

ARTÍCULO 3

Análisis y propuesta de optimización de la obra de toma del proyecto Guadalquivir–CENAVIT–Calamuchita aplicando dinámica de fluidos computacional

Perales Avilés Moisés¹, Baldiviezo Villena Daniel Rolando²

¹ Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

² Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

* Correspondencia del autor: moisesperales@uajms.edu.bo, dirección.

Resumen

Para que las obras hidráulicas sean eficientes, menos costosas y se asegure su mantenimiento se puede aplicar para su diseño la dinámica de fluidos computacional (CFD), esto implica aprovechar la tecnología para construir un modelo numérico para simular el comportamiento del agua a través de la misma.

La posibilidad de reproducir las variables hidráulicas de una infraestructura y analizar diferentes alternativas permite un proceso de diseño y verificación de su funcionamiento más ágil y eficiente.

El análisis de la obra de toma del proyecto de riego Guadalquivir- CENAVIT- Calamuchita bajo una condición de caudal elevado muestra que el vertedero y la bocatoma no son afectados por el flujo de agua, en cambio, la escalera de peces alcanza velocidades que suponen un riesgo para su estado a posteriori.

Las tres alternativas propuestas para el punto crítico de la escalera de peces logran disminuir la velocidad y la presión en la entrada, por lo que se puede decir que son efectivas. El redondeo de aristas y la reducción de la altura pueden conseguir un mejor funcionamiento sin grandes cambios en el diseño original, por lo que se escoge la alternativa 3.

La aplicación de CFD al diseño de la obra de toma ha permitido detectar las zonas de la obra que son más afectadas por el flujo de agua, pudiendo elaborar propuestas de modificación y encontrando una alternativa

que optimiza el diseño, reduciendo la velocidad máxima sin significar un incremento en el costo de la obra.

Palabras Clave: Dinámica de fluidos computacional, simulación, optimización, solidworks, obras hidráulicas.

Abstract

In order to make hydraulic works efficient, less costly and ensure their maintenance, computational fluid dynamics (CFD) can be applied to their design, which implies taking advantage of technology to build a numerical model to simulate the behavior of water through it.

The possibility of reproducing the hydraulic variables of an infrastructure and analyzing different alternatives allows for a more agile and efficient design process and verification of its operation.

The analysis of the intake works of the Guadalquivir-CENAVIT-Calamuchita irrigation project under a high flow condition shows that the spillway and the intake are not affected by the water flow; on the other hand, the fish ladder reaches velocities that pose a risk to its downstream condition.

The three alternatives proposed for the critical point of the fish ladder manage to decrease the velocity and pressure at the inlet, so they can be said to be effective.

Edge rounding and height reduction can achieve better performance without major changes to the original design, so alternative 3 is chosen.

The application of CFD to the design of the intake works has made it possible to detect the areas of the works that are most affected by the flow of water, making it possible to develop proposals for modification and finding an alternative that optimizes the design, reducing the maximum velocity without increasing the cost of the works.

Keywords: Computational fluid dynamics, Simulation, Optimization, Solidworks, Hydraulic constructions.

1. Introducción

Las obras hidráulicas están compuestas por varios elementos constructivos que influyen en el comportamiento del agua. Es por esto, que a la hora de diseñar y construir se debe considerar y analizar el funcionamiento hidráulico. Los medios comúnmente utilizados para la optimización de este tipo de infraestructura era únicamente la modelación física, que su aplicación estuvo limitada debido a los tiempos y costos de construcción.

Adicionalmente existen fenómenos naturales que se pueden replicar o analizar de una forma cercana a la realidad; sin embargo otros, por su escala o la complejidad de sus factores son muy difíciles de recrear o analizar como lo indica (Aponte-Reyes, 2014). Eso ha llevado al estudio de las simulaciones computacionales o dinámica de fluidos computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics), que es una combinación de física, métodos numéricos e informática (Barea Hernández, 2017).

Fernández (2012) menciona que el CFD ha sido un efecto secundario del desarrollo de los computadores desde los años 1950-1960. Hasta ese entonces las ecuaciones de flujo no se podían resolver por métodos convencionales por el gran

número de operaciones que se ejecutaban por unidad de tiempo.

La aplicación de CFD es importante porque reduce el tiempo del diseño y abarata costos y da la posibilidad de estudio en situaciones adversas (Versteeg & Malalasekera, 2007). No en todos los fenómenos se puede aplicar CFD, pero a futuro se buscará una modelación físico-matemática para cubrir las deficiencias de los modelos numéricos y disminuir la dificultad técnica de un modelo físico (Vázquez, 2015).

La dinámica de fluidos computacional se basa en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Con las dos ecuaciones se describen la mayoría de fluidos que se tiene en la naturaleza (Numberphile, 2019). Para la resolución de estas se debe aplicar artificios, como las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (Baker et al., 2019) the range of analytical and numerical techniques used in train aerodynamics is described. Simple panel methods are then outlined and their historic and continuing utility discussed. The use of the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS. En otras palabras, se recurre a métodos numéricos, donde por su reducido uso de la memoria y una alta velocidad de solución, el método preferido para fluidos es el Método de Volumen de Fluido, introducido en 1970 (Osse, 2016). Este, intercambia el dominio continuo por uno discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar al original (Moukalled et al., 2016).

El Proyecto de riego Guadalquivir-CENAVIT-Calamuchita fue recibido de manera definitiva el 14 de febrero de la pasada gestión 2020 y permitirá incrementar la superficie bajo riego a 3,500 hectáreas, beneficiado a 16 comunidades tal es el caso de: Ancón Grande, Pampa la Villa Chica, Chorrillos, Fuerte la Compañía, San Nicolás, Concepción, La Higuera, Maturayo, La Pintada, La Compañía, Calamuchita, La Angostura, Valle Bajo, entre otras.

Es una de las inversiones más importante realizadas en el sector agua en el departamento, el costo total del proyecto fue de Bs. 206,682,236.02 y la construcción dio inicio el 17 de diciembre del 2013 y la recepción provisional se realizó el 19 de agosto del 2019, y posteriormente la recepción definitiva el 14 de febrero del 2020, siendo 2350 días calendario el tiempo total de ejecución del proyecto. La obra de toma está ubicada sobre el Río Guadalquivir en la comunidad de El Temporal es un azud derivador de HoAo.

Esta obra por su importancia y envergadura requiere que se realice la verificación de su funcionamiento, es por esto que se analiza la obra de toma del proyecto “Guadalquivir – CENAVIT – Calamuchita” mediante la modelación y simulación con dinámica de fluidos computacional en

Solidworks para verificar y optimizar el diseño.

Esta investigación busca el uso de una alternativa que fomente el trabajo virtual, y proponer una metodología que permita optimizar el diseño de obras hidráulicas similares.

El uso de la dinámica de fluidos computacional permite no solo la maquetación detallada de estructuras hidráulicas, sino también una solución rápida y visual a problemas de la hidráulica, con un modelo paramétrico que agiliza la comparación entre distintos tipos de condiciones. Esta opción amplía las posibles obras a estudiar y comparar entre sí, además de entregar las soluciones de forma gráfica, para tener un conocimiento mayor de cómo es el comportamiento hidráulico a través de la misma.



Fotografía 1 Vista aguas debajo de la obra de toma del proyecto de riego Guadalquivir-CENAVIT-Calamuchita

2. Materiales y métodos

Dado el enfoque cuantitativo de la investigación, se optó por realizar un estudio aplicado, ya que se tiene propósitos prácticos e inmediatos mediante el estudio de caso en el que se analizó las características particulares del funcionamiento hidráulico de la obra de toma del proyecto de riego Guadalquivir-CENAVIT – Calamuchita, con base a los planos As Built. La investigación ha seguido el método científico analítico en cuanto al análisis de los resultados de la simulación y planteamiento y comparación de alternativas propuestas.

Los datos para la investigación fueron obtenidos de los documentos de la etapa de preinversión y ejecución del Proyecto “Construcción sistema de riego Guadalquivir-CENAVIT-Calamuchita”, el mismo que fue financiado por el Gobierno Autónomo Departamental de Tarija Sub Gobernación – Uriondo.

Para la elaboración del modelo en tres dimensiones en espacio CAD se utilizó los planos As Built de la obra de toma, que están compuestos por el vertedero de excedencia, bocatoma y escalera de peces, además de la topografía del sitio de emplazamiento de todas las obras que componen la captación.

Para la simulación CFD se utilizó también los datos técnicos referidos a la información hidrológica generada en la etapa de preinversión, es decir caudales máximos y eventos extremos determinados para un determinado periodo de retorno y los caudales de diseño.

Para aplicar la metodología CFD es necesario la generación de la siguiente secuencia de pasos:

2.1. Definir la geometría

El modelo creado en 3D define la geometría del dominio computacional que se va a tratar. Puede ser un dominio definido por el contorno interno del modelo o un dominio introducido manualmente en simulaciones de flujo externo

2.2. Discretizar

El volumen del dominio definido se divide en celdas discretas formando una malla. La malla es muy variada, pudiendo ser uniforme y no uniforme, estructurada o no estructurada, formada por celdas tetraédricas, hexaédricas, piramidales, etc.

2.3. Definir las condiciones de contorno

Consiste en definir las condiciones de entrada y salida del flujo, condiciones de las paredes que lo contienen o de estado de presión en sus orificios. Estas condiciones son los datos de partida para el cálculo.

2.4. Simulación

Se inicia la simulación, por tanto, se resuelven las ecuaciones por iteraciones hasta alcanzar la convergencia de los resultados.

2.5. Análisis de resultados

Finalmente se visualizan los resultados para verificar que se ha encontrado una solución válida y coherente para el problema, así como analizar las condiciones del flujo en cada parte del modelo.

Para esto se utilizó el solidworks flow simulación, que es una intuitiva solución de dinámica de fluidos computacional (CFD) integrada en Solidworks 3D CAD que permite simular de forma rápida y sencilla flujos de líquido y gas a través y alrededor de sus diseños para calcular así el rendimiento y capacidades del producto. (SOLIDWORKS Flow Simulation, 2017).

3. Resultados

Los planos As Built de la obra de toma estaban en formato DWG. Para la elaboración del modelo en Solidworks se requiere de exportarlos a un croquis 2D o 3D. La cantidad de datos que contiene el plano dificulta el trabajo en el croquis, por lo que se trabajó inicialmente formando el plano en 3D en AutoCad.

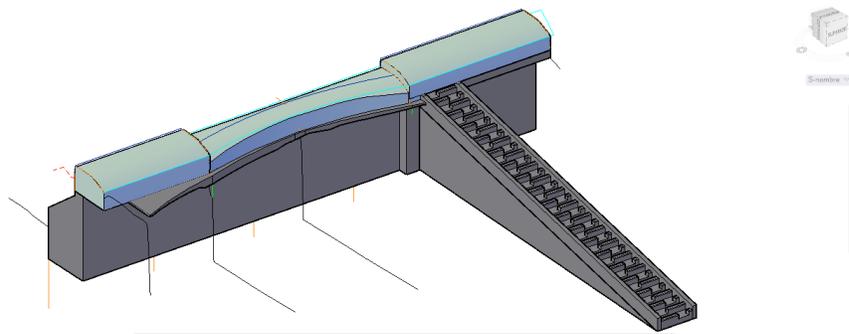


Figura 1 Modelo sólido de la obra de toma en AutoCad

Habiendo surgido esos errores en la exportación del croquis en 3D desde AutoCad se procedió a elaborar el modelo desde un croquis 2D exportado desde AutoCad, de modo que los errores en la transformación fueron menores y de fácil solución.

La obra de toma cuenta con tres partes principales, la presa derivadora, la bocatoma y la escalera de peces. Teniendo estos tres componentes casi independientes entre sí, por esta razón se escogió realizar un ensamblaje formado por tres piezas:

a) Vertedero de excedencias

El vertedero forma el cuerpo mayor y central de la obra, por lo que se ha tomado como referencia del modelo. Está formado por tres zonas principales, en ambos lados la contención y en la zona central a menor altura el vertedero en sí. Mantiene su altura uniforme, pero está reducido en la zona central, formando un arco en planta. Todo el cuerpo se ubica sobre mampostería de piedra perteneciente a la obra preexistente. Se ha exportado la sección transversal del vertedero en puntos clave para su desarrollo, tomando la sección a 4 m, 11 m (inicio del vertedero), 14 m, 19.5 m (mitad de la longitud total), 28 m (final del vertedero) y 40 m.

Alineando estas secciones se extruye cada uno hasta el límite con el siguiente, como no es lineal se hace un corte con respecto a la vista vertical, logrando la forma del vertedero con las dimensiones otorgadas por el plano.

Agua arriba queda un tramo con la definición de la topografía en contacto con el vertedero. Agua abajo no se requiere de una estructura de disipación de energía gracias a la roca presente, por lo tanto, en el modelo se refleja solo una superficie plana sobre la que no se requiere supervisión.

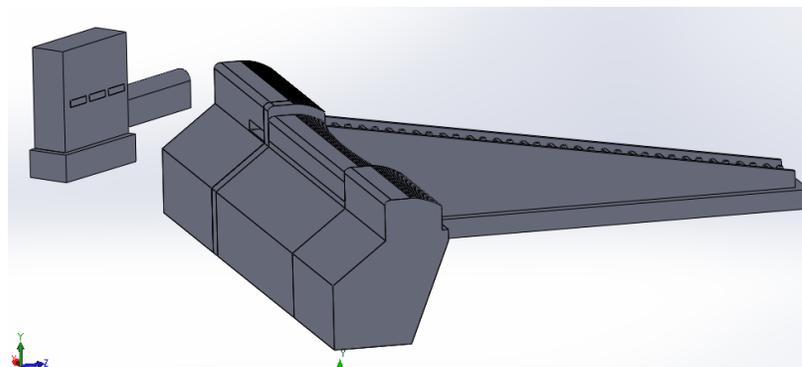


Figura 2 Sección transversal del vertedero de excedencias

b) Captación, Bocatoma

La boca de toma considera la apertura inicial de las compuertas. Se compone de un cuerpo rectangular con tres orificios en su zona media, ubicados en la cota 1836.88 msnm, que está 25 cm por debajo del nivel de la escalera de peces. En la zona inferior del cuerpo de la bocatoma se tiene una pendiente para conducir el agua captada hacia el canal conductor.

Para ello se ha exportado el croquis de la vista en planta de la bocatoma, en especial detalle a la forma de los diafragmas de la compuerta hasta la altura del cuerpo. Se exportó un croquis con la vista lateral del cuerpo de la bocatoma y se cortó el sólido para obtener la cavidad interna de la bocatoma.

Finalmente se dibujó el frente de la conducción del agua, y se extruye una longitud arbitraria, dado que en esa zona no se realizarán análisis mayores del flujo.

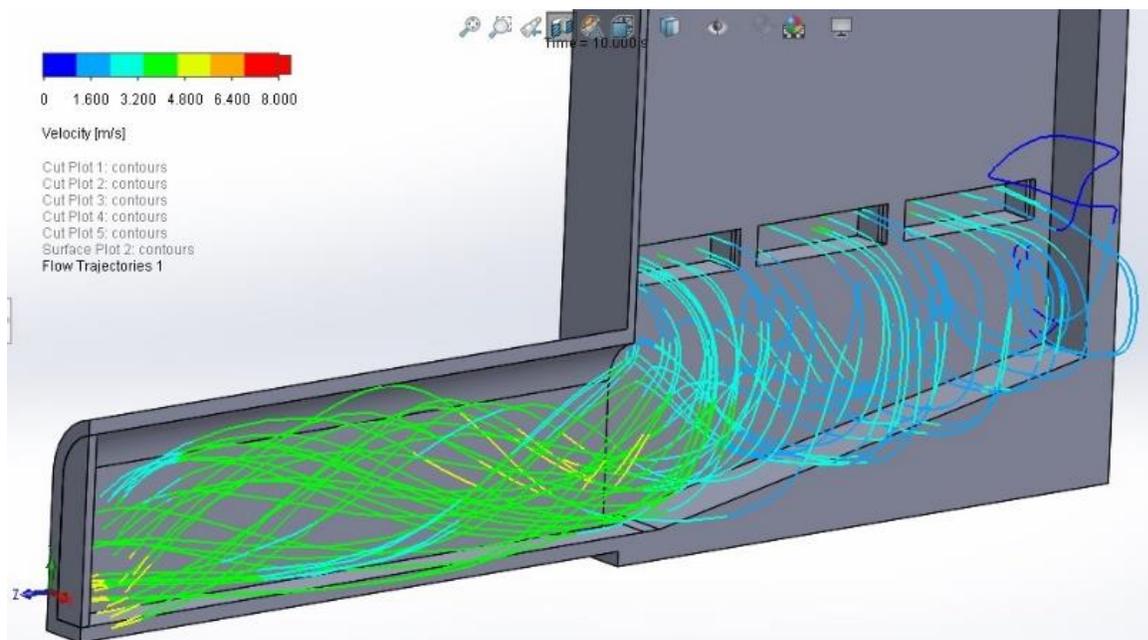


Figura 3 Cuerpo bocatoma

c) Escalera de peces

La escalera de peces recorre desde una apertura en el cuerpo del vertedero hasta el nivel del terreno aguas abajo, con una estructura que se repite, con el objetivo de disminuir la energía del agua aguas arriba.

La proyección horizontal tiene una longitud de 30.7 m, y salva una altura de 5.46 m, desde la cota 1836.629 hasta la 1831.169. Por lo que la inclinación es de 0.178 m/m.

Para formar el modelo se ha exportado el croquis de la vista lateral de la escalera, dibujando el contorno y extruyendo el ancho menor de los dientes. Se añaden los dentellones de mayor longitud y se realiza una simetría a través de un plano en perfil, trasladando esa simetría se forma el cuerpo final de la escalera de peces.

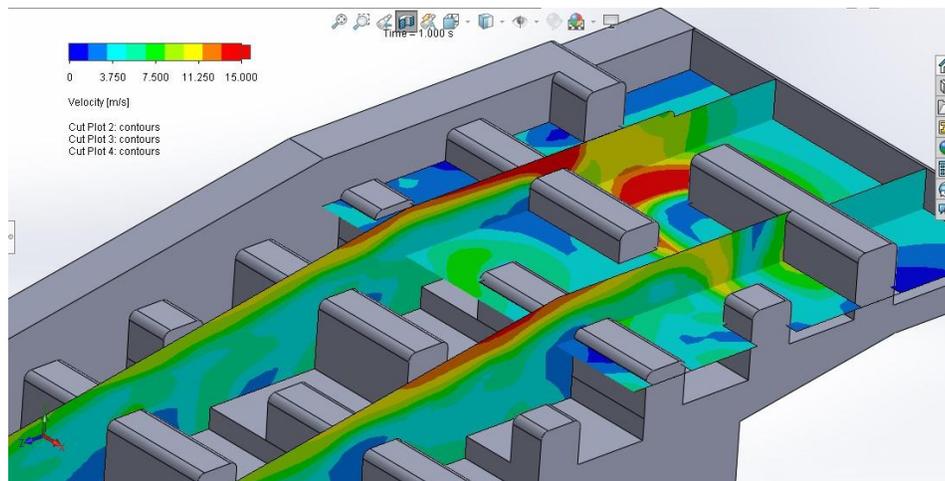


Figura 4 Vista de la escalera de peces

Obtenidas las tres piezas se procede a formar el ensamblaje. En el apartado de ensamblajes se introducen las tres piezas formadas y el vertedero se fija en una posición (pudiendo referirse al origen de coordenadas) limitando su traslación en los tres ejes e impidiendo la rotación.

Se inserta la pieza de la escalera de peces, condicionando la unión de acuerdo a:

- ⊙ La cara inferior del orificio del vertedero y de la escalera de peces debe ser coincidente.
- ⊙ La cara lateral de la escalera de peces debe ser coincidente con la pared del orificio del vertedero.
- ⊙ Se limita la distancia entre el extremo de la escalera de peces y la esquina del orificio una distancia de 0.8 m en la dirección longitudinal de la escalera.

A continuación, se inserta el cuerpo de la bocatoma condicionando la unión de acuerdo a:

- ⊙ Desde el vértice del orificio donde se ubica la escalera, se toma una distancia de 4.7 m paralela al eje de la presa y 11.1 m en perpendicular. Este punto se ubica en la esquina donde

se conecta el canal de conducción y el cuerpo de la bocatoma. La diferencia de altura se limita a 25 cm desde el inferior de los orificios de la bocatoma hasta el inferior del orificio de la escalera de peces.

- ⊙ Se condiciona la superficie superior de la bocatoma haciéndose paralela con la superficie superior del vertedero.
- ⊙ Se condiciona un ángulo de 52° de la bocatoma desde el eje de la presa.

Con estas limitaciones se obtiene el ensamblaje de las tres piezas con todas las condiciones de unión. Para finalizar el modelo se añaden los muros de encauce y demás cuerpos que completan la estructura.

4. Verificación del diseño

En búsqueda de verificar el diseño original de la obra y su adecuado funcionamiento, se procedió a modelar la obra en un cuerpo sólido en tres dimensiones y aplicar la herramienta Flow Simulation.

Dividiendo el dominio computacional se tomaron las tres zonas de análisis, la entrada a la obra de toma, el cuerpo de la bocatoma y la escalera de peces.

4.1. En la entrada de la obra de toma

En la entrada a la obra de toma se han tomado tres caudales de análisis 2000, 1000 y 500 m³/s respectivamente obteniendo los siguientes resultados:

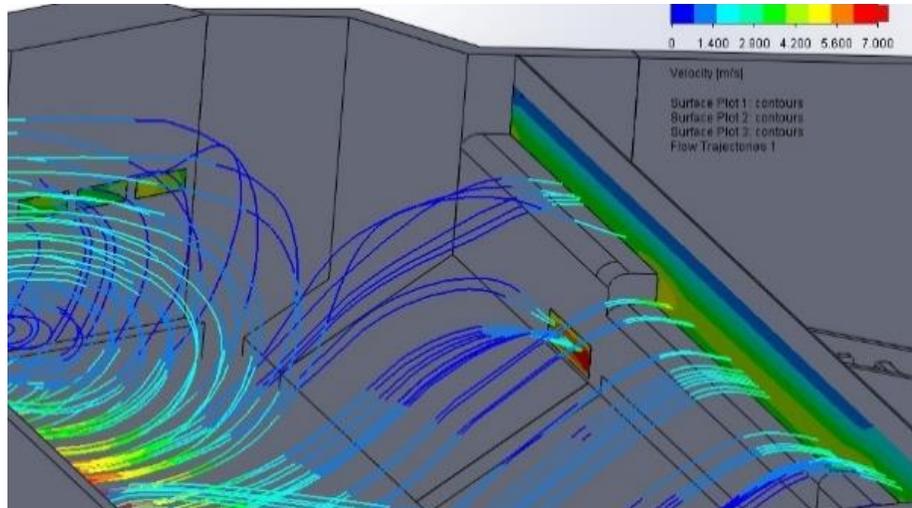


Figura 5 Simulación en entrada de la obra de toma para un $Q=2000 \text{ m}^3/\text{s}$

La parte de mayor velocidad está ubicada en la zona central del vertedero, junto a los bordes, lo que hace pensar que parte del flujo que llega a la pared adyacente se incorpora a la zona central, produciendo una mayor velocidad. En la superficie que aparece graficada en el vertedero se observan tonos amarillos que, según la escala, indican una velocidad de casi 5 m/s, mayor a la zona central del mismo, donde es cercano a los 3 m/s, lo que podría llevar a considerar un refuerzo en esa zona o la construcción del borde redondeado.

A continuación, se tiene una vista específica de la zona del vertedero, donde la escala de colores es la misma para todas las figuras.

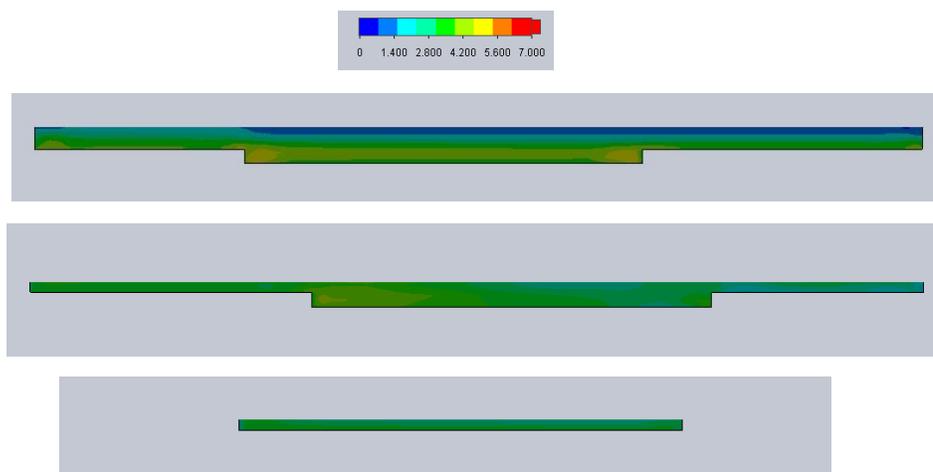


Figura 6 Sección transversal cresta del vertedero para un $Q=2000, 1000 \text{ y } 500 \text{ m}^3/\text{s}$

En cuanto a la entrada a la bocatoma se tienen los siguientes resultados:

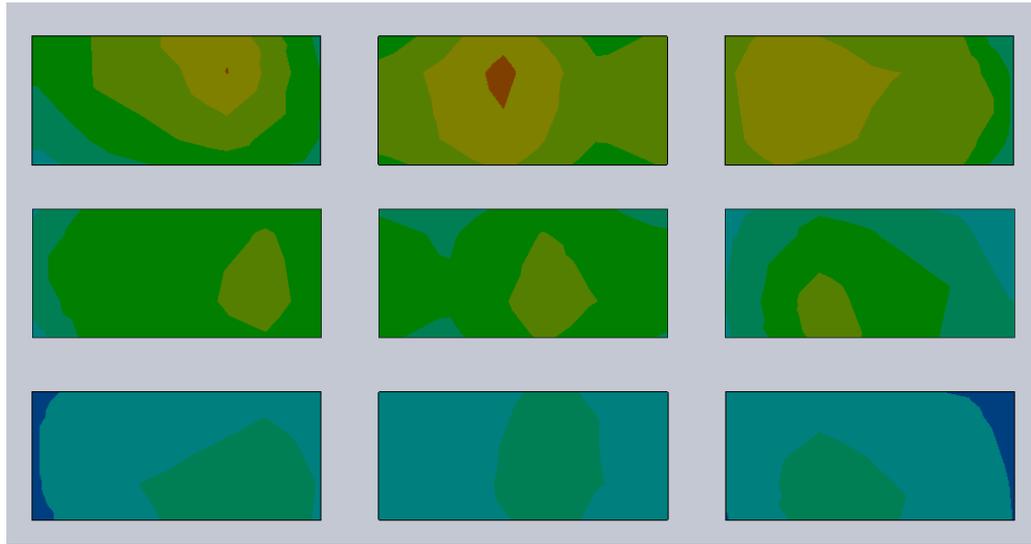


Figura 7 Distribución de velocidades en la entrada a bocatoma para caudales de 2000, 1000 y 500 m³/seg

La entrada a la bocatoma tiene una velocidad entre 3.5 a 5 m/s para un caudal de 2000 m³/s, siendo menor en el lado más alejado del vertedero. La máxima registrada es de 5.1 m/s en la zona central.

Para los otros caudales se mantiene similar la distribución de velocidades, descendiendo a una velocidad media de 2.8 m/s en la simulación para caudal de 500 m³/s.

4.2. Escalera de peces

La escalera tiene dos condiciones de frontera, la primera está en el orificio de entrada, mejor identificada como una velocidad de entrada. La segunda condición está al final de la escalera, como una abertura al medio, con presión atmosférica.

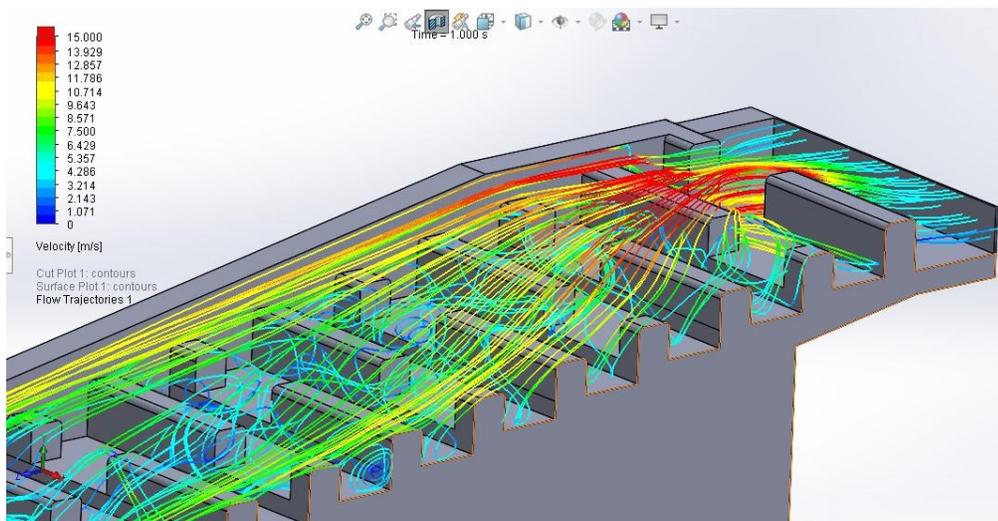


Figura 8 Trayectorias de flujo y velocidades en la escalera de peces

En la entrada de la escalera se puede observar cómo el estrechamiento de la sección eleva drásticamente la velocidad del flujo, verificando que los resultados de velocidad en la superficie.

La velocidad máxima llega hasta los 19 m/s, chocando contra el primer pivote. El flujo que se dirige al siguiente nivel tiene una velocidad menor, llegando cerca de los 12 m/s. En cambio, por encima del pivote se mantiene el flujo con mayor velocidad, hasta unos 50 centímetros aguas abajo.

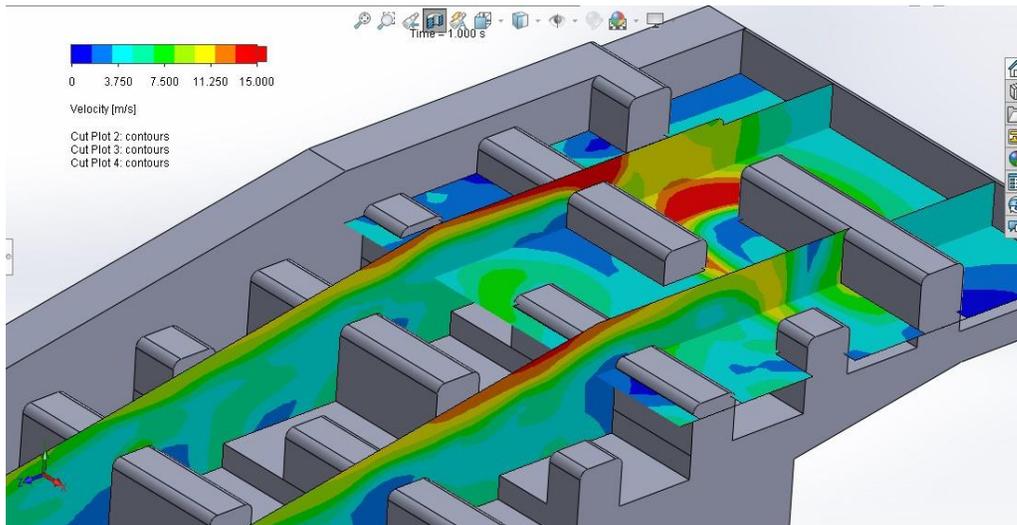


Figura 9 Velocidades en secciones de control de la escalera para un $Q=2000\text{m}^3/\text{s}$

En cada una de las caídas se puede observar que la trayectoria del flujo puede producir una zona de presiones negativas, lo que llevaría a un mayor desgaste del hormigón. La dirección de la velocidad del flujo en esta zona se puede ver detalladamente en la Figura 10, que muestra el gradiente de velocidad y la dirección que tiene.

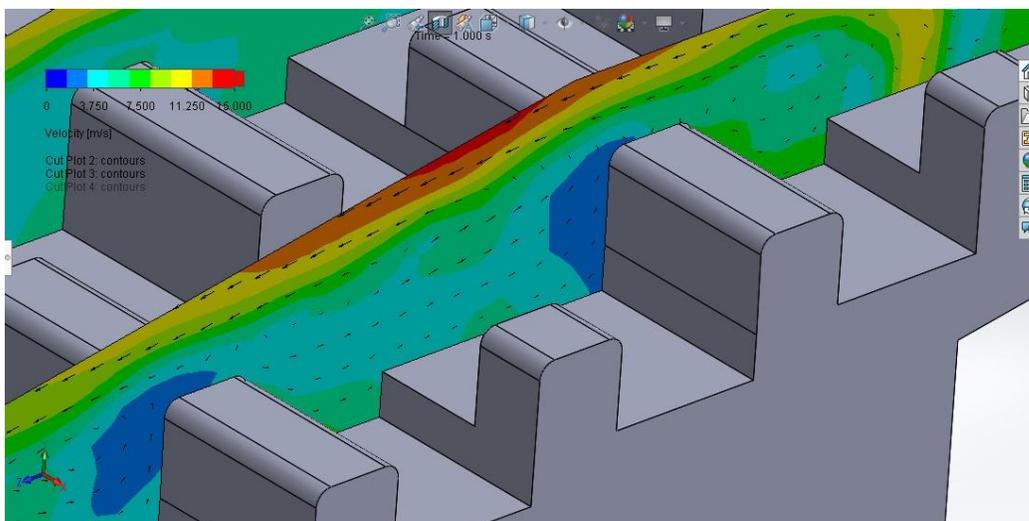


Figura 10 Vectores de velocidad en sección longitudinal

Considerando la vista de las trayectorias y los vectores de velocidad del flujo en las secciones de muestra, se obtiene una vista más completa del comportamiento del mismo.

La vista de las velocidades permite reconocer que la zona de entrada de la escalera es muy afectada, principalmente el primer pivote. También se puede estimar que esta será la zona donde se encuentren los mayores esfuerzos.

En la Figura 11 se muestra la presión en las superficies, notando que se tiene una zona de alta presión en la entrada, al lado posterior de la abertura, así como una zona de presión negativa sobre el primer pivote. De ahí en adelante, al igual que la velocidad, la presión toma valores poco relevantes.

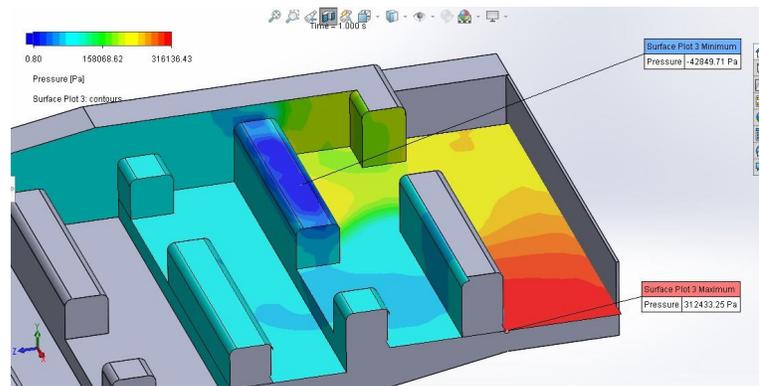


Figura 11 Presión en escalera de peces

En la Figura 12 se tiene graficado el esfuerzo cortante presente en las superficies, donde el máximo se halla en la parte superior del primer pivote, coincidiendo con la zona de mayor velocidad y presión negativa del sistema, llegando a una presión de 570 pascales (0.006 kg/cm²). Esta presión se debe solamente al flujo de agua, sin considerar los esfuerzos generados por el peso de los componentes del sistema, por lo que puede ser un factor a reconsiderar para el rediseño de esta obra en su condición más crítica.

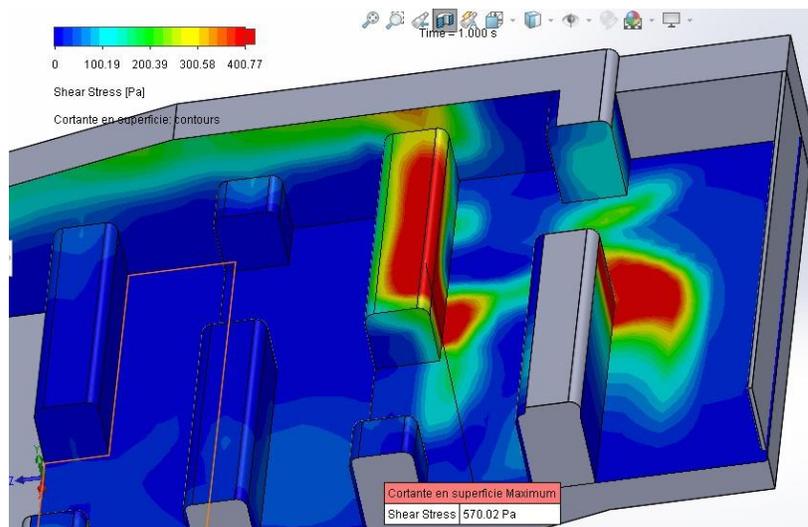


Figura 12 Esfuerzo cortante en la superficie

Con los resultados obtenidos para la escalera de peces se puede considerar la protección de la entrada de la escalera de peces, así como del primer pivote, debido a la alta velocidad que se produce en esta zona.

Por otra parte, además de dotar a estos elementos de una mayor resistencia, se considera la modificación en su geometría, ensanchando la primera entrada a la escalera y reduciendo la altura del primer pivote en funcionamiento. Bajo estas condiciones la velocidad se ve disminuida en la entrada. Además, la velocidad sobre el pivote también es menor, aunque se prolonga la alta velocidad en la escalera.

4.3. Bocatoma

La bocatoma tiene tres superficies de ingreso; de acuerdo a la simulación de la entrada se conoce que la velocidad a través de estas es de 3.5 m/s. Con esta condición de entrada y una única salida identificada como presión ambiental se inicia la simulación

Las trayectorias de flujo muestran claramente cómo la velocidad de entrada es suficiente para que se produzca un chorro hasta la otra pared de la obra, lo que genera un pequeño remolino en la parte baja.

La velocidad máxima del modelo se encuentra en la entrada del canal de conducción, a una altura a mitad de la sección, con velocidad de 5 m/s.

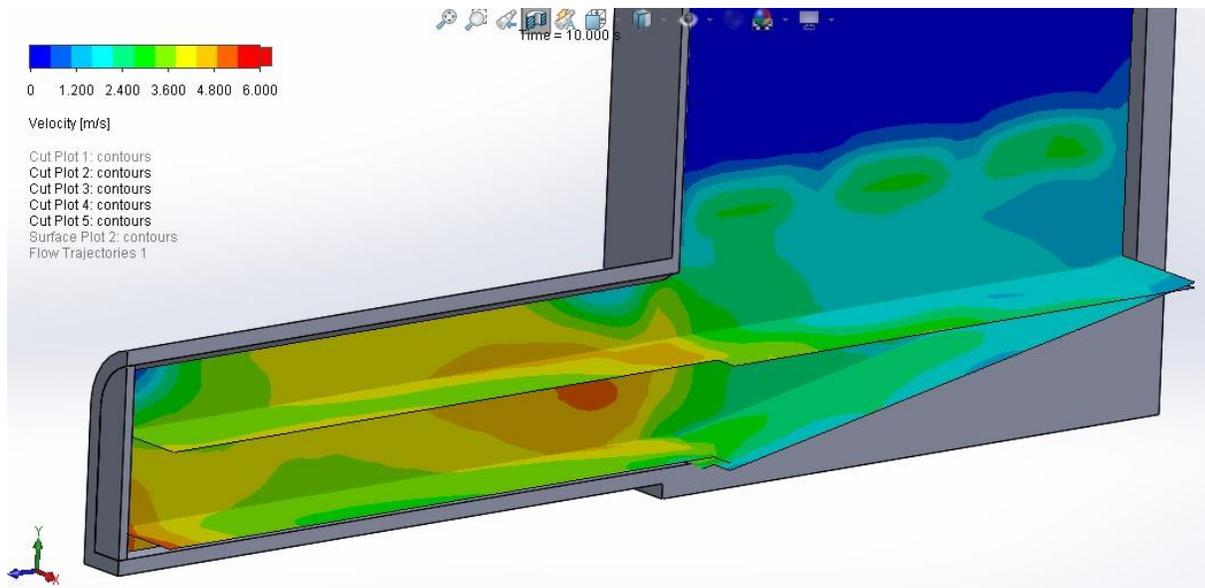


Figura 13 Distribución de velocidades en la bocatoma

La velocidad en la entrada apenas supera los 5 m/s en un tramo menor a 40 cm de longitud, la mayor velocidad representativa sería de 4.5 m/s (en color naranja). A partir de la trayectoria del flujo y las velocidades halladas, se puede ver que el flujo no representará un problema serio en la estructura.

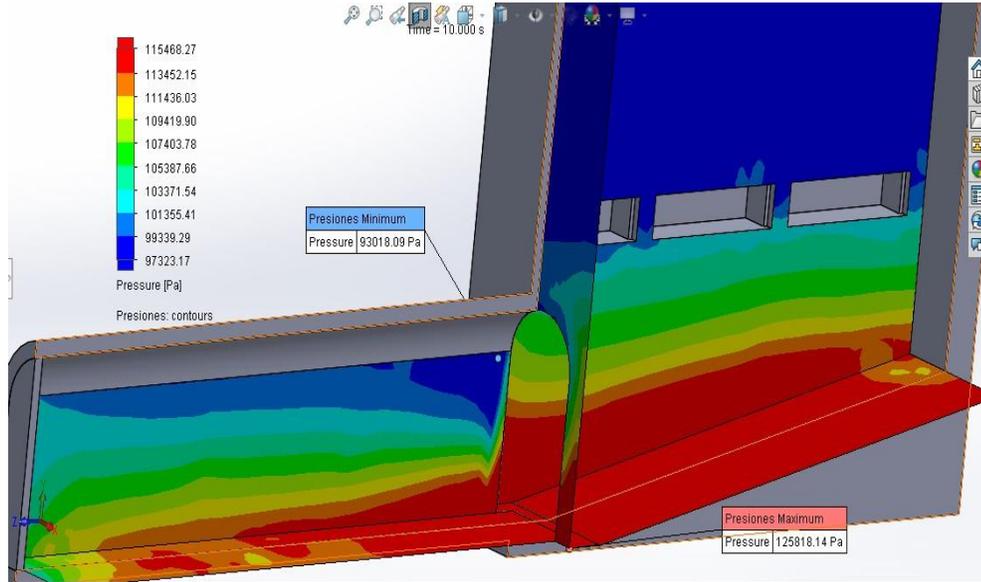


Figura 14 Presión en la bocatoma

Las presiones en el interior del cuerpo de la bocatoma se hallan en un rango de 90,000 Pa hasta 125,000 Pa (0.92 kg/cm² – 1.27 kg/cm²). En esta obra no se presentan presiones negativas y las máximas positivas no son considerables.

En cuanto al esfuerzo cortante, se puede observar cómo se ubican los máximos en las zonas de mayor velocidad, sin relacionarse con las zonas de mayor presión del sistema. El valor máximo se ubica al final del canal incluido en la simulación, con un valor de 55 pascales, 0.0006 kg/cm², por lo que se puede considerar como irrelevante para un reforzamiento del diseño.

A partir de los resultados obtenidos se introdujeron las condiciones de contorno del cuerpo de la bocatoma y la escalera de peces. Donde en la bocatoma no se destacan puntos críticos, con velocidades menores a los 5 m/s.

La tabla resume las velocidades máximas obtenidas en las superficies de control, de acuerdo a los caudales simulados.

Caudal (m ³ /s)	Velocidad máxima (m/s)		
	Vertedero	Escalera de peces	Bocatoma
2000	5.2	3.5	3.1
1000	3.9	4.2	4.5
500	3.3		

Tabla 1 Resumen de resultados en la entrada de la obra

5. Optimización del diseño

La simulación del diseño original de la obra muestra una zona de conflicto en la escalera de peces, con velocidades y presiones que podrían dañar la obra y perjudicar su funcionalidad. Para resolver este punto crítico se han elaborado tres alternativas a la entrada de la escalera de peces, con las que se considera:

- ⊙ Disminuir la velocidad máxima.
- ⊙ Disminuir la presión máxima.
- ⊙ Mantener parámetros adecuados para el paso de peces.

Nota. La escala cromática es la misma para todos los gráficos, con el valor menor en 0 m/s y el mayor en 15 m/s.

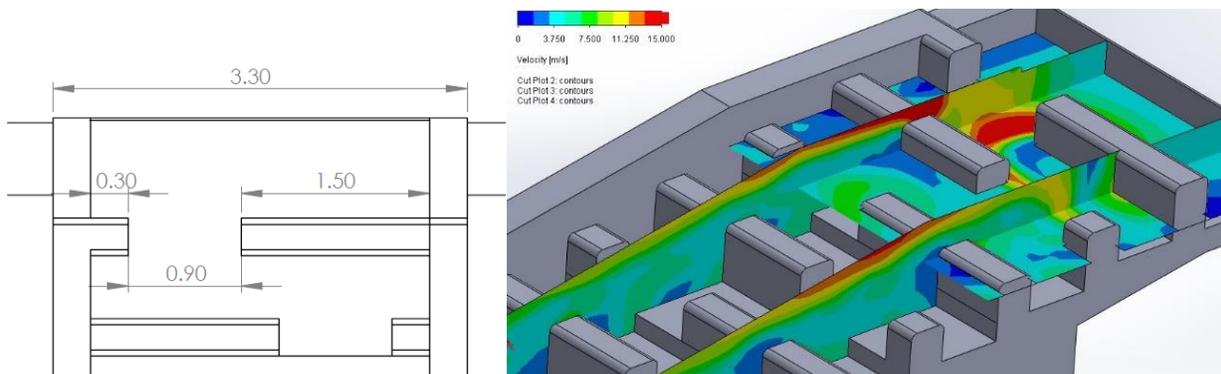


Figura 15 Diseño original

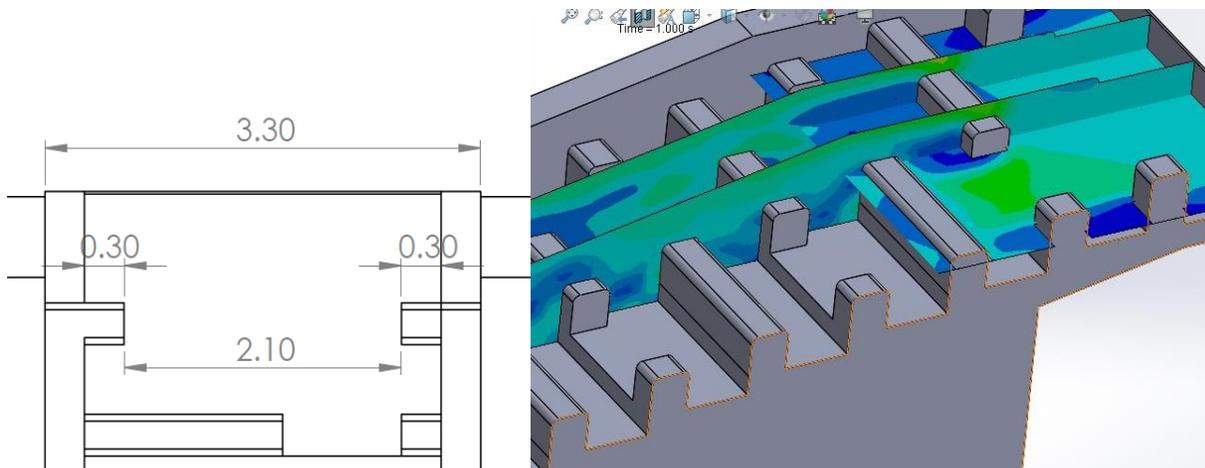


Figura 16 Alternativa 1

En el diseño original se obtiene una velocidad máxima de 19 m/s, sobre la segunda fila de pivotes.

La alternativa 1 plantea un primer estrechamiento totalmente abierto, disminuyendo drásticamente la velocidad máxima hasta los 8 m/s.

La alternativa 2 también disminuye el estrechamiento, pero aumentando 60 cm con respecto al diseño original. Esta modificación le lleva a tener una velocidad máxima de 12 m/s.

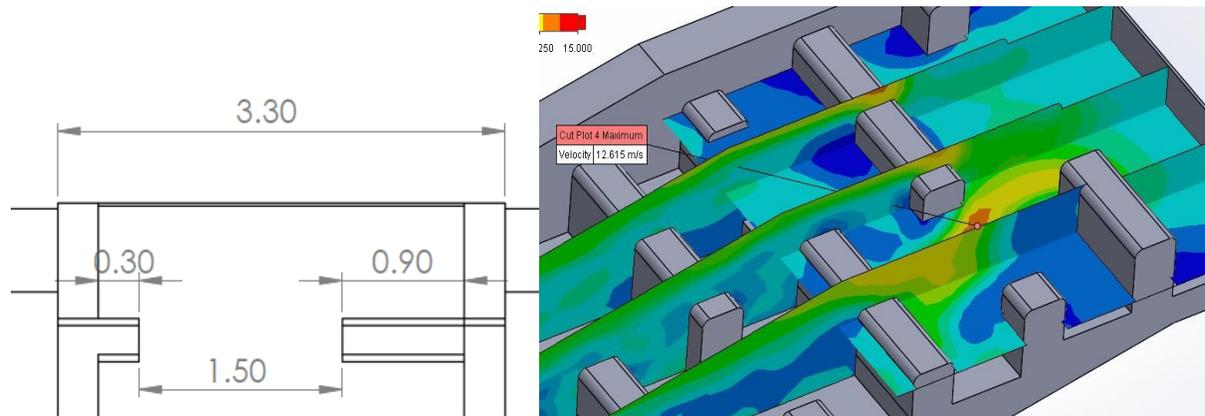


Figura 17 Alternativa 2

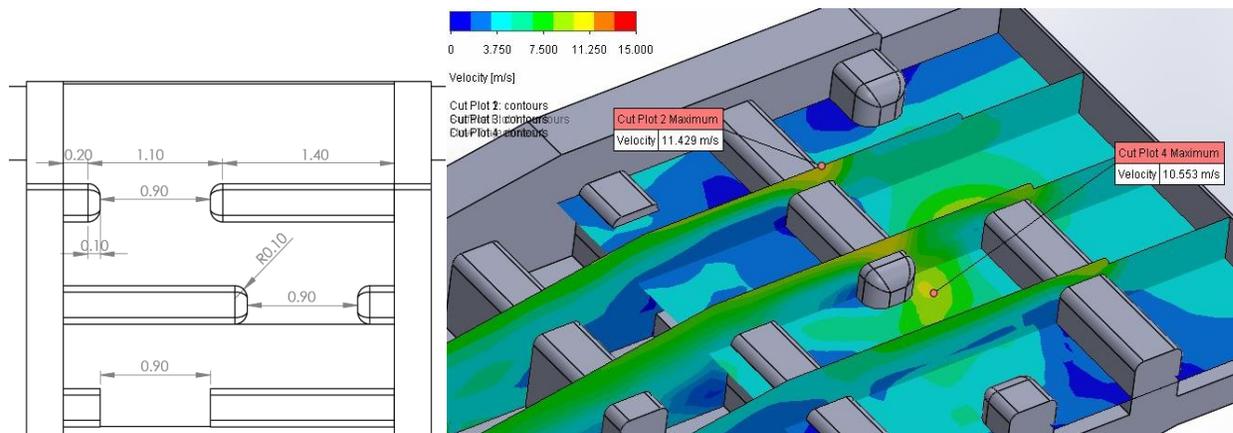


Figura 18 Alternativa 3

La alternativa 3 plantea mantener el estrechamiento y disminuir la altura de la primera fila de pivotes en 10 cm (quedando con 30 cm, con la misma altura que la siguiente fila). Además, también se realiza el redondeo de las aristas de las dos primeras filas, con radio de 10 cm).

6. Discusión

El objetivo de la optimización de la obra de toma se centró en neutralizar el punto crítico detectado en la escalera de peces, considerando la velocidad máxima, la presión máxima y el adecuado diseño para la circulación de los peces.

En cuanto a los parámetros de diseño para el adecuado paso de los peces se considera el tamaño del pez para la dimensión mínima de los pasos y la especie de pez para la velocidad máxima del agua. Ninguna de las alternativas disminuye las dimensiones de la escalera, por lo que los tamaños mínimos son salvados; y en todas las alternativas se disminuye la velocidad máxima, asegurando así la velocidad máxima de la especie. Por otra parte, el orificio de entrada a la escalera de peces se encuentra por debajo del nivel de la bocatoma, de modo que el tirante de agua mantendrá el orificio sumergido.

En la Tabla 2 se resumen las velocidades máximas de cada diseño, donde se observa que la alternativa 1 es la que logra una mayor reducción.

Diseño	Vel. Máx.	Ubicación
Original	19.7 m/s	Sobre segunda fila de pivotes
Alternativa 1	7.5 m/s	Abertura segunda fila de pivotes
Alternativa 2	12.6 m/s	Abertura segunda fila de pivotes
Alternativa 3	11.4 m/s	Sobre segunda fila de pivotes

Tabla 2 Velocidad máxima en alternativas propuestas

En cuanto a la presión, todas las alternativas neutralizan tanto la presión máxima como la mínima.

Diseño	Presión (Pa)		Presión (kg/cm ²)	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Original	312433	-42849	3.19	-0.44
Alternativa 1	133543	77656	1.36	0.79
Alternativa 2	187179	55789	1.91	0.57
Alternativa 3	172320	58888	1.76	0.60

Tabla 3. Presiones en alternativas propuestas

Finalmente, considerando el tiempo y recursos empleados en la solución de las simulaciones, se observa que el tiempo de cálculo requerido por el programa no supera los 30 minutos en una computadora estándar para el uso en ingeniería civil.

Diseño	Tiempo de solución (min:seg)	Nº iteraciones
Original	9:54	285
Alternativa 1	3:40	108
Alternativa 2	6:46	196
Alternativa 3	4:50	135

Tabla 4 Tiempo de solución e iteraciones empleadas.

7. Conclusiones

- ⊙ Se implementó la metodología CFD con el fin de analizar el comportamiento hidráulico de la obra de toma del proyecto de riego Guadalquivir-Cenavit-Calamuchita. La posibilidad de reproducir el comportamiento hidráulico de esta infraestructura hidráulica permitió un proceso de diseño más ágil y eficiente.
- ⊙ El análisis y predicción de afectación del patrón de escurrimiento ante el cambio de algunas variables geométricas permitió la optimización hidráulica del funcionamiento de cada parte constituyente de la estructura. Siendo el modelo numérico muy útil para realizar un análisis rápido de las diferentes alternativas analizadas.
- ⊙ Los resultados son consistentes con las observaciones realizadas del comportamiento de la estructura ante caudales extremos.

- ⊙ El análisis bajo una condición de caudal elevado muestra que el vertedero y la bocatoma no son afectados por el flujo de agua, en cambio, la escalera de peces alcanza velocidades que suponen un riesgo para su estado a posteriori. Por lo que el principal punto crítico detectado en la obra de toma es la entrada a la escalera de peces.
- ⊙ Las tres alternativas propuestas para el punto crítico de la escalera de peces logran disminuir la velocidad y la presión en la entrada, por lo que se puede decir que son efectivas. Entre ellas, la alternativa 1 es la que asegura una velocidad menor, pero el redondeo de aristas y la reducción de la altura pueden conseguir un mejor funcionamiento sin grandes cambios en el diseño original, por lo que se escoge la alternativa 3.
- ⊙ La aplicación de la dinámica de fluidos computacional al diseño de la obra de toma del proyecto Guadalquivir- Cenavit- Calamuchita ha permitido detectar las zonas de la obra que son más afectadas por el flujo de agua, pudiendo elaborar propuestas de modificación y encontrando una alternativa que optimiza el diseño, reduciendo la velocidad máxima sin significar un incremento en el costo de la obra.
- ⊙ En futuras investigaciones, se recomienda trabajar con distintos materiales (cambiando la rugosidad del material en el modelo), dando un mayor detalle a los parámetros de cálculo.

8. Bibliografía

- 📖 Aponte-Reyes, A. (2014). Validación de modelos hidrodinámicos de tres modelos topológicos de lagunas facultativas secundarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(4), 637-654.
- 📖 Baker, C., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., & Sterling, M. (2019). Chapter 4—Computational techniques. En C. Baker, T. Johnson, D. Flynn, H. Hemida, A. Quinn, D. Soper, & M. Sterling (Eds.), *Train Aerodynamics* (pp. 53-71). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813310-1.00004-6>
- 📖 Barea Hernández, J. C. (2017). Estudio del comportamiento del fluido al paso por válvulas hidráulicas mediante ensayo experimental y modelación CFD [Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad de Almería]. http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/6554/13091_TFG%20Juan%20Carlos%20Barea%20Hern%C3%A1ndez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 📖 Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab* (Vol. 113). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- 📖 Numberphile. (2019). Navier-Stokes Equations—Numberphile. <https://www.youtube.com/watch?v=ERBVFcutl3M>

- 🔖 Osses, J. (2016). El método de volúmenes finitos y sus soluciones para problemas de ingeniería. ESSS. <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>

🔖 SOLIDWORKS Flow Simulation. (2017, noviembre 28). SOLIDWORKS. <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-flow-simulation>
- 🔖 Vázquez, c. A. S. (2015). Análisis comparativo del efecto de una rápida en la modificación de la turbulencia y sus efectos en un tanque amortiguador trapecial. 94.

🔖 Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed). Pearson Education Ltd.