



CTSCAFE PARA CIUDADANOS.....

<http://www.ctscafe.pe>

ISSN 2521-8093



REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA



<http://www.ctscafe.pe>

Volumen IX- N° 26 Julio 2025

ISSN 2521-8093

2



Comparación de parámetros hidráulicos en rápidas escalonadas: Método de la ANA vs Simulación CFD en ANSYS CFX

Mg. Luis Enrique Yataco Osorio
Universidad Nacional de Ingeniería
Correo Electrónico: luis.yataco.o@uni.pe

Sr. Luis Antonio Yataco Pastor
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo Electrónico: luisantonio.yataco@unmsm.edu.pe

Recibido: 06 Junio 2025 Aceptado: 25 Julio 2025



Resumen: Este estudio analiza el diseño de una rápida escalonada con una caída de 1.85 m, aplicando un enfoque analítico basado en el manual de la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA) y un modelo numérico en ANSYS CFX. En las gradas, ambos métodos muestran buena concordancia, con errores menores al 12 % en velocidad y 9 % en tirante. Sin embargo, en el colchón amortiguador y el canal aguas abajo, las discrepancias alcanzan hasta 66 % y 174 %, respectivamente. Estos resultados evidencian la necesidad de ampliar los lineamientos del manual en zonas críticas y destacan la utilidad de la modelación CFD como herramienta complementaria para mejorar la precisión del diseño hidráulico.

Palabras claves: Rápida escalonada/ Diseño hidráulico/ ANSYS CFX/ Metodología ANA/ Simulación numérica.

Abstract: This study analyzes the design of a stepped chute with a drop of 1.85 m, applying an analytical approach based on the manual of the National Water Authority of Peru (ANA) and a numerical model in ANSYS CFX. In the steps, both methods show good agreement, with errors below 12% in velocity and 9% in flow depth. However, in the stilling basin and downstream channel, discrepancies reach up to 66% and 174%, respectively. These results highlight the need to expand the manual's guidelines in critical areas and emphasize the usefulness of CFD modeling as a complementary tool to improve the accuracy of hydraulic design.

Keywords: Stepped spillway/ Hydraulic design/ ANSYS CFX/ ANA methodology/ Numerical simulation.

Résumé: Cette étude analyse la conception d'un rapide à gradins avec une chute de 1,85 m, en appliquant une approche analytique fondée sur le manuel de l'Autorité Nationale de l'Eau du Pérou (ANA) et un modèle numérique dans ANSYS CFX. Dans les gradins, les deux méthodes montrent une bonne concordance, avec des erreurs inférieures à 12 % pour la vitesse et 9 % pour le tirant d'eau. Cependant, dans le radier amortisseur et le canal en aval, les écarts atteignent respectivement jusqu'à 66 % et 174 %. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'élargir les lignes directrices du manuel dans les zones critiques et soulignent l'utilité de la modélisation CFD comme outil complémentaire pour améliorer la précision du dimensionnement hydraulique.

Mots-clés : Rapide à gradins/ Conception hydraulique/ ANSYS CFX/ Metodologie ANA/ Simulation numérique.

1. Introducción

En las últimas décadas, se han desarrollado diversas estrategias de ingeniería para mitigar los efectos de la energía excesiva en estructuras hidráulicas. Entre ellas, las rápidas escalonadas se consolidan como soluciones efectivas para la disipación de energía en caídas pronunciadas, contribuyendo a la protección de taludes, canales y estructuras aguas abajo.

Numerosos estudios han demostrado la eficiencia de estas estructuras tanto desde el enfoque experimental como numérico. Por ejemplo, Díaz Rua (2021) [1] utilizó Open FOAM para modelar el flujo tipo nappe flow en una rápida escalonada, obteniendo alta concordancia con un modelo físico calibrado. De igual forma, Casa et al. (2018) [4] emplearon FLOW-3D para simular flujos rasantes en rápidas con pendientes de 45°, validando los resultados con desviaciones menores al 10% respecto a ensayos físicos. Otros autores, como Durán y Sánchez (2019) [5], trabajaron con modelos físicos para optimizar la geometría de entrada y mejorar la disipación energética, mientras que Guachamín y Simbaña (2018) [6] incorporaron elementos adicionales en el perfil escalonado para alterar la turbulencia y aumentar la eficiencia hidráulica.

En el contexto peruano, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha establecido lineamientos de diseño para estas estructuras en su Manual de Criterios de diseño de obras hidráulicas [11]. Si bien el manual incluye una sección específica para rápidas escalonadas, se enfoca principalmente en el diseño de las gradas, y no brinda un tratamiento separado o detallado para el colchón amortiguador, las transiciones y el canal aguas abajo dentro de ese mismo apartado. Para estas secciones, el diseñador debe recurrir a metodologías descritas en otras secciones del manual, como las correspondientes al diseño de caídas verticales o rápidas hidráulicas inclinadas, lo que puede generar ambigüedad o variabilidad en la aplicación de los criterios.

En este contexto, el presente estudio plantea un caso de ejemplo en el que se diseña una rápida escalonada para un desnivel de 1.85 metros, aplicando dos enfoques complementarios:

- (i) un método analítico, basado en el manual de la ANA, y
- (ii) un modelo numérico tridimensional, desarrollado en ANSYS CFX con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

El objetivo principal es comparar los parámetros hidráulicos clave —tirante y velocidad— obtenidos por ambos métodos, identificando coincidencias y discrepancias que permitan evaluar las fortalezas y limitaciones del enfoque analítico actual, así como valorar la utilidad de las herramientas de simulación para mejorar el diseño de este tipo de estructuras.

2. Material y métodos

2.1. Metodología

El estudio se divide en dos etapas:

2.1.1. Diseño de la rápida escalonada

Para el diseño de la rápida escalonada se consideraron las condiciones hidráulicas del canal aguas arriba y aguas abajo, así como el desnivel a superar. A partir de estos parámetros se desarrolló tanto el enfoque analítico como la configuración del modelo numérico en ANSYS CFX.

Datos básicos del sistema:

- Ancho del canal (B): 1.00 m
- Caudal de diseño (Q): 3.75 m³/s
- Coeficiente de rugosidad de Manning (n): 0.014
- Desnivel a superar: 1.85 m

Condiciones del canal aguas arriba:

- Pendiente longitudinal (S): 0.386%
- Talud Z=1

Condiciones del canal aguas abajo:

- Pendiente longitudinal (S): 0.571%
- Talud Z=1

Geometría de la rápida escalonada:

- Número de gradas: 3
- Altura de gradas: Primera grada: 0.60 m, Segunda grada: 0.65 m, tercera grada: 0.60 m
- Longitud de las gradas: definida según diseño hidráulico y criterios del manual de la ANA
- Tipo de material: concreto liso

Estos parámetros fueron usados como base común para ambos métodos (ANA y ANSYS CFX), garantizando coherencia y comparabilidad de resultados, especialmente en la evaluación del tirante y la velocidad en las distintas secciones de la estructura.

2.1.2. Modelación numérica en ANSYS CFX

Se replicaron las condiciones hidráulicas del caso de estudio mediante el software ANSYS CFX, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos a través del método analítico (basado en el manual de la ANA) con los generados por simulación numérica tridimensional. En esta etapa, se configuró el modelo de forma que reflejara fielmente la geometría de la rápida es-

calonada, incluyendo el canal aguas arriba, las tres gradas con alturas diferenciadas, el colchón amortiguador y el canal aguas abajo.

2.2. Procedimiento

2.2.1. Diseño de la rápida escalonada

2.2.1.1. Ecuación de Manning

Se tiene lo siguiente:

$$Q = \frac{A}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

Rh = Radio hidráulico (m).

S = Pendiente de la línea de energía (m/m).

n = Coeficiente de rugosidad. (adimensional).

Q = Caudal (/s).

A = Área ().

2.2.1.2. Cálculo del ancho de la caída

Para determinar el ancho de solera de la caída, se utilizará los 3 métodos ya antes mencionados y se realizará un promedio de todos los resultados:

- Suposición de: = E_n aguas arriba:

$$b = \sqrt{\frac{27Q^2}{8 E_{min}^3 g}} \quad (2)$$

Donde:

E_{min} = Energía específica mínima(m).

g = Gravedad ().

- Ecuación de Davidenkov:

$$b = 0.765 * Q^{2/5} \quad (3)$$

- Fórmula empírica:

$$b = \frac{(18.78\sqrt{Q})}{10.11+Q} \quad (4)$$

2.2.1.3. Cálculo de la longitud de la transición entrada

Se tiene lo siguiente:

$$L = \frac{T_1 + T_2}{2 * \operatorname{tg}(22,5^\circ)} \quad (5)$$

Donde:

L = Longitud de la transición(m).

T_1, T_2 = Espejos de agua (m).

2.2.1.4. Canal posterior a la transición

Se tiene lo siguiente:

$$Y_c = \sqrt{\frac{Q^2}{b^2 g}} \quad (6)$$

$$L_c = 4 * Y_c \quad (7)$$

Donde:

Y_c = Tirante crítico (m).

L_c = Longitud canal rectangular (m).

Además:

$$Y_o = 0.715 * Y_c \quad (8)$$

Donde:

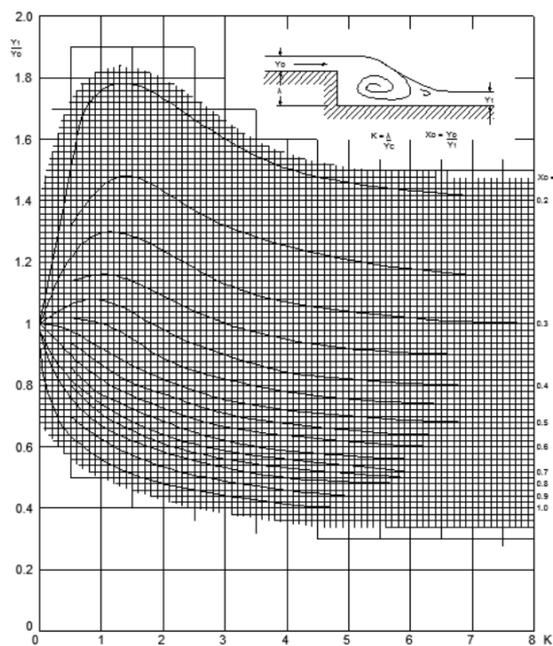
Y_o = Tirante borde (m).

2.2.1.5. Diseño de las gradas

En el diseño de gradas, es necesario emplear gráficos proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) [11], los cuales requieren el tirante crítico y la altura de las gradas como datos principales.

Estos datos se complementan con las figuras

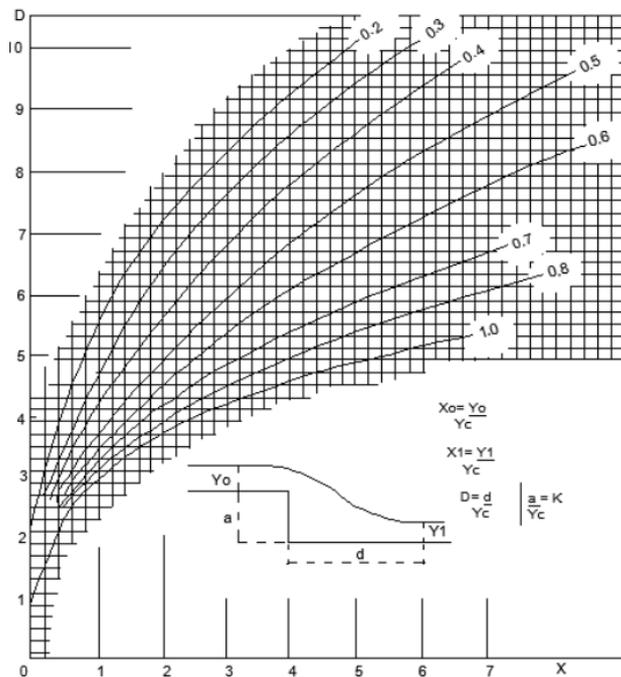
Figura N° 1: Gradas de bajada de antecedidas y seguidas de flujo supercrítico



74

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (Perú), 2010. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3135>

Figura N° 2: Distancia entre gradas en flujo supercrítico



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (Perú), 2010. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3135>

Tabla N° 1: Cuadro para la determinación de las gradas de la rápida

Grada	a(m)	K=a/Yc	Yo(m)	Xo	Y1/Yo	y1(m)	d/yc	d(m)
1								
2								
3								

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (Perú), 2010. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3135>

Donde:

Columna 1: Número de grada

Columna 2: Altura de grada

Columna 3: Resulta de dividir la altura de grada entre el tirante crítico que se produce en la primera grada, es decir en el punto 1

Columna 4: En la grada 1 se tiene:

Agua arriba: $Y_c = Y_o$

Aguas abajo: $Y_1 =$ = tirante de flujo supercrítico y a la vez es el valor Y_o aguas arriba de la segunda grada.

En la primera grada se tiene:

$$X_o = \frac{Y_o}{Y_c} = 1$$

Con este valor y la respectiva altura de grada (X_o y K) se entra el gráfico de figura 1. obteniéndose con: el valor de $\frac{Y_1}{Y_o}$

Columna 5: Sería el valor $X_o = 1$

Columna 6: El valor obtenido en el Anexo A. sera $\frac{Y_1}{Y_o} = c$

Columna 7: Sería el valor:

$$Y_1 = c * Y_o$$

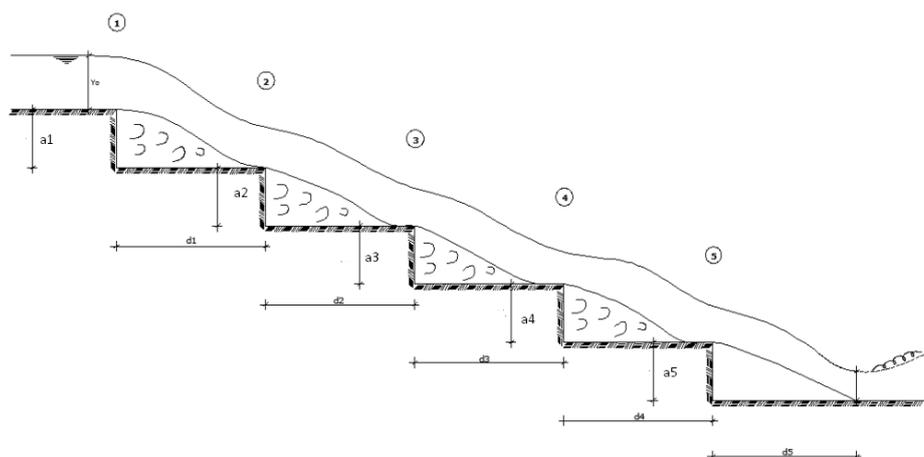
Columna 8: Se utilizará la figura 2 , con los datos de X_o y K obteniéndose con: el valor

de $\frac{d}{Y_c} = m$

Columna 9: Sería el valor:

$$d = m * Y_c$$

Figura N° 3: Vista longitudinal de una rápida escalonada



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (Perú), 2010 <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3135>

2.2.1.6. Tirantes conjugados

Se tiene lo siguiente:

$$V1 = Q/(b*y1) \tag{9}$$

$$F1 = \frac{V1}{\sqrt{g*y1}} \tag{10}$$

$$y2 = \frac{y1}{2} \left(\sqrt{8F1^2 + 1} - 1 \right) \tag{11}$$

Donde:

y1= Tirante conjugado menor (m)

V1= Velocidad-tirante conjugado menor(m/s)

F1= Número de Froude-tirante conjugado menor

y2= Tirante conjugado mayor(m)

2.2.1.7. Longitud resalto hidráulico

La determinación de la longitud del resalto hidráulico puede realizarse mediante diversas fórmulas empíricas disponibles en la literatura. Una estrategia práctica consiste en aplicar varios de estos métodos y calcular un valor promedio, con el fin de obtener una estimación más representativa. Entre las fórmulas más conocidas para este propósito se encuentran las siguientes:

- Según Silvester:

$$L = y1 * 9.75(F1-1) \quad (12)$$

Donde:

L= Longitud del resalto hidráulico (m)

- Según Seienchin para sección rectangular:

$$L = 5 (y2-y1) \quad (13)$$

Según Pavlovsky

$$L = 2.5 (1.9y2 - y1) \quad (14)$$

Según Schaumian

$$L = 3.6y2\left(1 - \frac{y1}{y2}\right)\left(1 + \frac{y1}{y2}\right)^2 \quad (15)$$

2.2.1.8. Longitud total colchón amortiguador

77

El colchón amortiguador tendrá una longitud igual a la longitud promedio del resalto hidráulico más la longitud final de la grada 3

$$LT = L + d3 \quad (16)$$

Donde:

LT= Longitud total colchón amortiguador (m)

d3=Longitud del escalón 3 (m)

2.2.1.9. Profundidad del colchón amortiguador

La profundidad del colchón amortiguador se determinará del promedio de los resultados de las dos fórmulas:

- Método 1:

$$P = 1.15 (y2 - y nab) \quad (17)$$

Donde:

P= Profundidad del colchón amortiguador (m)

y nab = Tirante canal aguas abajo (m)

- Método 2:

$$P = y / 6 \quad (18)$$

2.2.2. Modelación numérica en ANSYS CFX

2.2.2.1. Dinámica de fluido computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica que permite modelar el comportamiento de los fluidos a través del uso de algoritmos y métodos matemáticos destinados a resolver y examinar fenómenos de flujo (Ayremlouzadeh & Ghafouri, 2016) [3]. Esta área resulta particularmente útil para el análisis de sistemas hidráulicos complejos, brindando soluciones con un alto grado de precisión. Sin embargo, su aplicación exige conocimientos técnicos avanzados, sobre todo en contextos multifásicos, como los flujos con superficie libre.

El software ANSYS CFX emplea el método de volúmenes finitos, en el cual el dominio de estudio se segmenta en volúmenes de control. Dentro de estos, se discretizan y resuelven de forma iterativa las ecuaciones fundamentales: la de continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes y la de energía. En el caso de un flujo estacionario, estas pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_m \quad (20)$$

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla(U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (21)$$

2.2.2.2. Ecuaciones RANS

El modelado del flujo turbulento se realizará utilizando la aproximación RANS, la cual consiste en descomponer las variables del flujo en partes medias y fluctuantes, con el fin de representar el comportamiento promedio del flujo sin necesidad de resolver todas las escalas de la turbulencia (ANSYS, Inc., 2021) [7]. Esta técnica aplica un promediado en el tiempo, asegurando que dicho intervalo sea considerablemente mayor al periodo de las fluctuaciones turbulentas, lo que permite simular con precisión la dinámica del flujo manteniendo bajos los requerimientos computacionales.

2.2.2.3. Modelo de turbulencia SST

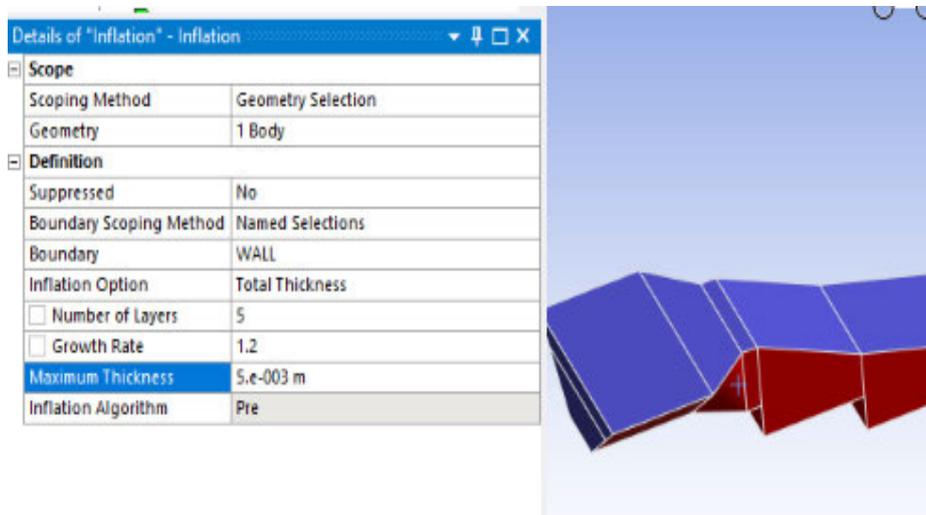
Se utilizará el modelo Shear Stress Transport (SST), el cual incorpora el efecto del transporte del esfuerzo cortante generado por la turbulencia y proporciona estimaciones precisas sobre el inicio y la intensidad de la separación del flujo cuando se presentan gradientes de presión desfavorables [7].

2.2.2.4. Discretización espacial

La discretización espacial se realizará mediante un mallado por el método Multizone, empleando elementos tetraédricos en todo el dominio. Se establecerá un tamaño máximo de elemento de 0.06 m. Para capturar con mayor detalle los gradientes cercanos a las superficies sólidas, se aplicará la función Inflation sobre todas las paredes de la geometría, definiendo un espesor

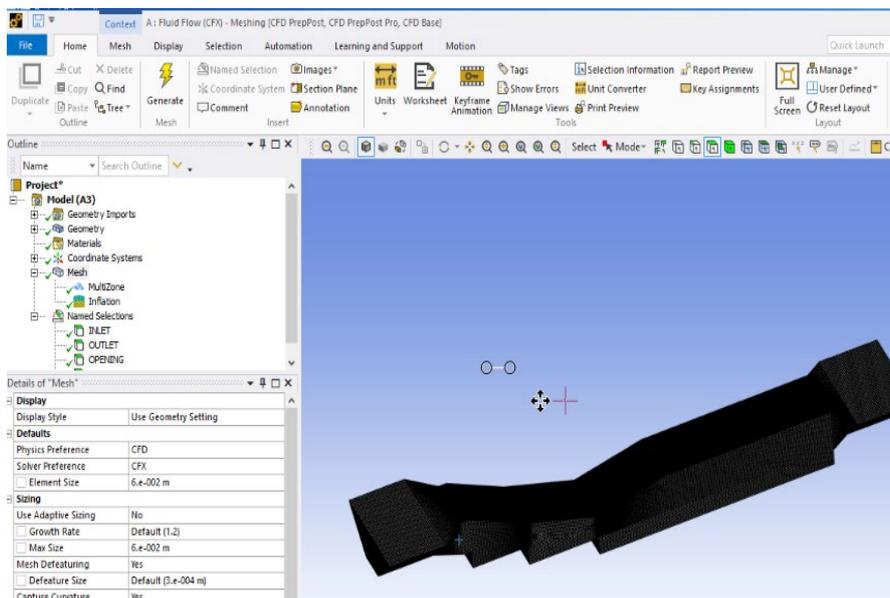
total de 0.005 m. Esta configuración permite una adecuada resolución de la capa límite y una representación precisa del flujo, manteniendo un balance entre fidelidad numérica y eficiencia computacional.

Figura N° 4: Selección de caras del modelo a introducir Inflation Total Thickness



Fuente: Elaboración propia

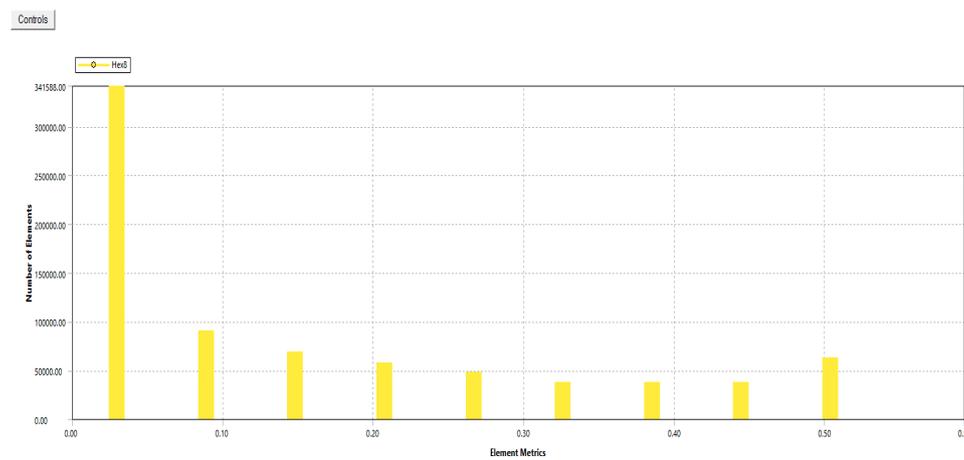
Figura N° 5: Mallado de la geometría



Fuente: Elaboración propia

La calidad del mallado se evaluó mediante el parámetro skewness, que mide la equiangularidad de las celdas en un rango de 0 a 1, donde 0 representa una celda equilátera (óptima) y 1 una celda degenerada (deficiente) (ANSYS, Inc., 2021) [9]. Durante el proceso de mallado, se obtuvo un valor máximo de skewness de 0.59, lo cual indica una calidad aceptable, ya que se mantiene por debajo del umbral de 0.75 considerado como límite superior del rango óptimo. Esto permite asegurar una adecuada precisión en la simulación, reconociendo que es complejo generar una malla en la que todas las celdas se encuentren estrictamente dentro del rango ideal [9].

Figura N° 6: Calidad skewness del mallado de la simulación



Fuente: Elaboración propia

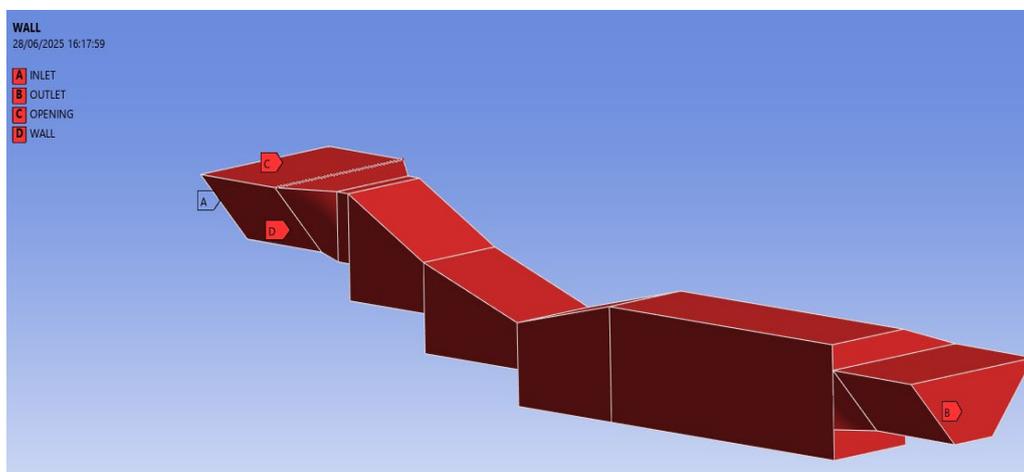
2.2.2.5. Condición de borde

80

Para llevar a cabo las simulaciones, es necesario identificar previamente cada una de las superficies del modelo, asignándoles condiciones específicas según su función dentro del dominio. Las definiciones aplicadas a cada cara son las siguientes:

- INLET: Se aplica una condición de entrada de caudal, representando el flujo que ingresa al modelo físico.
- OPENING: Se asigna una condición de tipo Opening para permitir la representación de la presión atmosférica sobre la superficie libre del flujo.
- OPENING: Se asigna una condición de tipo Opening para permitir la representación de la presión atmosférica sobre la superficie libre del flujo.
- WALLS: A estas superficies se les aplica la condición de *Wall*, incorporando el valor de rugosidad (en milímetros) correspondiente al material de construcción de las paredes, en este caso concreto liso.

Figura N° 7: Nombramiento de las caras del modelo



Fuente: Elaboración propia

2.2.2.6. Parámetros iniciales en el programa ANSYS CFX

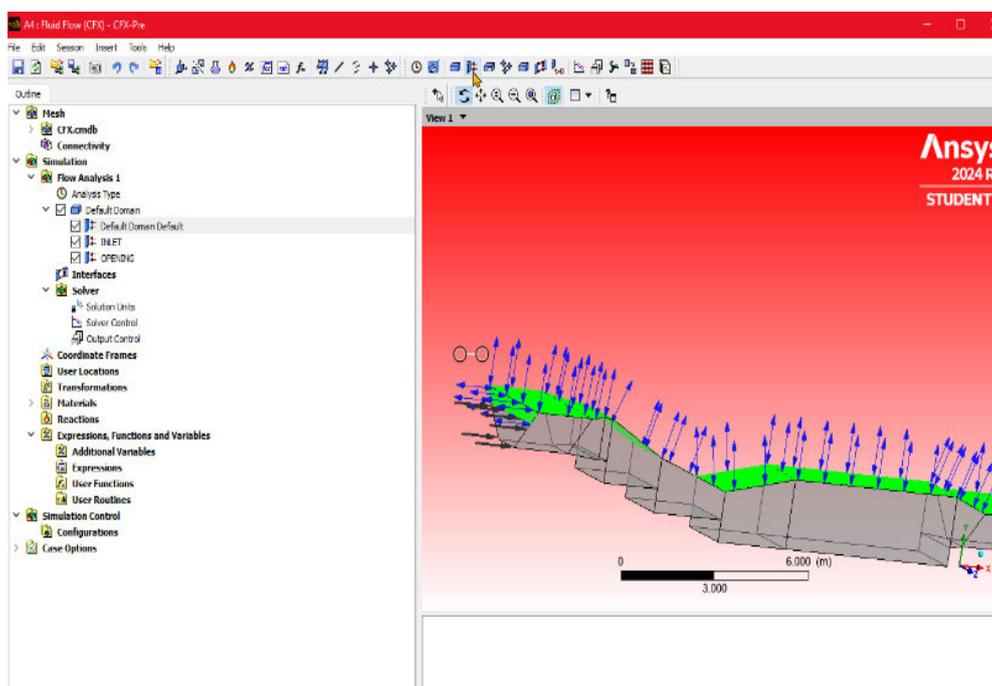
Se establecen las condiciones iniciales y los parámetros físicos necesarios para garantizar una simulación numérica eficiente. Estos parámetros se ajustarán según las características específicas de cada simulación, en las cuales se modificarán tanto la geometría del modelo como la velocidad de entrada del flujo.

Parámetros iniciales:

- Fluido incompresible
- Flujo a superficie libre
- Sistema bifásico: Densidad del Agua:998.2 Densidad del Aire:1200
- Tensión superficial del agua :0.072N/m
- Unidades: Sistema Internacional
- Sistema isotérmico
- Condición en INLET: Velocidad de entrada 2.581 Volume fraction Agua:1
Volume fraction Aire:0
- Condición OPENING: Opening Pres. and Dim =0Pa Volume fraction Agua:0
Volume fraction Aire:1
- Condición OUTLET: Opening Pres. and Dim =0Pa Volume fraction Agua:0
Volume fraction Aire:1

81

Figura N° 8: Introducción de parámetros iniciales en el modelo



Fuente: Elaboración propia

Parámetros físicos:

- Gravedad en eje Z=-9,81
- Modelo RANS
- Modelo de turbulencia: SST
- Condición PARED: Rugosidad (Nikuradse)= 0.2mm (concreto liso)

3. Resultados

3.1. Diseño de la rápida escalonada y resultados analíticos

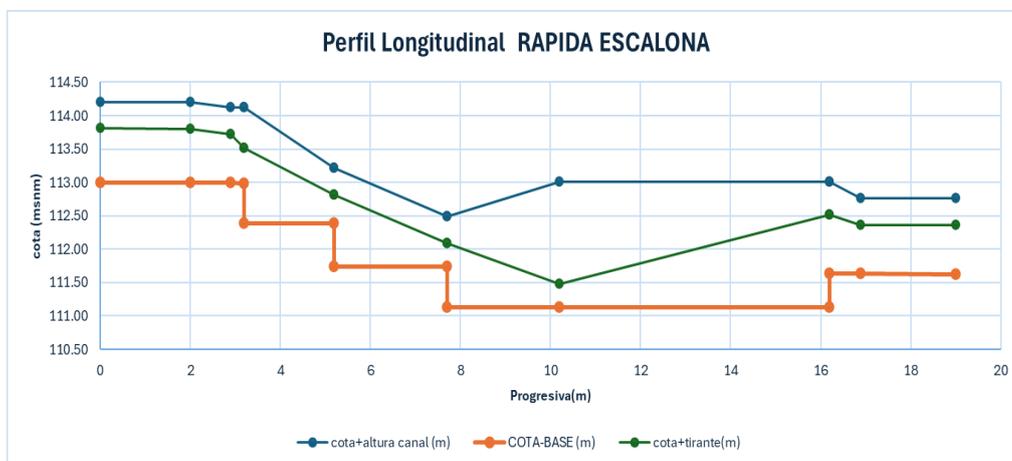
Siguiendo el procedimiento establecido, se logró dimensionar la rápida escalonada, determinando por secciones los valores de la progresiva (m), el tirante (m), el ancho de la base del canal (m), la velocidad del flujo (m/s), la cota base del canal(m) y la altura total del canal (m).

Tabla N° 2: Resumen del diseño de la rápida escalonada

PUNTOS	PROGRESIVAS (m)	TIRANTE (m)	BASE (m)	VELOCIDAD (m/s)	COTA-BASE (m)	ALTURA CANAL (m)	DATO RELVEANTE
1	0.000	0.805	1.000	2.581	113.000	1.205	INICIO CANAL AGUAS ARRIBA
2	2.000	0.805	1.000	2.581	112.992	1.205	INICIO TRANSICION
3	2.900	0.735	1.900	2.685	112.989	1.135	FIN TRANSICION
4	3.200	0.526	1.900	3.756	112.985	0.926	INICIO CAIDA PRIMER ESCALON
	3.200		1.900		112.385	0.926	Bajada del escalon
5	5.200	0.430	1.900	4.590	112.385	0.830	INICIO CAIDA SEGUNDO ESCALON
	5.200		1.900		111.735	0.830	Bajada del escalon
6	7.700	0.357	1.900	5.530	111.735	0.757	INICIO CAIDA TERCER ESCALON
	7.700		1.900		111.135	0.757	Bajada del escalon
7	10.200	0.337	1.900	5.852	111.135	0.737	ZONA tirante conjugado MENOR
8	16.200	1.375	1.900	1.435	111.135	1.875	ZONA tirante conjugado MAYOR
9	16.200	1.375	1.900	1.435	111.635	1.875	INICIO TRANSICION
10	16.900	0.728	1.000	2.984	111.631	1.128	FIN TRANSICION
11	19.000	0.728	1.000	2.984	111.619	1.128	FIN CANAL AGUAS ABAJO

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 9: Perfil Longitudinal de la rápida escalonada



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos por medio del modelamiento analítico se presentan a continuación en una tabla resumen:

Tabla N° 3: Resumen de los datos analíticos

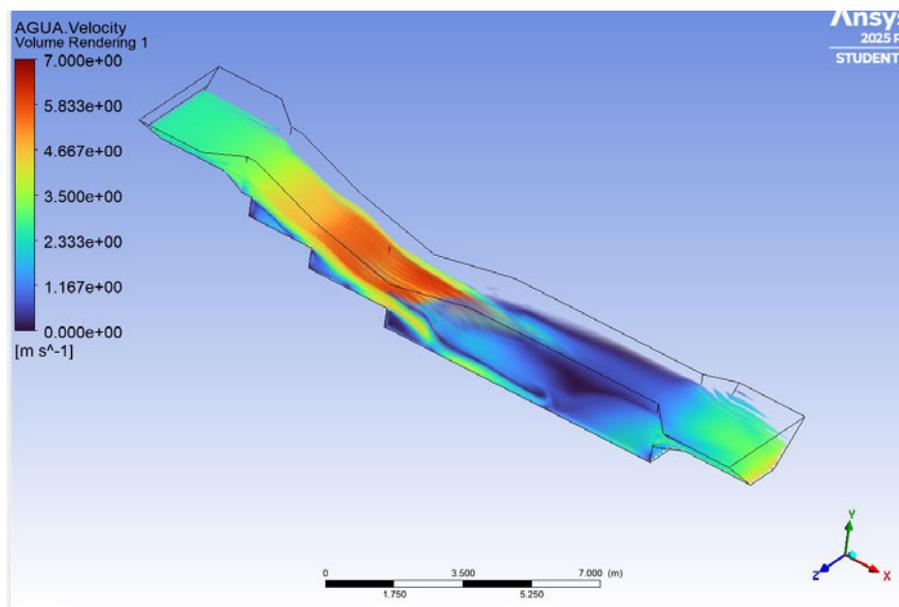
Datos analíticos	Caudal m ³ /s	Y m	Velocidad m/s
a1	3.5	0.53	3.76
a2	3.5	0.43	4.59
a3	3.5	0.36	5.53
Y1	3.5	0.34	5.85
Y2	3.5	1.38	1.44
Yn aguas abajo	3.5	0.73	2.98

Fuente: Elaboración propia

3.2. Resultado de la validación del modelo

Finalizada la simulación numérica de la rápida escalonada, utilizando los datos geométricos e iniciales definidos en el software ANSYS CFX, se accedió al módulo Results para obtener los valores de tirante y velocidad en puntos específicos, como los escalones, el colchón amortiguador y el canal aguas abajo. La visualización del flujo se realizó mediante la herramienta Volume Rendering, lo que permitió interpretar de manera clara la distribución del flujo en el dominio simulado.

Figura N° 10: Vistas del flujo dentro del modelo de Simulación



Fuente: Elaboración propia

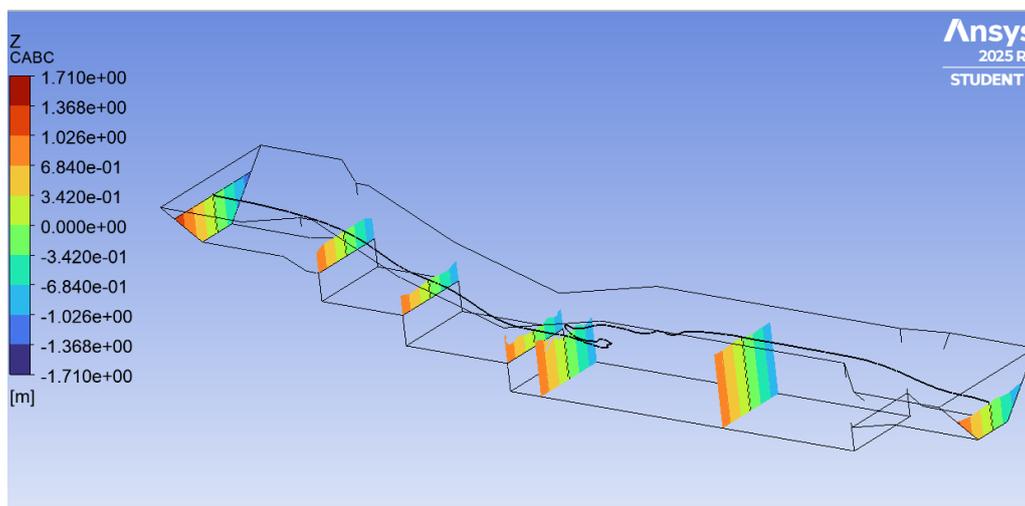
Para realizar las mediciones dentro del módulo Results, se optó por el uso de Expressions, debido a que permiten automatizar y simplificar el proceso de obtención de datos. Para ello, fue necesario definir los siguientes elementos:

- Plane: un plano ubicado en la posición deseada para efectuar la medición.
- Iso Clip: un filtro aplicado sobre el plano, que restringe la visualización a las zonas donde la fracción volumétrica de agua es igual o superior a 0.5.
- Contour: representa el contorno generado a partir del Iso Clip, que permite dividir el plano en secciones y facilita la medición del tirante en la región central.
- Polyline: una polilínea creada a partir de la segmentación del Contour, que define la línea media de la sección transversal y permite calcular el tirante.

Además, se utilizó la herramienta Polyline para representar visualmente tanto la línea de la base del modelo como el perfil del flujo a lo largo de toda la geometría simulada.

Figura N° 11: Polyline (tirante) y secciones de interés dentro del modelo de simulación

84



Fuente: Elaboración propia

Se utilizó Expressions para recolectar la información de las polylines (tirantes) y las secciones creadas con Isoclip (velocidades).

Se empleó la herramienta Table para incorporar dentro de ella las Expressions, lo que permitió extraer de forma organizada los datos experimentales obtenidos durante la simulación.

Figura N° 12: Datos recolectados del modelo de simulación

TABLA

E13

	A	B	C	D	E
1					
2			TIRANTE(m)	VELOCIDAD(m/s)	
3		ESC1	0.525 [m]	3.671 [m s ⁻¹]	
4		ESC2	0.387 [m]	5.125 [m s ⁻¹]	
5		ESC3	0.337 [m]	5.413 [m s ⁻¹]	
6		TMEN	0.926 [m]	1.979 [m s ⁻¹]	
7		TMAY	1.560 [m]	1.281 [m s ⁻¹]	
8		CAB	0.583 [m]	3.758 [m s ⁻¹]	
9					

Fuente: Elaboración propia

Con ello, se extrajeron los parámetros hidráulicos solicitados.

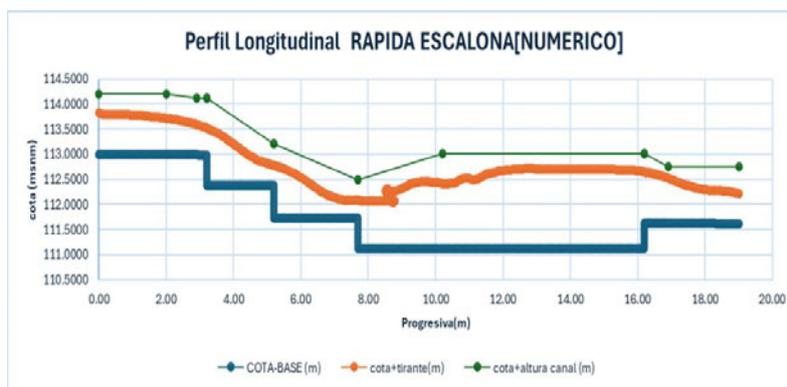
Tabla N° 4: Resumen de los datos numéricos

Datos numéricos	Caudal m ³ /s	Y m	Velocidad m/s
a1	3.5	0.53	3.67
a2	3.5	0.39	5.13
a3	3.5	0.34	5.41
Y1	3.5	0.93	1.98
Y2	3.5	1.56	1.28
Yn aguas abajo	3.5	0.58	3.76

Fuente: Elaboración propia

Además, se extrajo el perfil longitudinal de la rápida escalonada

Figura N° 13: Perfil longitudinal del nivel de agua en la rápida escalonado resultado numérico



Fuente: Elaboración propia

3.3. Comparación de resultados

3.3.1. Secciones de las gradas

86 Los tirantes presentan errores entre 0 % y 9 %, con coincidencia exacta en a1 (0 %) y la mayor diferencia en a2 (9 %). Las velocidades muestran errores de 2 % en a1 y a3, y 12 % en a2, lo que indica una buena concordancia general.

Tabla N° 5: Comparación de los resultados de las secciones de las gradas

Comparación de los resultados- Gradas									
Grada / Datos	Caudal	Desnivel	Distancia	Velocidad simulado	Velocidad Calculado	Error	Y simulado	Y Calculado	Error
	m ³ /s	m	m	m/s	m/s	%	m	m	%
a1	3.5	0.6	2	3.67	3.76	2%	0.53	0.53	0%
a2	3.5	0.65	2.5	5.13	4.59	12%	0.39	0.39	9%
a3	3.5	0.6	2.5	5.41	5.53	2%	0.34	0.35	6%

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Secciones del colchón amortiguador

La zona del tirante conjugado menor presenta los errores más altos: 174 % en tirante y 66 % en velocidad, evidenciando las limitaciones del modelo analítico en esta región. En el tirante conjugado mayor, los errores se reducen a 13 % y 11 %, respectivamente.

Tabla N° 6: Comparación de los resultados de las secciones del colchón amortiguador

Comparación de los resultados- Colchón Amortiguador							
Sección/ Datos	Caudal	Velocidad simulada	Velocidad Calculado	Error	Y simulado	Y Calculado	Error
	m ³ /s	m/s	m/s	%	m	m	%
Y1	3.75	1.98	5.85	66%	0.93	0.34	174%
Y2	3.75	1.28	1.44	11%	1.56	1.38	13%

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Sección canal aguas abajo

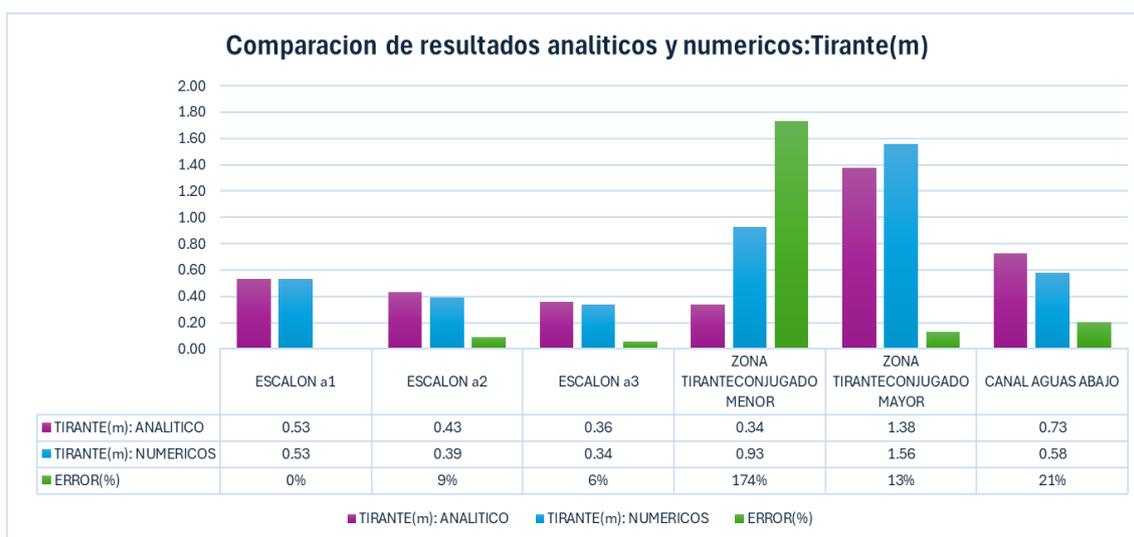
En el canal aguas abajo, el tirante y la velocidad presentan errores del 21 % y 26 %, respectivamente. Estas discrepancias pueden atribuirse a la condición de frontera tipo Opening, sin un nivel de referencia definido en la salida del modelo.

Tabla N° 7: Comparación de los resultados de la sección canal aguas abajo

Comparación de los resultados- Canal aguas abajo							
Sección/ Datos	Caudal	Velocidad simulada	Velocidad Calculado	Error	Y simulado	Y Calculado	Error
	m ³ /s	m/s	m/s	%	m	m	%
Yn aguas	3.75	3.76	3.44	26%	0.58	0.73	21%

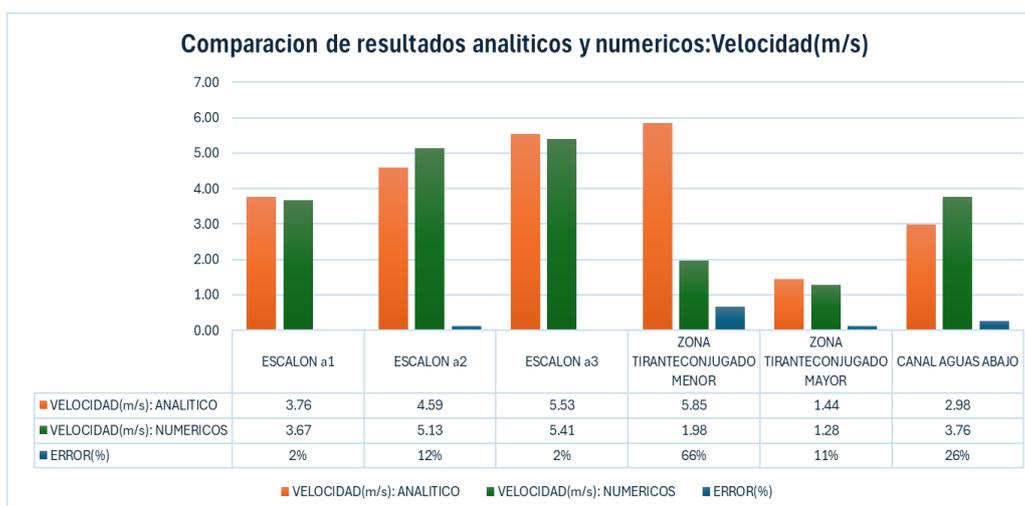
Fuente: Elaboración propia

Figura Nª 14: Comparación resultados del tirante(m) en la rápida escalonada



Fuente: Elaboración propia

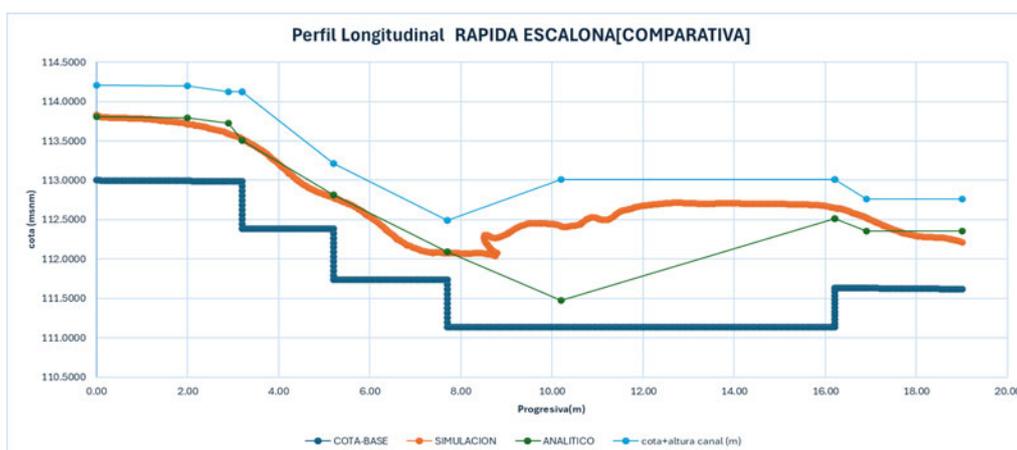
Figura N° 15: Comparación de los resultados de la velocidad (m/s) en la rápida escalonada



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 16: Comparación de resultados del perfil longitudinal en la rápida escalonada

88



Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

La evaluación comparativa entre el método analítico propuesto por la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA) y el modelo numérico implementado en ANSYS CFX permite establecer consideraciones fundamentales sobre la aplicabilidad y las limitaciones de cada enfoque en el diseño de estructuras hidráulicas tipo rápida escalonada.

En términos generales, los resultados muestran una consistencia significativa en las secciones de las gradas, donde el flujo mantiene un comportamiento relativamente uniforme. Las discrepancias registradas en esta zona son inferiores al 12 % en velocidad y al 9 % en tirante, lo que confirma que el método analítico puede ser utilizado con fiabilidad para estimaciones preliminares en etapas de diseño conceptual. Esta concordancia es especialmente relevante en contextos donde el acceso a software de simulación avanzada es limitado, permitiendo un diseño eficiente a partir de procedimientos tradicionales.

Sin embargo, esta correspondencia disminuye drásticamente en zonas donde el régimen de flujo varía abruptamente. En el colchón amortiguador, los errores alcanzan el 174 % en tirante y el 66 % en velocidad, particularmente en la zona del tirante conjugado menor, lo que evidencia la incapacidad del modelo analítico para capturar fenómenos altamente no lineales, como el resalto hidráulico. Este comportamiento está vinculado a la ausencia de un tratamiento específico para estas transiciones en el manual de la ANA, lo cual limita la precisión del diseño en zonas de disipación de energía. La modelación CFD, en contraste, logra representar con mayor realismo la dinámica del flujo, gracias a su capacidad para resolver gradientes locales, capturar turbulencia y simular estructuras tridimensionales complejas.

En la sección del canal aguas abajo, si bien los errores son menores en comparación con el colchón amortiguador (21 % en tirante y 26 % en velocidad), estos aún reflejan diferencias importantes. En este caso, las discrepancias no solo pueden atribuirse a las simplificaciones del modelo analítico, sino también a las condiciones de contorno utilizadas en la simulación numérica. La aplicación de una frontera tipo Opening sin un nivel de referencia preciso podría haber inducido inestabilidades numéricas o errores de cierre hidráulico. Esta observación resalta la necesidad de establecer criterios técnicos más rigurosos tanto en la modelación CFD como en los manuales de diseño tradicionales, particularmente en zonas de descarga y transición.

De este análisis se desprende que el enfoque analítico de la ANA resulta adecuado para flujos controlados y zonas regulares de la estructura, pero muestra serias limitaciones en tramos donde el flujo es altamente variable. La inclusión de herramientas de simulación CFD no debe entenderse únicamente como una validación de resultados, sino como un complemento necesario para abordar regiones críticas del diseño que escapan al alcance de los métodos convencionales. En este sentido, se propone que futuras versiones del manual de la ANA incorporen criterios específicos para el tratamiento del colchón amortiguador y las condiciones de salida, así como recomendaciones para el uso combinado de metodologías analíticas y numéricas en el diseño integral de rápidas escalonadas.

5. Conclusiones

Los resultados muestran que el enfoque analítico propuesto por la ANA ofrece una estimación adecuada para el dimensionamiento de las gradas, con diferencias menores al 10 % en tirante y al 12 % en velocidad respecto al modelo numérico. Esto confirma que, en zonas con flujo bien caracterizado, como los escalones, la metodología analítica es válida para etapas iniciales de diseño o dimensionamiento preliminar.

Las discrepancias significativas encontradas en el colchón amortiguador —especialmente en el tirante conjugado menor, con un error del 174 %— evidencian que el método analítico no captura con precisión fenómenos complejos como el resalto hidráulico. Esta limitación responde a la ausencia de una metodología específica en el manual de la ANA para esta zona, lo que obliga al diseñador a recurrir a criterios generales de otras estructuras. En este contexto, el uso de herramientas CFD se presenta como una alternativa eficaz para mejorar la comprensión del comportamiento hidráulico y optimizar el diseño en zonas de disipación de energía.

La diferencia observada en el canal aguas abajo, con errores del 21 % en tirante y 26 % en velocidad, resalta la necesidad de establecer lineamientos más claros en el manual respecto al tratamiento de las condiciones de salida. Las discrepancias numéricas pueden atribuirse, en

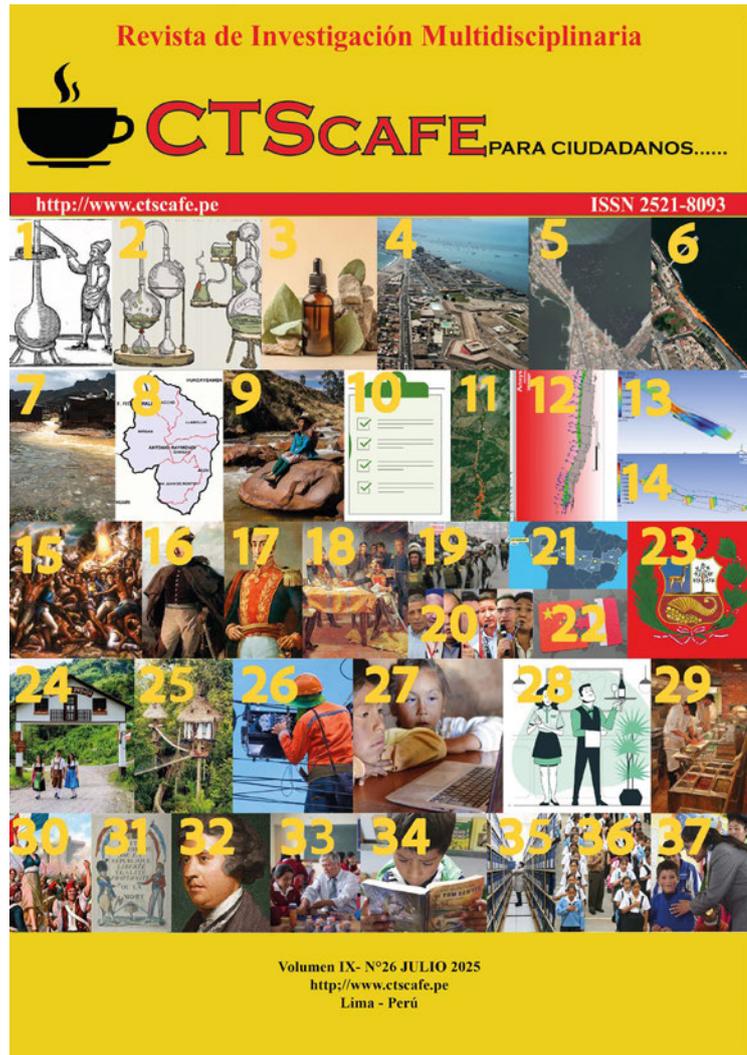
parte, a la configuración de fronteras tipo Opening sin nivel referencial. Por tanto, se concluye que las metodologías actuales del manual de la ANA deberían ser complementadas con criterios más detallados para zonas de transición y descarga, promoviendo un diseño integral que asegure tanto la eficiencia hidráulica como la estabilidad estructural de la obra.

6. Literatura citada

- (1) **Díaz Rúa, A. E.** (2021). Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada comparando los resultados de un modelo físico con un modelo numérico en OpenFOAM. Universidad Católica de Colombia.
- (2) **Stefano, E., Prieto Fernández, A. P., & León Méndez, A. J.** (2021). Recomendaciones básicas para modelar obras hidráulicas empleando la dinámica de los fluidos computacional (CFD). *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(Supl. 1), 33–48. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382021000400033&lng=es&tlng=es
- 90 (3) **Ayremlouzadeh, H., & Ghafouri, J.** (2016). Computational Fluid Dynamics Simulation and Experimental Validation of Hydraulic Performance of a Vertical Suspended API Pump. *International Journal of Engineering*, 29(11), 1612–1619.
- (4) **Casa, E., Hidalgo, X., Castro, M., Ortega, P., & Vera, P.** (2018). Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el uso de Flow-3D. *Revista Politécnica*, 41(2), 53–64. <https://doi.org/10.18273/revpol.v41n2-2018004>
- (5) **Durán Heras, D. A., & Sánchez Ramos, P. D.** (2019). Optimización experimental de la geometría de ingreso a una rápida escalonada desde un canal rectangular con flujo supercrítico de aproximación. Escuela Politécnica Nacional.
- (6) **Guachamín Paladines, K. X., & Simbaña Pumisacho, A. G.** (2018). Estudio experimental del flujo rasante, con la implementación de estructuras adicionales sobre el perfil escalonado para incrementar la disipación continua de energía. Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19771>
- (7) **ANSYS, Inc.** (2014). Turbulence Modeling. Introduction to Ansys Fluent.
- (8) **ANSYS, Inc.** (2021). Ansys CFX-Solver Theory Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/cfx_thry/cfx_thry.html
- (9) **ANSYS, Inc.** (2021). Ansys Meshing User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/msh_book_wb.html

- (10) **Sotelo Ávila, G.** (s.f.). Hidráulica General. LIMUSA.
- (11) **Autoridad Nacional del Agua (Perú).** (2010). Manual de criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3135>
- (12) **Ansys Learning Forum.** (2022, agosto 22). Wall Roughness, AIM. Ansys Innovation Space. <https://innovationspace.ansys.com/forum/forums/topic/wall-roughness-aim/>
- (13) **Chow, V. T.** (1994). Hidráulica de canales abiertos (1ª ed.). McGraw Hill.
- (14) **Giles, R. V., Evett, J. B., & Liu, C.** (1994). Mecánica de los fluidos e hidráulica (3ª ed., Serie de compendios Schaum). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- (15) **Villón, M. (2003).** Diseño de estructuras hidráulicas. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- (16) **Villón, M. (2007).** Hidráulica de canales. Editorial Tecnológica de Costa Rica

ÍNDICE DE IMÁGENES



218

1. <https://uk.pinterest.com/pin/313140980361367806/>
2. <https://www.dirtyrootsberlin.com/botanical-vessels>
3. <https://sip.pochteca.net/index.php/blog/los-aceites-esenciales-que-son-propiedades-y-usos>
4. https://cumbrepuebloscop20.org/turismo/peru/region-callao/#google_vignette
5. De la Torre Ostos (2025)
6. De la Torre Ostos (2025)
7. <https://proactivo.com.pe/minam-aprueba-decreto-supremo-que-flexibiliza-los-estandares-de-contaminacion-del-agua/>
8. <https://llamellinar2016.blogspot.com/2016/07/division-politica.html>Calidad/
9. <https://elpais.com/america-futura/2024-10-12/la-lucha-de-los-campesinos-peruanos-para-sanar-sus-tierras-enfermas-por-el-cambio-climatico.html>
10. <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-survey123/community-forms>
11. Zambrano, Álaba, Ávila et All (2025)
12. Yataco, Yataco (2025)
13. Yataco, Yataco (2025)
14. Yataco, Yataco (2025)
15. <https://www.lhistoria.com/america/descolonizacion>
16. <https://mihistoriauniversal.com/edad-contemporanea/independencia-de-latinoamerica>
17. <https://mihistoriauniversal.com/edad-contemporanea/independencia-de-latinoamerica>
18. <https://andina.pe/agencia/noticia-trabajadores-ministerio-cultura-escenificaran-firma-de-capitulacion-ayacucho-330330.aspx>
19. <https://www.infobae.com/america/agencias/2024/09/27/la-ola-de-extorsion-denunciada-por-transportistas-en-lima-fuerza-de-claracion-de-emergencia/>
20. <https://www.infobae.com/peru/2025/01/15/12-mil-candidatos-participaran-en-las-elecciones-de-2026-segun-estimaciones-del-jurado-nacional-de-elecciones/>
21. <https://www.lanacion.com.py/mundo/2025/07/08/brasil-y-china-acuerdan-conexion-ferroviaria-con-puerto-peruano-de-chancay/>
22. <https://www.comexperu.org.pe/en/articulo/peru-china-una-relacion-con-grandes-beneficios-para-la-economia-peruana>
23. <https://br.pinterest.com/pin/422281203302773/>
24. <https://yungaytoursperu.com.pe/2023/03/02/selva-central-pozuzo-oxapampa-la-merced/>
25. <https://treehouse lodge.com/tag/hoteles-unicos/>
26. https://hiraoka.com.pe/blog/post/internet-de-fibra-optica-que-es-como-funciona-y-ventajas?srsliid=AfmBOopp7TIJoSAvMf7g_aL9ieELdyKuBNiZfrDLJVJyJRKidXuzxj5Y
27. <https://rpp.pe/campanas/valor-compartido/internet-para-todos-como-va-la-cobertura-y-el-acceso-a-este-servicio-en-el-peru-noticia-1416613>
28. https://www.freepik.com/premium-vector/waiters-concept-illustration_9793082.htm

De izquierda a derecha

29. <https://es.pinterest.com/eduardosarxx/>
30. <https://es.pinterest.com/seguelanadine0202/1789-1799-r%C3%A9volution-fran%C3%A7aise/>
31. <https://es.pinterest.com/hippieflower1969/the-french-revolution/>
32. <https://www.bbc.co.uk/programmes/b00sjqyn>
33. <https://exitoeducativo.net/peru-impulsa-la-revalorizacion-docente/>
34. <https://andina.pe/agencia/noticia-plan-lector-nacional-aumento-lectura-juvenil-e-infantil-702922.aspx>
35. Vidal (2025)
36. <https://andina.pe/agencia/noticia-trataran-el-acuerdo-nacional-prioridades-educacion-para-20122016-380950.aspx>
37. <https://andina.pe/agencia/noticia-mine-du-mas-60000-maestras-biling%C3%BCes-ensenan-42-lenguas-originarias-940655.aspx>

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA



<http://www.ctscafe.pe>

Volumen IX- N° 26 Julio 2025

Contáctenos en nuestro correo electrónico

219

revistactscafe@ctscafe.pe

Página Web:

<http://ctscafe.pe>

