

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN UN PASO DE PECES PARA ESPECIES
NATIVAS CHILENAS**

JUAN PABLO TORO LABBÉ¹
PABLO JOSÉ MARCHANT CONTRERAS²
OSCAR LINK³

RESUMEN

El diseño actual de obras de paso para peces contempla criterios conocidos para especies migratorias de gran tamaño del tipo salmónidos. Sin embargo, estos criterios no resultan aplicables a peces de pequeño tamaño (<15 cm). El Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción cuenta con una rampa prototipo para el paso de peces nativos chilenos de 4 m de longitud y 70 cm de ancho con 5% de inclinación. Presenta bloques ubicados transversalmente al flujo, y su diseño y funcionamiento experimental mostró ser efectivo en permitir el paso de peces. Esta investigación pretende hacer una contribución con información relevante para el mejoramiento del diseño de pasos de peces con el objeto de conservar especies endémicas de Chile. Para ello, se realizó un estudio numérico del flujo medio en la rampa, considerando un caudal de 10 l/s, el cual tiene asociado un número de Reynolds de aproximadamente $1,1 \times 10^5$ y Froude de 2,8. Se pudo comprobar que el modelo numérico implementado reproduce de manera adecuada la velocidad media del flujo y cualitativamente la distribución de velocidades observada en la sección transversal del canal, tal como se comprobó con videos que mostraban el funcionamiento del canal. En relación con las estadísticas de la turbulencia se encontró que los valores máximos de TKE en el eje del canal son similares a los obtenidos cerca de los obstáculos, con valores representativos de aproximadamente $0,06 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Se discuten las variaciones periódicas de las estadísticas de la turbulencia inducidas por los obstáculos.

¹Profesor Asistente de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello–
juan.toro.l@unab.cl

²Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello—
pmarchantcontreras@gmail.com

³Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Universidad de Concepción—
olink@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, aproximadamente un 28% de la potencia neta instalada proviene de centrales hidroeléctricas (CNE, 2019), lo cual se explica en gran medida por la diferencia de elevación existente entre la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico (Kasper, 2018). La mayor parte de dicha producción está asociada a centrales hidroeléctricas que cuentan con un embalse de regulación, estructura hidráulica que permite un aprovechamiento eficiente del agua no sólo para fines de energía, sino que para otros usos tales como el riego en la agricultura y el uso recreacional.

La construcción de embalses y bocatomas tiene como resultado adicional, un aumento de las áreas de inundación y una fragmentación longitudinal del río, con el correspondiente cambio en los patrones del flujo, respecto a la condición natural. Al ser el embalse una obstrucción, el hábitat natural de las especies migratorias de peces también se ve modificado, impidiendo que puedan llevar a cabo sus ciclos naturales de reproducción. Esto trae como consecuencia una reducción en las poblaciones de peces migratorios, lo que a su vez provoca cambios en la cadena alimentaria y pérdida de biodiversidad (Laborde, et al., 2018).

Con el propósito de mantener la conectividad de estos hábitats naturales, los ingenieros han diseñado y construido distintos tipos de pasos para peces. Los pasos para peces son estructuras hidráulicas que permiten que los peces puedan sortear la obstrucción impuesta por el embalse (Rajaratnam, et al., 1986). Típicamente, estas estructuras están diseñadas de modo que operen con patrones de turbulencia que a los peces les resulten atractivos. Sin embargo, no existe claridad respecto a cuáles son los principales factores que hacen que algunos pasos de peces funcionen mejor que otros, ni tampoco cuál diseño es más apropiado para una especie de pez en particular (Link, et al., 2017).

Un buen diseño hidráulico de un paso para peces debiera incorporar las características biológicas de los peces, tales como migraciones, patrones de movimiento y preferencias alimentarias (Link y Habit, 2015), así como otras propiedades hidráulicas tales como la profundidad del agua, geometría de la sección transversal, velocidad e intensidad de la turbulencia (Link, et al., 2017). Por esta razón, los pasos para peces debieran ser diseñados de forma que funcionen de manera adecuada para una determinada especie.

Usualmente, los pasos para peces corresponden a canales diseñados para favorecer el paso de especies migratorias salmónidas (Kasper, 2018), especies que pueden alcanzar una longitud de hasta 2 m (Fishbase.in, 2019). Este diseño, naturalmente, es muy distinto de aquel requerido por peces endémicos, cuya longitud es inferior a 15 cm y los cuales requieren moverse en flujos con caudales más pequeños y números de Reynolds inferiores. En el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción diseñaron el prototipo de un canal tipo Denil que permitiera el paso natural de tres especies endémicas de pequeño tamaño del sur de Chile; estas son *Trichomycterus aerolatus*, *Percilia irwini* y *Diplomystes nahuelbutaensis*. En el

trabajo de Kasper (2018), se estudió el comportamiento del *Trichomycterus aerolatus* utilizando en el canal prototipo caudales variables de 4, 10 y 15 l/s, respectivamente.

De las pruebas llevadas a cabo por el equipo de investigadores de la Universidad de Concepción, se pudo observar que el caudal de 10 l/s correspondía al límite superior con el cual los *T. aerolatus* podían nadar hacia aguas arriba. Las observaciones indicaron que los peces se impulsaban hacia aguas arriba nadando en zonas cercanas a los obstáculos, para luego descansar entre obstáculos aprovechando las corrientes de recirculación que allí se generaban.

Dada la anterior evidencia experimental, resulta natural preguntarse cuáles son los valores de las estadísticas del flujo medio y turbulencia asociados con el caudal de 10 l/s y cómo dichas estadísticas influyen en el comportamiento observado de los *T. aerolatus*. Con este propósito, se realizó una simulación numérica del tipo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations) empleando para ello el modelo de turbulencia k-épsilon estándar en conjunto con el método VoF (Volume of Fluid) para capturar la ubicación de la superficie libre. El software de licencia abierta OpenFOAM fue utilizado con dos mallas de diferente resolución de manera de chequear la convergencia de malla en los resultados obtenidos. Se espera contribuir con este trabajo a un mejor entendimiento respecto a las condiciones del flujo de agua asociadas con el paso de peces endémicos de tamaño pequeño.

2. MARCO TEÓRICO

Ecuaciones que gobiernan el flujo

En este trabajo se utilizaron las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS) para un flujo incompresible en régimen permanente. Las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de cantidad de movimiento se presentan a continuación.

Conservación de masa

Para un flujo incompresible en régimen permanente, la ecuación de conservación de la masa indica que la divergencia del vector velocidad media debe ser nula.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Conservación de cantidad de movimiento

Esta es la ecuación principal que describe la dinámica de los fluidos y se obtiene de la segunda ley de Newton. La ecuación de conservación de momentum establece que la variación de la cantidad de movimiento de una porción de fluido se debe a las fuerzas que actúan sobre ella. Estas ecuaciones, en conjunto con la ley de conservación de masa, constituyen las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^R) \quad (2)$$

donde \bar{u}_i es la velocidad promedio del flujo, ρ es la densidad del fluido, \bar{p} es la presión media, $\bar{\tau}_{ij}$ representa el tensor medio de tensiones asociado con la viscosidad del fluido, τ_{ij}^R son las tensiones de Reynolds. La convención de Einstein va de forma implícita en los índices repetidos.

Para cerrar el problema expuesto por las ecuaciones (1) y (2) se utilizó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ estándar, el cual utiliza el concepto de viscosidad turbulenta (ν_T) y supone que las tensiones de Reynolds y la tasa media de deformación (\bar{S}_{ij}) se relacionan de forma lineal de acuerdo con el criterio de Boussinesq (Davidson, 2015).

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\rho \nu_T \bar{S}_{ij} - \frac{\rho}{3} (\overline{u'_k u'_k}) \delta_{ij} \quad (3)$$

donde el superíndice “prima” indica fluctuaciones de velocidad debidas a la turbulencia (las velocidades instantáneas están dadas por $u_i = \bar{u}_i + u'_i$) y δ_{ij} es el delta de Kronecker. La tasa media de deformación está dada por:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Modelo matemático

Modelo $k - \varepsilon$ estándar

Este modelo de turbulencia de Jones y Launder (1972) utiliza dos ecuaciones de transporte para el cálculo de la viscosidad turbulenta y se basa en la aproximación de Boussinesq (Moukalled et al., 2016). La primera ecuación corresponde a una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta (k), la cual se obtiene a partir de una ecuación de energía modificada:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon + \left(\frac{\tau_{ij}^R}{\rho} \right) \bar{S}_{ij} \quad (5)$$

donde $k = 0.5 \overline{u'_k u'_k}$ y ν es la viscosidad cinemática molecular. El último término en (5) representa la producción de energía cinética turbulenta, y puede escribirse en forma compacta como $\underline{\underline{\tau}}^R : \underline{\underline{S}}$.

La segunda ecuación corresponde a una ecuación de transporte para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ε) y es muy similar a la ecuación de transporte para k .

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\tau_{ij}^R}{\rho} \right) \bar{S}_{ij} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\nu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\varepsilon = 2\nu \overline{S'_{ij}S'_{ij}} \quad (8)$$

$$S'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

En el modelo $k - \varepsilon$ estándar, los valores de los coeficientes σ_k , σ_ε , $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ y C_μ son iguales a 1,0; 1,3; 1,44; 1,92; y 0,09, respectivamente.

3. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Geometría del canal

El canal prototipo está ubicado en la Universidad de Concepción y tiene dimensiones de 4 m de largo y 70 cm de ancho con una pendiente de 5% de modo de asegurar flujo supercrítico. El canal cuenta con diez pares de obstáculos ubicados de forma simétrica con respecto al eje longitudinal del canal (Figura 1a) y cuya separación es de 30 cm, tal como se detalla en la Figura 1b. Estos obstáculos tienen dimensiones de 7,6 cm de ancho; 15,2 cm de largo y 3,4 cm de alto.

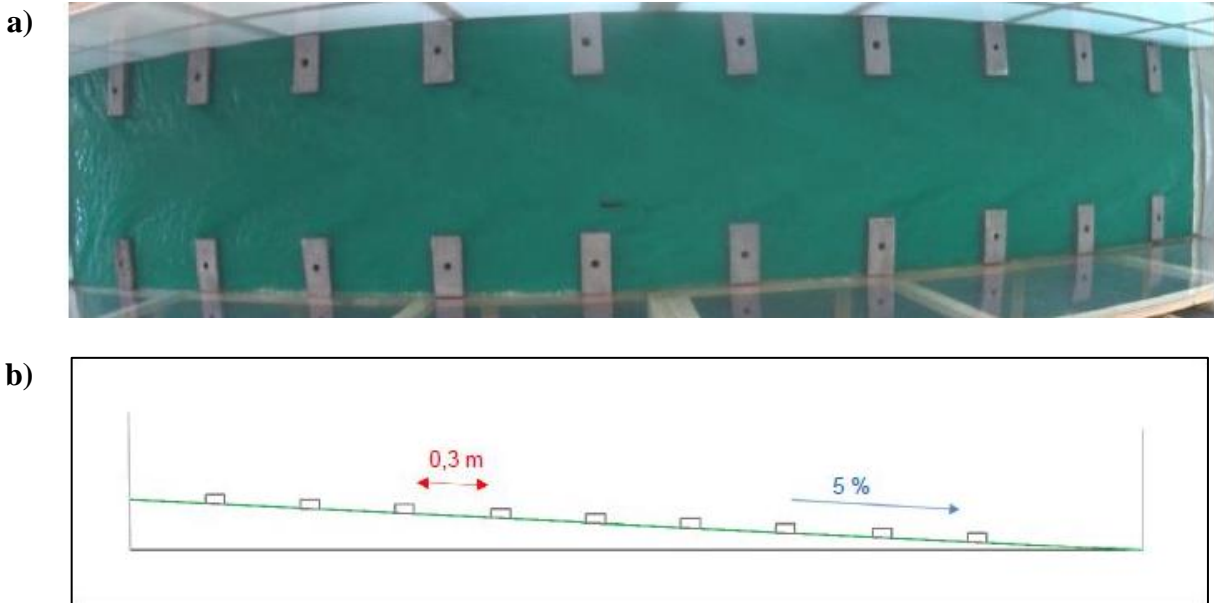


Figura 1. a) Vista en planta del canal prototipo; **b)** Sección longitudinal del canal sobre los obstáculos.

En esta investigación, se simuló el canal con un caudal de 10 l/s el cual tiene asociado un número de Reynolds de aproximadamente $1,1 \times 10^5$, y un número de Froude de 2,8 basado en una longitud de referencia de 7 cm, la cual se calculó usando el ancho entre los obstáculos (sección transversal) y la velocidad media medida en el último par de obstáculos.

Descripción del dominio computacional

Los obstáculos se modelaron en 3D usando AutoCAD y luego se exportaron a OpenFOAM como un único archivo STL. Estos obstáculos fueron dispuestos de forma horizontal para facilitar la generación de la malla, de manera que, para efectos de la simulación numérica, se descompuso el vector de aceleración de gravedad en dos componentes; una en sentido horizontal, en la dirección del flujo, y otra en dirección perpendicular al fondo del canal en dirección hacia el fondo del canal.

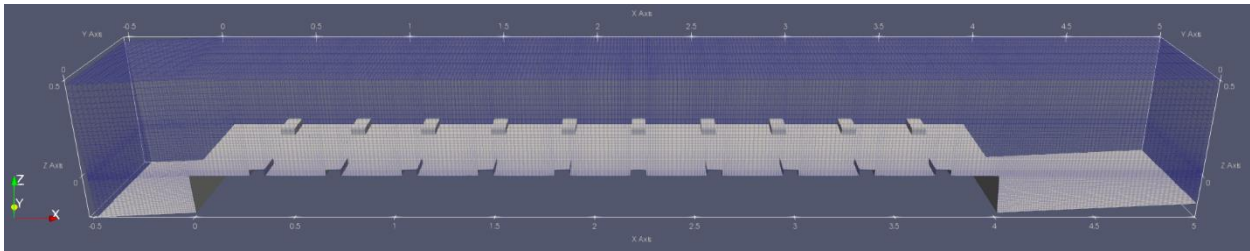


Figura 2. Vista lateral de la malla utilizando el software ParaView.

Tal como se observa en la Figura 2, además del canal, se incorporó una piscina en el extremo de más aguas arriba, y una caída en el extremo de más aguas abajo. Ambos elementos son ficticios, es decir, no son parte del canal prototipo; sin embargo, permitieron representar de manera adecuada las condiciones de borde observadas en el laboratorio. Al tratarse de un escurrimiento supercrítico, la caída hidráulica no tiene influencia sobre el flujo de más aguas arriba. Similarmente, la piscina actúa tal que el nivel en ella se incrementa progresivamente, de manera que el flujo de agua ingresa de manera suave hacia el canal principal. En la figura 2 se observa también que existe una inclinación en la piscina y en el tramo luego de la caída hidráulica, en concordancia con la inclinación existente entre el fondo del canal y la horizontal.

La malla se generó usando la herramienta BlockMesh, la cual lee la geometría declarada en el archivo BlockMeshDict, que descompone la geometría en bloques hexagonales. La malla completa fue construida en base a 304 puntos que componen 144 bloques. Posteriormente, se utilizó la herramienta SnappyHexMesh, que utiliza el archivo SnappyHexMeshDict, en el cual se declara la ubicación y nombre del archivo STL que se necesita recortar de la malla. Los bloques declarados en BlockMeshDict fueron ubicados de forma que calzaran perfectamente con la posición exacta de los obstáculos. Finalmente, se agregó una condición inicial para el agua, usando la herramienta setFields, definiendo para el tiempo inicial un bloque de agua que llenó el canal y la piscina. Este bloque de agua se posicionó de forma que el agua quedara justo al borde de la caída. De esta forma, al iniciar la simulación, el agua comienza a caer inmediatamente.

La simulación fue realizada en una estación de trabajo que cuenta con un procesador Intel Core i5-6500 con frecuencia de 3,2GHz y una memoria RAM de 8GB. La simulación se realizó usando los cuatro núcleos del procesador de forma paralela. Dos mallas fueron utilizadas para hacer un análisis de convergencia de malla. La primera malla contiene un total de 884.509 celdas, desde ahora nombrada “malla gruesa” y, la segunda, contiene un 40,3% más de celdas, dando un total de 1.240.720, desde ahora nombrada “malla fina”. Utilizando la malla gruesa, se corrió la simulación durante 60 segundos de flujo. Luego, usando la herramienta *mapFields*, se traspasaron los campos

y se interpolaron a la malla fina, que luego se corrió por 6 segundos más, para permitir ajustes en la solución.

Condiciones de borde

A continuación, se detallan las condiciones de borde empleadas:

- **inlet:** Para la velocidad de entrada, se utilizó la condición de borde *variableHeightFlowRateInletVelocity*, la cual calcula la velocidad del flujo basándose en el caudal volumétrico de entrada especificado (openfoam.org, 2019), el cual fue definido como $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. Para la presión se asignó la condición *zeroGradient* (derivadas nulas en la dirección longitudinal) y para las variables k y ε se asignaron valores de $9,60 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ y $5,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$ respectivamente.
- **outlet:** En la frontera de salida se asignó la condición de *zeroGradient* en las variables velocidad y presión. En las variables k y ε se usó la condición *InletOutlet* y finalmente en la variable nut se usó la condición *calculated*.
- **atmosphere:** Es la frontera superior y se le impuso la condición de *pressureInletOutletVelocity* para la velocidad, *totalPressure* en la presión, *InletOutlet* en las variables k y ε y finalmente *calculated* en la variable nut.
- **bottom, front, back y obstáculos:** En estas últimas cuatro fronteras del modelo, se definieron condiciones de borde de no deslizamiento para la velocidad y las respectivas funciones de pared de cada variable.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se verificó que el flujo estuviera desarrollado, de manera que las variables instantáneas tuvieran sentido físico, es decir, fueran representativas del flujo de agua en el tiempo. Se extrajeron datos de altura de agua para los cuatro últimos segundos de simulación de la malla fina; es decir, entre los segundos 63 a 66, y se comprobaron variaciones mínimas en el tiempo entre dichos valores. Estos resultados se presentan en la Figura 3.

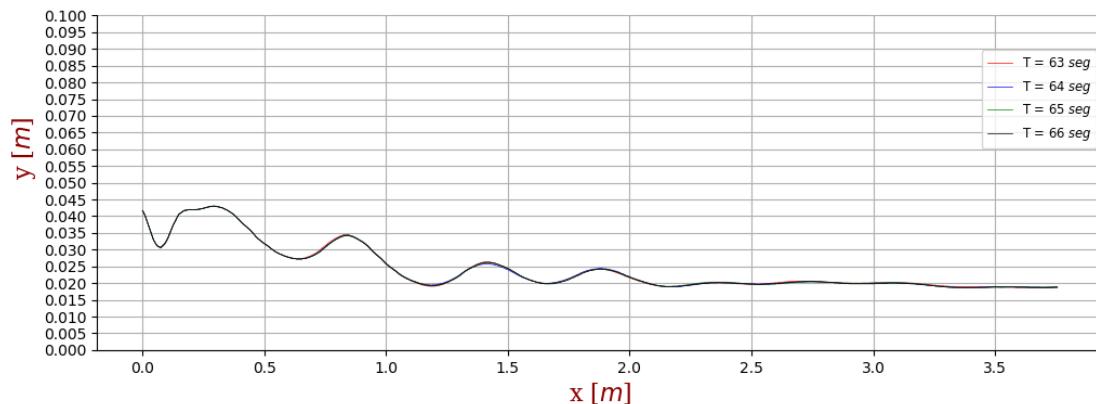


Figura 3. Altura del agua a lo largo del eje longitudinal del canal.

A continuación, se presenta una breve descripción de los campos de velocidad media, presión normalizada y energía cinética turbulenta.

Velocidad media

En la Figura 4a) se presenta una vista en planta de los contornos de velocidad en la dirección del flujo obtenidos a una altura de 1 cm por sobre el fondo del canal. Se observa que, en el centro del flujo, el agua alcanza una velocidad máxima de aproximadamente 1,5 m/s, mientras que, cerca de los obstáculos, estos contornos se mantienen cercanos unos con otros a lo largo de la longitud del canal. Se ve además que, en las bahías entre los obstáculos, la velocidad del flujo es reducida en comparación con el flujo principal y que incluso, es negativa en las paredes del canal.

En la Figura 4b) se ve una vista en planta de las líneas de flujo a una altura de 1 cm con respecto al fondo del canal y se puede observar con mayor facilidad la presencia de vórtices de recirculación del flujo asociados a números de Reynolds moderados.

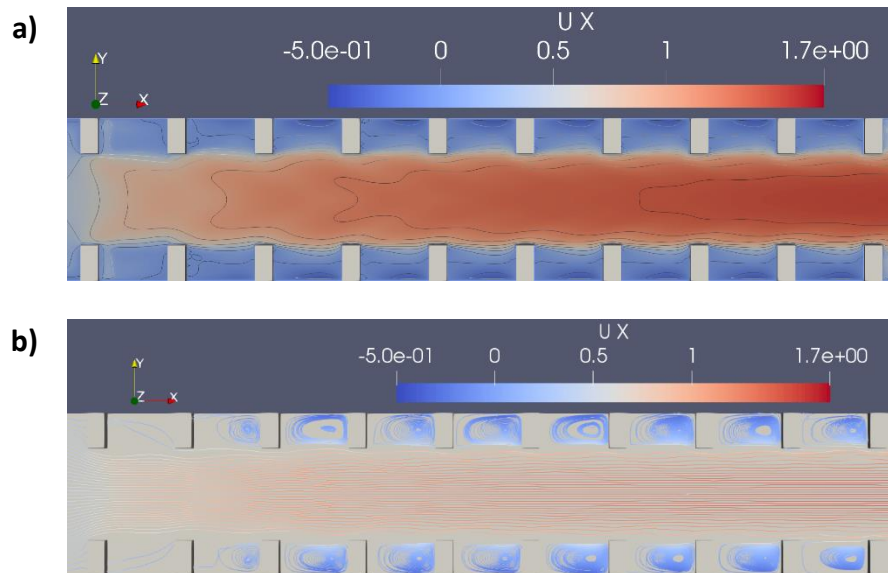


Figura 4. a) Contornos de velocidad en la dirección del flujo. **b)** Líneas de flujo del agua sobre el canal.

En la Figura 5, se muestra una comparación entre la velocidad en el centro del canal y la velocidad cerca de los obstáculos, comparando al mismo tiempo, los resultados de la malla gruesa y la malla fina. Se aprecia que, aunque ambas velocidades se ajustan cerca de la entrada, la velocidad en el centro del canal aumenta hasta llegar a los 1,5 m/s; mientras que, cerca de los obstáculos permanece fluctuante con frecuencia y amplitud regular, partiendo desde 0,37 m/s en los obstáculos (valles de gráfico), hasta los 0,85 m/s aproximadamente en los espacios entre obstáculos (cimas del gráfico)

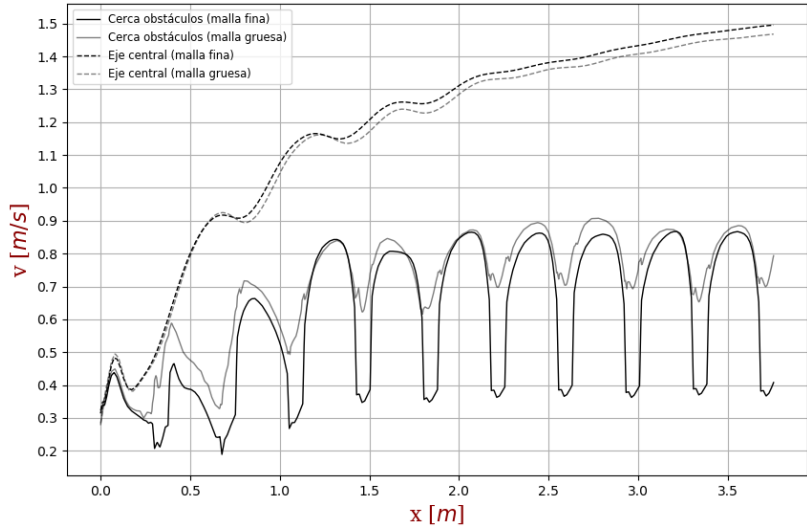


Figura 5. Comparación entre la velocidad en el eje del canal y cerca de los obstáculos con malla gruesa y malla fina.

Energía cinética turbulenta

En la Figura 6, se muestra una vista en planta de la distribución de energía cinética turbulenta (TKE) a lo largo del flujo. Se puede notar que esta distribución genera un patrón “en punta de flecha” en la zona central del canal, la cual se va intensificando poco a poco a medida que el flujo avanza.

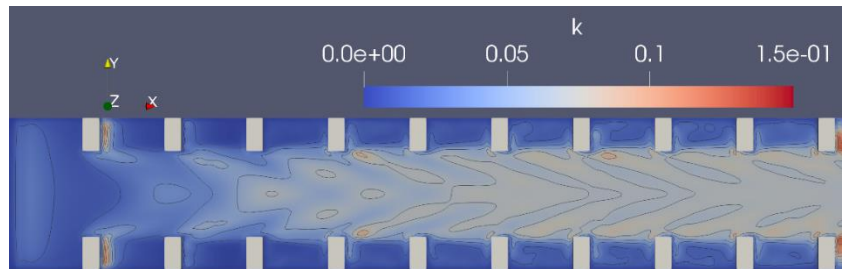


Figura 6. Vista en planta de los contornos de energía cinética turbulenta.

Dado que los *T. aerolatus* nadan cerca de los obstáculos, se hace necesario analizar la energía cinética turbulenta cerca de estos. En la Figura 7a se observa la variación de TKE cerca de los obstáculos; existe un patrón similar al observado para la velocidad media en esta área. Sin embargo, después de la zona de ajuste en entrada del canal, la energía cinética turbulenta continúa aumentando, teniendo una diferencia de aproximadamente $0,04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ entre las cimas y valles de la curva. Las cimas corresponden a la energía turbulenta que se produce por el choque entre el agua y las esquinas de los obstáculos que enfrentan el agua; es decir, aquellas esquinas que cortan el flujo principal. Los valles corresponden a la energía turbulenta que se produce cuando el agua pasa las esquinas aguas abajo de los obstáculos. La disminución de TKE en esta última región se asocia al flujo proveniente de las bahías con baja energía.

En la Figura 7b se observa que la energía cinética turbulenta en el centro del canal posee también un rango de acomodación en la entrada del canal, pero una vez se estabiliza el flujo, el patrón de turbulencia presenta pequeñas fluctuaciones entre 0,060 y 0,065 m^2/s^2 .

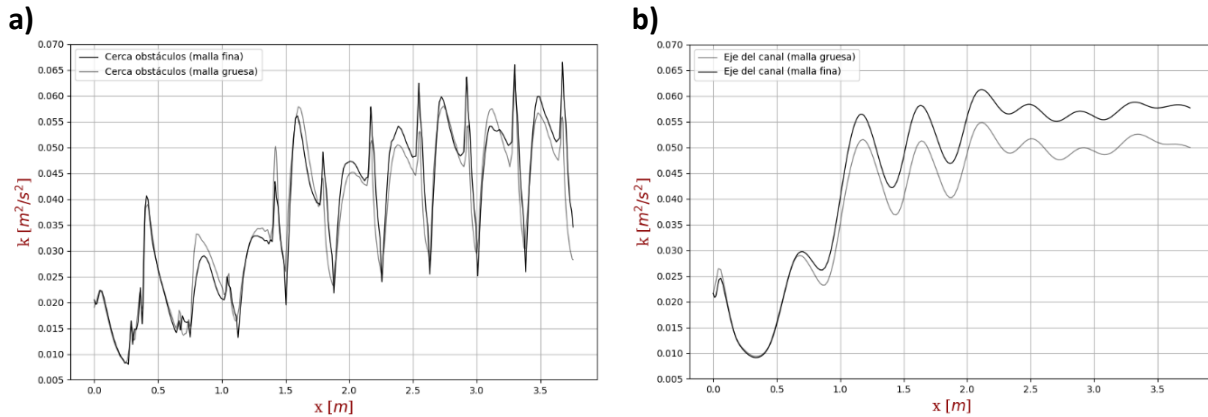


Figura 7. a) Energía cinética turbulenta cerca de los obstáculos con malla fina y gruesa. **b)** Energía cinética turbulenta en el eje central del canal con malla fina y gruesa.

Presión normalizada

De la Figura 8, se puede observar la distribución de presiones en el canal en los últimos siete pares de obstáculos, dado que es en esta área donde la altura del agua es relativamente constante. Se puede ver que la distribución de presiones posee también un patrón de “punta de flecha”, debido a que la superficie del agua es la que toma esta forma. Es de suponer entonces que se cumple que en el flujo principal existe una distribución hidrostática de presiones. También es posible apreciar que en las esquinas de los obstáculos que enfrentan el flujo principal, existe una presión mayor debido a que el agua aumenta su altura debido a la interacción con la estructura.

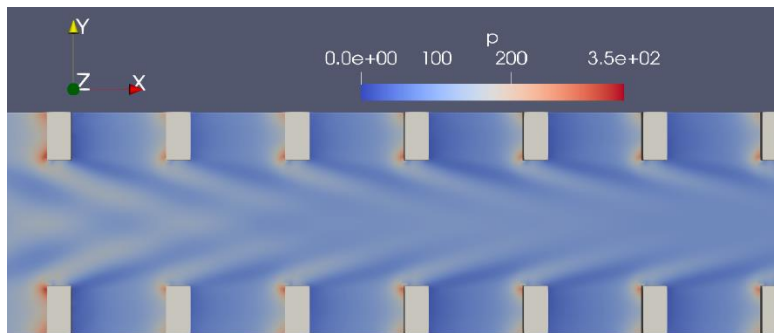


Figura 8. Vista en planta de presiones de los últimos 7 pares de obstáculos a lo largo del canal a 1 cm desde el fondo.

En la Figura 9a se puede ver la distribución de presiones normalizada obtenidas en el eje del canal en los puntos $x = 0,526 m$; $x = 1,278 m$; $x = 2,030 m$; $x = 2,782 m$ y $x = 2,534 m$ con respecto a la entrada; es decir, cada dos pares de obstáculos. Estas presiones siguen la línea de la distribución hidrostática de presiones con pequeñas divergencias cuando y/h llega cerca de 1,

debido a que en esta zona la relación volumétrica, α , llega a valores cercanos a 0,5, cambiando la presión calculada del agua.

En la Figura 9b se ve la distribución de presiones normalizadas en las esquinas de los obstáculos que cortan el flujo principal dista de la distribución de presión hidrostática. Siendo superior a esta cuando la relación de altura es cercana a 1, y siendo menos a la hidrostática para valores menores a 0,8. Esto puede deberse a que en estas zonas existe gran cantidad de movimiento en el flujo, lo que desordena las líneas de flujo evitando que se cumpla la ley hidrostática.

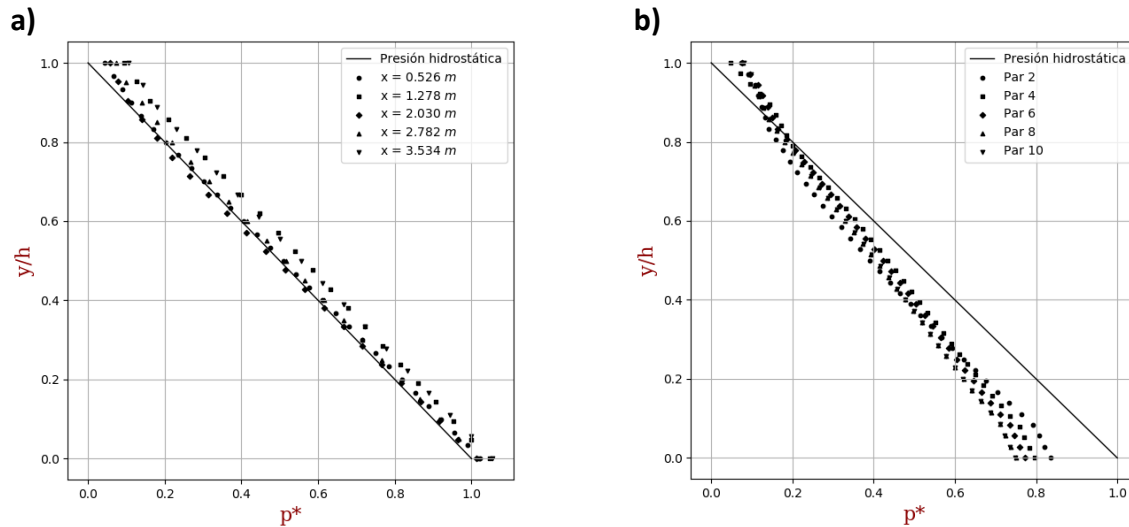


Figura 9. a) Distribución de presiones normalizadas a lo largo del eje del canal. b) distribución normalizada de presiones en las esquinas de los obstáculos que cortan el flujo principal.

Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta

Para visualizar aquellas zonas con mayor tasa de disipación de energía en el flujo, es necesario analizar la variable ϵ . En la Figura 10 se muestran los valores de ϵ a una altura de 1 cm por sobre el fondo del canal. Se puede observar que las zonas que más energía disipan son las esquinas de los obstáculos que enfrentan el flujo principal y, a media que aumenta la velocidad y la turbulencia, la disipación en el flujo principal también incrementa.

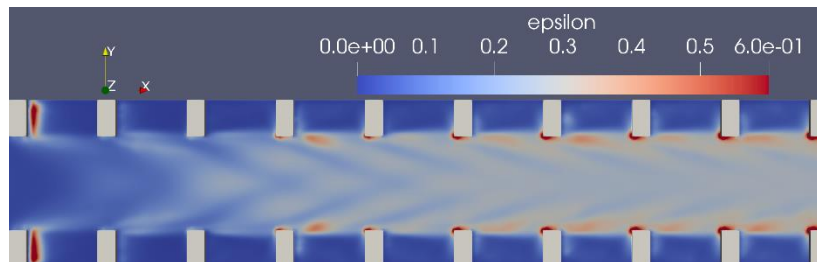


Figura 10. Valores de ϵ a lo largo del canal a una altura de 1 cm desde el fondo.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de una simulación numérica del flujo de agua en un paso para peces nativos chilenos. El canal, cuyo prototipo está disponible en la Universidad de Concepción, tiene una longitud de 4 m, un ancho de 70 cm y está provisto con diez pares de obstáculos ubicados de manera transversal al eje principal del canal, los cuales obstruyen el 43,4% del ancho total disponible (Fig. 1).

La simulación numérica fue realizada con el software OpenFOAM; el modelo estándar de turbulencia $k - \epsilon$ junto con la técnica VOF para ubicar la posición de la superficie libre del agua fueron empleados con una malla gruesa y otra fina, de manera de verificar la convergencia de malla. El dominio computacional, incluyó, además del canal, una piscina de entrada y una caída hidráulica al final del canal, ambas ficticias, pero las cuales permitieron reproducir las condiciones de borde observadas en el laboratorio (Fig. 2). De acuerdo con los resultados numéricos obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) La velocidad del flujo en el centro del canal aumenta acorde a como lo haría el agua en un canal normal, lo cual implica que la velocidad que alcanza supera la velocidad en la cual los peces se sienten cómodos según Kasper (2018). Sin embargo, cerca de los obstáculos la velocidad presenta variaciones en intervalos regulares en los cuales la velocidad del flujo entre obstáculos en la dirección del flujo no supera los 0,85 m/s, velocidad dentro del rango el cual los peces se sienten cómodos para nadar. Los vórtices generados en las bahías entre los obstáculos tienen dos efectos: ayudan a disipar energía en el flujo principal y crean zonas de baja velocidad y energía que los *T. aerolatus* usan para descansar luego de un impulso hacia aguas arriba. De acuerdo a la Figura 5, la fluctuación de la velocidad cerca de los obstáculos presenta una amplitud fija, con lo cual, se puede asumir que se pueden implementar tramos más largos del canal sin afectar a los *T. aerolatus*. Sin embargo, se debe estudiar el efecto de la alta velocidad en el centro del canal y la capacidad de los peces de comenzar a nadar hacia aguas arriba.
- b) La energía cinética turbulenta obtenida en la zona cercana a los obstáculos tiene una variación cualitativamente similar a la que presenta la velocidad, sin embargo, aunque parece tener una amplitud constante, los valores luego de cada obstáculo van aumentando y llegan a ser similares a los que se llega en el centro del canal. Según lo observado, los peces nadan hacia aguas arriba por estas zonas, con lo que se puede concluir que los patrones de turbulencia que se generan en estas zonas se asemejan a la turbulencia que se crea en los canales naturales por los cuales se mueven.
- c) Considerando que el flujo de 10 l/s fue el caudal máximo en el cual los peces lograron llegar hasta el final del canal, se puede asumir que los valores de turbulencia y velocidad obtenidos cerca de los obstáculos pueden ser los valores máximos encontrados en el hábitat natural de los *T. aerolatus*. Además, se puede concluir que el comportamiento de los peces puede estar más influenciado por la velocidad del flujo cerca de los obstáculos que por la turbulencia.

REFERENCIAS

- Comisión Nacional de Energía (2019). Informe de costos de tecnologías de generación 2019. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/03/Res.-Ext.-N%C2%B0-207-Informe-costos-de-generaci%C3%B3n-2019.pdf>
- Davidson, P. 2015. *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*. Oxford University Press.
- Fishbase.in. (02 de septiembre de 2019). Familia Salmonidae - Salmonids. Obtenido de Fish Base: <https://www.fishbase.in/Summary/FamilySummary.php?Family=Salmonidae>
- Fuentes-Pérez, J., Sanz-Ronda, F., Martínez de Azagra Paredes, A., y García-Vega, A. 2014. Modeling Water-Depth Distribution in Vertical-Slot Fishways under Uniform and Nonuniform Scenarios. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Jones W.P, Launder B.E (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *Int J Heat Mass Transf* 15(2):301–314
- Kasper, K. 2018. *Laboratory Studies on a Fishway Prototype for Endemic Fish Species in Chile*. Master Thesis, Concepción.
- Laborde, A., Habit, E., & Link, O. 2018. Hydropower dams threaten freshwater Chilean fish species: what dams and what species? *E3S Web of Conferences*.
- Link, O., & Habit, E. 2015. Requirements and boundary conditions for fish passes of non-sport fish species based on Chilean experiences. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 9-21.
- Link, O., Sanhueza, C., Arriagada, P., Brevis, W., & Laborde, A. 2017. The fish Strouhal number as a criterion for hydraulic fishway design. *Ecological Engineering*, 118-126.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. 2016. *The Finite Volume Method in CFD, an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab*. Switzerland: Springer.
- Openfoam.org. (20 de agosto de 2019). OpenFOAM: API Guide. Recuperado el 09 de Julio de 2019, de https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/classFoam_1_1variableHeightFlowRateInletVelocityFvPatchVectorField.html#details
- Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., & Katopodis, C. 1986. Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 909-927.