



## Análisis hidrodinámico por CFD de una obra de toma de agua potable en una presa de almacenamiento

### Hydrodynamic analysis through CFD of a potable water intake in a storage dam

Zamora-Juárez Miguel Ángel

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Civil  
Instituto de Ingeniería Civil  
Correo: [mzamoraje@uanl.edu.mx](mailto:mzamoraje@uanl.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-9509-6898>

Guerra-Cobián Víctor Hugo

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Civil  
Instituto de Ingeniería Civil  
Correo: [victorguerracb@uanl.edu.mx](mailto:victorguerracb@uanl.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0001-6193-100X>

Ferriño-Fierro Adrián Leonardo

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Civil  
Instituto de Ingeniería Civil  
Correo: [adrian.ferrinofr@uanl.edu.mx](mailto:adrian.ferrinofr@uanl.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-4405-4962>

#### Resumen

El análisis hidrodinámico de una Obra de Toma de Agua Potable (OTAP) y una sección de tubo de conducción en una presa de México fue evaluada mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El objetivo del estudio fue visualizar el comportamiento del flujo en la estructura de la OTAP y de 36 metros del tubo que conduce hacia una planta de bombeo. La metodología estableció cuatro escenarios en función del nivel de almacenamiento  $H_{OTAP}$  y el caudal de extracción  $Q_{out}$  para satisfacer parte de la demanda de agua. El balance de caudal mostró que las entradas 01 y 02 aportan un promedio combinado de 61.34 % del caudal de entrada a la torre. Sin embargo, la ubicación y orientación de la entrada 01, respecto a la dirección del flujo en el tubo, induce un efecto de vorticidad y turbulencia que puede inducir efectos de vibración y desgaste en la conexión de la torre y el tubo a largo plazo. Los valores de velocidad y condiciones operativas permitieron caracterizar el flujo como turbulento y sub-crítico ( $Re = 1.01 \times 10^{-6}$ ,  $Fr = 0.29$ ), respaldado por la estimación analítica y numérica de velocidad del agua a la salida con un error relativo de 4.44 %. El efecto del paso de tiempo indicó un impacto mayor (3.61 %) que los modelos de turbulencia (2.61 %) en la solución numérica. Con base en los resultados se proporcionaron fundamentos para proponer un elemento disipador de energía en la parte inferior de la torre y reducir el nivel de vorticidad a lo largo del tubo, con el fin de evitar vibraciones y desgaste por fatiga en la entrada del tubo de conducción de agua de la OTAP.

**Descriptores:** Obra de toma de agua potable, dinámica de fluidos computacional, turbulencia, caudal de extracción, vorticidad.

#### Abstract

A hydrodynamic analysis of potable water intake (PWI) and a section of flow tube at a dam of Mexico was assessed through Computational Flow Dynamics method. The aim of this study was to visualize the flow behavior within the structure of PWI and a section of 36 meters for the flow tube. The methodology set out four scenarios in function of storage level  $H_{OTAP}$  and the outlet flow  $Q_{out}$  towards a pumping system. The assessment of fluxes showed that water inlets 01 and 02 contribute a mean mixed of water flow rate of 61.34 % to intake. However, the location and direction of inlet 01, respect to tube axis, promote an effect of vorticity and turbulence which can produce vibration and wear in the long term. The velocity values and operative make it possible to flow as turbulent and sub-critical ( $Re = 1.01 \times 10^{-6}$ ,  $Fr = 0.29$ ), which were back up by the analytic and numerical comparison of velocity outlet values with an 4.44 % as relative error. The effects of time step indicated a higher impact (3.61 %) than the turbulence models (2.61 %) at numerical solution. Based on results, the basis for the installation of a wall for turbulence dissipation were proposed at the bottom of the tower to reduces the vorticity rate along the pipe, in order to cutting down vibration and wear.

**Keywords:** Water potable intake, computational fluid dynamics, turbulence, outlet flow, vorticity.

## INTRODUCCIÓN

Las torres de toma de agua son típicamente estructuras de concreto armado de secciones cajón, estas contienen el equipamiento de control de descargas de agua y se pueden considerar como el punto de partida en la red de agua potable dirigido por un tubo de descarga. El tubo de descarga es una tubería que dirige el flujo hacia la planta de bombeo y le proporciona la energía de presión suficiente para dirigir un gasto constante, según sean las necesidades de demanda, hasta la siguiente estación de bombeo o la zona conurbada. Visto de forma global, la obra de toma de un embalse tiene como función permitir la salida regulada del agua para cubrir la demanda requerida. La obra de toma de agua potable (OTAP) es diseñada con una capacidad mínima suficiente para satisfacer la demanda máxima en las condiciones más desfavorables, con una salida constante y con mínimas variaciones de flujo (Bolinaga, 1999).

En la práctica, evaluar este tipo de estructuras y su desempeño es difícil hasta una vez terminadas. El empleo de software de simulación numérica permite tener una perspectiva detallada e información local para diferentes variables y parámetros que, de forma física-experimental, serían complicados de medir, por ejemplo, la caída de presión y el nivel de turbulencia en el tramo de transición torre-acueducto. Entre este tipo de herramientas computacionales se encuentra la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés; Rojas & López, 2021).

La Dinámica de Fluidos Computacional es la aplicación de un conjunto de métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas a fenómenos de la mecánica de fluidos y transferencia de calor. La CFD posee la ventaja de no requerir una etapa de calibración, ya que se deriva de las ecuaciones universales que gobiernan la dinámica de los fluidos y facilita el estudio de fenómenos complejos (Zikanov, 2010; White, 2015). Entre las principales áreas de aplicación, destacan la industria automotriz (diseño de autos aerodinámicos), la aeronáutica (diseño de aviones), la mecánica en general (diseño de turbinas, tanques y bombas) y el análisis hidrodinámico de estructuras hidráulicas. Por lo que, la CFD se ha convertido en una herramienta predictiva, mejorando la relación costo-beneficio en el diseño de sistemas (Dhakal *et al.*, 2015). La CFD tradicional utiliza un enfoque Euleriano, a diferencia del método utilizado previamente Hidrodinámica de Partícula-Suavizada-*Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), basado en el enfoque Lagrangiano. El enfoque Euleriano discretiza el volumen de control en pequeños volúmenes, donde el fluido define su trayectoria en el espacio según las condiciones del medio continuo (gradiente de presión,

temperatura y velocidad, entre otros), conocido como Método de Volúmenes Finitos (Hanif *et al.*, 2018).

En el caso de estructuras hidráulicas, Macián *et al.* (2023) realizaron la modelación numérica de saltos hidráulicos por el efecto del tamaño de escalones negativos para optimizar la disipación de energía. La disipación de energía fue evaluada considerando dos posibles alturas relativas del escalón y tres posibles valores de número Froude en el flujo a superficie libre. La modelación numérica se realizó con el software comercial FLOW-3D y con base en las ecuaciones de Navier-Stokes bajo un esquema transitorio de presión y velocidad. Tal enfoque es conocido como RANS (*Reynolds Averaging of the Navier-Stokes equations*) y utilizando el modelo de turbulencia Grupo de Renormalización *RNG - k - e* (energía cinética y grado de disipación). Los resultados mostraron que las fluctuaciones de presión que influyen en la disipación de energía son significativamente reducidas debido al tamaño del escalón negativo e influyendo en el tamaño del salto hidráulico. Por otro lado, Coroneo *et al.* (2011) evaluaron el comportamiento hidrodinámico de un tanque de agitación monofásico (parte de un reactor químico). La modelación del flujo en el tanque fue realizada con el software ANSYS-Fluent 6.3 bajo el esquema RANS, el modelo de turbulencia *RNG - k - e* y el algoritmo SIMPLEC para acoplar las ecuaciones de continuidad y momentum al análisis. Los resultados indicaron, en general, que los valores medios de flujo son adecuados, sin embargo, es necesario poner especial atención a la cuantificación de turbulencia mediante parámetros hidráulicos y relacionados al fenómeno, debido a cierto nivel de incertidumbre.

El presente trabajo evaluó el comportamiento hidrodinámico del flujo a través de la estructura que corresponde a la torre de Obra de Toma de Agua Potable (OTAP) y una sección de tubo del acueducto mediante CFD. En este caso, se empleó el software comercial ANSYS-Fluent© (2022) donde se analizó el comportamiento de la estructura para los escenarios operativos esperados. El principal objetivo fue analizar la variación de velocidad y la caída de presión en la región interna de la torre de obra de toma, así como los gastos correspondientes para cada entrada de la OTAP según los escenarios de carga y almacenamientos esperados. De igual forma, con base en los resultados se estimaron parámetros hidráulicos para analizar el comportamiento del fluido en la zona de entrada y a lo largo del tubo para caracterizar el flujo e identificar fenómenos que pudiesen afectar el funcionamiento del sistema o que propicien el desgaste por fatiga.

### ECUACIONES QUE RIGEN LA CFD

Un análisis mediante CFD supone una solución utilizando métodos numéricos y procesos iterativos de ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos. Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos son las conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, formuladas por el francés Claude-Louis Navier y el matemático irlandés George Stokes en el siglo XIX (Mataix, 2008). Las cuales son ecuaciones diferenciales parciales que se derivan de las ecuaciones del matemático Leonard Euler (Gupta *et al.*, 2016; White, 2015).

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden deducirse de la segunda Ley de Newton y establecen que la rapidez de cambio de momentum de una partícula de fluido es igual a la suma de las fuerzas que están actuando sobre el fluido.

De esa forma, las fuerzas se clasifican en:

- Fuerzas superficiales: La fuerza causada por la diferencia de presiones, la fuerza de viscosidad, la tensión superficial.
- Fuerzas volumétricas: La fuerza de gravedad, la fuerza centrífuga, la fuerza Coriolis, la fuerza electromagnética.

Por ello y de acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$m \cdot \vec{a} = \text{fuerza presión} + \text{fuerza viscosidad} + \text{peso} + \text{Tension superficial} \tag{1}$$

La tensión superficial juega un papel poco representativo para el movimiento del fluido a macro escala, por lo que no suele tomarse en cuenta durante el desarrollo de las ecuaciones. Las ecuaciones resultantes son las de conservación de masa (ecuación 1) y momentum (ecuaciones 2, 3 y 4) en coordenadas cartesianas para un flujo turbulento, incompresible en un esquema transitorio (Adzic *et al.*, 2022).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right) = \tag{3}$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \tag{4}$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \tag{5}$$

Donde:

- $u, v$  y  $w$  = componentes del vector velocidad
- $\rho$  = densidad del fluido
- $P$  = presión absoluta
- $\mu$  = viscosidad dinámica

### MATERIALES Y MÉTODO

La modelación de estructuras hidráulicas con CFD es una actividad que permite evaluar el comportamiento del flujo con fines de diseño y análisis. Los códigos de CFD contienen tres elementos o etapas principales: Preprocesamiento, solución y post-procesamiento. Por tal motivo se estableció una metodología de análisis para este procedimiento y asegurar una simulación fiable y válida. La Figura 1 muestra la metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo.

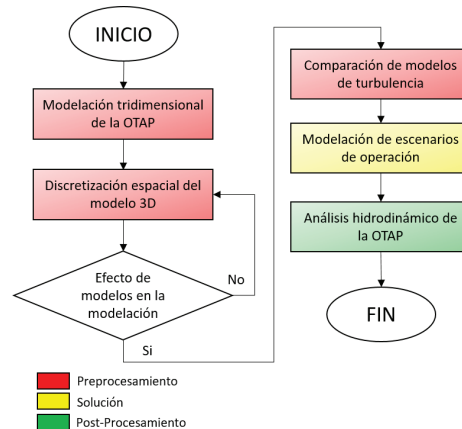


Figura 1. Diagrama de flujo del método utilizado

### MODELACIÓN GEOMÉTRICA

La modelación del dominio o construcción en 3D del modelo es una de las etapas iniciales y proporciona in-

formación de entrada para el análisis. En el presente trabajo la delimitación del volumen de control abarcó la estructura interna de la Obra de Toma de Agua (OTAP), una sección del tubo de conducción y la rendija superior para acceder al interior desde la corona en la parte superior de la presa (Figura 2). La estructura cuenta con una altura de 39.2 m y está conformada de Concreto Compactado por Rodillo (CCR). La geometría fue modelada utilizando el software de tipo CAD (*Computer-Aided Design*), SolidWorks© (2023).

La configuración de la OTAP está conformada por tres secciones de cajón a diferentes alturas, como se muestra en la Figura 1, asimismo cuenta con 5 entradas de perfil rectangular y 0.5 m de espesor. Las entradas rectangulares están distribuidas en la torre, donde cuatro entradas permiten la entrada del agua hacia la tubería de toma y la quinta entrada se encuentra en la corona de la presa para el ingreso de aire en los casos donde el descenso de agua genere caídas de presión y permita la succión de aire; así como el acceso al interior de la OTAP por cuestiones de análisis y mantenimiento.

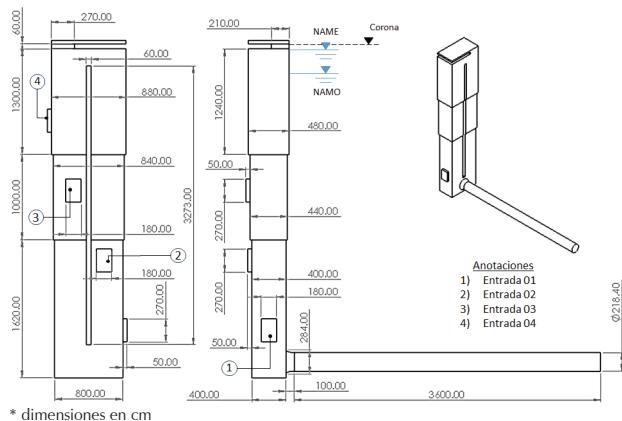


Figura 2. Estructura de la Obra de Toma de Agua Potable utilizado para modelación

#### GENERACIÓN DE MALLA Y CONDICIONES DE FRONTERA

El análisis numérico mediante CFD fue realizado con el software comercial ANSYS-Fluent 2023-R1© (2023). La Figura 3 muestra el dominio con las entradas y salidas de flujo como se describió previamente, donde el dominio fue discretizado utilizando el método de volúmenes finitos (FVM).

Considerando la geometría poco compleja de la estructura, se generó una malla estructurada con una configuración de tipo *Cartesian* y topología hexaédrica (Figura 4), la cual es conveniente para geometrías no complejas. La malla está constituida por 290 170 nodos y 262 110 elementos, donde el tamaño de elemento fue de 0.2 m, el cual garantizó una simulación fiable respec-

to a otras topologías (p.e. tetraédrica), con una calidad media de elemento (*Element quality*) de 0.97 y una desviación estándar en la deformación de elementos de 0.052.

La presa fue diseñada para operar con una carga hidráulica nominal de  $H_{OTAP}$  de 34.2 m respecto al fondo de la OTAP, designado como Nivel de Agua Mínimo de Operación (NAMO). Mientras que, el nivel máximo o Extremo (NAME) está contemplado para 38.6 m (Bolinaga, 1999). Respecto a los valores de extracción  $Q_{out}$  de la presa al sistema de distribución, se ha fijado en 1600 l/s como valor nominal y un flujo máximo de 5000 l/s para condiciones donde se demande una mayor cantidad de agua. La Tabla 1 muestra los escenarios posibles según los valores mencionados dependiendo de la demanda requerida por el sistema de distribución y el almacenamiento disponible según los escurrimientos generados por el régimen de precipitación en la región.

Para el método de análisis se planteó en gradiente de presión (*“Solución con Base en Presión-Pressure-Based Solver”*) considerando un flujo incompresible, Newtoniano y transitorio. Las condiciones operativas y ambientales de la OTAP plantean una modelación con flujo bifásico (aire-agua) utilizando la función *‘Volumen de Fluido (Volume of Fluid-VOF)’*, el cual es adecuado para aplicaciones donde los campos de flujos tienen una frontera/capa definida entre dos fases. Para simular el gradiente de presión de la columna de agua generada por el almacenamiento se utilizó el Submódulo *‘Flujo a Canal Abierto (Open Channel Flow)’* declarando la altura de la superficie libre respecto al fondo de la estructura según el escenario evaluado, en este caso definidos por el NAMO y NAME. Las cuatro entradas ubicadas en las superficies laterales de la torre fueron designadas con el efecto del gradiente de presión, mientras que la entrada en la parte superior fue declarada con una presión relativa de 0 Pa, simulando condiciones de superficie libre (Tabla 2). Las ecuaciones de continuidad y *momentum* utilizan un alto esquema de resolución con los términos de advección mediante un factor de gradiente dependiente (Chonji *et al.*, 2016). El esquema de advección seleccionado fue de alta resolución, aplicando el *First Order Upwind*. Para el fenómeno de turbulencia se estableció el modelo RNG *‘Standard Wall Functions’* (K-Epsilon, energía cinética y su tasa de disipación). El modelo de turbulencia es conveniente para resolver el problema de transporte en el desarrollo de vórtices estableciendo la relación entre la fluctuación de las variables y el tiempo (Li *et al.*, 2020).

En el estado inicial del dominio se consideró una cobertura parcial de la Fracción de Volumen (*Volume Fraction*) del agua equivalente a la altura  $H_{OTAP}$  del NAMO o NAME, según sea el caso, utilizando la función *Patch*.

La evaluación se realizó para 600 periodos (*TimeSteps*) con un periodo de 0.05 s (30 segundos) y 20 iteraciones por *TimeStep*. El periodo de operación se planteó una vez que se alcanzó la convergencia en los valores de entrada y salida (continuidad), así como en los monitores residuales de las variables.

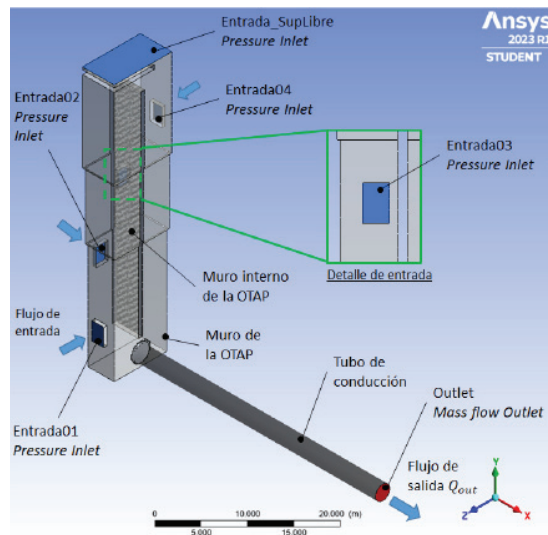


Figura 3. Modelación del dominio de la OTAP

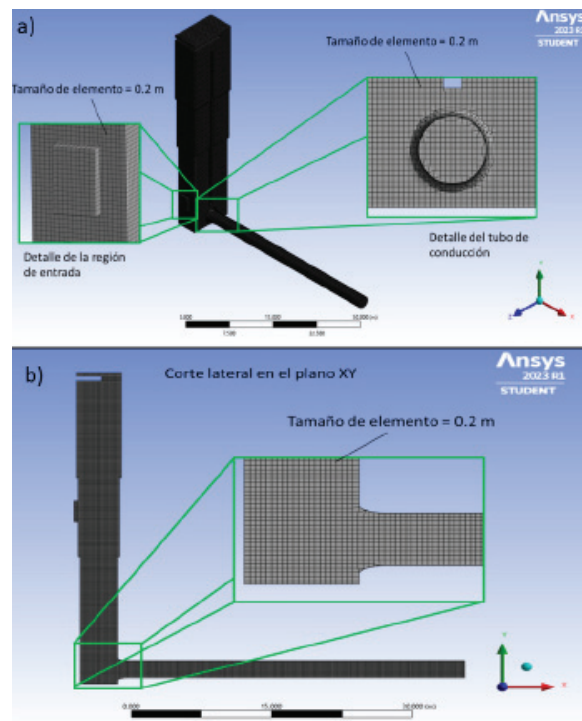


Figura 4. Mallado generado en el dominio, a) Detalles generales en la parte externa, b) Corte lateral en el plano XY de la OTAP

Tabla 1. Escenarios de operación de la OTAP hacia el sistema de suministro de agua

Parámetro	Nomenclatura	Valor mínimo	Valor máximo
Nivel de almacenamiento en la presa	$H_{OTAP}$	34.2 m	38.6 m
Gasto de extracción en el tubo	$Q_{out}$	1600 l/s	5000 l/s

Tabla 2. Condiciones de frontera y principales parámetros considerados en la simulación

Boundary	Condición de frontera	Elemento	Parámetro	Valor
Entrada 01		Área de sección transversal de compuerta de entrada	Nivel de agua constante	
Entrada 02		Área de sección transversal de compuerta de entrada	Nivel de agua constante	$NAMO = 34.2$ m
Entrada 03	Pressure Inlet	Área de sección transversal de compuerta de entrada	Nivel de agua constante	$NAME = 38.6$ m
Entrada 04		Área de sección transversal de compuerta de entrada	Nivel de agua constante	
Entrada_SupLibre		Zona superior a superficie libre	Volumen de aire dentro del dominio	0 Pa
Outlet	Mass flow outlet	Área transversal al tubo de conducción	Restricción del caudal de salida	1.6 m <sup>3</sup> /s gasto nominal y 5.0 m <sup>3</sup> /s gasto máximo
OTAP_Wall	Wall	Pared interna de la torre de OTAP	-	-
Pipe Wall	Wall	Pared interna del tubo de conducción	-	-



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### EFFECTO DEL MODELO DE TURBULENCIA

La influencia del modelo de turbulencia fue evaluada entre el modelo  $\kappa - \epsilon$  'Scalable Wall Functions-Funciones de Pared Escalable' y el modelo -SST (Shear Stress Transport-Esfuerzo Cortante de Transporte) en el escenario NAMO = 34.2 m y gasto de salida  $Q_{out} = 5\,000.0$  l/s para asegurar la fiabilidad de la simulación. La diferencia se estimó en 0.26 % para la velocidad máxima y 2.61 % en el valor promedio, indicando una diferencia significativa mínima respecto al modelo de turbulencia (Tabla 3).

### EFFECTO DEL PASO DE TIEMPO

En esquemas transitorios, el paso del tiempo o *time step* juega un rol importante en la precisión y convergencia de la solución numérica. Los *time steps* son declaraciones de intervalos de tiempo en los cuales ANSYS-Fluent calcula los parámetros del flujo. Para evaluar el efecto de este factor se realizaron simulaciones con intervalos de 0.1 s, 0.05 s, 0.025 s y 0.01 s; estableciendo el factor nominal de 0.05 s para los escenarios restantes y optimizar los recursos informáticos en las simulaciones. La variación de intervalos se evaluó en función de la estimación de velocidad máxima y media a la salida del tubo (Tabla 4).

### DISTRIBUCIÓN DE AGUA, PRESIÓN Y VELOCIDAD

La distribución del campo de velocidades en la OTAP está asociada a la carga hidráulica generada por el nivel de almacenamiento en la presa, la ubicación de cada entrada en la estructura y el volumen de extracción requerido según la demanda de la estación de bombeo en el sistema de distribución. La Figura 5 muestra el perfil de velocidades en la torre para los gastos de extracción en el

escenario del NAMO descritos en la Tabla 1. La presión de succión y la velocidad del fluido aumentan sustancialmente dependiendo del caudal de extracción en el tubo. En el caso del NAMO, el nivel del agua en la OTAP no sobrepasa la pared de bifurcación en el centro de la estructura por lo que los caudales de entrada de las entradas 01 y 02 no interactúan con el flujo de las entradas 03 y 04 hasta la región cercana al tubo de entrada. En el NAME el nivel del agua sobrepasa la pared de bifurcación y existe una pequeña interacción, principalmente de parte del flujo de la entrada 04, por lo que la contribución de la zona izquierda de la OTAP aumenta.

El régimen de velocidad dentro de la OTAP para un caudal  $Q_{out} = 1600$  lps (Figura 5a) alcanzó un valor máximo de 0.16 m/s y para un caudal  $Q_{out} = 5000$  lps la velocidad fue de 0.39 m/s (un incremento de 143.7 %), principalmente en la zona de la entrada 01 (Figura 5b). El incremento de velocidad en el flujo no muestra un incremento proporcional con el caudal de extracción (212.5 %, respecto al valor nominal). Sin embargo, la orientación de las entradas ejerce una importante influencia en el comportamiento del flujo. Las entradas 01 y 04 poseen una orientación ortogonal al eje axial del tubo y la velocidad de entrada induce un efecto de remolino en región inferior de la OTAP, previo a la conexión con el tubo. Este fenómeno se evaluó con mayor atención más adelante.

El reporte de flujos en la entrada y salida fue uno de los principales intereses en el análisis (Figura 6) debido a la complejidad de realizar esta medición de forma física. En promedio, las entradas 01 y 03 aportan la mayor parte del caudal requerido por el tubo de conducción, 35.84 % y 27.73 %, respectivamente. Es de especial atención esta comparativa, debido a que la entrada 02 presenta un gradiente de presión mayor comparado al ejercido en la entrada 03 (Figura 7). Lo cual indica, que el flujo en la zona de la entrada 01 genera un empuje con dirección a la corona y el muro interno de la

Tabla 3. Variación de resultados según el modelo de turbulencia

Modelo de turbulencia	Time Step [s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad media a la salida del tubo [m/s]
$\kappa - \epsilon$ 'Standard Wall Functions'	0.05	1.541	1.339
$\kappa - \omega$ - SST (Shear Stress Transport)	0.05	1.545	1.304

Tabla 4. Variación de la velocidad para diferentes *time steps*

Time step [s]	Velocidad máxima [m/s]	Velocidad media a la salida del tubo [m/s]
0.1	1.520	1.324
0.05	1.541	1.339
0.025	1.525	1.313
0.01	1.575	1.302

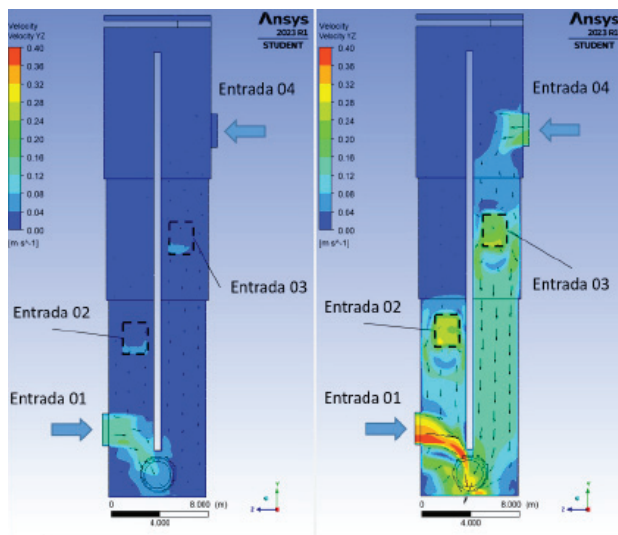


Figura 5. Distribución del campo de velocidades en la OTAP en el escenario de NAMO, a)  $Q_{out} = 1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , b)  $Q_{out} = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$

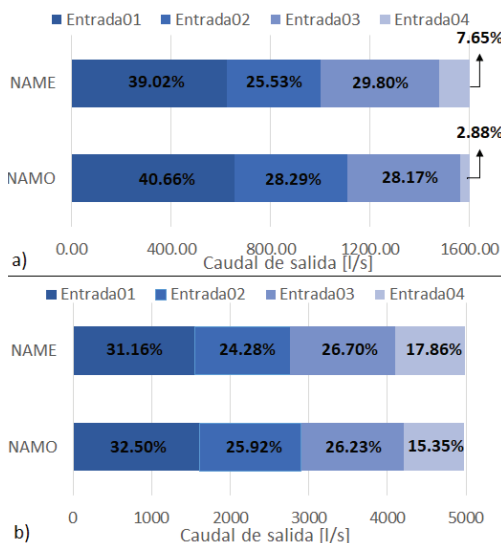


Figura 6. Reporte de flujos para los escenarios de operación de la presa, a) Flujo nominal de extracción  $Q_{out} = 1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , b) Flujo máximo de extracción  $Q_{out} = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$

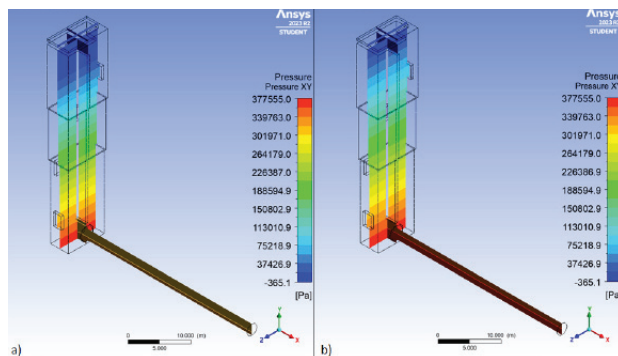


Figura 7. Perfil de presión en el interior de la OTAP para el caso del NAMO y NAME y  $Q_{out} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$

OTAP, disminuyendo la rapidez con la que el flujo ingresa en la compuerta 02. Adicionalmente, para el escenario NAME = 38.6 m y  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$  se puede apreciar una presión de  $-365.1 \text{ Pa}$ , que indica efectos de vacío en la zona superior de la torre, correspondiente a una región constituida por aire. El efecto de vacío infiere que la entrada superior en la corona induce el ingreso de aire a la torre. En caso de que la presión se presente en el volumen de agua, es posible la formación de vapor de agua (cavitación) debido al descenso de presión y así afectar a largo plazo la integridad de la estructura.

La entrada 01 es la compuerta con la mayor aportación al sistema con un máximo de 40.66 % en el escenario de NAMO y  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$ , y; un mínimo de 31.16 %. El valor mínimo se presentó en el escenario de NAME y  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$  debido a un incremento de la presión. La presión generada por el nivel del agua muestra una tendencia proporcional con una presión de 311.3 kPa en la región cercana al tubo de conducción en el caso del NAMO y se presentó un incremento de 12.86 % para el caso del NAME.

Por otra parte, la comparación de resultados numéricos y analíticos indica un error relativo máximo de 4.44 % (Tabla 5) con ligeras variaciones del régimen de velocidad a la salida del dominio. La estimación de caudal de salida, mediante el principio de continuidad, permitió generar una perspectiva de la diferencia que indica el proceso numérico con el valor analítico. Sin embargo, es conveniente que la medición experimental corrobore los resultados para validar completamente el modelo.

Tabla 5. Estimación de velocidad a la salida del tubo de conducción

Caudal de salida $Q_{out} [\text{m}^3/\text{s}]$	Velocidad de salida $V_{out} [\text{m/s}]$		Error relativo [%]
	Analítico	Numérico	
1.6	0.410	0.407	0.73
5.0	1.282	1.339	4.44

Adicionalmente, fue posible evaluar las pérdidas de energía cinética debido a la turbulencia del fenómeno (Figura 8). Para un escenario nominal de extracción, las pérdidas son significativamente pequeñas ( $0.001 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) respecto a un caudal de  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$ , donde la turbulencia y las pérdidas locales y por fricción aumentan el valor neto de pérdidas de energía cinética hasta un máximo de  $0.018 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

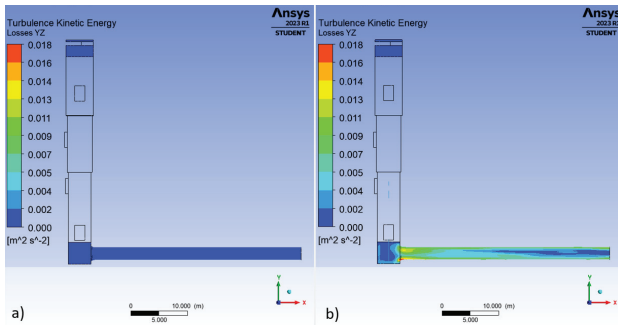


Figura 8. Perdidas de energía en el interior de la OTAP para el caso del NAMO, a)  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$ , b)  $5000 \text{ lps}$

ANÁLISIS DEL FLUJO EN EL TUBO DE CONDUCCIÓN

La visualización del flujo identificó la formación de vorticidad en el tubo desde la zona inferior de la OTAP (Figura 9). Como se mencionó anteriormente, la formación de vorticidad se debe a la diferencia de velocidades en las líneas de corriente provenientes de las entradas en la torre. El muro interno evita que los flujos entrantes choquen y formen vórtices en todo el cuerpo de la OTAP, sin embargo, la orientación de la entrada 01 y la ausencia de una estructura o pared induce que las líneas de corriente provenientes de la zona superior adquieran un impulso de rotación previo al ingreso del tubo de conducción. La Figura 9 muestra el comportamiento del fluido en diferentes secciones del tubo, donde el perfil  $X_1$  muestra la formación de dos zonas de vorticidad y esta se mantiene hasta un trayecto de 9 m (perfil  $X_3$ ) que la rotación se vuelve uniforme y se mantiene hasta la sección  $X_8$ . Sin embargo, la tendencia del flujo indica que esta vorticidad se prolonga más allá de los 36 m modelados.

Los perfiles de cada sección muestran el sentido de rotación del vórtice, donde la sección 4 coincide con el perfil de vectores tangenciales de la velocidad y el mayor descenso de velocidad, con un  $-29.9 \%$  ( $1.079 \text{ m/s}$ ). Para escenarios de alta demanda  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$ , la vorticidad puede generar vibraciones en la estructura del tubo, y a largo plazo, efectos de desgaste en la zona que conecta el tubo de conducción con la OTAP. El perfil de velocidad de la Figura 9 muestra un descenso de velocidad de hasta  $29.9 \%$  por efectos de turbulencia.

Los números de Froude y de Reynolds fueron estimados para caracterizar cuantitativamente el comportamiento del flujo en el eje del tubo (Figura 10 y 11). En el escenario de extracción nominal  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$  se estimó un valor máximo de número de Froude de 0.11, en los casos de NAMO y del NAME. Mientras que para un caudal de  $5000 \text{ lps}$ , el valor aumenta hasta 0.32, lo cual indica que el flujo se mantiene en un flujo sub-crítico. El

comportamiento de ambos parámetros alcanza sus valores máximos en la región de la sección  $X_2$  y disminuyendo gradualmente a una tasa de  $2.49 \%$  hasta la sección  $X_4$ . Por lo que, si en regiones posteriores al tubo existe la presencia de ondas, por ejemplo, generadas por la bomba del sistema de distribución, esta se propagará en todas direcciones, o bien, aguas abajo o aguas arriba (OTAP). Dependiendo de la magnitud de la onda, esta puede tener la capacidad suficiente de producir un impacto en los elementos de la obra de toma. Por otro lado, para el Número de Reynolds se determinó un régimen turbulento ( $Re > 4000$ ) con valores máximos de  $1.09 \times 10^6$  y  $3.37 \times 10^6$  para los caudales de  $1600 \text{ lps}$  y  $5000 \text{ lps}$ , respectivamente.

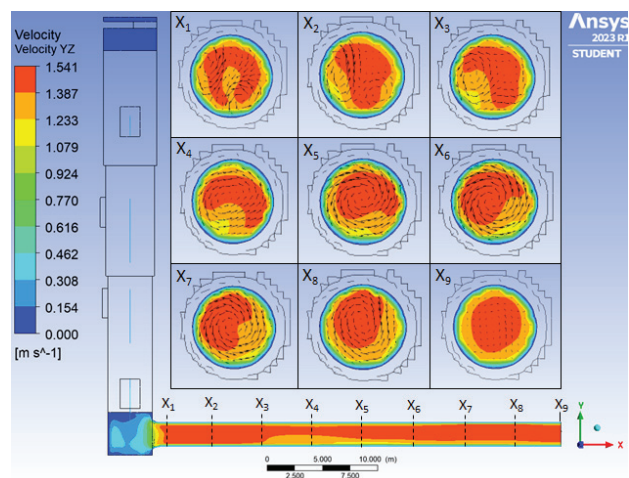


Figura 9. Perfiles del tubo de conducción en el escenario de NAMO y  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$

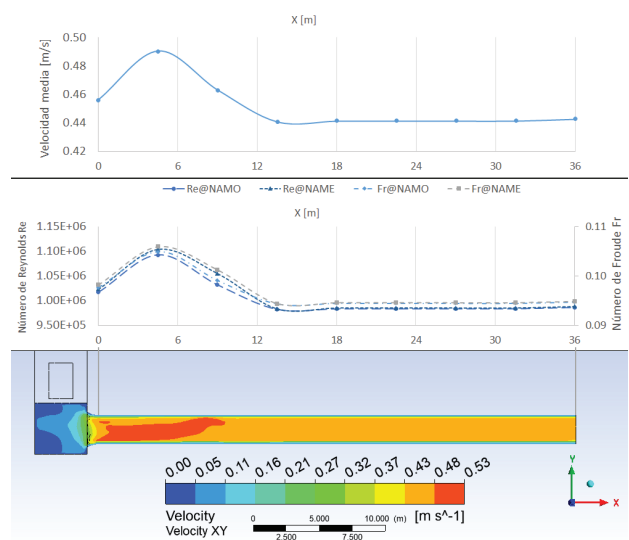


Figura 10. Estimación de coeficientes hidráulicos del flujo a lo largo del tubo con un caudal  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$



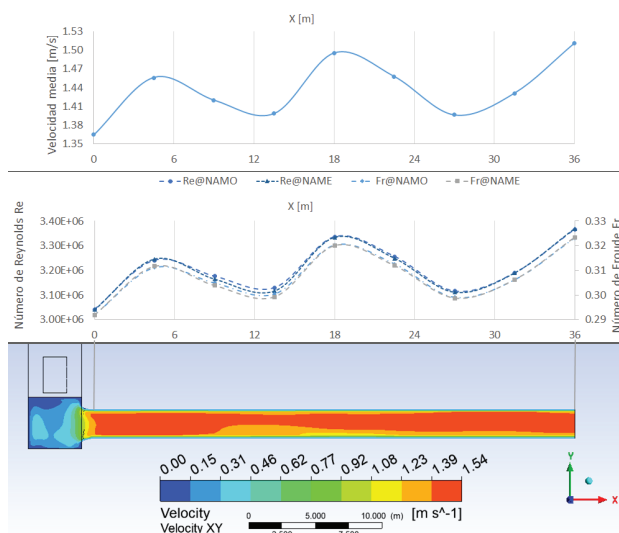


Figura 11. Estimación de coeficientes hidráulicos del flujo a lo largo del tubo con un caudal  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$

El comportamiento de la turbulencia en el escenario  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$  muestra una fluctuación y una tendencia de crecimiento que se mantiene hasta la superficie que representa la frontera del tubo. La primera variación abarca un crecimiento desde la sección  $X_1$  hasta  $X_4$  con una tasa de crecimiento de 6.74 % y después desciende un 2.49 %. Posteriormente, se registra un segundo incremento de 6.95 % y disminuye 4.21 % hasta la sección  $X_7$ . Finalmente, la turbulencia se incrementa en los 9 m finales del tubo, un 5.61 %. La tendencia de crecimiento de la turbulencia y pérdida de energía cinética está asociada a la vorticiudad descrita previamente (Figura 9). Es importante mencionar que, la estabilidad del flujo se puede apreciar a partir del comportamiento general de los valores de los números de Reynolds y Froude. Para un caudal  $Q_{out} = 1600 \text{ lps}$  los valores de  $Fr$  y  $Re$  alcanzan una estabilidad media de 0.094 y  $1.09 \times 10^6$ , respectivamente, y esto se puede apreciar en la distribución de velocidades en el tubo (Figura 10) con una mayor estabilidad de la velocidad en el eje axial del tubo. Mientras que, para el escenario de  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$  los parámetros hidráulicos poseen una distribución con mayor inestabilidad. Lo cual está asociado a que, si bien la vorticiudad ha disminuido, la turbulencia aún es significativa por la velocidad a la que transita el flujo. De esta forma, el sistema de bombeo en la red de distribución puede disminuir su eficiencia.

### CONCLUSIONES

El análisis hidrodinámico de la Obra de Toma de Agua Potable de una presa de almacenamiento se realizó para cuatro escenarios de operación proyectados para

el suministro de agua. El balance de flujos mostró que las entradas 01 y 02 aportan un estimado de 61.34 % del caudal de suministro al tubo. Sin embargo, en escenarios del NAME la aportación de la entrada 03 es mayor a comparación de la entrada 02, a pesar que esta última se encuentre con un gradiente de presión mayor y a mayor profundidad respecto a la superficie libre de la presa. Lo anterior se debe a que la presión del flujo en la entrada 01 ejerce una oposición al régimen en la entrada 02.

La evaluación del modelo de turbulencia mostró nulas diferencias significativas en los resultados de velocidad, con un máximo de 2.61 %. Por otro lado, el efecto del *time step* en el proceso numérico mostró un mayor impacto con un error relativo máximo de 3.6 %. Indicando que el establecimiento del tiempo de análisis genera un impacto más significativo en el proceso numérico y la estimación de resultados.

El análisis identificó que las condiciones de trabajo y la orientación de la entrada 01 inducen la formación de turbulencia en la zona de inferior de la OTAP y vorticiudad respecto al eje del tubo. Si bien, la rotación del flujo a lo largo del tubo no afecta el rendimiento del sistema de bombeo, la zona cercana a la OTAP puede sufrir de cierto nivel de vibración de acuerdo con los valores estimados del Número de Reynolds, principalmente para el escenario de  $Q_{out} = 5000 \text{ lps}$  ( $Re > 4000$ ). De esta manera, la configuración geométrica de la OTAP sugiere la colocación de una estructura disipadora de energía para prevenir la formación de vorticiudad previo a la entrada del flujo en la tubería de conducción. Lo anterior debe ser evaluado en futuros trabajos, con el fin de disminuir la vorticiudad en el tubo de conducción y la optimización de las dimensiones de tal estructura en el número de Reynolds. Asimismo, para evaluar el efecto de tales fenómenos se sugiere un análisis Fluido-Estructura a partir del campo de presión generado de las simulaciones en el presente trabajo.

Finalmente, el empleo de herramientas como la CFD permite no solo evaluar el rendimiento de sistemas hidráulicos sino también actividades de prevención ante fenómenos imprevistos, como la turbulencia y vorticiudad en este caso.

### REFERENCIAS

- Adzic, F., Stoesser, T., Liu, Y., & Xie, Z. (2002). Large-eddy simulation of supercritical free-surface flow in an open channel contraction. *Journal of Hydraulic Research*, 60(4), 628-644. <https://doi.org/10.1080/00221686.2022.2041496>
- Bolinaga, J. J. (1999). *Proyectos de ingeniería hidráulica*. Volumen 1. Caracas, Venezuela: Fundación Polar, pp. 470.

- Chongji, Z., Yexiang, X., Wei, X., Tao, W., Jin, Z., Zhengwei, W., & Yongyao, L. (2016). Numerical analysis of Pelton nozzle jet flow behavior considering elbow pipe. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 49(1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/49/2/022005>
- Coroneo, M., Montante, G., Paglianti, A., & Magelli, F. (2011). CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations. *Computers and Chemical Engineering*, 35(1), 1959-1968. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.12.007>
- Dhakal, S., Babu-Timilsina, A., Dhakal, R., Ratna-Bajracharya, T., Pandit, H. P., Nagendra A., Nakarmi A. (2015). Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex turbine. *Renewable Energy and Sustainable Reviews*, 48 (1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.030>
- Gupta, V. Prasad, V., & Khare, R. (2016). Numerical simulation of six jet Pelton turbine model. *Energy*, 104(1), 24-32. <http://doi://10.1016/j.energy.2016.03.110>
- Hanif, N., Cheema, T., Chattha, J., & Park, C. (2018). Effective basin blade configuration of a gravitational water vortex turbine for micro hydro power generation. *Journal of Energy Engineering*, 144(4), 1-16. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000558](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000558)
- Li, N., Liu, Y., Li, L., Chang, S., Han, S., Zhao, H., & Meng, H. (2020). Numerical simulation of wind turbine wake based on extended k-epsilon turbulence model coupling with actuator disc considering nacelle and tower. *IET Renewable Power Generation*, 14(18), 3834-3842. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0416>
- Macián, J., García, R., López, P., & Vallés, F. (2023). Numerical modeling of hydraulic jumps at negative steps to improve energy dissipation in stilling basins. *Applied Water Science*, 13(203), 1-15.
- Mataix, C. (2008). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. México: Alfaomega.
- Rojas, D., & López, B. (2021). Análisis mediante dinámica de fluidos computacional de la conducción de calor de un elemento combustible del reactor nuclear TRIGA-MARK III. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 22(4), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.4.028>
- SolidWorks Corporation. (2015). *Introducción a Solidworks*. 1a Ed., Massachusetts: Dassault Systemes. 134 p.
- White, F. (2015). *Fluid mechanics*. United States: McGraw-Hill Science Engineering.
- Zikanov, O. (2010). *Essential computational fluid dynamics*. United States: John Wiley & Sons.

#### Cómo citar:

Zamora-Juárez, M. Á., Guerra-Cobián, V. H., & Ferriño-Fierro, A. L. (2024). Análisis hidrodinámico por CFD de una obra de toma de agua potable en una presa de almacenamiento. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25(02), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.2.010>