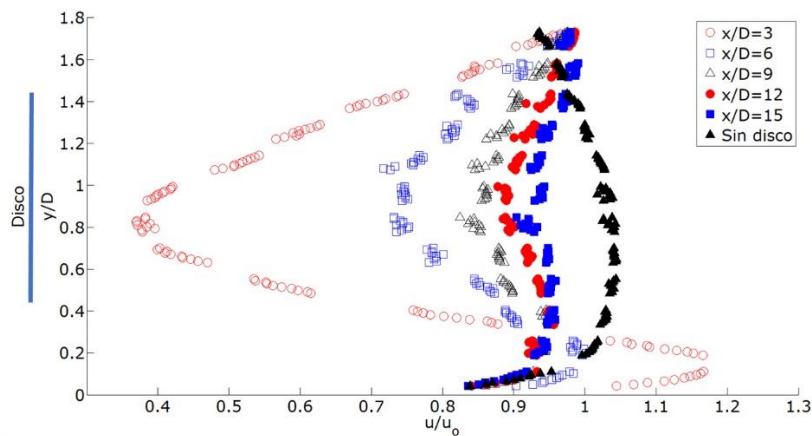


Figura 20. Perfiles de velocidad para $x/D = 3, 6, 9, 12,$ y 15 aguas abajo del disco poroso, incluyendo el perfil de velocidad sin disco sumergido. Disco poroso de 135.7 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_3 = 0.197$.

Con la información de los perfiles de velocidad en la vertical, se generó un mapa de curvas de velocidades (Figura 21). Considerando los valores de los puntos ubicados en $y/D = 0.95$, al centro del disco, la recuperación de la velocidad en $x/D = 3$ es de 40%; para $x/D = 12$, se tiene una recuperación de 90%.

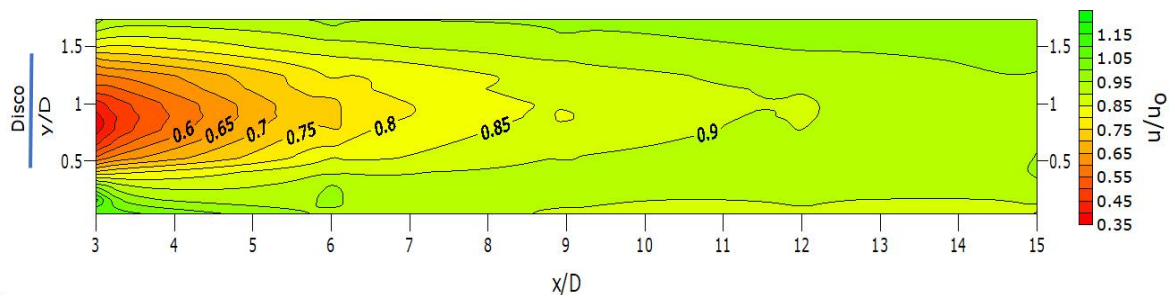


Figura 21. Mapa de curvas de velocidad. Disco poroso de 135.7 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_3 = 0.197$.

Los perfiles de intensidad de turbulencia en el canal para $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco, incluyendo el perfil de intensidad de turbulencia sin disco sumergido en el fluido, se muestran en la Figura 22.

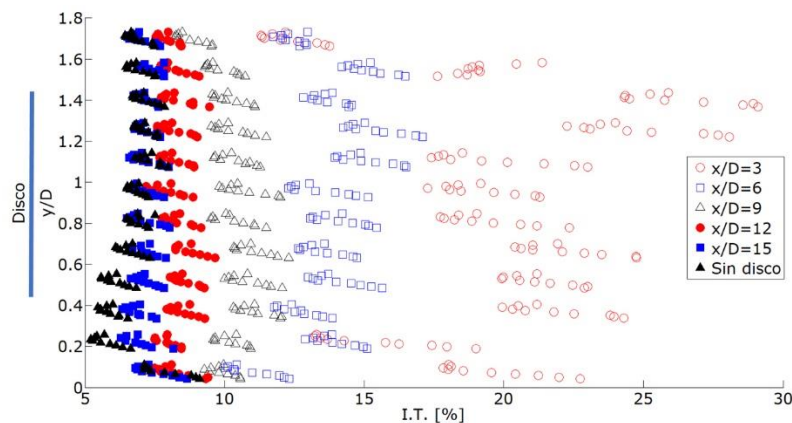


Figura 22. Intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 135.7 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_3 = 0.197$.

Aplicando el filtrado de datos a los perfiles de intensidad de turbulencia se generan los gráficos mostrados en la Figura 23.

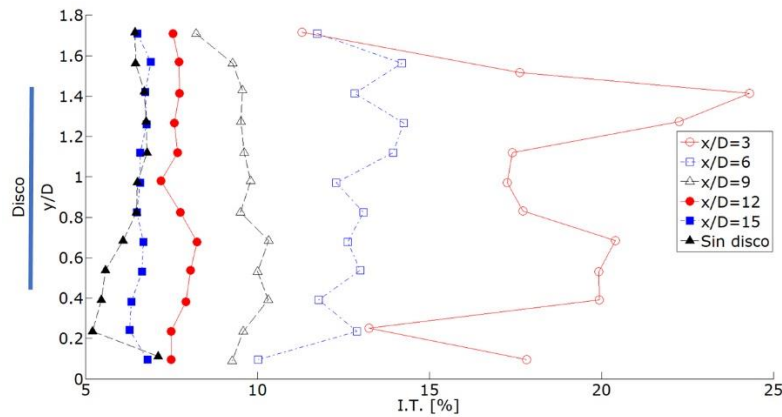


Figura 23. Filtrado de datos aplicado a las intensidades de turbulencia para los perfiles de velocidad en el canal en $x/D = 3, 6, 9, 12$ y 15 aguas abajo del disco poroso, y sin disco sumergido. Disco poroso de 135.7 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_3 = 0.197$.

Considerando los valores de los puntos ubicados al centro del disco con respecto al fondo del canal $y/D = 0.95$, la intensidad de turbulencia presenta valores en $x/D = 3$ cercanos a 18% ; para $x/D = 12$, cerca de 8% (Figura 24).

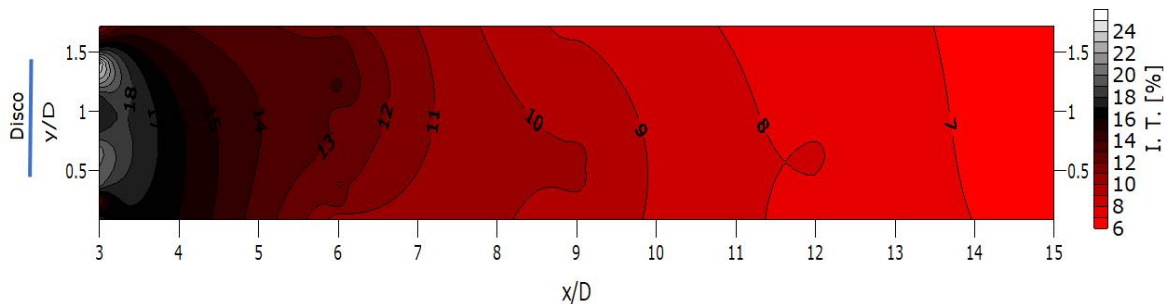


Figura 24. Mapa de curvas de intensidad de turbulencia. Disco poroso de 135.7 mm de diámetro y relación de bloqueo $B_3 = 0.197$.

Los resultados muestran que, para las condiciones hidráulicas establecidas en el canal experimental, independientemente de la relación de bloqueo, la recuperación de la velocidad en la estela lejana a los 12 diámetros aguas abajo del disco alcanza un valor cercano a 90% respecto a la velocidad media del perfil antes de introducir los discos. Lo mismo sucede para el caso de la intensidad de turbulencia, que a los 12 diámetros aguas abajo del disco muestra un valor cercano a 8%. Esto permitiría realizar una primera recomendación para el aprovechamiento óptimo del espacio de una fila de turbinas hidrocinéticas colocadas en serie.

Es importante señalar que los estudios con altas relaciones de bloqueo se deben extender analizando turbinas hidrocinéticas colocadas en serie, paralelo e incluso matrices, como es común encontrarlas en canales y ríos. Es de esperarse un aumento en la recuperación de la velocidad en la estela lejana a medida que se incrementa la relación de bloqueo en turbinas, como se muestra en los estudios de Chime y Malte (2014), con turbinas colocadas en paralelo. Bajo este escenario, sería importante analizar el comportamiento de las curvas de intensidad de turbulencia y determinar la separación óptima entre turbinas.

**Cálculo del coeficiente de arrastre y coeficiente de potencia
para relaciones de bloqueo $B_1 = 0.090$, $B_2 = 0.156$ y $B_3 =$
 0.197**

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los empujes hidrodinámicos para las distintas relaciones de bloqueo. El empuje hidrodinámico entre el disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_2 = 0.156$ presenta un incremento de 99%; el empuje hidrodinámico entre el disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_3 = 0.197$ muestra un incremento de 170%.

Tabla 4. Empuje hidrodinámico en discos porosos con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$, $B_2 = 0.156$ y $B_3 = 0.197$, resultados experimentales.

Diámetro del disco (mm)	Relación de bloqueo	Porosidad	Empuje total (N)		Empuje sobre vástago (N)	Empuje sobre disco (N)	
92.0	0.0904	0.34	1.448	±0.040	0.103	1.346	±0.040
120.8	0.1564	0.34	2.767	±0.049	0.088	2.679	±0.049
135.7	0.1976	0.34	3.719	±0.067	0.081	3.638	±0.067

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los coeficientes de arrastre y los coeficientes de potencia para las distintas relaciones de bloqueo en estudio. El coeficiente de arrastre entre el disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_2 = 0.156$ presenta un incremento de 15%, mientras que el coeficiente de arrastre entre el

disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_3 = 0.197$ muestra un incremento de 26%. Por otro lado, el coeficiente de potencia entre el disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_2 = 0.156$ tiene un incremento de 37%, y el coeficiente de potencia entre el disco con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$ y el de relación de bloqueo $B_3 = 0.197$ presenta un incremento de 59%.

Tabla 5. Coeficiente de arrastre en discos porosos con relación de bloqueo $B_1 = 0.090$, $B_2 = 0.156$ y $B_3 = 0.197$, resultados experimentales.

Diámetro del disco (mm)	Relación de bloqueo	Porosidad	Densidad del agua (kg/m ³)	Empuje sobre disco (N)		Área disco (m ²)	u_0 (m/s)	u_1 (m/s)	C_T	C_p
92.0	0.0904	0.34	998.2	1.346	±0.040	0.0066	0.503	0.192	1.603	0.613
120.8	0.1564	0.34	998.2	2.679	±0.049	0.0115	0.503	0.228	1.845	0.838
135.7	0.1976	0.34	998.2	3.638	±0.067	0.0145	0.503	0.244	2.013	0.977

En la Tabla 6 se muestra una comparativa entre los coeficientes de potencia obtenidos con las pruebas experimentales y los coeficientes de potencia máximos logrados con la teoría unidimensional; las diferencias en los valores alcanzados son de 19.45% para el caso de $B_1 = 0.090$; 4.13% para $B_2 = 0.156$, y 0.84% para $B_3 = 0.197$.

Tabla 6. Coeficiente de potencia en discos porosos con resultados experimentales y coeficientes de potencia máximos obtenidos con la teoría unidimensional.

Diámetro del disco (mm)	Relación de bloqueo	Porosidad	C_p experimental	$C_{p\text{máx}}$ teoría unidimensional	Diferencia (%)
92.0	0.0904	0.34	0.613	0.732	19.45
120.8	0.1564	0.34	0.838	0.872	4.13
135.7	0.1976	0.34	0.977	0.985	0.84

En la Figura 25 se muestra la influencia de la relación de bloqueo en el coeficiente de potencia en discos porosos con resultados experimentales y utilizando la teoría unidimensional del disco actuador propuesta por Houslyby *et al.* (2008).

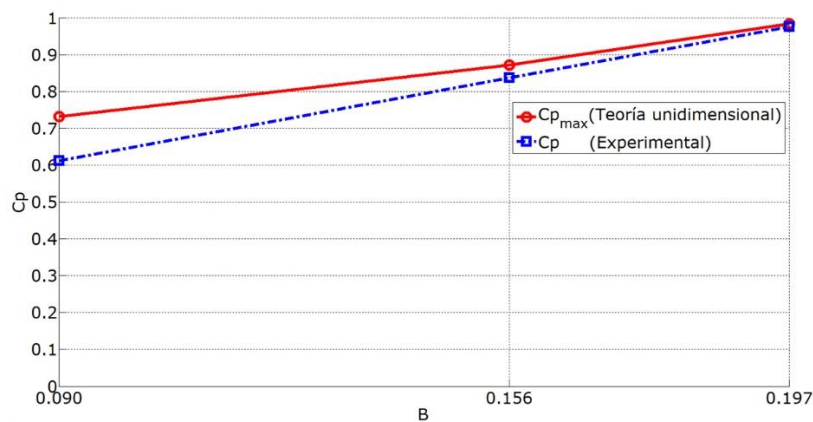


Figura 25. Coeficiente de potencia en discos porosos con resultados experimentales y coeficientes de potencia máximos obtenidos con la teoría unidimensional para diferentes relaciones de bloqueo.

Conclusiones

Para las distintas relaciones de bloqueo y las condiciones hidráulicas establecidas en las pruebas experimentales, se concluye que la recuperación de la velocidad en la estela lejana, en y/D correspondiente a la ubicación del centro del disco poroso, alcanza un 90% a 12 diámetros aguas abajo del disco. La intensidad de turbulencia en 12 diámetros aguas abajo del disco presenta un valor cercano a 8%, magnitud que para fines prácticos es aceptable, en comparación con el 5.7% que exhibe la sección del canal sin disco poroso. De esta manera se puede recomendar que, ante un arreglo de turbinas colocadas en serie, se adopte este criterio para establecer la separación mínima entre una y otra turbina.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que existe un incremento en la potencia aprovechable de turbinas hidrocínicas, al aumentar la relación de bloqueo en los canales. Por ejemplo, se obtuvo que al incrementar la relación de bloqueo de $B_1 = 0.090$ a $B_2 = 0.156$, se tiene un incremento en el coeficiente de potencia de 37%; con un incremento de $B_1 = 0.090$ a $B_3 = 0.197$, hay un aumento del coeficiente de potencia de 59%.

Comparando los coeficientes de potencia $C_{p1} = 0.613$, $C_{p2} = 0.838$ y $C_{p3} = 0.977$, obtenidos para las relaciones de bloqueo $B_1 = 0.090$, $B_2 = 0.156$ y $B_3 = 0.197$, respectivamente, con los máximos teóricamente esperados, se encontró que con una relación de bloqueo del orden de 0.20, los valores del coeficiente de potencia se asemejan a los máximos teóricamente esperados, y que con valores inferiores a 0.10 de esta

relación de bloqueo, dicho coeficiente cae alrededor de un 20% con respecto al máximo teóricamente esperado.

Si bien es de reconocer que para generalizar los resultados anteriores es necesario contar con mayor número de pruebas experimentales, en canales de diferentes dimensiones y utilizando discos con distinta porosidad, los autores consideran que son lo suficientemente sólidos como para tener una primera orientación ante la decisión de adoptar las dimensiones de una turbina y seleccionar la separación de éstas cuando se colocan en serie, en especial si se busca maximizar la potencia extraíble de las mismas. Asimismo, es conveniente realizar pruebas en canales con condiciones reales, donde la rugosidad puede ser significativa en los perfiles de velocidad o, en su caso, validar un modelo físico-matemático con dinámica de fluidos computacional CFD, utilizando los resultados del presente estudio, y así manipular las variables de interés para generalizar los resultados.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el recurso económico otorgado para desarrollar este trabajo, y tanto a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), como al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por facilitar el uso de sus instalaciones.

Referencias

Garrett, C., & Cummins, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 588, 243-251.

- Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126.
- Harrison, M. E., Batten, W. M., Myers, L. E., & Bahaj, A. S. (2010). A comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines. *IET Renewable Power Generation*, 4(6), 613-627.
- Chime, A. H., & Malte, P. C. (2014). Hydrokinetic turbines at high blockage ratio. *Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium*, METS2014, Seattle, WA, USA.
- Houlsby, G. T., Draper, S., & Oldfield, M. L. G. (2008). *Application of linear momentum actuator disc theory to open channel flow* (Technical Report OUEL 2296/08). Oxford, UK: Department of Engineering Science, University of Oxford.
- Koca, K., Noss, C., Anlanger, C., Brand, A., & Lorke, A. (2017). Performance of the vectrino profiler at the sediment-water interface. *Journal of Hydraulic Research*, 55(4), 573-581.
- Lomelí, R., & Álvarez, N. (2014). La conservación de los distritos de riego y las cuencas de captación. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Maganga, F., Germain, G., King, J., Pinon, G., & Rivoalen, E. (2010). Experimental characterisation of flow effects on marine current turbine behaviour and on its wake properties. *IET Renewable Power Generation*, 4(6), 498-509.

- Mori, N., Suzuki, T., & Kakuno, S. (2007). Noise of acoustic Doppler velocimeter data in bubbly flows. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(1), 122-125.
- Myers, L. E., & Bahaj, A. S. (2012). An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays. *Renewable Energy*, 37, 28-36.
- Okulov, V. L., & Van Kuik, G. A. (2012). The Betz-Joukowski limit: On the contribution to rotor aerodynamics by the British, German and Russian scientific schools. *Wind Energy*, 15(2), 335-344.
- Panton, R. L. (2005). *Incompressible flow*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. .
- Thomas, R. E., Schindfessel, L., McLelland, S. J., Creëlle, S., & De Mulder, T. (2017). Bias in mean velocities and noise in variances and covariances measured using a multistatic acoustic profiler: The Nortek Vectrino Profiler. *Measurement Science and Technology*, 28(7).
- Whelan, J. I., Graham, J. M. R., & Peiró, J. (2009). A free-surface and blockage correction for tidal turbines. *Journal of Fluid Mechanics*, 624, 281-291.
- Xiao, H., Duan, L., Sui, R., & Rösger, T. (2013). Experimental investigations of turbulent wake behind porous disks. *Proceedings of the 1st Marine Energy Technology Symposium, METS2013*, Washington, DC, USA.