



**Universidad
Católica de
Santa María**

**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil**

**Evaluación de la confiabilidad de la formulación teórica de una rápida
mediante comparación con experimentación en prototipo y simulación CFD
- caso peruano: Arequipa, 2025**

Tesis presentada por:

Chavez Tapia, Fatima Del Carmen

ORCID: 0009-0005-5804-6823

Mestas Delgado, Piero Orlando

ORCID: 0009-0000-9044-8738

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Mg. Arroyo Ambia, Arturo Félix

ORCID: 0009-0003-2851-4513

Arequipa – Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 14 de Julio del 2026

Dictamen: 014161-C-EPIC-2026

Visto el borrador del expediente 014161, presentado por:

2020203561 - MESTAS DELGADO PIERO ORLANDO

2020227182 - CHAVEZ TAPIA FATIMA DEL CARMEN

Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA FORMULACIÓN TEÓRICA DE UNA RÁPIDA
MEDIANTE COMPARACIÓN CON EXPERIMENTACIÓN EN PROTOTIPO Y SIMULACIÓN CFD -
CASO PERUANO: AREQUIPA, 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

**29688899 - HIDALGO VALDIVIA ALEJANDRO VICTOR
DICTAMINADOR**



**29412437 - UGARTE CALDERON ENRIQUE ALFONSO
DICTAMINADOR**



**43673910 - NORIEGA AQUISE GUILLERMO YOREL
DICTAMINADOR**



Evaluación de la confiabilidad de la formulación teórica de una rápida mediante comparación con experimentación en prototipo y simulación CFD - caso peruano: Arequipa, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
2	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
5	arxiv.org	<1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.ug.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	
7	es.scribd.com	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.unu.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE	<1%
	Trabajo del estudiante	
10	Submitted to Indian Institute of Technology Roorkee	<1%
	Trabajo del estudiante	
11	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	core.ac.uk	<1%
	Fuente de Internet	
13	repositorio.espe.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	
14	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

Dedico esta tesis primeramente a mi familia, no solo por ser mi hogar, sino también por la fuerza y resiliencia que nos ha estado presente ya hace más de un año. A mi papá, que sin querer me enseñó a no tener miedo en demostrar quién soy, y que no hay nada malo en la singularidad, que siempre se encuentra a aquellos que te amen y cuiden, gracias por haberme amado a tu manera tan singular. También se la dedico a todas aquellas personas que han estado en mi camino, no solo profesional, sino también amical, sé que siempre estarán en mi corazón; igualmente dedicar esta tesis a aquellas personas que creen que no lo lograrán y que tal vez no tienen un futuro cercano muy alegre; les prometo que al final sí lo hay. Y por último dedicar esta tesis tan especial a mi pareja, Piero Mestas; que, aunque nos conocimos y fuimos amigos por muchos años, sé que no cambiaría a la persona con la que he llevado todo este camino de vida.

Fatima Del Carmen Chavez Tapia

Este trabajo está dedicado a Dios, a quien dedico también todos mis logros porque solo pueden ser conseguidos a través de Él; a mis papás, Sergio y Teresa, quienes sembraron su sabiduría en mí desde pequeño, vieron cada logro conseguido, festejaron conmigo y por ellos daría más que mi vida; a mi hermano Paul porque reconoce el esfuerzo que le pongo a todos mis proyectos, me apoya incondicionalmente y se enorgullece de mí; a toda mi familia, de quien recibo mucho amor y cariño, reconocimiento y siento su confianza sobre mí de que seré un gran hombre al servicio del mundo; a mis protectores desde arriba, abuelito Emilio, a quien no pude conocer pero se alegra desde el cielo con este gran logro, y tío Carlos, quien me quiso y estimó mucho todos los años que estuvo en este mundo; a mi abuelita Esther, con especialidad, a quien le prometí que miraría mi título profesional con sus propios ojos; y a mi pareja Fatima Chavez, quien ha sido la mejor amiga y compañera de clases y de vida que he tenido, siendo siempre una gran fuente de mi inspiración para triunfar.

Piero Orlando Mestas Delgado

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero a Dios, que, con mis idas y venidas, sé que siempre estará ahí, en cualquier formato de mi vida. A los hermanos, Padres, terapeutas, y todo aquel que más que darme unas palabras, me dieron un momento de sabiduría, gracias por las enseñanzas y las herramientas, gracias a ustedes estoy acá. A mis profesores durante mi carrera profesional, por la paciencia y todas las lecciones fuera de ser solo una ingeniera, sino también una persona llena de virtudes para la sociedad. A mi mamá por enseñarme a ser una mujer no solo llena de fortalezas, sino también de sabidurías y emociones válidas. A mis hermanos, por siempre estar en mi entorno y reírnos. A Piero Mestas, por ser mi compañero durante estos años de carrera, pero también mi compañero de vida, agradecerle por siempre apoyarme en seguir adelante, y por ser una persona que todo el mundo quisiera en su vida. Y por último agradecerme a mí misma, por haber crecido tanto y seguir aquí, sin muchas respuestas, más preguntas, pero con la certeza de que me queda una gran vida por vivir. Gracias.

Fatima Del Carmen Chavez Tapia

Agradezco sobre todas las cosas a Dios, por haber hecho posible todo para la conclusión de este trabajo y esta etapa académica; a mis papás, por todo su esfuerzo, voluntad y entrega para que pudiera terminar mis estudios profesionales y por su puesto por toda su motivación en los momentos difíciles; a mi hermano Paul por ayudarme y escucharme mucho cuando más necesité y ser un hermano leal; a mi pareja Fatima Chavez, por motivarme y ser pieza fundamental en este camino, por hacer este trabajo juntos y confiar en mí estos seis años que nos conocemos.

Agradezco también particularmente al ingeniero Arturo Arroyo, porque me enseñó mucho acerca de la rama de hidráulica e hidrología, pero sobre todo por su desprendimiento y apertura cada vez que acudía a él. Aprendí mucho de él y lo considero no solo un gran actor de la ingeniería en el nivel local y regional, sino también una gran persona de bien y con muchos valores.

Por último, agradezco a los siguientes ingenieros por su aporte clave en mi formación profesional: Marco Sánchez Zapata, Alejandro Hidalgo Valdivia, Augusto Ticona Baldarrago, Juan Carlos Tejada Calderón, Cristian Lazaro Aguilar.

Piero Orlando Mestas Delgado

RESUMEN

En la localidad de Imata del distrito de San Antonio de Chuca de la provincia de Caylloma del departamento de Arequipa, Perú, se ubica una infraestructura hidráulica compuesta de 3 subestructuras en serie conocidas como “rápidas”. Esta obra se construyó con el objetivo de conectar la zona de descarga del túnel de trasvase con la presa Pillones ya que el resalto hidráulico que se produce en este tipo de estructura permite la pérdida de energía y con ello la disminución de las altas velocidades y erosivas que se producirían si se conectaran los puntos con un canal convencional de pendiente uniforme.

No obstante, la obra sufrió desbordamientos de agua cuando se comenzó la descarga de un caudal menor al de diseño, dejando la obra como obsoleta por estar hidráulicamente mal diseñada.

En esta investigación se lleva a cabo el diseño de la rápida del medio por formulación teórica para 5 escenarios distintos, una experimentación de escenario único mediante el ensayo en laboratorio de un prototipo fabricado a escala manteniendo la semejanza hidráulica de uno de los diseños por formulación teórica, y 4 simulaciones en el software de Dinámica de Fluidos Computacional “Flow 3D” correspondientes con los restantes 4 diseños por formulación teórica.

El diseño por formulación teórica se basa en determinar las longitudes y pendientes de las partes que conforman la rápida para que se produzca el resalto hidráulico que genere la pérdida de energía prevista.

La experimentación se llevó a cabo en un escenario adecuado a las limitaciones de implementación de equipos en el laboratorio y sus capacidades máximas, pero válidas para la comparación gracias a los parámetros adimensionales que rigen la hidráulica del escenario evaluado.

Para las simulaciones en el software Flow 3D se implementó el modelo de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) y el esquema de cierre k- ϵ , parámetros fundamentales para la caracterización de la turbulencia de una simulación.

Los tirantes de los diseños por formulación teórica son comparados con aquellos de la experimentación y simulaciones por separado para luego calcular sus diferencias a través de diferentes tipos de error.

Finally, the reliability of the theoretical formulation method is evaluated based on the errors obtained from the comparison of the results.

Palabras clave: rápidas hidráulicas, CFD, semejanza hidráulica

ABSTRACT

In the locality of Imata, district of San Antonio de Chuca, Province of Caylloma, Department of Arequipa, Peru, there is a hydraulic infrastructure composed of three substructures arranged in series, commonly referred to as stilling basins. This structure was constructed to connect the outlet section of the transbasin diversion tunnel to Pillones Dam, as the hydraulic jump generated within this type of structure enables energy dissipation, thereby reducing the high flow velocities and erosive effects that would otherwise occur if both points were connected through a conventional channel with a uniform slope.

However, the structure experienced water overtopping when the discharge of a flow rate lower than the design flow was initiated, rendering the infrastructure obsolete due to deficiencies in its hydraulic design.

This research comprises the theoretical design of the intermediate stilling basin under five different scenarios, an experimental evaluation of one scenario through laboratory testing of a scaled physical model developed in accordance with hydraulic similitude principles, and four Computational Fluid Dynamics CFD simulations using the software Flow 3D, corresponding to the remaining four theoretical design scenarios.

The theoretical design methodology is based on determining the lengths and slopes of the components that constitute the stilling basin in such way that a hydraulic jump is generated, producing the expected energy dissipation.

The experimental evaluation was conducted under conditions compatible with the implementation constraints and maximum operational capacities of the laboratory equipment. Nevertheless, the results remain suitable for comparison through the use of the dimensionless parameters governing the hydraulic behavior of the evaluated scenario.

The Flow 3D simulations were performed using the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model and the k-epsilon closure scheme, which are fundamental parameters for the characterization of turbulence in numerical simulations.

The flow depths obtained from the theoretical design are compared separately with those obtained from the experimental testing and CFD simulations. Subsequently, the discrepancies between results are quantified through different error metrics.

Finally, the validity the theoretical design methodology is assessed based on the errors obtained from the comparison of results.

Keywords: stilling basins, CFD, hydraulic similitude

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN..... 1

1.1 Problemática 1

1.2 Justificación 2

1.3 Objetivos de Investigación..... 2

Objetivo General..... 2

Objetivos Específicos 2

1.4 Hipótesis 3

1.5 Variables 3

Variable Independiente..... 3

Variable Dependiente 3

Operacionalización de Variables 4

II. FUNDAMENTO TEÓRICO 5

2.1 Estado del Arte..... 5

2.1 Marco Conceptual..... 7

2.2 Marco Legal..... 9

III. METODOLOGÍA 10

3.1 Tipo de Investigación..... 10

3.2 Métodos..... 10

3.3 Esquema Metodológico 12

3.4 Contenido Temático..... 12

3.5 Cronograma..... 13

IV. DIFERENCIA ENTRE LA FORMULACIÓN TEÓRICA Y EL PROTOTIPO 15

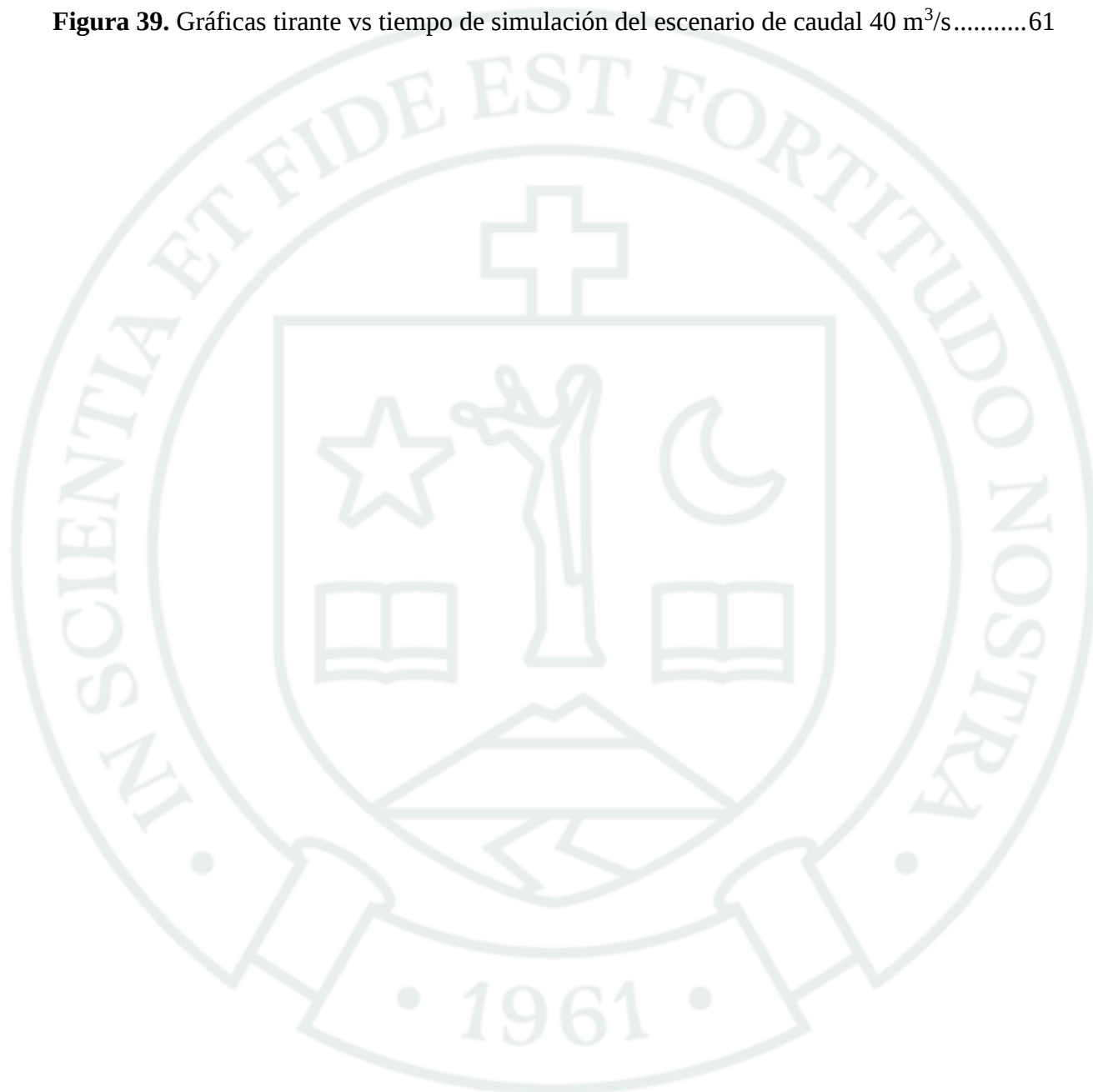
4.1 Experimentación implementando instrumentos de medición 16

4.2 Formulación teórica de la rápida.....	22
4.3 Discusión.....	42
V. OBTENCIÓN DE TIRANTES DE SIMULACIÓN CFD PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	43
5.1 Análisis Numérico con Simulación en CFD	43
5.2 Discusión.....	62
VI. CONTRASTE DE APLICACIÓN DE AMBOS MÉTODOS	63
6.1 Validación mediante errores promedio	63
6.2 Discusión.....	71
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
7.1 Conclusiones	73
7.2 Recomendaciones	73
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
VI. ANEXOS	77
ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO DE LA FASE EXPERIMENTAL	77
ANEXO 2: TABLAS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN FLOW 3D	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Canal de Panamá	1
Figura 2. Rápida hidráulica en la zona de descarga del túnel de trasvase – Presa Pillones.....	2
Figura 3. Esquema metodológico	12
Figura 4. Longitud y diferencia de nivel reales disponibles para la rápida	23
Figura 5. Diseño del canal de aproximación – escenario para la experimentación	25
Figura 6. Relación de energías en tramos adyacentes	26
Figura 7. Diseño de la transición – escenario para la experimentación.....	27
Figura 8. Desnivel de desarrollo de la trayectoria	29
Figura 9. Diseño de la trayectoria – escenario para la experimentación	30
Figura 10. Diseño de la poza de disipación – escenario para la experimentación.....	33
Figura 11. Diseño de la rápida completa – escenario para la experimentación.....	33
Figura 12. Diseño de la rápida completa – escenario para la experimentación y escalado	33
Figura 13. Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 10 m ³ /s	36
Figura 14. Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 20 m ³ /s.....	38
Figura 15. Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 30 m ³ /s	40
Figura 16. Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 40 m ³ /s	42
Figura 17. Modelos físicos seleccionados para la simulación	43
Figura 18. Configuración global, de unidades y tiempo de finalización	44
Figura 19. Configuración de la densidad del fluido.....	44
Figura 20. Configuración de la viscosidad del fluido	44
Figura 21. Configuración del modelo físico de “Gravedad y No Inerciales”	45
Figura 22. Configuración del modelo físico de “Turbulencia y Viscosidad”	46
Figura 23. Configuración de la geometría	47
Figura 24. Vista de la geometría con los bloques de malla	48
Figura 25. Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 1	49
Figura 26. Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 2	50
Figura 27. Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 3	50
Figura 28. Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 4	51
Figura 29. Configuración de la condición de frontera “Tasa de Flujo Volumétrico”	52
Figura 30. Configuración de la condición de frontera “Presión”	53
Figura 31. Configuración de las condiciones iniciales	53
Figura 32. Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 10m ³ /s	54
Figura 33. Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 10 m ³ /s.....	55

Figura 34. Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 20 m ³ /s	56
Figura 35. Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 20 m ³ /s.....	57
Figura 36. Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 30 m ³ /s	58
Figura 37. Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 30 m ³ /s.....	59
Figura 38. Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 40 m ³ /s	60
Figura 39. Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 40 m ³ /s.....	61



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de la variable independiente	4
Tabla 2. Operacionalización de la variable dependiente.....	4
Tabla 3. Estado del arte.....	5
Tabla 4. Marco legal	9
Tabla 5. Cronograma.....	14
Tabla 6. Dimensiones de las variables consideradas para la repetición de variables	17
Tabla 7. Caudal de la obtención de rugosidad del material “Vinifan”	21
Tabla 8. Resultados en el canal de aproximación – escenario para la experimentación.....	24
Tabla 9. Resultados críticos– escenario para la experimentación.....	24
Tabla 10. Fórmulas de Excel para parámetros en tramos adyacentes en la transición	27
Tabla 11. Resultados en la transición – escenario para la experimentación	27
Tabla 12. Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario para la experimentación	29
Tabla 13. Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario para la experimentación	31
Tabla 14. Resultados del resalto hidráulico – escenario para la experimentación.....	32
Tabla 15. Elevación de la poza de disipación – escenario para la experimentación.....	32
Tabla 16. Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	34
Tabla 17. Resultados críticos – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	34
Tabla 18. Resultados en la transición – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	34
Tabla 19. Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	34
Tabla 20. Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	35
Tabla 21. Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	35
Tabla 22. Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	35
Tabla 23. Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	36
Tabla 24. Resultados críticos – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	36
Tabla 25. Resultados en la transición – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	36
Tabla 26. Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	37
Tabla 27. Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	37
Tabla 28. Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	37
Tabla 29. Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	38
Tabla 30. Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$	38
Tabla 31. Resultados críticos – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$	38
Tabla 32. Resultados en la transición – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$	38

Tabla 33. Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 30 m ³ /s.....	39
Tabla 34. Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 30 m ³ /s	39
Tabla 35. Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 30 m ³ /s.....	39
Tabla 36. Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de 30 m ³ /s.....	40
Tabla 37. Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de 40 m ³ /s.....	40
Tabla 38. Resultados críticos – escenario caudal de 40 m ³ /s.....	40
Tabla 39. Resultados en la transición – escenario caudal de 40 m ³ /s	40
Tabla 40. Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 40 m ³ /s.....	41
Tabla 41. Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 40 m ³ /s	41
Tabla 42. Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 40 m ³ /s.....	41
Tabla 43. Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de 40 m ³ /s.....	42
Tabla 44. Comparación de resultados formulación teórica – experimentación con prototipo	42
Tabla 45. Errores formulación teórica – simulación – Escenario 1	63
Tabla 46. Errores formulación teórica – simulación – Escenario 2	63
Tabla 47. Errores formulación teórica – simulación – Escenario 3.....	64
Tabla 48. Errores formulación teórica – simulación – Escenario 4.....	64
Tabla 49. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2	64
Tabla 50. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-3	65
Tabla 51. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-4	65
Tabla 52. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-3	66
Tabla 53. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-4	66
Tabla 54. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 3-4	67
Tabla 55. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-3	67
Tabla 56. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-4	68
Tabla 57. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-3-4	69
Tabla 58. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-3-4	70
Tabla 59. Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-3-4..	71

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

En la actualidad, proyectos de la ingeniería civil han tomado relevancia por tener como factor primordial que se relacionen con estructuras hidráulicas, dado que estas tienen una utilidad casi imprescindible dentro de la sociedad y un mayor impacto por las herramientas tecnológicas emergentes que facilitan la fase de cálculo de estas estructuras (Amador et al., 2006).

Sabemos que en países desarrollados estas estructuras tienen éxito porque hacen uso de diversas tecnologías computacionales como lo son los programas que implementan la metodología “Computational Fluid Dynamics” (que en adelante para la investigación se usará las siglas CFD y que en español significa “Dinámica de Fluidos Computacional”); que se comprueban con estudios científicos basados en la comparación con prototipos construidos a escala y con semejanza hidráulica (Institute of Engineering Simulation and Scientific Software, 2016), como lo fue en el desarrollo de la estructura del Canal de Panamá que se observa en la *Figura 1* que se culminó con gran éxito (Gobbetti, 2013).



Figura 1.
Canal de Panamá
Fuente: Stantec (2023)

Es así como, en nuestro entorno local, el diseño de estructuras hidráulicas se realiza a través de la formulación teórica pero no se comprueba mediante la comparación de resultados con la metodología CFD ni con un prototipo. Y el diseño de estructuras hidráulicas a través de esta formulación no posee confiabilidad dentro de casos de estudios, específicamente en una rápida hidráulica que es tal y como se muestra en la *Figura 2*, donde se aprecia que el nivel del agua no resultó como se esperaba del cálculo, por lo cual se tuvo que acondicionar temporalmente

con sacos de arena en los costados del canal. Este caso será parte de nuestro estudio de investigación.



Figura 2.

Rápida hidráulica en la zona de descarga del túnel de trasvase – Presa Pillones

Fuente: Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa SA (2024)

1.2 Justificación

Esta investigación podrá tener uso conveniente tanto de alumnos como de profesionales dentro del campo del diseño de rápidas hidráulicas por formulaciones teóricas, siendo referentes iniciales acerca de la confiabilidad de este método de diseño y que puedan determinar cuál es la mejor alternativa para el diseño de estas estructuras.

También, se tendrá un beneficio por las partes encargadas de la elaboración de expedientes técnicos de proyectos de rápidas hidráulicas al conocer ya la confiabilidad de la formulación teórica, y ser más precavidos al momento de elegir los métodos con los que se diseñará y con ello lograr un mejor balance de costos.

Finalmente, debido a su valor teórico, se plantea que este trabajo de investigación sea de utilidad para trabajos futuros donde se puedan desarrollar de manera más específica los cambios a la formulación teórica que brinde resultados validados y por ende más confiables.

1.3 Objetivos de Investigación

Objetivo General

O.G. Evaluar la confiabilidad de la formulación teórica para el diseño de una rápida respecto a otros métodos.

Objetivos Específicos

O.E.1 Hallar las diferencias entre la formulación teórica y los resultados del prototipo.

O.E.2 Obtener los tirantes característicos de una simulación CFD que desarrolle correctamente el comportamiento hidráulico de una rápida en distintos escenarios.

O.E.3 Contrastar los resultados de la formulación teórica con la simulación en CFD.

1.4 Hipótesis

La formulación teórica para el análisis hidráulico de rápidas presenta diferencias estadísticamente cuantificables respecto a los resultados obtenidos mediante experimentación con prototipo y simulación CFD, las cuales pueden evaluarse mediante los indicadores MRE y RMSRE utilizando como criterio de confiabilidad un error máximo del 10%.

1.5 Variables

Variable Independiente

La variable independiente será el método de análisis hidráulico, y sus categorías son la formulación teórica, la experimentación con prototipo y la simulación CFD.

Variable Dependiente

La variable dependiente será el error de la formulación teórica respecto de los otros métodos de análisis hidráulico, que es una variable cuantitativa continua ya que tiene una dimensión de error relativo (razón) y tiene las métricas de error MRE para la comparación de tirantes respecto a ambos métodos de referencia y RMSRE para la comparación de tirantes respecto a la simulación CFD.

Operacionalización de Variables

Tabla 1.

Operacionalización de la variable independiente

Elaboración propia

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Categorías	Fuente de obtención de datos
Método de análisis hidráulico (variable cualitativa nominal)	Variable cualitativa que representa el método que será usado para obtener resultados propios	Sus categorías son los diferentes métodos de análisis hidráulico, cuyos resultados independientes serán comparados.	Formulación teórica	Ecuaciones hidráulicas de diseño
			Experimentación con prototipo	Modelo físico experimental y medición de tirantes
			Simulación CFD	Software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Tabla 2.

Operacionalización de la variable dependiente

Elaboración propia

Variable dependiente	Definición operacional	Dimensiones	Métricas	Unidad de medida	Instrumentos
Error de la formulación teórica respecto a los métodos de referencia (variable cuantitativa continua)	Se determina mediante el cálculo de métricas de error entre los tirantes característicos obtenidos por la formulación teórica y los obtenidos mediante los métodos de referencia.	Error relativo de los resultados hidráulicos	Error Relativo Medio (MRE) de 5 tirantes característicos de la formulación teórica respecto al prototipo.	%	-Procesamiento de datos obtenidos del modelo físico mediante hoja de cálculo de Excel
			Error Relativo Medio (MRE) de 6 tirantes característicos de la formulación teórica respecto a la simulación en CFD, considerando las combinaciones posibles de los cuatro escenarios evaluados.	%	-Resultados de la simulación CFD procesados mediante hoja de cálculo.
			Raíz del Error Cuadrático Relativo Medio (RMSRE) de 6 tirantes característicos de la formulación teórica respecto a la simulación en CFD, considerando las combinaciones posibles de los cuatro escenarios evaluados.	%	-Cálculo matemático efectuado a partir de los resultados de la simulación CFD mediante hoja de cálculo de Excel

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Estado del Arte

En la *Tabla 1* se detalla antecedentes que serán tomados en cuenta. Asimismo, se detallan los métodos utilizados y la relevancia que tendrán dentro de nuestra investigación, investigaciones tal como las que muestran estudios más detallados sobre las formulaciones teóricas. También, teoría sobre la metodología CFD y algunas donde se habla medianamente sobre rápidas, estructuras hidráulicas o el proceso de erosión. El ID de cada investigación corresponden de la siguiente forma: “A” para los artículos de investigación encontrados en las bases de datos de indexación Scopus y Web of Science, “O” los artículos encontrados en otras bases de datos de indexación y “T” para trabajos de tesis encontrados en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación del Perú. Además, se clasifican los métodos de los antecedentes en 5 tipos, cada uno de ellos orientado al logro de uno o más objetivos específicos según la siguiente leyenda.

- M1: Experimentación implementando instrumentos de medición (O.E.1)
- M2: Formulación teórica de una estructura hidráulica (O.E.1)
- M3: Análisis numérico con simulación en CFD (O.E.2)
- M4: Validación mediante errores promedio (O.E.3)
- M5: Revisión de literatura (O.E.1, O.E.2)

En los métodos de los antecedentes de la *Tabla 1*, se indica el código del tipo al que corresponden según la clasificación anterior entre paréntesis al final de cada uno.

Tabla 3.
Estado del arte
Elaboración propia

ID	Autor	Relevancia	Métodos
A1	Jiang et al. (2023)	Pruebas de filtración de mezclas, para investigar las características que se dan por la erosión por flujo de escombros por su propia filtración.	Pruebas de filtración en mezclas de grava, arena y arcilla (M1)
A2	Biswas and Anand (2023)	Se da solución a las diferentes ecuaciones de Navier Stokes, para tres tipos de flujo.	Ecuaciones diferenciales parciales (M2) Ecuaciones de Navier-Stokes tridimensionales (3D) para flujo laminar, estable e incompresible (M3) Dinámica de fluidos computacional (M3)

A3	El Bohoty et al. (2024)	Se presenta la solución y reconstrucción de un aliviadero en una ciudad con sobrepoblación y problemas sísmológicos.	Métodos de análisis espectral 2D y de convolución de Euler 3D (M3)
A4	Liu et al. (2015)	Nos detalla información sobre el campo de flujo de chorro de impacto dentro de sus características estructurales.	Mecanismo de transferencia de calor y masa (M2) Modelo de secado por impacto de aire de múltiples basado en el modelo RNG k-ε estándar (M3)
A5	Babaali et al. (2015)	Pone a prueba la simulación en CFD de una rápida.	Construcción de un prototipo para ponerlo (M1) Simulación en software de CFD “Flow 3D” (M2) Comparación y validación de resultados (M4)
A6	Amal et al. (2024)	Evalúa el efecto de la cavitación en un vertedero que forma parte de una rápida.	Simulación numérica en CFD usando los métodos Lattice Gas Automata LGA y Lattice Boltzmann Method LBM (M3)
A7	De Padova and Mossa (2021)	Resume las investigaciones y descubrimientos más importantes y relevantes acerca del resalto hidráulico.	Revisión de literatura (M5)
A8	Hassanpour et al. (2017)	Estudia los efectos al cambiar la altura de la rugosidad de las paredes y las divergencias	Experimentación en laboratorio usando paredes de acrílico transparente (M1)
O1	Panfilov et al. (2023)	Se da minuciosa información sobre simulación y análisis matemático en las ecuaciones de Navier-Stokes,	Modelo de fase discreta DPM (M2) Las ecuaciones de Navier-Stokes (M3)
O2	Franck Boyer (2010)	Se de diferentes resultados teóricos de la ecuación de Navier-Stokes que salen de diferentes softwares.	Simulación y análisis matemático utilizado en mecánica de fluidos (M2) Ecuaciones de Navier-Stokes (M3) Modelo básico para el flujo de fluidos viscosos incompresibles (M2)
O3	Dashtban et al. (2024)	Estudio de los perfiles de resalto hidráulico y de la eficiencia en la disipación de energía	Experimentación con prototipo y medición de variables (M1)
O4	Macián-Pérez et al. (2020)	Explica la diferencia entre el resalto hidráulico convencional y el resalto hidráulico como parte de una rápida.	Experimento usando un modelo de perfil de agua de fácil acceso (M1) Perfil de resalto según el US Bureau (M2)

O5	Lewis (1982) [según cita Klimberg et al. (2010)]	Sugiere el porcentaje máximo de error que se debe esperar en una predicción	Validación de pronósticos (M4)
T1	Sanchez Gutierrez (2023)	Nos da información teórica sobre el impacto del comportamiento hidráulico y los aliviaderos de tormenta, específicamente en un sistema de alcantarillado.	Modelamiento hidráulico en el programa SewerCad (M3)
T2	Navarro Gárate (2019)	Características necesarias para evitar la erosión del casco urbano.	Modelos numéricos (M2) Softwares de cálculos (M3)
T3	Rodriguez Guevara (2018)	Diseño completo de una rápida perteneciente al tramo de un canal.	Aplicación de la ingeniería y las consideraciones de diseño hidráulico (M2)
T4	Sevilla Becerra (2020)	Análisis de una rápida como componente de una central hidroeléctrica.	Simulación numérica en CFD usando ANSYS CFX (M3)

En el estado del arte de esta investigación se han citado varios estudios que hemos encontrado relevantes sobre simulación hidráulica y análisis de fluidos. En el caso de Jiang et al. (2023) y Biswas and Anand (2023) proponen diferentes enfoques utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes, que permiten comparar sus resultados en diferentes contextos, como la simulación de flujos mixtos y erosión en estructuras.

En contraste, Liu et al. (2015) se centran en la transferencia de calor, mientras que Hassanpour et al. (2017) analizan el comportamiento del flujo bajo condiciones de altura específicas. Críticamente, se puede señalar que, si bien los modelos CFD son herramientas poderosas, la precisión de los resultados depende de la verificación experimental, que se dan en algunos estudios, como el de Babaali et al. (2015), con un enfoque de creación de prototipos físicos. Finalmente, al vincular estos estudios, queda claro que los modelos numéricos y experimentos sigue siendo fundamental para avanzar en el diseño y análisis de estructuras hidráulicas. Sin embargo, cabe destacar que no se ha encontrado material propiamente vinculado a nuestro tema o que en sí vaya de la mano con la comparación tanto teórica y computacional de las estructuras ya mencionadas de forma entrelazada.

2.1 Marco Conceptual

En muchos casos donde se encuentran canales abiertos que deben transportar agua en un gradiente de elevación muy grande, o en casos como en donde se perderá altura de agua a causa de velocidades altas, tendremos que considerar que los parámetros no sobrepasen ciertos valores, esto con el fin de evitar que el agua tenga un movimiento muy turbulento y dañe las superficies en contacto de las estructuras. Es así como nace una rápida hidráulica. Según

Krochin (1982), cuando buscamos estructuras hidráulicas que cubran la necesidad de transportar agua perdiendo altura por una caída o una pendiente significativa, entonces a tales estructuras se les llama “rápidas”. Además, en su libro dedica un capítulo a las rápidas, de donde se rescató los tipos más comunes que existen según el autor, siendo así que el enfoque de la investigación será hacia el tercer tipo, el cual representa el caso en el que un canal tendrá que pasar de una planicie a otra planicie de una parte más baja, teniendo como dificultad tener que pasar el tramo con una gran pendiente y con la variable del caudal constante y permanente, aunque para el caso de estudio el caudal es constante durante épocas de lluvias.

Por otro lado, en la actualidad existen softwares que apoyan a la recolección de data y a su desarrollo en base al campo que se lo use. La presente investigación se enfocará en la simulación hidráulica con CFD, donde se tendrá facilidad al usarse como método numérico que resuelva las ecuaciones que rigen el modelo físico (hidráulico) del caso de estudio. En líneas generales, esta herramienta computacional planea el sistema de interés en volúmenes más pequeños, de esta forma dividiéndolos y logrando que se consiga resolver con aproximaciones las ecuaciones generales del fluido. Así se tendrá los resultados de cada punto encontrando dentro del sistema y se podrá poner en cuestión cada uno de forma más rápida y cualquier cambio de características que se dé en estos. Con relación a lo anterior, la turbulencia influye de manera drástica en este modelo físico en estudio al afectar de manera directa los parámetros hidráulicos de resultados. La turbulencia es un fenómeno que las herramientas de CFD reconocen por modelos para diferentes propósitos y necesidades. La elección del modelo adecuado estará ligada a cuán realista se deseen los resultados. Para esta investigación se usará el modelo de turbulencia “Reynolds Averaged Navier-Stokes” RANS, por ser más simplificado que desarrollar la turbulencia completa y real, de forma que se optimice el espacio en disco usado y el tiempo de cómputo. Este modelo de turbulencia deja unas variables sin resolver que requieren de un conjunto extra de ecuaciones disponibles para su solución, el cual es llamado esquema de cierre. En este caso, se usó el esquema de cierre k - ϵ , porque optimiza lo suficiente sin sacrificar significativamente la precisión de sus resultados.

Finalmente, cuando los estudios requieren una comprobación o verificación, lo más lógico sería probar en el mismo lugar de estudio, pero el costo de construir y modificar constantemente lo construido no tiene ninguna viabilidad. Por tanto, una forma de verificar los modelos en la realidad es a través de la elaboración de prototipos a escala geométrica, lo que significa construir el modelo en materiales menos costos y en menores dimensiones principalmente. Para satisfacer que las condiciones sean totalmente idénticas, se usan parámetros adimensionales que rigen los modelos físicos presentes en el caso de estudio y deben ser iguales tanto en el

escenario real como en el escenario experimental con el prototipo físico. Esta condición de igualdad en dos escenarios se le llama semejanza hidráulica. Como resultado, se obtiene el caudal, rugosidad y ancho reducidos para el escenario de la experimentación.

2.2 Marco Legal

La *Tabla 2* presenta lineamientos normativos locales e internacional, y su objeto de uso, de acuerdo con el planeamiento investigativo.

Tabla 4.

Marco legal

Elaboración propia

Marco Legal	Objeto de Uso
Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2008)	Limitaciones en la velocidad admisible del agua sobre estructuras de concreto.
Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico (Autoridad Nacional del Agua del Perú, 2010)	Referencia del procedimiento de diseño hidráulico mediante formulación teórica de una rápida con flujo menor a 2.8 m ³ /s.
Design Standards No. 13: Hydraulic Design of Spillways (U. S. Bureau of Reclamation, 2011)	Establece los tipos de resalto hidráulico que pueden desarrollarse y a los cuales deben corresponder las estructuras que presenten resalto hidráulico. También propone el método más aceptable para determinar el bordo libre de un muro.
Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels: Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition (Thompson & Kilgore, 2006)	Establece las directrices para el diseño con formulación teórica de una rápida hidráulica.

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

El enfoque cuantitativo en una investigación sigue un proceso secuencial y riguroso, en el cual cada etapa debe seguir a la anterior sin omitir pasos. Inicia con una idea que se va delimitando para formular objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura, se construye un marco teórico, y a partir de las preguntas se derivan hipótesis y variables. Luego, se elabora un plan para probar la hipótesis, midiendo las variables en un contexto específico, utilizando métodos estadísticos para analizar los resultados finalmente, se extraen conclusiones. (Hernández Sampieri, 2014)

Tomando esto en cuenta, la presente investigación sería de tipo cuantitativa, ya que es secuencial y probatoria.

3.2 Métodos

En base al estado de arte mostrado en esta investigación, se detalló y codificó cada método encontrado y utilizado en cada artículo revisado. Así mismo, la relación que tendrían con nuestros objetivos, como se mostrará a continuación:

M1: Experimentación implementando instrumentos de medición (O.E.1). Este método conducirá a la obtención de resultados reales utilizando los instrumentos y equipos necesarios para realizar mediciones físicas al prototipo real.

La experimentación consistirá en probar un prototipo en un canal de pendiente variable de un laboratorio hidráulico. El prototipo será construido a escala espacial (escalando también la rugosidad absoluta de la superficie) en base al resultado del dimensionamiento geométrico del método de diseño de la formulación teórica de la rápida de nuestro caso de estudio: Rápida hidráulica en la zona de descarga del túnel de trasvase – Presa Pillones; con un caudal y rugosidad posibles dentro de las limitaciones de los equipos de laboratorio y de los materiales disponibles, pero aplicando la semejanza hidráulica para poder contrastar los resultados de la experimentación. No obstante, el prototipo insertado en el canal de pendiente variable deberá quedar de tal forma que los muros laterales tengan mayor altura a la calculada puesto que es posible que en las pruebas el tirante supere la altura calculada.

Las pruebas con el prototipo permitirán obtener tirantes mediante medición: en la entrada, trayectoria, tirante anterior y conjugado en la poza de disipación, y en la salida de la rápida, puesto que son valores característicos.

M2: Formulación teórica de la rápida (O.E.1, O.E.2). Permitirá realizar el diseño de la estructura a partir de consideraciones teóricas. El método contiene una serie de procedimientos de cálculo que forman parte del diseño analítico.

Mediante la formulación teórica se realizarán 5 diseños: 1 para el diseño del perfil longitudinal del prototipo y comparación con el mismo, y 4 para ser simulados con CFD y comparar los resultados con los de estas simulaciones. En el primer caso, se utilizarán parámetros adecuados según las limitaciones de la experimentación, mientras que, en el segundo caso, se diseñará usando condiciones reales del caso de estudio, considerando 4 caudales diferentes, que representan el 25, 50, 75 y 100% del caudal de diseño real. Cada diseño calculará el tirante esperado en distintos puntos, lo cual permitirá tener varios puntos de comparación en cada caso.

M3: Análisis numérico con simulación en CFD (O.E.2). Consiste en realizar simulaciones hidráulicas con CFD para obtener resultados de parámetros hidráulicos asistidos por un software que implemente CFD.

Se correrá un modelo para cada escenario y se obtendrán los tirantes en los mismos puntos que en los métodos anteriores. Todas las corridas contemplarán el mismo modelo de turbulencia, esquema de cierre, mallado (discretización espacial), intervalo de tiempo computado (discretización temporal) y el mismo arreglo de bloques, condiciones de contorno y condiciones iniciales. No obstante, estos parámetros serán validados por un análisis de estabilidad realizando diferentes mallas, intervalos de tiempo de simulación y las combinaciones que se puedan realizar entre ellos, analizando el escenario del caudal mayor.

M4: Validación mediante errores promedio (O.E.3). Permitirá comparar los resultados de la formulación teórica con los otros dos métodos para poder calcular el Error Relativo Medio (Mean Relative Error MRE) y la Raíz del Error Relativo Cuadrático Medio (Root of Mean Square Relative Error RMSRE) y posteriormente evaluar la confiabilidad del método de la formulación teórica. Para la comparación con la experimentación con prototipo se tomarán 5 tirantes característicos en un escenario, mientras que para la comparación con la simulación en CFD se tomarán 6 tirantes característicos en 4 escenarios de diferentes caudales, analizando al final todas las combinaciones posibles entre ellos: 4 combinaciones de 1 escenario (Q1, Q2, Q3, Q4), 6 combinaciones de 2 escenarios (Q1-Q2, Q1-Q3, Q1-Q4, Q2-Q3, Q2-Q4, Q3-Q4), 4 combinaciones de 3 escenarios (Q1-Q2-Q3, Q1-Q2-Q4, Q1-Q3-Q4, Q2-Q3-Q4), 1 combinación de 4 escenarios (Q1-Q2-Q3-Q4).

Para determinar que la formulación teórica es confiable, el error máximo de todas las métricas debe ser menor a 10%. En caso contrario, se determinará como no confiable. La determinación

de este porcentaje máximo de error como criterio es indicado por Klimberg et al. (2010), quienes siguieron lo recomendado por Lewis (1982), quien propuso tal porcentaje como el límite para tomar un pronóstico (en este caso, valor esperado) como confiable.

M5: Revisión de literatura (O.E.1, O.E.2). Consultar antecedentes relevantes y relacionados a la investigación para tener una referencia.

3.3 Esquema Metodológico

En la *Figura 3* se muestra el esquema metodológico que parte de la revisión de literatura y señala el procedimiento para llegar al objetivo general. Según se ve en el esquema, la formulación teórica es la base para la experimentación y la simulación en CFD, toda vez que se necesita un diseño de base el cual poder experimentarlo en laboratorio y simularlo en CFD.

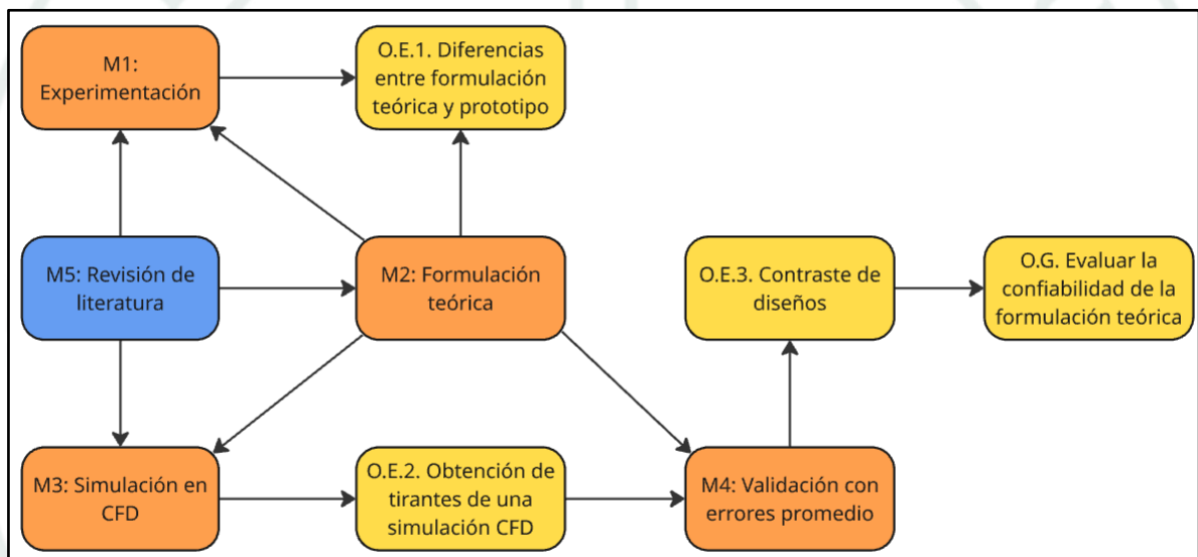


Figura 3.
Esquema metodológico
Elaboración propia

3.4 Contenido Temático

I. Introducción

1. Planteamiento del Problema
2. Justificación de la Investigación
3. Hipótesis
4. Objetivos de la Investigación
5. Variables

II. Fundamento Teórico

1. Estado del arte
2. Marco conceptual
3. Marco legal

III. Metodología propuesta

1. Tipo de Investigación
2. Métodos

- 3. Esquema Metodológico
- IV. Diferencia entre la Formulación Teórica y el prototipo
 - 1. Experimentación implementando instrumentos de medición
 - 2. Formulación Teórica de la Rápida
 - 3. Discusión
- V. Obtención de Tirantes de Simulación CFD para el Caso de Estudio
 - 1. Análisis Numérico con Simulación en CFD
 - 2. Discusión
- VI. Contraste de Aplicación de ambos Métodos
 - 1. Validación mediante Errores Promedio
 - 2. Discusión
- VII. Conclusiones y Recomendaciones
 - 1. Conclusiones
 - 2. Recomendaciones
- VIII. Bibliografía

3.5 Cronograma

En la *Tabla 3* se muestra el diagrama de Gantt ordenado por semanas que seguirá el trabajo de investigación.

Tabla 5.
Cronograma
Elaboración propia

Ítem	Duración (semanas)	Comienzo	Fin	16/02/26	23/02/26	02/03/26	09/03/26	16/03/26	23/03/26	30/03/26	06/04/26	13/04/26	20/04/26	27/04/26	04/05/26	11/05/26	18/05/26	25/05/26
I. Introducción	3	16/02/26	09/03/26															
1.1 Problemática	1	16/02/26	23/02/26															
1.2 Justificación	1	23/02/26	02/03/26															
1.3 Objetivos de Investigación	1	23/02/26	02/03/26															
1.4 Hipótesis	1	02/03/26	09/03/26															
1.5 Variables	1	02/03/26	09/03/26															
II. Fundamento Teórico	7	16/02/26	06/04/26															
2.1 Estado del Arte	6	16/02/26	30/03/26															
2.2 Marco Conceptual	1	30/03/26	06/04/26															
2.3 Marco Legal	1	30/03/26	06/04/26															
III. Metodología	7	16/02/26	06/04/26															
3.1 Tipos de Investigación	1	09/03/26	16/03/26															
3.2 Métodos	2	16/03/26	30/03/26															
3.3 Esquema Metodológico	1	23/03/26	30/03/26															
3.4 Contenido Temático	1	30/03/26	06/04/26															
3.5 Cronograma	1	16/02/26	23/02/26															
IV. Diferencia entre la formulación teórica y el prototipo (O.E.1)	3	06/04/26	27/04/26															
4.1 Experimentación implementando instrumentos de medición (M1)	1	13/04/26	20/04/26															
4.2 Formulación teórica de la rápida (M2)	1	06/04/26	13/04/26															
4.3 Discusión	1	20/04/26	27/04/26															
V. Obtención de tirantes de simulación CFD para el caso de estudio (O.E.2)	5	20/04/26	25/05/26															
5.1 Análisis numérico con modelado en CFD (M3)	3	20/04/26	11/05/26															
5.2 Discusión	2	11/05/26	25/05/26															
VI. Contraste de aplicación de ambos métodos (O.E.3)	2	11/05/26	25/05/26															
6.1 Validación mediante errores promedio (M4)	1	11/05/26	18/05/26															
6.2 Discusión	1	18/05/26	25/05/26															
VII. Conclusiones y Recomendaciones	1	18/05/26	25/05/26															
7.1 Conclusiones	1	18/05/26	25/05/26															
7.2 Recomendaciones	1	18/05/26	25/05/26															

IV. DIFERENCIA ENTRE LA FORMULACIÓN TEÓRICA Y EL PROTOTIPO

Previo a explicar los resultados, se introducirá el caso de estudio. Se trata de una estructura hidráulica de disipación de energía tipo canal que consiste en tres rápidas en serie, que constan cada una de las siguientes partes: un canal de aproximación o llegada (que en la primera rápida aguas arriba conecta la sección y pendiente del canal que sale del túnel de trasvase con la sección y pendiente de la rápida, y en las siguientes rápidas conecta con la rápida anterior), una transición que consta de un tramo con pendiente mayor que el canal de aproximación, seguida de una curva vertical llamada trayectoria que conecta con una poza de disipación de energía, donde se desarrolla el resalto hidráulico que permitirá la pérdida necesaria, y termina con la el canal de salida, que es a su vez el canal de aproximación de la rápida siguiente.

La estructura se ubica en el sector Pillones, distrito de San Antonio de Chuca, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, Perú, y se encuentra a la salida del túnel de un canal de trasvase que proviene de una obra de captación aguas arriba en el río Pillones. Esta estructura hidráulica fue construida para evitar la erosión sobre el terreno natural en la zona de llegada de la canal ocasionada por la gran diferencia de elevación entre la salida de éste hasta la presa Pillones, dado que la construcción de un canal simple se vería afectado por las grandes velocidades del agua que dañarían el concreto y perjudicarían el desempeño y vida útil de la estructura.

En la presente investigación de tesis se analizó el caso de una sola rápida: la del medio de las tres rápidas en serie puesto que el comportamiento hidráulico debería ser similar en cada una de ellas.

Caracterizando la estructura, se sabía que la transición de entrada es rectangular de 5 metros en el canal que llega aguas arriba con una expansión en la zona de transición de entrada hacia un ancho de 10 metros en la trayectoria, poza de disipación y transición de salida. La segunda y tercera rápida tienen sección rectangular de 10 metros de ancho en todas sus partes. La estructura está hecha de concreto armado, tanto en muros laterales como en el suelo o fondo, y la rugosidad de la superficie en contacto con el agua corresponde a un número de Manning $n = 0.013$. El caudal de diseño es de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

El modelo final a analizar quedó compuesto por el canal de aproximación, la transición, la trayectoria y la poza de disipación de la rápida del medio. Es importante resaltar que el diseño tiene como limitaciones propias la longitud total y diferencia de altura entre el inicio y final que deberá tener la rápida que se diseña.

En todos los procesos de cálculo, consideramos las siguientes nomenclaturas para las variables:

Q: caudal
V: velocidad
A: área hidráulica
P: perímetro mojado
T: espejo de agua
S: pendiente longitudinal del canal
S_f: pendiente de pérdida por fricción
h_f: pérdida de energía por fricción
n: coeficiente de Manning
b: base del canal
y: tirante o profundidad de agua
z: relación horizontal/vertical de los taludes laterales del canal
hV: carga de velocidad
E: energía total
V_c: velocidad crítica
A_c: área hidráulica crítica
P_c: perímetro mojado crítico
y_c: tirante o profundidad de agua crítica
hV_c: carga de velocidad crítica
E_c: energía total crítica
Δh_e: diferencia de altura estática

4.1 Experimentación implementando instrumentos de medición

Esta fase consistió en la experimentación de un prototipo con un caudal que cumplan en conjunto (geometría, rugosidad y caudal) con la semejanza hidráulica con el escenario real de diseño. No obstante, se construyó el prototipo con ciertas limitaciones de la rugosidad de los materiales y las características de los equipos de laboratorio disponibles, y se tomó este prototipo de base para obtener los parámetros para el diseño. Por lo tanto, los parámetros del escenario real del caso de estudio serán diferentes a los usados para la investigación debido a las limitaciones encontradas en la fase experimental, pero no afectará los propósitos comparativos de la investigación en tanto se usará el mismo conjunto de parámetros entre el escenario experimental y el diseño teórico a ser comparado con éste, aplicando apropiadamente el análisis de semejanza hidráulica. En conclusión, el aporte del caso de estudio en la presente investigación es servir como punto de partida al dar indicios acerca de fallas en el diseño teórico y también brindar las condiciones propias de diseño (longitud y diferencia de altura fijos) para los otros cuatro diseños teóricos que se harán para ser simulados con CFD y comparados con sus resultados.

Continuando, al llevar a cabo el diseño del prototipo para ensayar, se pensó aplicar la semejanza hidráulica tomando como conjunto base de parámetros los usados para el diseño por formulación teórica. Y es entonces como se notó las limitaciones del laboratorio al intentar replicar a escala el escenario hidráulico real.

Entonces, se calcularon los parámetros adimensionales que controlarán el escenario hidráulico. La metodología que se usó para calcular estos parámetros es la de Repetición de Variables del Teorema de Pi-Buckingham. Las variables que se consideraron primordiales para el escenario hidráulico de una rápida fueron: rugosidad “n” de Manning, ancho de la base (longitud) “b”, caudal “Q” y la gravedad “g”, que contienen las dimensiones de longitud [L] y tiempo [T]. Se decidió no considerar variables que contengan la dimensión de masa debido a que en una rápida priman las fuerzas de gravedad sobre las fuerzas viscosas, es decir, el ajuste por viscosidad y densidad en el prototipo no generará cambios significativos. Por tanto, al tener 4 variables que involucran 2 dimensiones, se calcularon 2 parámetros adimensionales Π . Se conocen las dimensiones de las variables involucradas luego de realizar el análisis dimensional de la fórmula de Manning y así obtener las dimensiones implícitas de la rugosidad de Manning “n”.

$$v = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Reordenando los términos se obtuvo la siguiente ecuación.

$$n = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{v}$$

En esta ecuación, se buscó la homogeneidad dimensional para hallar las dimensiones implícitas de la variable “n”.

$$[n] = \left[\frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{v} \right]$$

Se sustituyeron las variables por sus dimensiones conocidas.

$$[n] = \frac{L^{2/3}}{L \cdot T^{-1}}$$

Finalmente, se obtuvo las dimensiones de la variable “n”.

$$[n] = L^{-1/3} \cdot T$$

Se enlistaron todas las variables involucradas con sus dimensiones.

Tabla 6.

Dimensiones de las variables consideradas para la repetición de variables
Elaboración propia

Variable / Dimensión	[L]	[T]
n	-1/3	1
Q	3	-1
b	1	0
g	1	-2

Las variables repetidas que se escogieron son la longitud de la base “b”, conteniendo la dimensión longitud [L], y la rugosidad de Manning “n”, conteniendo la dimensión tiempo [T]. Entonces, se formaron las ecuaciones siguientes que permiten hallar los dos parámetros Π adimensionales.

$$\Pi_1 = b^{a_1} \cdot n^{b_1} \cdot Q$$

$$\Pi_2 = b^{a_2} \cdot n^{b_2} \cdot g$$

Luego, se estableció la adimensionalidad de los parámetros.

$$[\Pi_1] = L^0 \cdot T^0 = (L)^{a_1} \cdot (L^{-1/3} \cdot T)^{b_1} \cdot (L^3 \cdot T^{-1})$$

$$[\Pi_2] = L^0 \cdot T^0 = (L)^{a_2} \cdot (L^{-1/3} \cdot T)^{b_2} \cdot (L \cdot T^{-2})$$

Entonces, se plantearon los siguientes sistemas de ecuaciones, uno para cada parámetro Π adimensional.

$$\begin{cases} a_1 - \frac{1}{3}b_1 + 3 = 0 \\ b_1 - 1 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} a_2 - \frac{1}{3}b_2 + 1 = 0 \\ b_2 - 2 = 0 \end{cases}$$

Finalmente, se resolvieron los dos sistemas de ecuaciones, hallándose los siguientes resultados.

$$\begin{cases} a_1 = -\frac{8}{3} \\ b_1 = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} a_2 = -\frac{1}{3} \\ b_2 = 2 \end{cases}$$

Por tanto, los parámetros adimensionales resultantes fueron los siguientes.

$$\Pi_1 = \frac{n \cdot Q}{b^{8/3}}$$

$$\Pi_2 = \frac{n^2 \cdot g}{b^{1/3}}$$

Una vez hallados los parámetros adimensionales que rigen el modelo hidráulico, se escalaron los siguientes parámetros inicialmente considerados para el modelo teórico:

Caudal = 40 m³/s

Ancho = 10 m

Rugosidad de Manning = 0.014

Para este punto, se reconocieron dos alternativas a priori: definir el ancho del canal en el prototipo y escalar la rugosidad y el caudal a partir de la relación de longitudes, y definir el caudal para el prototipo y escalar el ancho y rugosidad a partir de la relación de caudales. El

análisis de cada alternativa se detalla a continuación. Para el primer caso, se calculó primero la rugosidad, a partir de la relación de longitudes, utilizando el segundo parámetro adimensional calculado. Para todo cálculo de la semejanza hidráulica, el subíndice “1” indica que se trata de un parámetro del escenario real o del que será usado para el diseño teórico, y el subíndice “2” indica que se trata de un parámetro que será usado para el ensayo con prototipo.

$$n_1^2 \cdot \frac{g}{b_1^{1/3}} = n_2^2 \cdot \frac{g}{b_2^{1/3}}$$

Aislando y simplificando la rugosidad del prototipo, se obtuvo la relación de rugosidades en función de la relación de longitudes.

$$n_2 = n_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/6}$$

El ancho de canal del prototipo vino limitado por el máximo ancho del canal experimental con el que se contaba en laboratorio, que es 0.48 metros, es decir, $b_2 \leq 0.48$ m. Entonces, la relación b_2/b_1 tenía un máximo.

$$\frac{b_2}{b_1} \leq \frac{0.48}{10}$$

Y la rugosidad del prototipo también tendría un máximo.

$$n_2 = n_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/6} \leq 0.014 \cdot \left(\frac{0.48}{10}\right)^{1/6} = 0.008440$$

Ahora, se calculó el caudal para el prototipo con el primer parámetro adimensional.

$$\frac{n_1 \cdot Q_1}{b_1^{8/3}} = \frac{n_2 \cdot Q_2}{b_2^{8/3}}$$

Conociendo por el segundo parámetro adimensional la relación de rugosidades en función de la relación de longitudes, se reemplaza.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{8/3} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) = Q_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{8/3} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{1/6} = Q_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{5/2}$$

Así, se podría calcular el caudal del prototipo. Para esto, sabiendo que la rugosidad de Manning debía ser menor a 0.008440, se supuso que se llegaría a este valor límite, que ocurre cuando el ancho de canal es el máximo según la limitación del equipo de laboratorio, y se calculó el caudal para el prototipo.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{5/2} = 40 \cdot \left(\frac{0.48}{10}\right)^{5/2} = 0.020191 \text{ m}^3/\text{s} = 20.191 \text{ L/s}$$

No obstante, este caudal era muy grande al punto que excedía el máximo caudal sumado de los dos aparatos con los que se contaba en laboratorio. Por tanto, al requerirse una rugosidad de

Manning muy baja para el prototipo y un caudal muy grande, se tomó como una limitación ya que fabricar una superficie con una geometría como la de la rápida y con una rugosidad extremadamente baja, así como adquirir una bomba con regulador de caudal, resultaba complejo y costoso. Consecuentemente, se optó por un cambio en el conjunto de parámetros considerados para el método teórico.

Entonces, se concluyó por tener como parámetros base el conjunto de aquellos accesibles de conseguir en la experimentación y a partir de este conjunto aplicar la semejanza hidráulica para obtener un conjunto de parámetros para el diseño por el método teórico, consiguiendo así mayor libertad en la experimentación. Así, el máximo caudal posible en la experimentación fue medido mediante los caudalímetros digitales propios de los dos bancos hidráulicos usados en suma de caudales, el ancho máximo corresponde al uso total de la sección del canal de ensayo y se midió con flexómetro (el valor es el mismo que se reporta párrafos arriba) y la rugosidad fue medida con un ensayo previo en el que se probó el material plástico forro “Vinifan”, que sería usado para el ensayo experimental del prototipo de rápida en las caras en contacto con el agua.

El ensayo previo para la determinación de la rugosidad del material escogido para la superficie del prototipo consistió en probar en un canal reducido un bloque de sección rectangular forrado con “Vinifan” en las paredes internas y base, con una pendiente y caudal constantes y una longitud suficiente para que se desarrolle el tirante normal, de tal forma que se pueda usar la ecuación de Manning para el caudal, para poder tener como incógnita el número de Manning y el resto de valores conocidos (caudal, pendiente, área hidráulica y perímetros mojado calculados a partir de la medición del tirante con limnómetros). La ecuación de Manning se usó en la siguiente forma, para unidades del Sistema Internacional (SI).

$$Q = \frac{R_h^{2/3} \cdot A \cdot S^{1/2}}{n} = \frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{P^{2/3} \cdot n}$$

De esta forma, luego de medir el caudal con un método volumétrico, el desnivel del canal con un nivel de manguera y un flexómetro, el tirante normal con un limnómetro, y conociendo la sección del bloque de reducción, se pudieron obtener todas las variables en la ecuación de Manning para poder hallar la rugosidad del forro “Vinifan”.

El método volumétrico que se implementó para la medición del caudal consistió en la acumulación del agua que caía del canal de ensayo en una cubeta con marcas a diferentes volúmenes, iniciar un cronómetro con un celular y registrar en video en un solo encuadre el llenado de la cubeta y el cronómetro, de tal forma de obtener diferencias de volúmenes y de tiempo. Los resultados se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 7.*Caudal de la obtención de rugosidad del material “Vinifan”**Elaboración propia*

Lectura	Marca Volumen (L)	Cronómetro (s)	Δ Volumen (L)	Δ Cronómetro (s)	Caudal (L/s)
1	1.00	31.966	-	-	-
2	1.50	44.666	0.50	12.70	0.039
3	2.00	56.775	1.00	24.81	0.040
4	2.50	69.988	1.50	38.02	0.039
5	3.00	83.654	2.00	51.69	0.039
PROMEDIO					0.039

Luego, la pendiente se calculó a partir de la medición del desnivel entre dos puntos del canal utilizando un nivel de manguera y agua, y de la distancia entre dichos puntos, utilizando funciones trigonométricas, según se indica en la siguiente ecuación.

$$S = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\text{Desnivel}}{\text{Distancia entre puntos}} \right) \right) = \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{6.7 \text{ cm}}{4.5 \text{ m}} \right) \right) = 0.015$$

También, se midieron dos tirantes en una zona donde ocurre teóricamente el tirante normal, y se promediaron ambas lecturas. En general, las siguientes ecuaciones relacionan el tirante con el área hidráulica y perímetro mojado en cualquier escenario. Para el área hidráulica se utilizó la siguiente ecuación. El valor de “z” es cero debido a la sección rectangular y no trapezoidal ni triangular del canal.

$$A_h = (b + z \cdot y) \cdot y = (29.4 \text{ mm} + 0 \cdot 5) \cdot 5 \text{ mm} = 145.53 \text{ mm}^2$$

Y para el perímetro mojado se tiene la siguiente ecuación.

$$P = b + 2y \cdot \sqrt{1 + z^2} = 29.4 \text{ mm} + 2 \cdot 5 \text{ mm} \cdot \sqrt{1 + 0^2} = 39.4 \text{ mm}$$

Entonces, con todas estas variables calculadas, se resuelve la incógnita del número de Manning.

$$n = \frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{P^{2/3} \cdot Q} = \frac{(145.53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2)^{5/3} \cdot (0.015)^{1/2}}{(39.4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^{2/3} \cdot (0.039 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})} = 0.0108$$

Así, volviendo a la experimentación principal, el conjunto inicial de parámetros experimentales sería el siguiente.

$$\text{Caudal} = (12.70 + 12.90) \text{ galones/minuto} = 1.615 \text{ L/s} = 0.001615 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Ancho} = 0.48 \text{ m}$$

$$\text{Rugosidad de Manning} = 0.0108$$

Entonces, a partir de estos valores se calcularon los parámetros para el diseño teórico, habiendo fijado el valor del ancho del canal para el método teórico en $b = 20$ metros, de forma que quedan dos incógnitas, caudal y rugosidad de Manning del método teórico, para ser resueltas con las dos ecuaciones de la semejanza hidráulica provenientes de igualar los dos parámetros adimensionales en los escenarios de diseño por formulación teórica y de experimentación con prototipo, como se muestra a continuación.

$$\Pi_1 = \frac{n_1 \cdot Q_1}{b_1^{8/3}} = \frac{n_2 \cdot Q_2}{b_2^{8/3}}$$

$$\Pi_2 = \frac{n_1^2 \cdot g}{b_1^{1/3}} = \frac{n_2^2 \cdot g}{b_2^{1/3}}$$

Tras reemplazar los valores conocidos y simplificar la variable gravedad en la segunda ecuación, se tienen las dos incógnitas presentes en las siguientes dos ecuaciones.

$$\frac{n_1 \cdot Q_1}{(20 \text{ m})^{8/3}} = \frac{0.0108 \cdot (0.001615 \text{ m}^3/\text{s})}{(0.48 \text{ m})^{8/3}}$$

$$\frac{n_1^2}{(20 \text{ m})^{1/3}} = \frac{0.0108^2}{(0.48 \text{ m})^{1/3}}$$

Así, se resuelven las incógnitas y se tiene el siguiente conjunto de parámetros iniciales para el diseño por el método teórico.

Caudal = 18.099 m³/s

Ancho = 20 m

Rugosidad de Manning = 0.0201

Con estos parámetros se diseñó la geometría del perfil longitudinal de la rápida por medio del método teórico. En el capítulo siguiente se expandirá el proceso de cálculo de la geometría del perfil longitudinal de la rápida.

Así, luego de haber fabricado y ensayado el prototipo, se recogieron los siguientes resultados para poder calibrar el posterior análisis numérico mediante simulación en CFD.

Tirante crítico al inicio de la transición: 5.0 mm

Tirante a la mitad de la transición: 3.5 mm

Tirante en la poza de disipación: 5.2 mm

Tirante normal en el canal de aproximación: 17.0 mm

Tirante normal en el canal de salida: 20.0 mm

Finalmente, estos tirantes medidos en el prototipo son escalados con el factor 20/0.48 para obtener las dimensiones del escenario real.

Tirante crítico al inicio de la transición: 0.208 m

Tirante a la mitad de la transición: 0.145 m

Tirante en la poza de disipación: 0.217 m

Tirante normal en el canal de aproximación: 0.708 m

Tirante normal en el canal de salida: 0.833 m

4.2 Formulación teórica de la rápida

Este método fue usado en total 5 veces para diferentes escenarios y conjuntos de parámetros iniciales: una vez para diseñar la geometría del perfil longitudinal del prototipo a partir del conjunto de parámetros obtenidos a través de la semejanza hidráulica, y 4 veces para la

comparación de resultados con el método de diseño del análisis numérico con simulación en CFD. Así, se expone a continuación el procedimiento general de cálculo para el diseño considerando como escenario de ejemplo el de la experimentación con prototipo y su conjunto de parámetros obtenidos mediante la aplicación de la semejanza hidráulica. Posteriormente, se resumirán los resultados parciales y finales del procedimiento de cálculo para cada uno de los otros 4 escenarios de diseño restantes.

4.2.1 Diseño 1: diseño del perfil longitudinal del prototipo

Por tanto, se presentan los parámetros de diseño para el primer escenario. El conjunto siguiente proviene de la aplicación de la semejanza hidráulica al conjunto de parámetros de la experimentación con prototipo.

Caudal = $18.099 \text{ m}^3/\text{s}$
Ancho = 20.00 m
Rugosidad de Manning = 0.0201

Por otro lado, se contó con un segundo conjunto de parámetros de diseño, independientes de la parte experimental, que estuvieron condicionados por las características del escenario real, como la distancia longitudinal y vertical entre el punto de salida de la primera rápida y el punto de entrada de la tercera rápida. Esto significa que el canal de aproximación y la estructura completa de la segunda rápida, desde la transición hasta la salida de la posa de disipación, tendrían una longitud total y diferencia de alturas fijas. Así, el siguiente conjunto de parámetros representa las limitaciones del escenario real previamente descritas.

Largo total de la estructura incluido el canal de aproximación = 40.990 m
Diferencia de altura = 3.290 m

Estas restricciones se representan gráficamente en la siguiente figura, donde se visualiza el perfil construido de las 3 rápidas consecutivas.

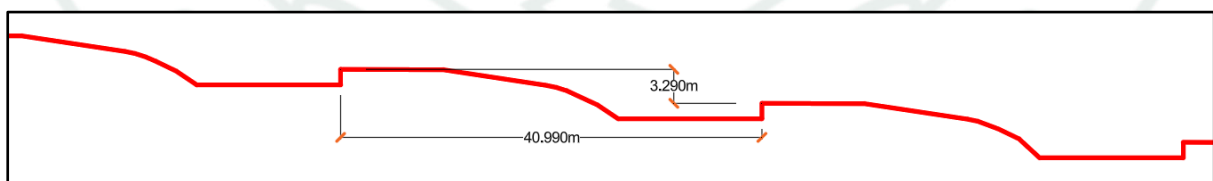


Figura 4.
Longitud y diferencia de nivel reales disponibles para la rápida
Fuente: Egasa

Entonces, se comenzó por el diseño del canal de aproximación (a continuación de la primera rápida), que comprende la determinación de su longitud y pendiente, puesto que la sección transversal permanece rectangular. Para el diseño de la longitud se considera que en ésta debe ocurrir el tirante normal. Para ello, es necesario calcular el tirante normal a partir de valores de prueba para la pendiente y posteriormente proponer una longitud a través de una proporción

práctica que indica que el tirante normal se desarrolla en una distancia aproxima de 20 veces el tirante. La ecuación de Manning permite obtener el tirante normal, como se muestra a continuación.

$$Q = \frac{R_h^{2/3} \cdot A \cdot S^{1/2}}{n} = \frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{P^{2/3} \cdot n}$$

El cálculo fue realizado en una hoja de cálculo de Excel, implementando el cálculo iterativo incorporado en el programa. El valor de la pendiente fue elegido dentro de un rango típico que tienen los canales de aproximación que conectan con rápidas, entre 0.2 a 0.5%, tomando el valor de 0.4%. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 8.

Resultados en el canal de aproximación – escenario para la experimentación

Elaboración propia

Tirante y (m)	Pendiente S (%)	Área A (m²)	Perímetro P (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)
0.482	0.4	9.637	20.964	1.878	0.180

Teniendo el resultado del tirante normal de 0.482 metros, se calculó la longitud del canal de transición aplicando la proporción práctica (20 x 0.482), resultando 9.637 metros, considerando todos los decimales. Sin embargo, se fija la longitud en 15.940 para poder cumplir la limitación de longitud total de la estructura de 40.990 metros.

Luego, para poder diseñar la siguiente parte de la estructura (la transición), fue necesario calcular la carga de energía en el punto de intersección del canal de aproximación con la transición. No obstante, la teoría dice que en estos casos el tirante crítico del canal de aproximación sucede en este punto de intersección. Para canales rectangulares, la siguiente expresión permite calcular el tirante crítico.

$$\frac{Q^2}{(b \cdot y)^3 \cdot g} \cdot b = 1$$

Luego de reemplazar los valores de estas variables, el resultado para el tirante crítico es 0.437 metros. También, en este paso se calcula el área, perímetro, velocidad y carga de velocidad cuando sucede el tirante crítico.

Tabla 9.

Resultados críticos– escenario para la experimentación

Elaboración propia

Tirante crítico y_c (m)	Área crítica A_c (m²)	Perímetro crítico P_c (m)	Velocidad crítica V_c (%)	Carga de velocidad crítica hV_c (m)
0.437	8.741	20.874	2.071	0.219

Además, se consideró que el canal de salida (luego de la poza de disipación, que es el canal de aproximación para la tercera rápida), tendría las mismas características que el canal de aproximación de la segunda rápida.

En la siguiente figura se muestra el perfil del fondo del canal de aproximación diseñado.

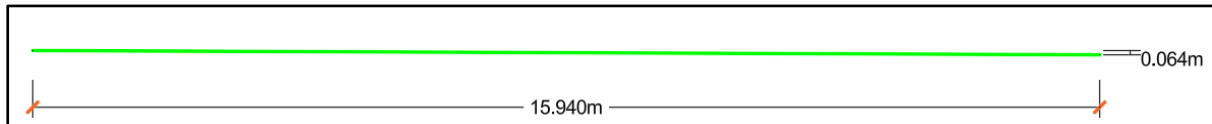


Figura 5.

*Diseño del canal de aproximación – escenario para la experimentación
Elaboración propia*

La siguiente parte diseñada corresponde a la transición, cuyo planteamiento incluyó nuevamente la determinación de la longitud y de la pendiente. Este diseño, para dejar el punto de partida para la siguiente subparte de la estructura, toma en cuenta las alturas de energía en una cantidad elegida de tramos en los que se divide la transición. Para este caso, se decidió dividir esta subparte en 10 tramos. La longitud y pendiente se definieron con valores de prueba, ajustándolos posteriormente tomando en cuenta los resultados generales de las demás partes, de forma que el fin pretendido sea minimizar la profundidad de la poza de disipación y el tirante conjugado que ocurre en ésta. Entonces, el procedimiento de cálculo consiste en, a partir del tirante conocido en un punto inicial (tirante crítico que sucede en la intersección del canal de aproximación con la transición), calcular la pérdida de energía en el tramo (a través de la pendiente de pérdida por fricción que se obtiene previamente) para poder concluir la energía del punto inicial del siguiente tramo usando la conservación de la energía y considerando la diferencia de altura del fondo del canal en el tramo, que es la misma para todos los tramos al tener la misma longitud (la pendiente en la transición es única). La siguiente expresión define la conservación de energía a través de los parámetros indicados.

$$E_i + \Delta h_{e_i} - h_{f_i} = E_{i+1}$$

Luego, en el tramo siguiente, como se tiene la energía inicial, se calcula el tirante y velocidad para poder calcular la pendiente de pérdida de fricción y la pérdida de energía en el tramo para poder hallar la energía inicial del siguiente tramo, y así sucesivamente. También, la siguiente figura ayuda a comprender, gráficamente, el significado de la ecuación de la conservación de energía.

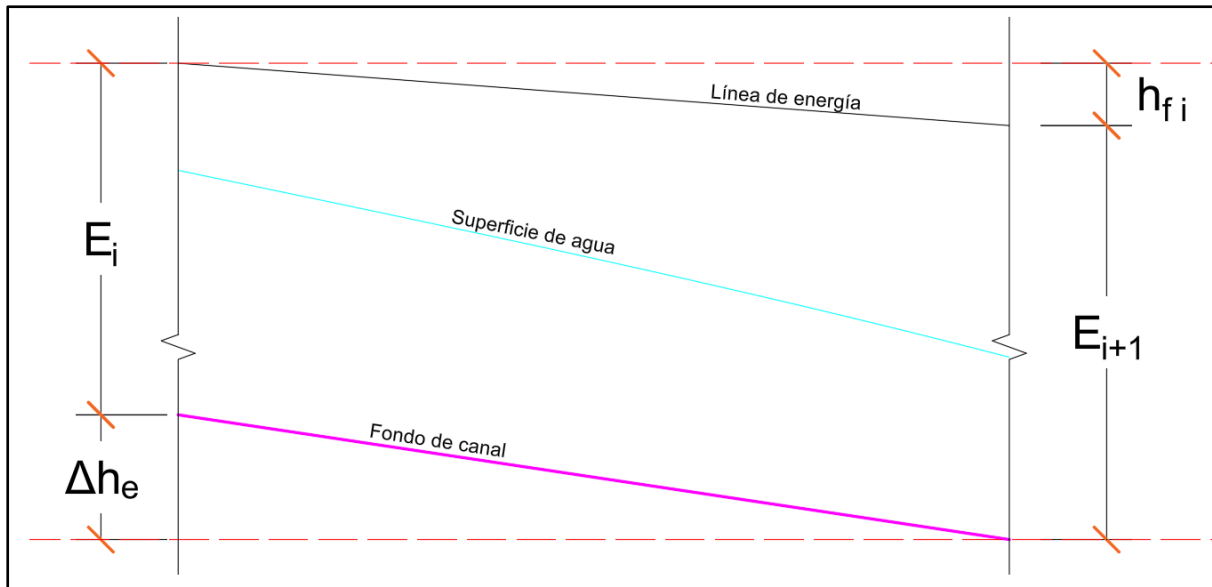


Figura 6.
Relación de energías en tramos adyacentes
Elaboración propia

El rango en el cual se prueban diferentes valores corresponde a la finalidad de la transición de generar un flujo rápido y supercrítico para poder desarrollar el resalto hidráulico posteriormente en la poza de disipación, es decir, se prueban con pendientes moderadas y no bajas para poder generar tal velocidad de flujo, y longitudes que permitan que el flujo alcance la velocidad antes de llegar a la siguiente subparte, la trayectoria. Para demostrar el cálculo, se utilizan los valores finales de longitud y pendiente obtenidos luego de haber evaluado la estructura completa con distintos datos para la transición. Estos valores son de 10 metros para la longitud y 15% para la pendiente, lo cual genera que cada tramo tenga una longitud horizontal de 1 metro y una diferencia de altura de 0.15 metros. El primer tramo tiene como punto de partida el escenario del régimen crítico (es decir, el tirante es crítico en el punto de intersección entre el canal de aproximación y la transición). A continuación, se muestra el cálculo iterativo llevado a cabo en Excel para los primeros dos tramos, siguiendo de forma similar para los tramos siguientes. El proceso de cálculo en Excel se optó de la siguiente manera: se resta la energía del tramo actual con un valor de prueba de tirante para así obtener la carga de velocidad, a partir de la cual se calcula la velocidad que generaría dicha carga, y con esta velocidad se encuentra el área que le corresponde siguiendo la ecuación de continuidad, para así obtener el tirante que produce tal área y finalmente igualarlo al tirante de prueba inicial para que el programa encuentre el valor correcto; posteriormente, con el tirante correcto se calcula el perímetro mojado, radio hidráulico, energía actual, pendiente de pérdida de energía, pérdida de energía y energía del siguiente tramo. La siguiente captura de pantalla muestra las fórmulas implementadas para el cálculo de las variables mencionadas.

Tabla 10.*Fórmulas de Excel para parámetros en tramos adyacentes en la transición**Elaboración propia*

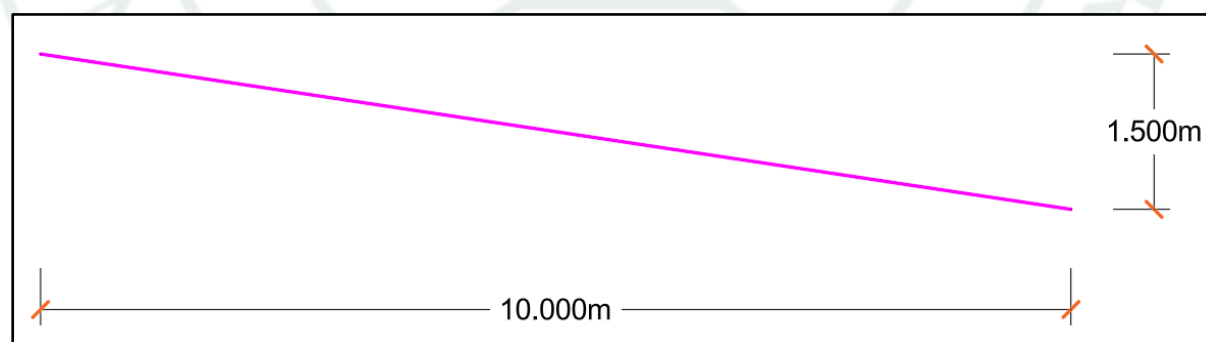
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Tramo	y	hV	V	A	y	P	Rh	E	Δh_e	Sf	hf	E+ Δh_e -hf
2	0	0.437	0.219	2.071	8.741	0.437	20.874	=E2/G2	=B2+C2	0.150	=(D2*Manning/H2^(2/3))^2	=K2*1	=I2+J2-L2
3	1	=F3	=M2-B3	=(C3*2*9.81)^0.5	=Caudal/D3	=E3/Base	=Base+2*F3	=E3/G3	=B3+C3	0.150	=(D3*Manning/H3^(2/3))^2	=K3*1	=I3+J3-L3
4	2	=F4	=M3-B4	=(C4*2*9.81)^0.5	=Caudal/D4	=E4/Base	=Base+2*F4	=E4/G4	=B4+C4	0.150	=(D4*Manning/H4^(2/3))^2	=K4*1	=I4+J4-L4
5	3	=F5	=M4-B5	=(C5*2*9.81)^0.5	=Caudal/D5	=E5/Base	=Base+2*F5	=E5/G5	=B5+C5	0.150	=(D5*Manning/H5^(2/3))^2	=K5*1	=I5+J5-L5

Los resultados para los 10 tramos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 11.*Resultados en la transición – escenario para la experimentación**Elaboración propia*

Tramo	y (m)	hV (m)	V (m/s)	A (m ²)	y (m)	P (m)	Rh (m)	E (m)	Δh_e (m)	Sf (-)	hf (m)	E+ Δh_e -hf (m)
0	0.437	0.219	2.071	8.740	0.437	20.874	0.419	0.656	0.150	0.006	0.006	0.800
1	0.285	0.516	3.180	5.691	0.285	20.569	0.277	0.800	0.150	0.023	0.023	0.927
2	0.248	0.680	3.652	4.956	0.248	20.496	0.242	0.927	0.150	0.036	0.036	1.042
3	0.226	0.816	4.000	4.524	0.226	20.452	0.221	1.042	0.150	0.048	0.048	1.144
4	0.212	0.932	4.277	4.232	0.212	20.423	0.207	1.144	0.150	0.060	0.060	1.234
5	0.201	1.033	4.501	4.021	0.201	20.402	0.197	1.234	0.150	0.071	0.071	1.313
6	0.193	1.120	4.687	3.862	0.193	20.386	0.189	1.313	0.150	0.081	0.081	1.381
7	0.187	1.194	4.841	3.739	0.187	20.374	0.184	1.381	0.150	0.090	0.090	1.441
8	0.182	1.259	4.970	3.642	0.182	20.364	0.179	1.441	0.150	0.099	0.099	1.492
9	0.178	1.314	5.078	3.564	0.178	20.356	0.175	1.492	0.150	0.106	0.106	1.536
10	0.175	1.361	5.168	3.502	0.175	20.350	0.172	1.536	0.150	0.112	0.112	1.574

En la siguiente figura se muestra el perfil del fondo de la transición que se diseñó.

**Figura 7.***Diseño de la transición – escenario para la experimentación**Elaboración propia*

En la siguiente parte del diseño, la teoría dice que la parte de la trayectoria debe seguir una ecuación matemática en función de algunos parámetros calculados hasta este punto. La ecuación es la siguiente, donde la velocidad máxima es respecto a la transición, la cual corresponde al punto final del último tramo.

$$Y = - \left[X \cdot \tan \theta + \frac{X^2 \cdot g}{2 \cdot V_{max}^2} \cdot (1 + (\tan \theta)^2) \right]$$

El punto con el par ordenado (0.000;0.000) corresponde al punto final de la transición. Para desarrollar la curvatura, se escoge un incremento horizontal pequeño en comparación con la longitud del canal de aproximación, transición y poza de disipación.

En este punto se establece un sistema global de cotas para todas las partes de la rápida a partir de una cota de referencia con el fin de poder empalmar en elevación las subpartes diseñadas y conocer las diferencias de elevación entre puntos de diferentes partes ya que es necesario para el diseño de los siguientes componentes de la rápida. La cota de referencia usada se establece como 100.000 metros de elevación para el punto inicial del canal de aproximación (donde la rápida anterior empalma con la rápida actual) y a partir de esta se obtienen las cotas de fondo de los demás puntos de interés restando sucesivamente las diferencias de cota de fondo desde el punto de la referencia. Por ejemplo, si se sabe que la diferencia de altura entre el punto inicial del canal de aproximación de la segunda rápida y el mismo punto de la siguiente rápida es 3.290 metros, entonces la cota del último punto será la diferencia entre 100.000 y 3.290 igual a 96.710 metros. De igual forma, en los puntos deseados, se suman los tirantes y las cargas de velocidad a las cotas de fondo para obtener la elevación de la línea de energía.

Así, las coordenadas “Y” obtenidas de la ecuación de trayectoria son sumadas con la cota que coincide con el origen, es decir, la cota de fondo del punto final de la transición, que se calcula de la siguiente forma: a la cota de referencia global (100.000 metros) se resta la diferencia de cotas de fondo entre el punto inicial del canal de aproximación y el punto inicial de la transición, $0.4\% \cdot 15.940 = 0.064$ metros, y se resta también la diferencia de cotas de fondo entre los puntos inicial y final de la transición $15\% \cdot 10 = 1.500$ metros; entonces, la cota de del origen de la trayectoria que se sumará a las coordenadas “Y” de ésta se calcula operando $100.000 - 0.064 - 1.500$, resultando 98.436 metros.

Esta ecuación se desarrolla hasta bajar de la cota de la línea de energía del tirante normal en el canal de salida, que se obtiene de sumar la energía en este punto, 0.662, a la cota de fondo del punto, 96.710, resultando su elevación en $96.710 + 0.662 = 97.372$ metros. Esta restricción de la trayectoria para no descender de dicha elevación de energía se muestra gráficamente en la siguiente figura.

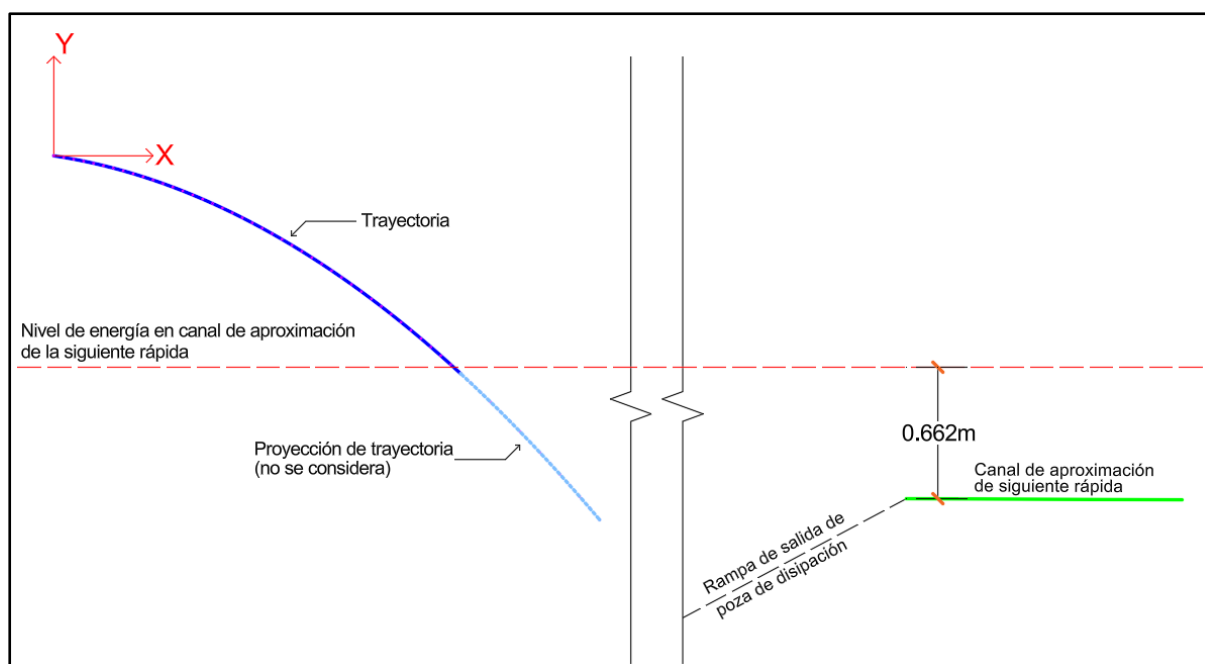


Figura 8.
Desnivel de desarrollo de la trayectoria
Elaboración propia

Consecuentemente, se tabulan cada par de coordenadas siguiendo el incremento horizontal elegido, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12.
Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario para la experimentación
Elaboración propia

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
0	0.000	0.000	98.436	21	1.050	-0.365	98.072
1	0.050	-0.008	98.428	22	1.100	-0.392	98.044
2	0.100	-0.017	98.419	23	1.150	-0.421	98.015
3	0.150	-0.027	98.410	24	1.200	-0.450	97.986
4	0.200	-0.038	98.399	25	1.250	-0.481	97.955
5	0.250	-0.049	98.387	26	1.300	-0.512	97.924
6	0.300	-0.062	98.374	27	1.350	-0.545	97.892
7	0.350	-0.076	98.361	28	1.400	-0.578	97.858
8	0.400	-0.090	98.346	29	1.450	-0.612	97.824
9	0.450	-0.106	98.331	30	1.500	-0.647	97.789
10	0.500	-0.122	98.314	31	1.550	-0.684	97.753
11	0.550	-0.139	98.297	32	1.600	-0.721	97.716
12	0.600	-0.158	98.279	33	1.650	-0.759	97.678
13	0.650	-0.177	98.259	34	1.700	-0.798	97.639
14	0.700	-0.197	98.239	35	1.750	-0.838	97.599
15	0.750	-0.218	98.218	36	1.800	-0.878	97.558
16	0.800	-0.240	98.196	37	1.850	-0.920	97.516
17	0.850	-0.263	98.173	38	1.900	-0.963	97.473
18	0.900	-0.287	98.149	39	1.950	-1.007	97.430

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
19	0.950	-0.312	98.124	40	2.000	-1.051	97.385
20	1.000	-0.338	98.098	41	2.050	-1.097	97.340

La siguiente figura muestra el perfil del fondo de la trayectoria diseñada.

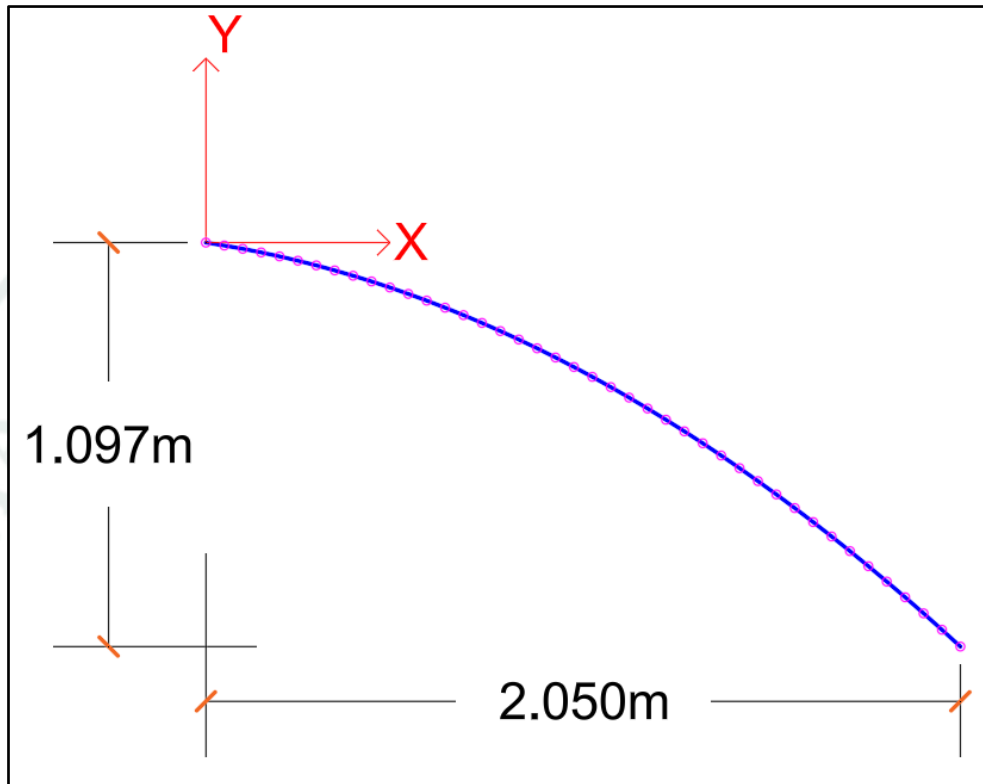


Figura 9.
Diseño de la trayectoria – escenario para la experimentación
Elaboración propia

La última parte en el diseño es la poza de disipación. Para esto, es necesario conocer la pérdida de carga que ocurrirá entre el último punto de la transición y el punto final de la rampa de salida de la poza, que es a su vez el punto inicial del canal de salida o canal de aproximación de la rápida siguiente.

De esta manera, se calcula la pérdida de carga que ocurrirá entre el último punto de la transición y el punto final de la rampa de salida de la poza restando la cota de la línea de energía en estos puntos. Al ser la cota de fondo del canal en el final de la transición 98.436 metros, entonces la cota de la línea de energía en este último punto se obtiene sumando la energía final del último tramo, $98.436 + 1.536$, resultando 99.973 metros, considerando todos los decimales.

Por su parte, la cota de la línea energía en el punto final de la rampa de salida de la poza de disipación se calculó previamente en el diseño de la trayectoria, resultado 97.372 metros.

Ahora, se restan ambas cotas de línea de energía, $99.973 - 97.372$, resultando la diferencia de energía 2.601 metros, considerando todos los decimales del programa Excel. Ahora, se resuelve

el fenómeno del resalto hidráulico que ocurre en la poza de disipación, es decir, se calcula el tirante anterior y el tirante conjugado. Entonces, para este caso se tienen 2 incógnitas (tirante anterior y conjugado) y se dispone de 2 ecuaciones para poder resolverlas: la relación entre los tirantes anterior y conjugado, y la pérdida de energía producto del resalto hidráulico (que en este caso ya se tiene conocido). La fórmula que relaciona el tirante anterior con el tirante conjugado se muestra a continuación.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right]$$

En esta fórmula se expresa el número de Froude en función al tirante. El subíndice “1” del número de Froude indica que se trata la situación del tirante anterior. Entonces, la fórmula queda reescrita de la siguiente forma exclusiva para canales de sección rectangular.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{Q^2}{b^2 \cdot y_1^3 \cdot g}} - 1 \right]$$

Y, por otro lado, la fórmula de la pérdida de energía en el resalto hidráulico es la siguiente.

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

La forma en que se resolvió este sistema de dos ecuaciones no lineales fue mediante la herramienta “Solver” del programa Excel, de la siguiente manera: se empieza definiendo un tirante anterior y_1 de prueba (que se le indicará al programa que itere), luego, con la primera ecuación presentada se obtiene el tirante conjugado y_2 asociado, posteriormente, se usan ambos tirantes en la segunda ecuación para obtener la pérdida de energía correspondiente a estos valores, para luego ser restada con la pérdida de carga objetivo (la que se obtuvo al restar las cotas de la línea de energía en dos puntos) y finalmente indicarle al programa que busque que dicha resta sea cero, cambiando el tirante anterior y_1 . A continuación, se muestra una tabla con la solución encontrada por el programa.

Tabla 13.

Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario para la experimentación

Elaboración propia

Tirante anterior y_1 (de prueba) (m)	Tirante conjugado y_2 (m)	Pérdida ΔE (m)	Pérdida $\Delta E_{\text{objetivo}}$ (m)	Diferencia de pérdidas $\Delta E - \Delta E_{\text{objetivo}}$ (m)
0.106	1.204	2.601	2.601	-6.048E-8

Estos tirantes se pueden verificar cuando, al restar la energía asociada al tirante anterior (tirante + carga de velocidad) de la cota de la línea de energía en el último punto de la transición, el resultado es igual que restar la energía asociada al tirante conjugado de la cota de la línea de

energía en punto final de la rampa de salida de la poza de disipación. El cálculo de la energía de cada tirante se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Resultados del resalto hidráulico – escenario para la experimentación

Elaboración propia

Tirante y	Área A	Velocidad V	Carga de Velocidad hV	Energía E
(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)
0.106	2.116	8.553	3.728	3.834
1.204	24.088	0.751	0.029	1.233

Y la resta de cotas de la línea de energía en los dos puntos con las energías de los tirantes se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 15.

Elevación de la poza de disipación – escenario para la experimentación

Elaboración propia

Cota	Energía	Diferencia 1	Cota	Energía	Diferencia 2
L.E.₁	E₁	L.E.₁ - E₁	L.E.₂	E₂	L.E.₂ - E₂
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
99.973	3.834	96.138	97.372	1.233	96.138

Entonces, se verifican los tirantes del resalto hidráulico. Esta diferencia usada para su comprobación corresponde a la cota del fondo de la poza de disipación. No obstante, la teoría recomienda aumentar su profundidad en un 40% de la energía del tirante conjugado, lo que hace que la nueva cota de fondo de la poza de disipación sea $96.138 - 40\% \cdot 1.233$, resultando 95.645 metros.

Luego, para el diseño de la longitud de la poza de disipación se debe calcular la longitud del resalto hidráulico. Para esto, se cuenta con la siguiente ecuación teórica.

$$L = 6 \cdot (y_2 - y_1)$$

El resultado es 6.591 metros para la longitud del resalto hidráulico, pero la longitud de la poza se redondea a 7.000 metros.

Este tramo de la ecuación presentada, que constituye la trayectoria, se empalma aguas abajo con una rampa de entrada a la poza de disipación con pendiente 2 horizontal por 1 vertical (2:1). La distancia vertical de esta rampa se obtiene de restar la cota del último punto de la trayectoria con la cota de la poza de disipación: $97.340 - 95.645 = 1.695$ metros, luego se multiplica por 2 para hallar la distancia horizontal: $2 \cdot 1.695 = 3.390$ metros y se redondea a la unidad superior, 4.000 metros. Luego, a esta rampa se empalma la poza de disipación, que es solamente un tramo horizontal (pendiente cero) con la longitud calculada para esta subparte. Finalmente, a la poza se empalma una rampa de salida con pendiente 1.5 horizontal por 1 vertical (1.5:1). En este caso, la distancia vertical de la rampa se obtiene de restar la cota de inicio de la siguiente rápida (punto inicial del canal de aproximación de la siguiente rápida)

con la cota de la poza de disipación: $96.710 - 95.645 = 1.065$ metros, y se multiplica esta distancia por 1.5 para obtener la distancia horizontal: $1.5 * 1.065 = 1.598$ metros, y también redondeada a la unidad superior, 2.000 metros.

En la siguiente figura se muestra el perfil del fondo de la poza de disipación diseñada.

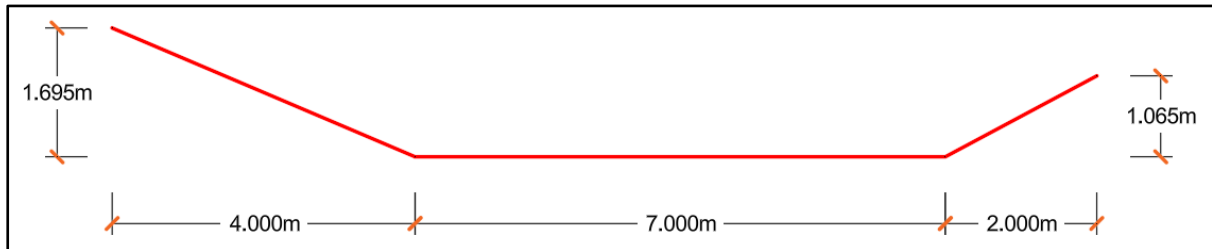


Figura 10.
Diseño de la poza de disipación – escenario para la experimentación
Elaboración propia

El perfil del fondo de la rápida completa, luego de todo el diseño se muestra en la siguiente figura.

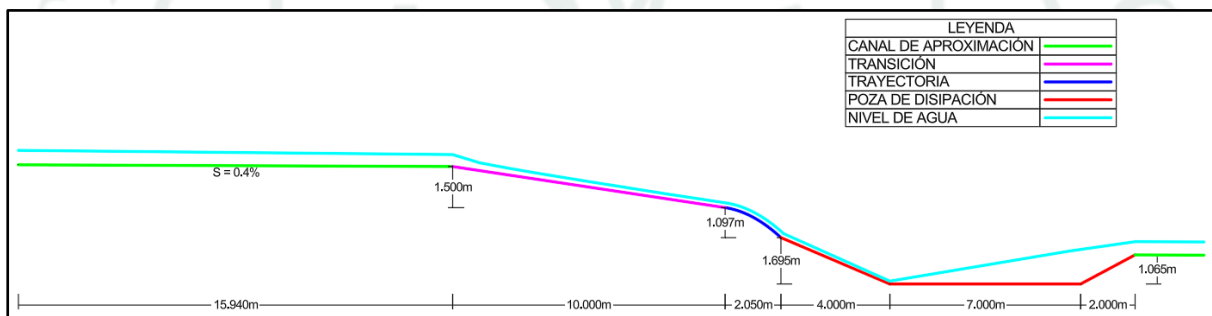


Figura 11.
Diseño de la rápida completa – escenario para la experimentación
Elaboración propia

Finalmente, las dimensiones del perfil longitudinal del fondo del prototipo mismo se obtienen al reducir la geometría multiplicando las longitudes por el factor $0.48/20 = 0.024$, respetando la relación de geometrías usadas en la semejanza hidráulica. En la siguiente figura se muestra el perfil longitudinal del prototipo, con las dimensiones reducidas.

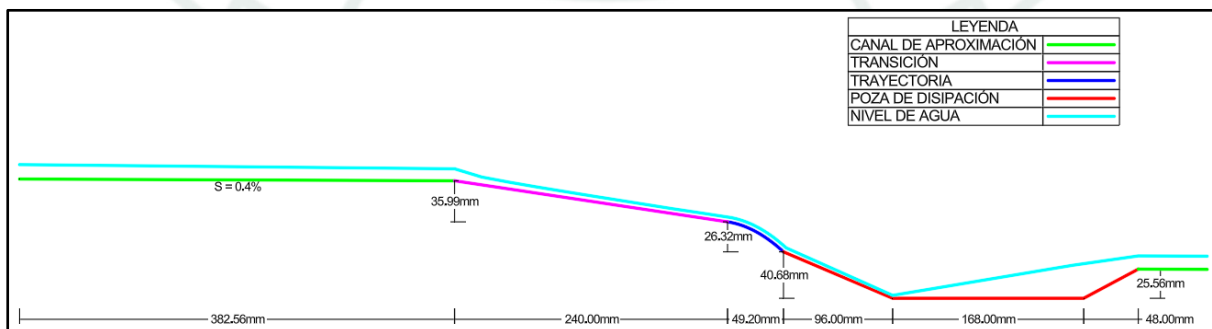


Figura 12.
Diseño de la rápida completa – escenario para la experimentación y escalado
Elaboración propia

4.2.2 Diseño 2: caudal 10 m³/s

Para este diseño y los siguientes, se mostrarán solamente las tablas de resultados y la composición final de la estructura en una figura.

Canal de Aproximación

Tabla 16.

Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de 10 m³/s

Elaboración propia

Tirante y (m)	Pendiente S (%)	Área A (m²)	Perímetro P (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)
0.418	0.4	4.178	10.836	2.393	0.292

Tabla 17.

Resultados críticos – escenario caudal de 10 m³/s

Elaboración propia

Tirante crítico y_c (m)	Área crítica A_c (m²)	Perímetro crítico P_c (m)	Velocidad crítica V_c (%)	Carga de velocidad crítica hV_c (m)
0.467	4.671	10.934	2.141	0.234

Transición

Tabla 18.

Resultados en la transición – escenario caudal de 10 m³/s

Elaboración propia

Tramo	y (m)	hV (m)	V (m/s)	A (m²)	y (m)	P (m)	Rh (m)	E (m)	Δh_e (m)	S_f (-)	h_f (m)	E+Δh_e-h_f (m)
0	0.467	0.234	2.141	4.671	0.467	10.934	0.427	0.701	0.081	0.003	0.003	0.779
1	0.341	0.438	2.932	3.411	0.341	10.682	0.319	0.779	0.081	0.008	0.007	0.853
2	0.305	0.548	3.280	3.049	0.305	10.610	0.287	0.853	0.081	0.011	0.010	0.924
3	0.282	0.643	3.551	2.816	0.282	10.563	0.267	0.924	0.081	0.014	0.013	0.992
4	0.265	0.728	3.778	2.647	0.265	10.529	0.251	0.992	0.081	0.018	0.016	1.057
5	0.251	0.806	3.976	2.515	0.251	10.503	0.239	1.057	0.081	0.021	0.019	1.120
6	0.241	0.879	4.152	2.408	0.241	10.482	0.230	1.120	0.081	0.024	0.022	1.179
7	0.232	0.947	4.311	2.320	0.232	10.464	0.222	1.179	0.081	0.027	0.024	1.236
8	0.225	1.011	4.454	2.245	0.225	10.449	0.215	1.236	0.081	0.030	0.027	1.289
9	0.218	1.071	4.585	2.181	0.218	10.436	0.209	1.289	0.081	0.033	0.030	1.341
10	0.213	1.128	4.704	2.126	0.213	10.425	0.204	1.341	0.081	0.036	0.033	1.389

Trayectoria

Tabla 19.

Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 10 m³/s

Elaboración propia

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
0	0.000	0.000	99.128	27	1.350	-0.529	98.599
1	0.050	-0.005	99.123	28	1.400	-0.564	98.564
2	0.100	-0.011	99.117	29	1.450	-0.600	98.528
3	0.150	-0.019	99.109	30	1.500	-0.638	98.490

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
4	0.200	-0.027	99.101	31	1.550	-0.676	98.452
5	0.250	-0.036	99.092	32	1.600	-0.716	98.412
6	0.300	-0.047	99.081	33	1.650	-0.757	98.371
7	0.350	-0.059	99.069	34	1.700	-0.799	98.329
8	0.400	-0.072	99.056	35	1.750	-0.842	98.286
9	0.450	-0.086	99.042	36	1.800	-0.886	98.242
10	0.500	-0.101	99.027	37	1.850	-0.931	98.197
11	0.550	-0.117	99.011	38	1.900	-0.978	98.150
12	0.600	-0.134	98.994	39	1.950	-1.025	98.103
13	0.650	-0.153	98.975	40	2.000	-1.074	98.054
14	0.700	-0.172	98.956	41	2.050	-1.123	98.005
15	0.750	-0.193	98.935	42	2.100	-1.174	97.954
16	0.800	-0.215	98.913	43	2.150	-1.226	97.902
17	0.850	-0.238	98.890	44	2.200	-1.279	97.849
18	0.900	-0.262	98.866	45	2.250	-1.334	97.794
19	0.950	-0.287	98.841	46	2.300	-1.389	97.739
20	1.000	-0.313	98.815	47	2.350	-1.445	97.683
21	1.050	-0.341	98.787	48	2.400	-1.503	97.625
22	1.100	-0.369	98.759	49	2.450	-1.562	97.566
23	1.150	-0.399	98.729	50	2.500	-1.621	97.507
24	1.200	-0.430	98.698	51	2.550	-1.682	97.446
25	1.250	-0.462	98.666	52	2.600	-1.744	97.384
26	1.300	-0.495	98.633				

Poza de Disipación

Tabla 20.

*Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 10 m³/s
Elaboración propia*

Tirante anterior y ₁ (de prueba) (m)	Tirante conjugado y ₂ (m)	Pérdida ΔE (m)	Pérdida ΔE _{objetivo} (m)	Diferencia de pérdidas ΔE - ΔE _{objetivo} (m)
0.109	1.314	3.049	3.049	1.607E-07

Tabla 21.

*Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 10 m³/s
Elaboración propia*

Tirante y (m)	Área A (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)	Energía E (m)
0.109	1.091	9.167	4.283	4.392
1.314	13.136	0.761	0.030	1.343

Tabla 22.

*Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de 10 m³/s
Elaboración propia*

Cota L.E. ₁ (m)	Energía E ₁ (m)	Diferencia 1 L.E. ₁ - E ₁ (m)	Cota L.E. ₂ (m)	Energía E ₂ (m)	Diferencia 2 L.E. ₂ - E ₂ (m)
----------------------------------	----------------------------------	---	----------------------------------	----------------------------------	---

100.469 4.392 96.076 97.420 1.343 96.076

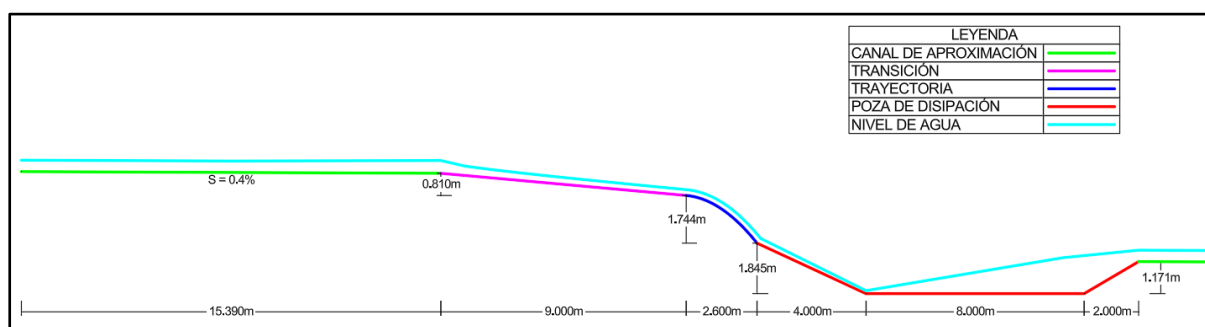


Figura 13.
Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$
Elaboración propia

4.2.3 Diseño 3: caudal $20 \text{ m}^3/\text{s}$

Canal de Aproximación

Tabla 23.
Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$
Elaboración propia

Tirante y (m)	Pendiente S (%)	Área A (m^2)	Perímetro P (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)
0.500	0.9	4.995	10.999	4.004	0.817

Tabla 24.
Resultados críticos – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$
Elaboración propia

Tirante crítico y_c (m)	Área crítica A_c (m^2)	Perímetro crítico P_c (m)	Velocidad crítica V_c (%)	Carga de velocidad crítica hV_c (m)
0.742	7.415	11.483	2.697	0.371

Transición

Tabla 25.
Resultados en la transición – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$
Elaboración propia

Tramo	y (m)	hV (m)	V (m/s)	A (m^2)	y (m)	P (m)	Rh (m)	E (m)	Δh_e (m)	S_f (-)	h_f (m)	$E + \Delta h_e - h_f$ (m)
0	0.742	0.371	2.697	7.415	0.742	11.483	0.646	1.112	0.049	0.003	0.002	1.160
1	0.608	0.552	3.289	6.080	0.608	11.216	0.542	1.160	0.049	0.005	0.003	1.205
2	0.564	0.641	3.547	5.638	0.564	11.128	0.507	1.205	0.049	0.006	0.004	1.250
3	0.533	0.716	3.749	5.335	0.533	11.067	0.482	1.250	0.049	0.007	0.005	1.294
4	0.510	0.784	3.921	5.100	0.510	11.020	0.463	1.294	0.049	0.008	0.006	1.337
5	0.491	0.846	4.074	4.909	0.491	10.982	0.447	1.337	0.049	0.010	0.007	1.379
6	0.475	0.904	4.213	4.748	0.475	10.950	0.434	1.379	0.049	0.011	0.007	1.421
7	0.461	0.960	4.340	4.608	0.461	10.922	0.422	1.421	0.049	0.012	0.008	1.462
8	0.449	1.013	4.458	4.486	0.449	10.897	0.412	1.462	0.049	0.013	0.009	1.502
9	0.438	1.064	4.569	4.377	0.438	10.875	0.402	1.502	0.049	0.014	0.010	1.541
10	0.428	1.113	4.673	4.280	0.428	10.856	0.394	1.541	0.049	0.015	0.010	1.580

Trayectoria

Tabla 26.

Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 20 m³/s

Elaboración propia

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
0	0.000	0.000	99.396	24	1.200	-0.409	98.987
1	0.050	-0.004	99.392	25	1.250	-0.440	98.956
2	0.100	-0.009	99.387	26	1.300	-0.472	98.924
3	0.150	-0.016	99.380	27	1.350	-0.506	98.890
4	0.200	-0.023	99.373	28	1.400	-0.540	98.856
5	0.250	-0.032	99.364	29	1.450	-0.576	98.820
6	0.300	-0.041	99.355	30	1.500	-0.613	98.783
7	0.350	-0.052	99.344	31	1.550	-0.651	98.745
8	0.400	-0.064	99.332	32	1.600	-0.690	98.706
9	0.450	-0.077	99.319	33	1.650	-0.730	98.666
10	0.500	-0.091	99.305	34	1.700	-0.771	98.625
11	0.550	-0.107	99.289	35	1.750	-0.814	98.582
12	0.600	-0.123	99.273	36	1.800	-0.857	98.539
13	0.650	-0.141	99.255	37	1.850	-0.902	98.494
14	0.700	-0.160	99.236	38	1.900	-0.948	98.448
15	0.750	-0.179	99.217	39	1.950	-0.995	98.401
16	0.800	-0.200	99.196	40	2.000	-1.043	98.353
17	0.850	-0.223	99.173	41	2.050	-1.092	98.304
18	0.900	-0.246	99.150	42	2.100	-1.142	98.254
19	0.950	-0.270	99.126	43	2.150	-1.194	98.202
20	1.000	-0.296	99.100	44	2.200	-1.246	98.150
21	1.050	-0.322	99.074	45	2.250	-1.300	98.096
22	1.100	-0.350	99.046	46	2.300	-1.355	98.041
23	1.150	-0.379	99.017	47	2.350	-1.411	97.985

Poza de Disipación

Tabla 27.

Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 20 m³/s

Elaboración propia

Tirante anterior y ₁ (de prueba) (m)	Tirante conjugado y ₂ (m)	Pérdida ΔE (m)	Pérdida ΔE _{objetivo} (m)	Diferencia de pérdidas ΔE - ΔE _{objetivo} (m)
0.210	1.869	2.911	2.911	-1.748E-06

Tabla 28.

Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 20 m³/s

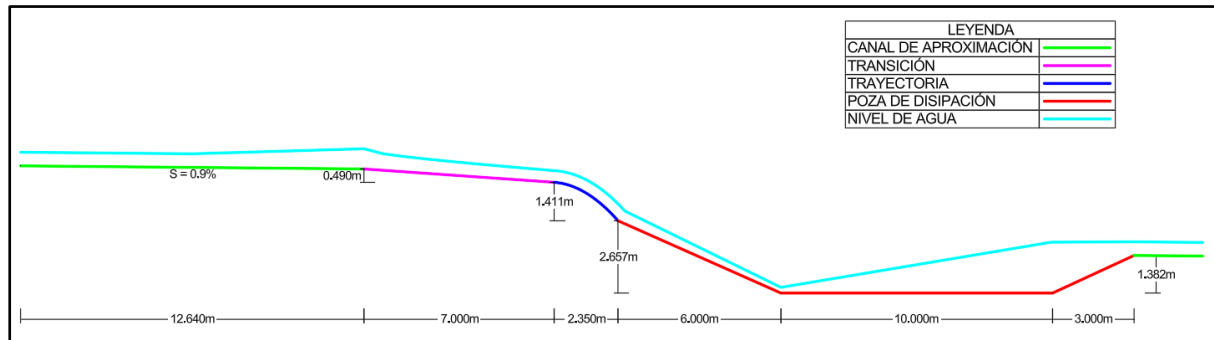
Elaboración propia

Tirante y (m)	Área A (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)	Energía E (m)
0.210	2.099	9.529	4.628	4.838
1.869	18.690	1.070	0.058	1.927

Tabla 29.Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaboración propia

Cota L.E. ₁ (m)	Energía E ₁ (m)	Diferencia 1 L.E. ₁ - E ₁ (m)	Cota L.E. ₂ (m)	Energía E ₂ (m)	Diferencia 2 L.E. ₂ - E ₂ (m)
100.937	4.838	96.099	98.027	1.927	96.099

**Figura 14.**Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de $20 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaboración propia

4.2.4 Diseño 4: caudal $30 \text{ m}^3/\text{s}$ **Canal de Aproximación****Tabla 30.**Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaboración propia

Tirante y (m)	Pendiente S (%)	Área A (m ²)	Perímetro P (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)
0.588	1.2	5.882	11.176	5.100	1.326

Tabla 31.Resultados críticos – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaboración propia

Tirante crítico y _c (m)	Área crítica A _c (m ²)	Perímetro crítico P _c (m)	Velocidad crítica V _c (%)	Carga de velocidad crítica hV _c (m)
0.972	9.717	11.943	3.087	0.486

Transición**Tabla 32.**Resultados en la transición – escenario caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaboración propia

Tramo	y (m)	hV (m)	V (m/s)	A (m ²)	y (m)	P (m)	Rh (m)	E (m)	Δh _e (m)	S _f (-)	h _f (m)	E+Δh _e -h _f (m)
0	0.972	0.486	3.087	9.717	0.972	11.943	0.814	1.458	0.025	0.002	0.001	1.481
1	0.858	0.624	3.498	8.576	0.858	11.715	0.732	1.481	0.025	0.004	0.002	1.504
2	0.817	0.688	3.674	8.166	0.817	11.633	0.702	1.504	0.025	0.004	0.002	1.527
3	0.787	0.740	3.811	7.873	0.787	11.575	0.680	1.527	0.025	0.005	0.002	1.550

4	0.764	0.786	3.927	7.639	0.764	11.528	0.663	1.550	0.025	0.005	0.003	1.572
5	0.744	0.828	4.031	7.443	0.744	11.489	0.648	1.572	0.025	0.006	0.003	1.595
6	0.727	0.867	4.125	7.273	0.727	11.455	0.635	1.595	0.025	0.006	0.003	1.616
7	0.712	0.904	4.212	7.123	0.712	11.425	0.623	1.616	0.025	0.007	0.003	1.638
8	0.699	0.939	4.293	6.988	0.699	11.398	0.613	1.638	0.025	0.007	0.003	1.660
9	0.687	0.973	4.370	6.866	0.687	11.373	0.604	1.660	0.025	0.007	0.004	1.681
10	0.675	1.006	4.442	6.754	0.675	11.351	0.595	1.681	0.025	0.008	0.004	1.702

Trayectoria

Tabla 33.

Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 30 m³/s

Elaboración propia

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
0	0.000	0.000	99.605	20	1.000	-0.299	99.306
1	0.050	-0.003	99.602	21	1.050	-0.327	99.278
2	0.100	-0.007	99.598	22	1.100	-0.357	99.248
3	0.150	-0.013	99.592	23	1.150	-0.387	99.218
4	0.200	-0.020	99.585	24	1.200	-0.419	99.186
5	0.250	-0.028	99.577	25	1.250	-0.452	99.153
6	0.300	-0.037	99.568	26	1.300	-0.486	99.119
7	0.350	-0.048	99.557	27	1.350	-0.522	99.083
8	0.400	-0.060	99.545	28	1.400	-0.558	99.047
9	0.450	-0.073	99.532	29	1.450	-0.596	99.009
10	0.500	-0.087	99.518	30	1.500	-0.636	98.969
11	0.550	-0.103	99.502	31	1.550	-0.676	98.929
12	0.600	-0.120	99.485	32	1.600	-0.718	98.887
13	0.650	-0.138	99.467	33	1.650	-0.761	98.844
14	0.700	-0.157	99.448	34	1.700	-0.805	98.800
15	0.750	-0.178	99.427	35	1.750	-0.851	98.754
16	0.800	-0.199	99.406	36	1.800	-0.897	98.708
17	0.850	-0.223	99.382	37	1.850	-0.945	98.660
18	0.900	-0.247	99.358	38	1.900	-0.995	98.610
19	0.950	-0.272	99.333				

Poza de Disipación

Tabla 34.

Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 30 m³/s

Elaboración propia

Tirante anterior y ₁ (de prueba)	Tirante conjugado y ₂	Pérdida ΔE	Pérdida ΔE _{objetivo}	Diferencia de pérdidas ΔE - ΔE _{objetivo}
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.312	2.274	2.662	2.662	-1.076E-05

Tabla 35.

Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 30 m³/s

Elaboración propia

Tirante y	Área A	Velocidad V	Carga de Velocidad hV	Energía E
(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)

0.312	3.120	9.616	4.713	5.025
2.274	22.742	1.319	0.089	2.363

Tabla 36.

Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de 30 m³/s

Elaboración propia

Cota L.E. ₁ (m)	Energía E ₁ (m)	Diferencia 1 L.E. ₁ - E ₁ (m)	Cota L.E. ₂ (m)	Energía E ₂ (m)	Diferencia 2 L.E. ₂ - E ₂ (m)
101.286	5.025	96.261	98.624	2.363	96.261

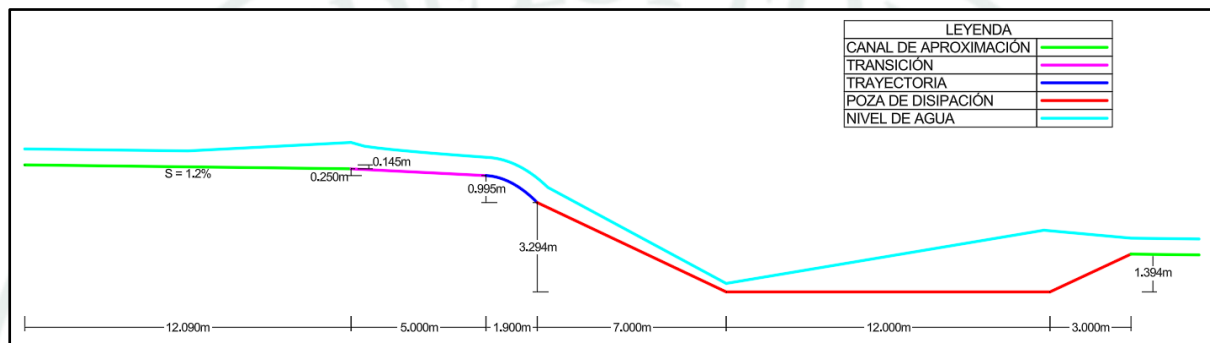


Figura 15.

Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 30 m³/s

Elaboración propia

4.2.5 Diseño 5: caudal 40 m³/s

Canal de Aproximación

Tabla 37.

Resultados en el canal de aproximación – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Tirante y (m)	Pendiente S (%)	Área A (m ²)	Perímetro P (m)	Velocidad V (m/s)	Carga de Velocidad hV (m)
0.644	1.6	6.437	11.287	6.214	1.968

Tabla 38.

Resultados críticos – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Tirante crítico y _c (m)	Área crítica A _c (m ²)	Perímetro crítico P _c (m)	Velocidad crítica V _c (%)	Carga de velocidad crítica hV _c (m)
1.177	11.771	12.354	3.398	0.589

Transición

Tabla 39.

Resultados en la transición – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Tramo	y (m)	hV (m)	V (m/s)	A (m ²)	y (m)	P (m)	Rh (m)	E (m)	Δh _e (m)	S _f (-)	h _f (m)	E+Δh _e -h _f (m)
0	1.177	0.589	3.398	11.771	1.177	12.354	0.953	1.766	0.016	0.002	0.001	1.781
1	1.075	0.706	3.721	10.749	1.075	12.150	0.885	1.781	0.016	0.003	0.001	1.795

2	1.037	0.759	3.858	10.368	1.037	12.074	0.859	1.795	0.016	0.004	0.001	1.810
3	1.009	0.801	3.964	10.090	1.009	12.018	0.840	1.810	0.016	0.004	0.002	1.824
4	0.987	0.838	4.055	9.865	0.987	11.973	0.824	1.824	0.016	0.004	0.002	1.839
5	0.967	0.871	4.135	9.674	0.967	11.935	0.811	1.839	0.016	0.004	0.002	1.853
6	0.951	0.902	4.208	9.507	0.951	11.901	0.799	1.853	0.016	0.005	0.002	1.867
7	0.936	0.931	4.275	9.357	0.936	11.871	0.788	1.867	0.016	0.005	0.002	1.881
8	0.922	0.959	4.338	9.221	0.922	11.844	0.779	1.881	0.016	0.005	0.002	1.895
9	0.910	0.985	4.397	9.097	0.910	11.819	0.770	1.895	0.016	0.005	0.002	1.909
10	0.898	1.011	4.453	8.983	0.898	11.797	0.761	1.909	0.016	0.006	0.002	1.923

Trayectoria

Tabla 40.

Puntos de la ecuación de la trayectoria – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Punto	X (m)	Y (m)	Elevación (m)
0	0.000	0.000	99.633	11	0.550	-0.097	99.536
1	0.050	-0.003	99.630	12	0.600	-0.113	99.520
2	0.100	-0.006	99.627	13	0.650	-0.131	99.502
3	0.150	-0.012	99.621	14	0.700	-0.149	99.484
4	0.200	-0.018	99.615	15	0.750	-0.169	99.464
5	0.250	-0.025	99.608	16	0.800	-0.191	99.442
6	0.300	-0.034	99.599	17	0.850	-0.213	99.420
7	0.350	-0.044	99.589	18	0.900	-0.237	99.396
8	0.400	-0.056	99.577	19	0.950	-0.262	99.371
9	0.450	-0.068	99.565	20	1.000	-0.288	99.345
10	0.500	-0.082	99.551	21	1.050	-0.315	99.318

Poza de Disipación

Tabla 41.

Cálculo del resalto con cálculo iterativo – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Tirante anterior y ₁ (de prueba)	Tirante conjugado y ₂	Pérdida ΔE	Pérdida ΔE _{objetivo}	Diferencia de pérdidas ΔE - ΔE _{objetivo}
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0.427	2.560	2.220	2.220	-2.007E-06

Tabla 42.

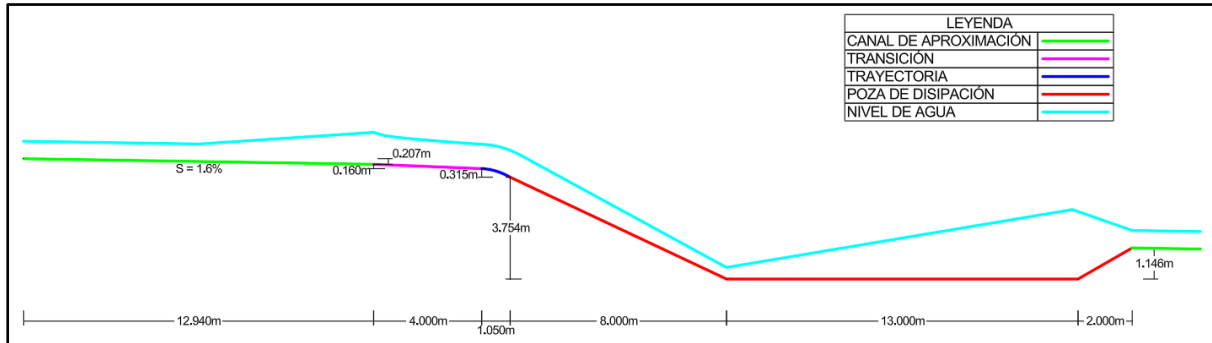
Resultados del resalto hidráulico – escenario caudal de 40 m³/s

Elaboración propia

Tirante y	Área A	Velocidad V	Carga de Velocidad hV	Energía E
(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)
0.427	4.268	9.373	4.478	4.904
2.560	25.595	1.563	0.124	2.684

Tabla 43.*Elevación de la poza de disipación – escenario caudal de 40 m³/s**Elaboración propia*

Cota L.E. ₁ (m)	Energía E ₁ (m)	Diferencia 1 L.E. ₁ - E ₁ (m)	Cota L.E. ₂ (m)	Energía E ₂ (m)	Diferencia 2 L.E. ₂ - E ₂ (m)
101.542	4.904	96.638	99.322	2.684	96.638

**Figura 16.***Diseño de la rápida completa – escenario de caudal de 40 m³/s**Elaboración propia*

4.3 Discusión

En la comparación del prototipo y la formulación teórica resaltó una diferencia: el resalto hidráulico ocurrió durante los primeros segundos en los que el caudal empezaba a pasar por la poza de disipación debido a que estaba vacía, pero en el transcurso del tiempo el resalto hidráulico fue haciéndose menos notorio y terminó ahogándose, es decir, había un solo tirante en la poza de disipación y parecía que no todo el volumen de agua en su interior estaba en movimiento.

A priori, se podría pensar que lo que genera esta estanqueidad de agua en la poza de disipación es su profundidad aumentada en 40%.

Por otro lado, también se encontraron diferencias entre los demás tirantes del prototipo (medidos físicamente y transformados al escenario real a través de la semejanza hidráulica) y sus correspondientes tirantes calculados por la formulación teórica, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 44.*Comparación de resultados formulación teórica – experimentación con prototipo**Elaboración propia*

	Prototipo	Formulación Teórica	Error Absoluto %
Tirante normal en el canal de salida (m)	0.708	0.482	31.9%
Tirante crítico al inicio de la transición (m)	0.208	0.437	110.1%
Tirante a la mitad de la transición (m)	0.145	0.201	38.6%
Tirante en la poza de disipación (m)	0.217	1.204 (y ₂)	454.8%
Tirante normal en el canal de salida (m)	0.833	0.482	42.1%

V. OBTENCIÓN DE TIRANTES DE SIMULACIÓN CFD PARA EL CASO DE ESTUDIO

5.1 Análisis Numérico con Simulación en CFD

5.1.1 Configuración de la simulación en el software

Se utilizó el software CFD de computadora Flow 3D para el desarrollo del presente capítulo. El funcionamiento de este software se basa en obtener resultados en cada unidad mínima de subdivisión de la geometría, cada cierto tiempo en el escenario real. Por ejemplo, una geometría podría estar subdividida en 5 mil bloques cúbicos pequeños, y obtener resultados de cada 0.5 segundos de simulación. Los resultados que fueron recopilados en cada simulación son únicamente los tirantes (Flow Depth) en diversos puntos a lo largo de la geometría.

Este software permite realizar simulaciones implementando diferentes modelos físicos que pueden ser combinados para su análisis en simultáneo. Para el propósito de la presente investigación se utilizaron los modelos físicos de “Gravedad y No Inerciales” y de “Turbulencia y Viscosidad”.

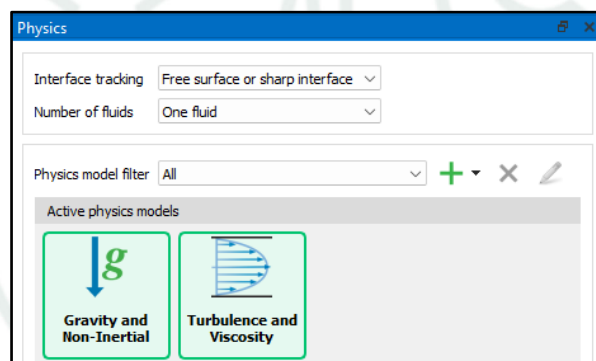


Figura 17.
*Modelos físicos seleccionados para la simulación
Captura de configuración del software Flow 3D*

El software permite seleccionar unidades físicas en diferentes sistemas. Para este caso, como se vino trabajando, se eligió el Sistema Internacional (SI) de unidades.

Por otro lado, se definió que las lecturas de presión sean manométricas y no absolutas.

También, se define la presión atmosférica de referencia, en este caso, la presión atmosférica típicamente conocida y que es la misma que muestra el software de forma predeterminada.

En cuanto a la temperatura de referencia, las propiedades del fluido se definirán de forma aparte y no vinculada a esta temperatura, por lo que en este caso no es influyente.

El tiempo de simulación se refiere al tiempo dentro del escenario que está siendo simulado, diferente al tiempo de cómputo, que se refiere al tiempo real que le toma a la computadora en procesar los cálculos. Para este caso, se llegó al tiempo de 40 segundos luego de varios análisis,

al notar que en un tiempo de 30 segundos el escenario hidráulico todavía no es estable y que en tiempos superiores a 40 segundos el escenario hidráulico estará siempre estabilizado.

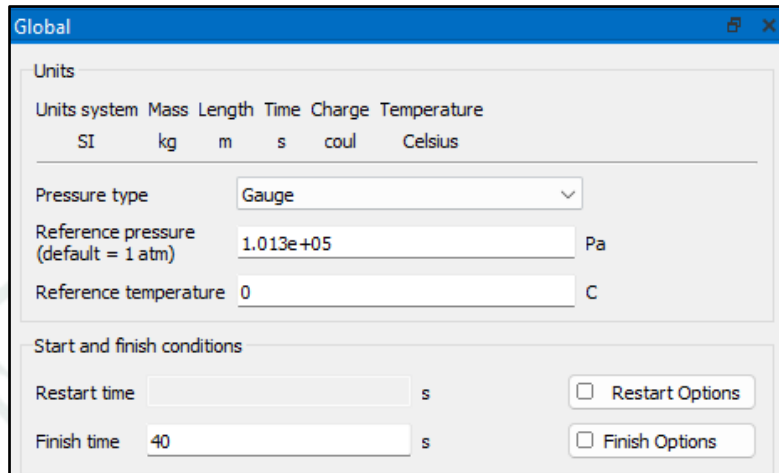


Figura 18.
Configuración global, de unidades y tiempo de finalización
Captura de configuración del software Flow 3D

Se configuró el agua como el líquido en la simulación y sus propiedades de densidad, compresibilidad y viscosidad con los valores predeterminados que muestra el software. Nuevamente, las propiedades térmicas no se consideraron debido a que no se trabajaría con modelos físicos que contemplen y dependan de las propiedades térmicas del agua.

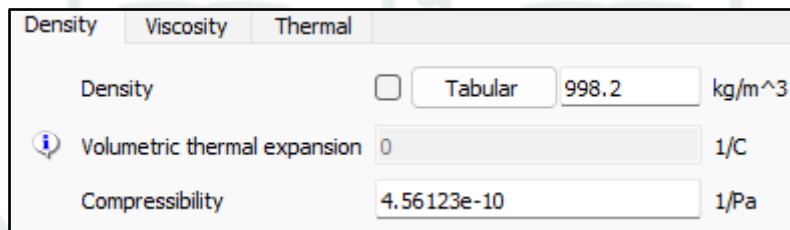


Figura 19.
Configuración de la densidad del fluido
Captura de configuración del software Flow 3D

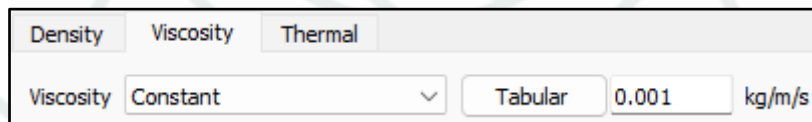


Figura 20.
Configuración de la viscosidad del fluido
Captura de configuración del software Flow 3D

Para la configuración del modelo físico de “Gravedad y No Inerciales” solo se indicó el vector de aplicación de la gravedad mediante sus componentes cartesianas.

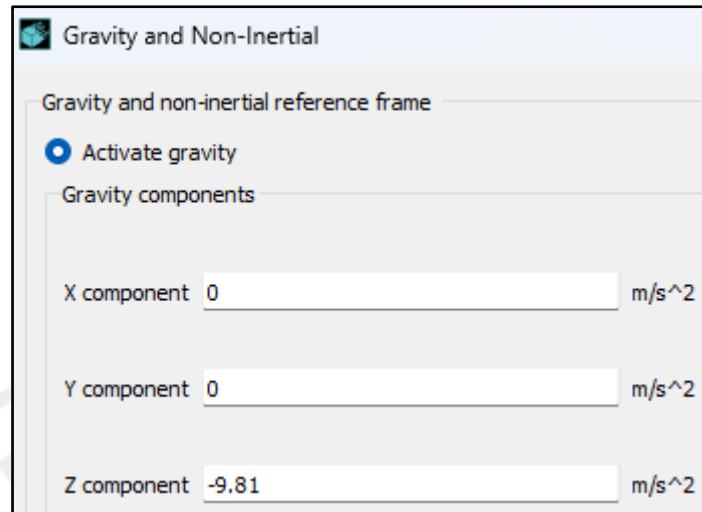


Figura 21.

Configuración del modelo físico de “Gravedad y No Inerciales”

Captura de configuración del software Flow 3D

La configuración del modelo físico de “Turbulencia y Viscosidad” permite definir el modelo de turbulencia y el esquema de cierre que implementará el software para solucionar las ecuaciones de flujo de Navier-Stokes. En este caso, se definió el modelo de turbulencia “Reynolds Averaged Navier Stokes” RANS y el esquema de cierre k-epsilon k-e por conveniencia de ahorro de espacio y tiempo de procesamiento y porque los resultados son lo suficientemente específicos para el propósito de la presente investigación.

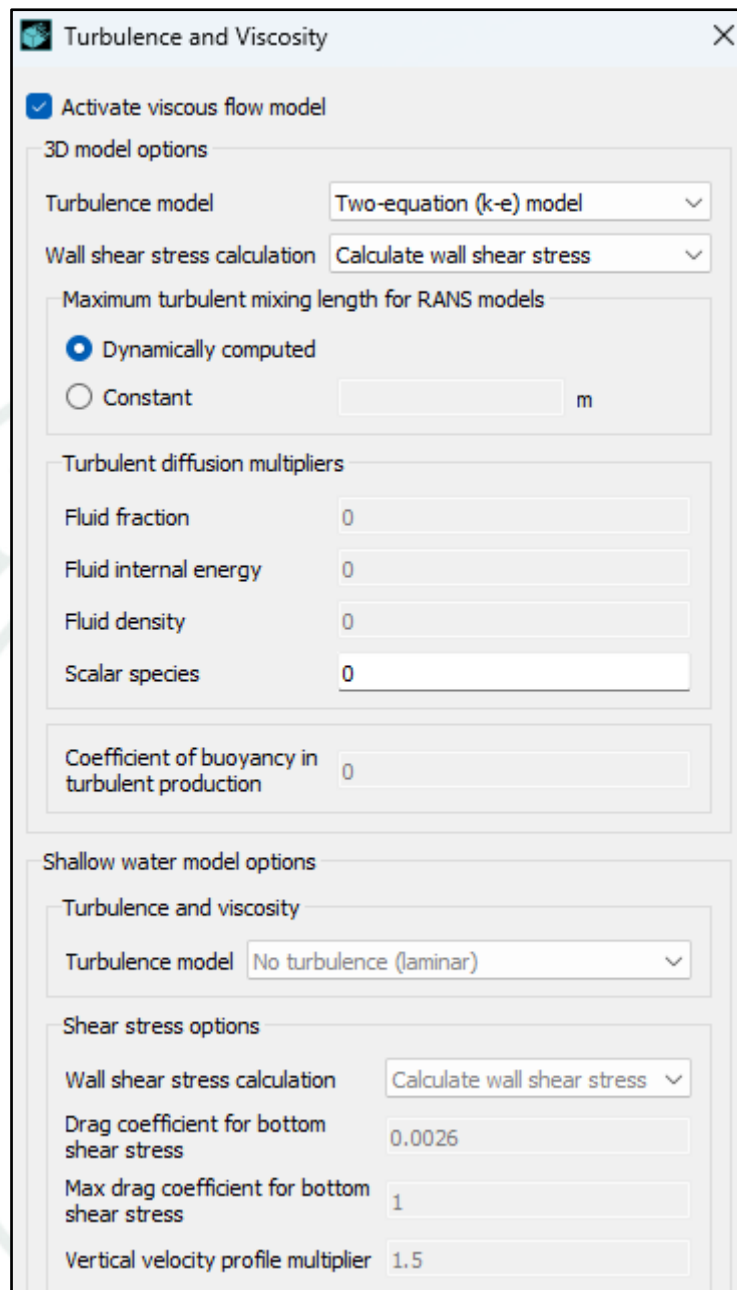


Figura 22.

Configuración del modelo físico de “Turbulencia y Viscosidad”

Captura de configuración del software Flow 3D

Posteriormente, se carga la geometría sólida de la estructura en un formato de archivo de estereolitografía (.stl). Se decidió comenzar simulando el escenario de mayor caudal puesto que antes de llegar a una configuración final de malla e intervalo de tiempo se debe probar diferentes configuraciones y ver la que produzca los resultados más óptimos; y el escenario de mayor caudal es el que demanda los resultados más precisos. La geometría cargada debe ser configurada con las propiedades que influyen en los modelos físicos seleccionados, en este caso, la rugosidad superficial. No obstante, el programa solo permite indicar la rugosidad superficial como rugosidad absoluta. Para la conversión pertinente, se utilizó siguiendo el

planteamiento de Strickler, que deriva en al siguiente fórmula, donde “ k_s ” es la rugosidad absoluta en metros y “ a ” puede adoptar valores entre 21 y 29.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{a}$$

En el caso de análisis se consideró adoptar el valor de $a = 26$. Entonces, se calculó la rugosidad superficial de la siguiente manera.

$$k_s = (26 * n)^6 = (26 * 0.014)^6 = 0.002323 \text{ m}$$

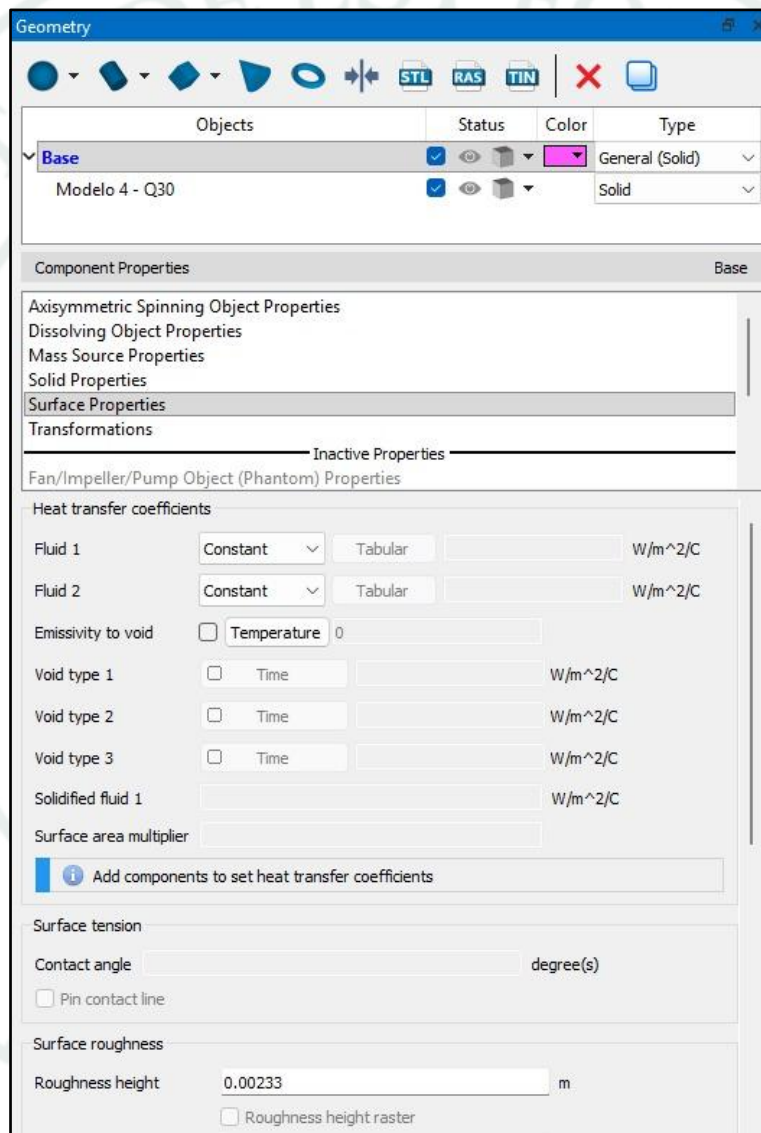


Figura 23.

Configuración de la geometría

Captura de configuración del software Flow 3D

El paso siguiente fue la discretización espacial o mallado. Luego de varios intentos, se determinó analizar simplemente una franja central representativa de 20 cm de ancho para optimizar la cantidad de almacenamiento en disco y tiempo de procesamiento que tomaría cada

simulación. Esta opción fue posible gracias a que el software permite colocar condiciones de frontera (boundary conditions) de simetría lateral a los planos del bloque de malla.

También, se hizo una configuración más con el propósito de optimizar el almacenamiento y tiempo al definir 4 bloques de malla de diferente tamaño de celda, haciendo que una malla más fina, de 5 cm, sea aplicada desde la transición hasta el final de la rampa de entrada de la poza de disipación debido a que la geometría es más específica en esta zona, respecto de la malla intermedia, de 10 cm, aplicada en la parte horizontal de la poza de disipación hasta antes de comenzar el canal de salida, y respecto de las 2 mallas más gruesas, de 20 cm, que se ubican en el canal de aproximación y canal de salida.

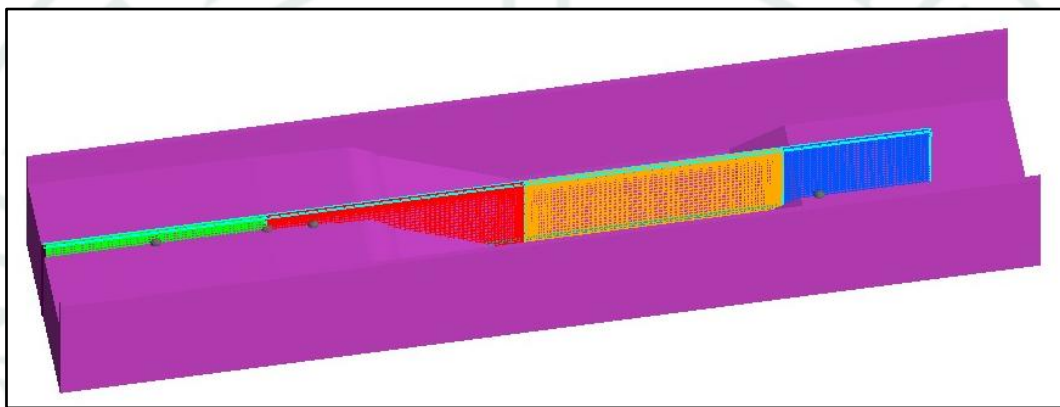


Figura 24.

*Vista de la geometría con los bloques de malla
Captura de configuración del software Flow 3D*

Como paso siguiente, se definieron las condiciones de frontera de cada uno de los 6 planos que delimitan cada malla. Estos planos están nombrados siguiendo el sistema cartesiano de coordenadas: X mínimo, X máximo, Y mínimo, Y máximo, Z mínimo y Z máximo. Para todos los bloques de malla, los planos Y mínimo y Y máximo están asignados con la condición de frontera de “Simetría”, que significa que el fluido en la proximidad tendrá la misma forma y propiedades, librando así la necesidad de simular todo el ancho de la sección. También, todos los bloques de malla tendrán el plano Z mínimo con la condición de frontera “Pared”, que significa que debajo del bloque se encuentra un espacio sólido, el cual no estará lleno de fluido en ningún momento. La última condición de frontera que comparten todos los bloques de malla es la del plano Z máximo, que es “Presión”, ya que el plano superior de cada bloque de malla estaría abierto a la atmósfera, por lo cual se le debía indicar una presión manométrica de cero. Las condiciones de frontera de los planos X de cada bloque de malla tenían que ser diferentes, ya que los bloques de malla estaban distribuidos también a lo largo de este eje.

Al primer bloque de malla se le asignó el plano X mínimo con una condición de frontera de “Tasa de Flujo Volumétrico”, es decir, en esta condición de frontera se asignaría el caudal. El

plano X máximo fue asignado con la condición de frontera de “Simetría” debido a que es el plano común que comparte con el bloque de malla adyacente, y se debía indicar que el flujo que finaliza en el primer bloque de malla tendrá las mismas propiedades con las que iniciará en el segundo bloque de malla. En otras palabras, es la condición de frontera que definiría la transferencia de propiedades de dos bloques de malla adyacentes.

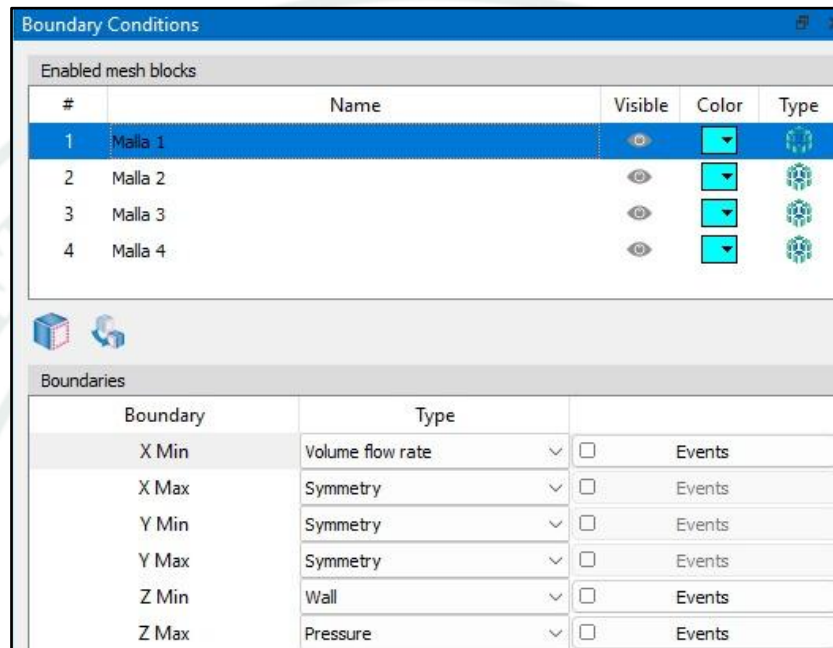


Figura 25.
Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 1
Captura de configuración del software Flow 3D

El segundo bloque de malla, al tener dos bloques de malla adyacentes en la dirección X, tuvo asignada la condición de frontera de “Simetría” en los dos planos, X mínimo y X máximo.

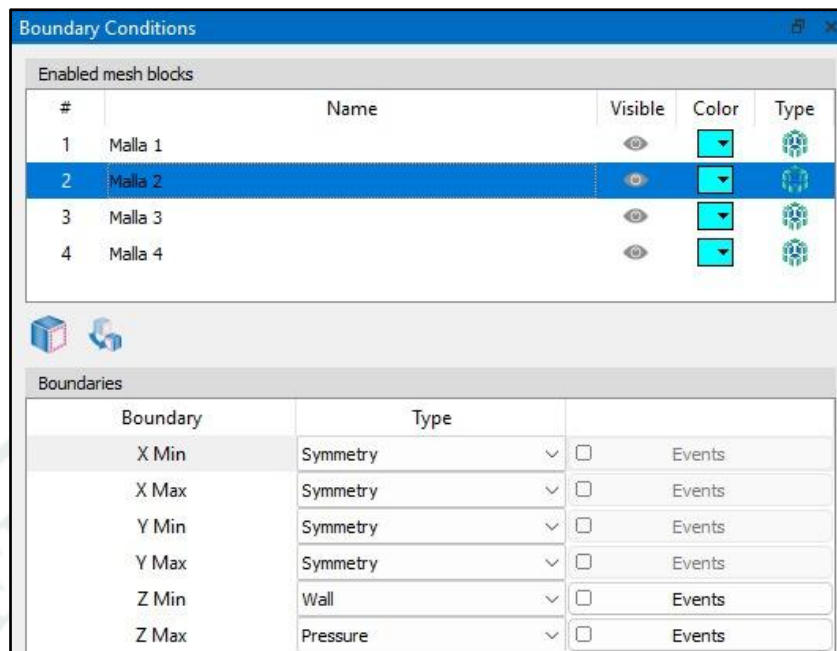


Figura 26.
 Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 2
 Captura de configuración del software Flow 3D

El tercer bloque de malla también tuvo el plano X mínimo y X máximo con la condición de “Simetría”, siguiendo el mismo criterio que para el segundo bloque de malla.

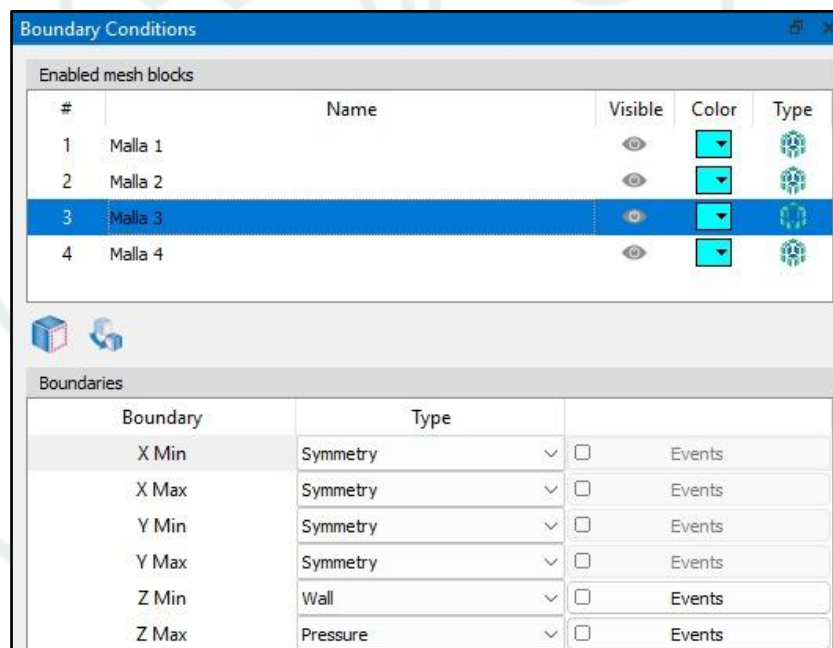


Figura 27.
 Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 3
 Captura de configuración del software Flow 3D

El último bloque de malla fue asignado con la condición de frontera de “Simetría” en el plano X mínimo porque es un plano común con el bloque adyacente anterior. No así, el plano X

máximo fue asignado con la condición de frontera “Presión” puesto que se le debía indicar al software la presión y tirante con los que saldría el fluido.

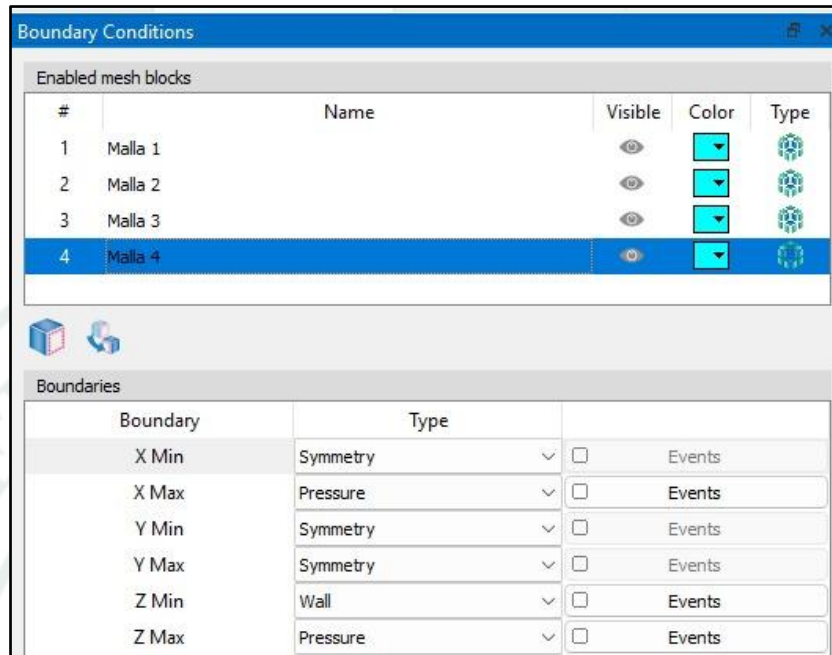


Figura 28.

*Arreglo de las condiciones de frontera del bloque de malla 4
Captura de configuración del software Flow 3D*

Además, cada condición de frontera tiene una parte configurable. Para este caso, solo se configuraron las condiciones de frontera de “Tasa de Flujo Volumétrico” en el plano X mínimo del primer bloque (a la entrada) y “Presión” en el plano X máximo del último bloque (a la salida).

La condición de frontera “Tasa de Flujo Volumétrico” se configuró con un caudal reducido debido a que no se estaba considerando para la simulación el ancho de sección completo. Entonces, se calculó proporcionalmente el caudal que pasaría por la franja del ancho especificado. En la siguiente figura se observa el caudal reducido para el escenario de caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. También, se estableció el tirante con el que ingresará el caudal ya que, modo contrario, el software estaría haciendo ingresar el fluido en toda la altura del bloque de malla. Adicionalmente, se configuró el fluido con un vector de dirección inicial usando coordenadas cartesianas para asegurar que el flujo esté ingresando en la dirección correcta

Boundary	Type		Events
X Min	Volume flow rate	☐	Events
X Max	Symmetry	☐	Events
Y Min	Symmetry	☐	Events
Y Max	Symmetry	☐	Events
Z Min	Wall	☐	Events
Z Max	Pressure	☐	Events

Volume flow rate

Volume flow rate ☐ Time 0.6 m³/s

Horizontal velocity profile Uniform

Flow direction vector

X 1

Y 0

Z 0

Fluid distribution

Type Use fluid elevation

Fluid fraction ☐ Time 1

Fluid elevation type Specify fluid elevation

Fluid elevation ☐ Time 5.772 m

Figura 29.

*Configuración de la condición de frontera “Tasa de Flujo Volumétrico”
Captura de configuración del software Flow 3D*

La condición de frontera “Simetría” a la salida del último bloque se configuró marcando la casilla de “Flujo de Salida de Presión” ya que es precisamente la condición que se quería definir.

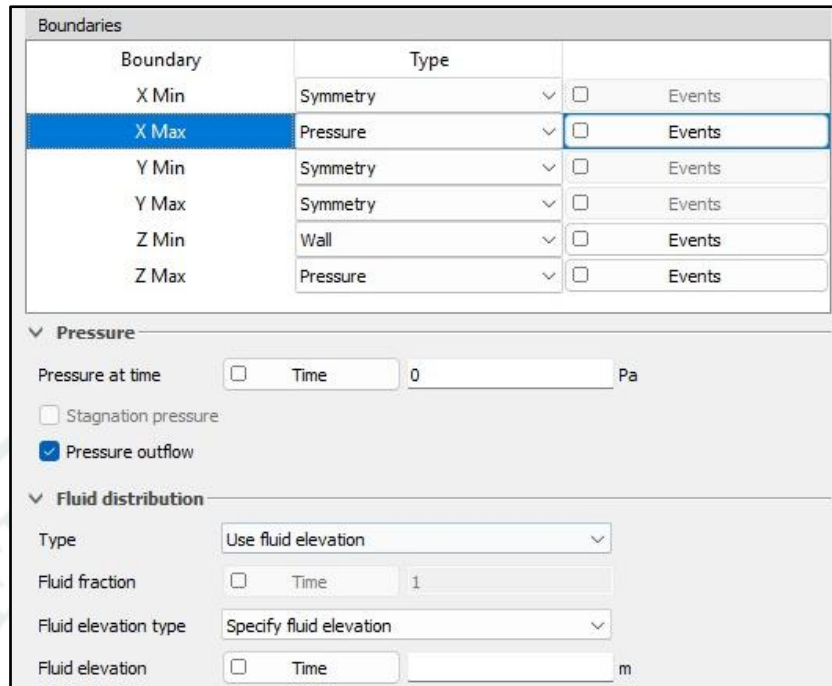


Figura 30.
Configuración de la condición de frontera “Presión”
Captura de configuración del software Flow 3D

Como paso siguiente previo a la corrida de la simulación, se estableció una condición inicial que haga que la poza de disipación esté llena, ya que en el escenario real la poza de disipación quedaría llena cada vez que se detenga el trasvase de agua. Entonces, se asignó una condición inicial global del tipo “Presión Hidrostática”, estableciendo la elevación del volumen de agua (dentro del sistema de coordenadas) que se encontraría en el modelo físico desde el segundo cero.

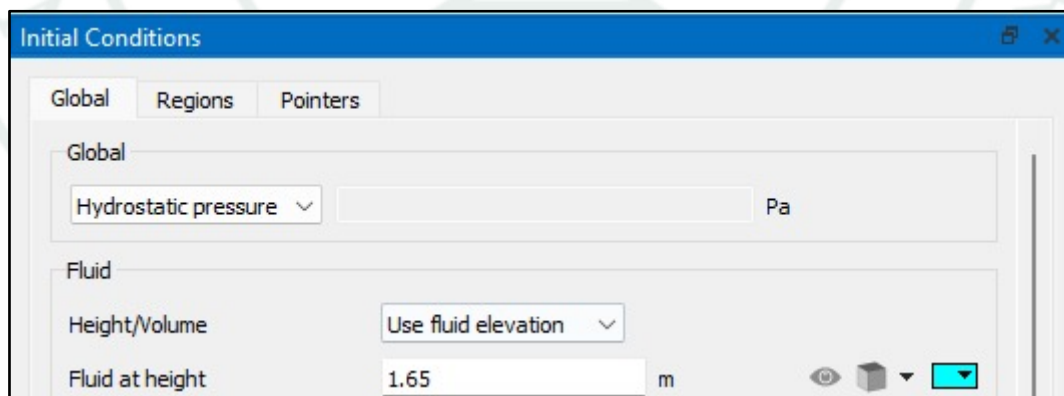


Figura 31.
Configuración de las condiciones iniciales
Captura de configuración del software Flow 3D

Posteriormente, para obtener los resultados en lugares específicos, se establecieron, mediante coordenadas cartesianas, “Puntos de Sondeo” en los siguientes puntos: mitad del canal de

aproximación, inicio de la transición, mitad de la transición, tirante anterior y conjugado en la poza de disipación, primeros metros en el canal de salida.

Finalmente, se configuró un intervalo de tiempo de análisis de 0.25 segundos y se corrió la simulación.

5.1.2 Diseño 1: caudal 10 m³/s

En cada diseño, se mostrarán los siguientes resultados: mapa de calor de tirantes del perfil longitudinal en el punto estable de la simulación, gráficas de tirante contra tiempo de simulación en cada punto de sondeo y promedio de tirantes en la región estable (obtenido de los reportes tabulares de los tirantes en los puntos de sondeo cada 0.25 segundos, adjuntos en el anexo 2). Las gráficas de tirante contra tiempo aparecen en el orden: canal de aproximación, inicio de transición, media transición, tirante anterior, tirante conjugado y canal de salida.

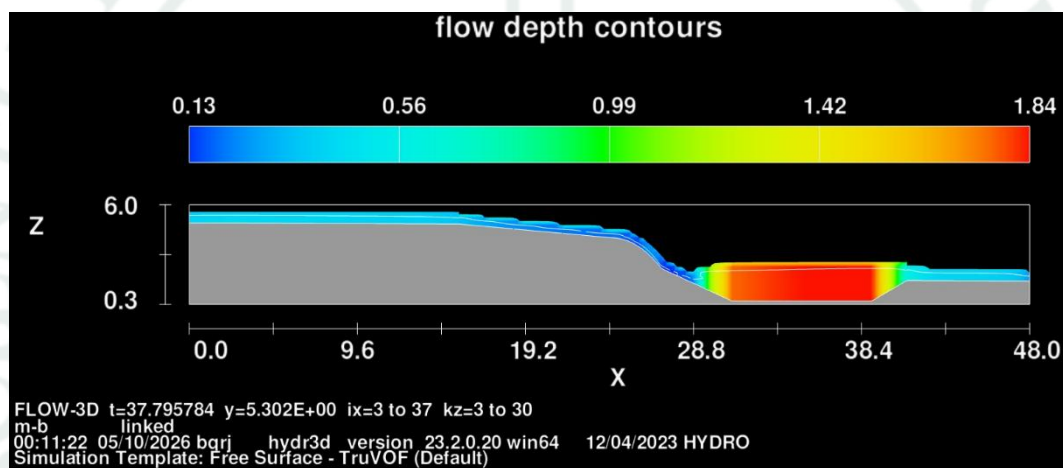


Figura 32.

Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 10m³/s
Captura de resultados del software Flow 3D

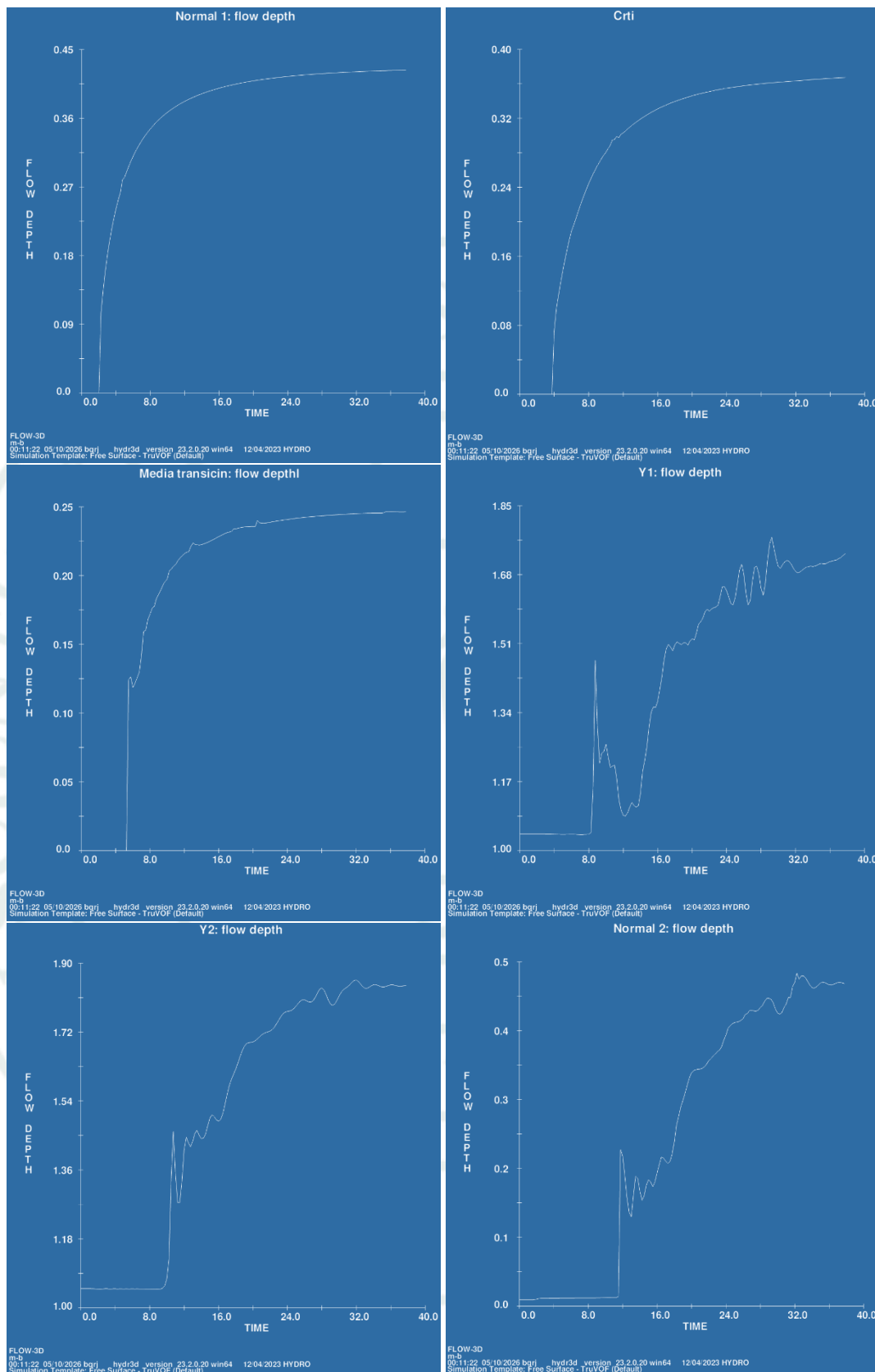


Figura 33.

Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal $10 \text{ m}^3/\text{s}$
 Captura de resultados del software Flow 3D

5.1.3 Diseño 2: caudal 20 m³/s

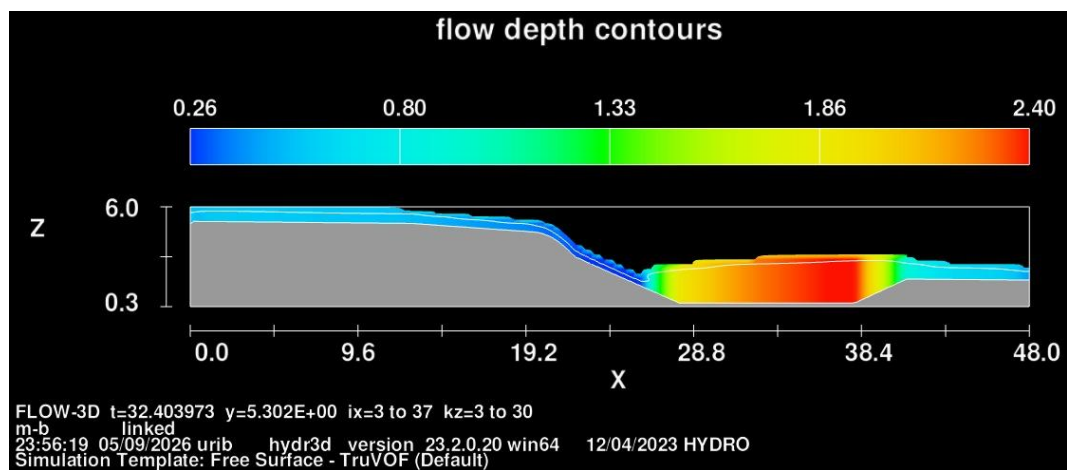


Figura 34.

Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 20 m³/s

Captura de resultados del software Flow 3D

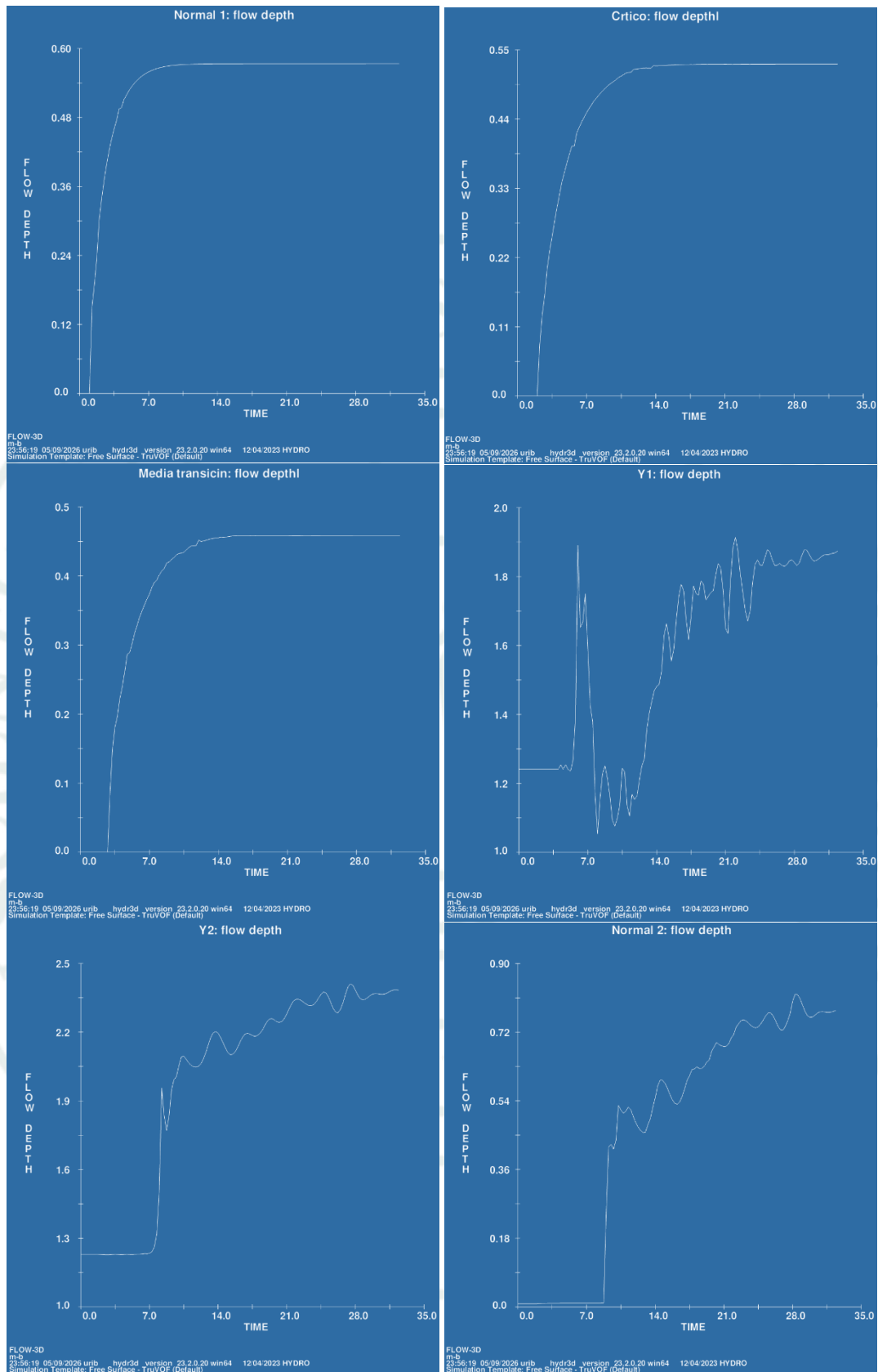


Figura 35.
Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 20 m³/s
Captura de resultados del software Flow 3D

5.1.4 Diseño 3: caudal 30 m³/s

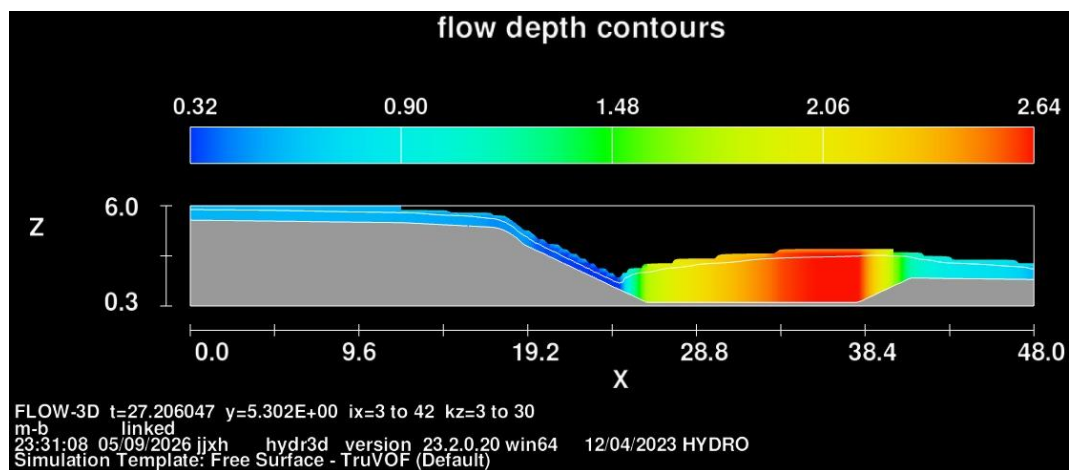


Figura 36.

*Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 30 m³/s
Captura de resultados del software Flow 3D*

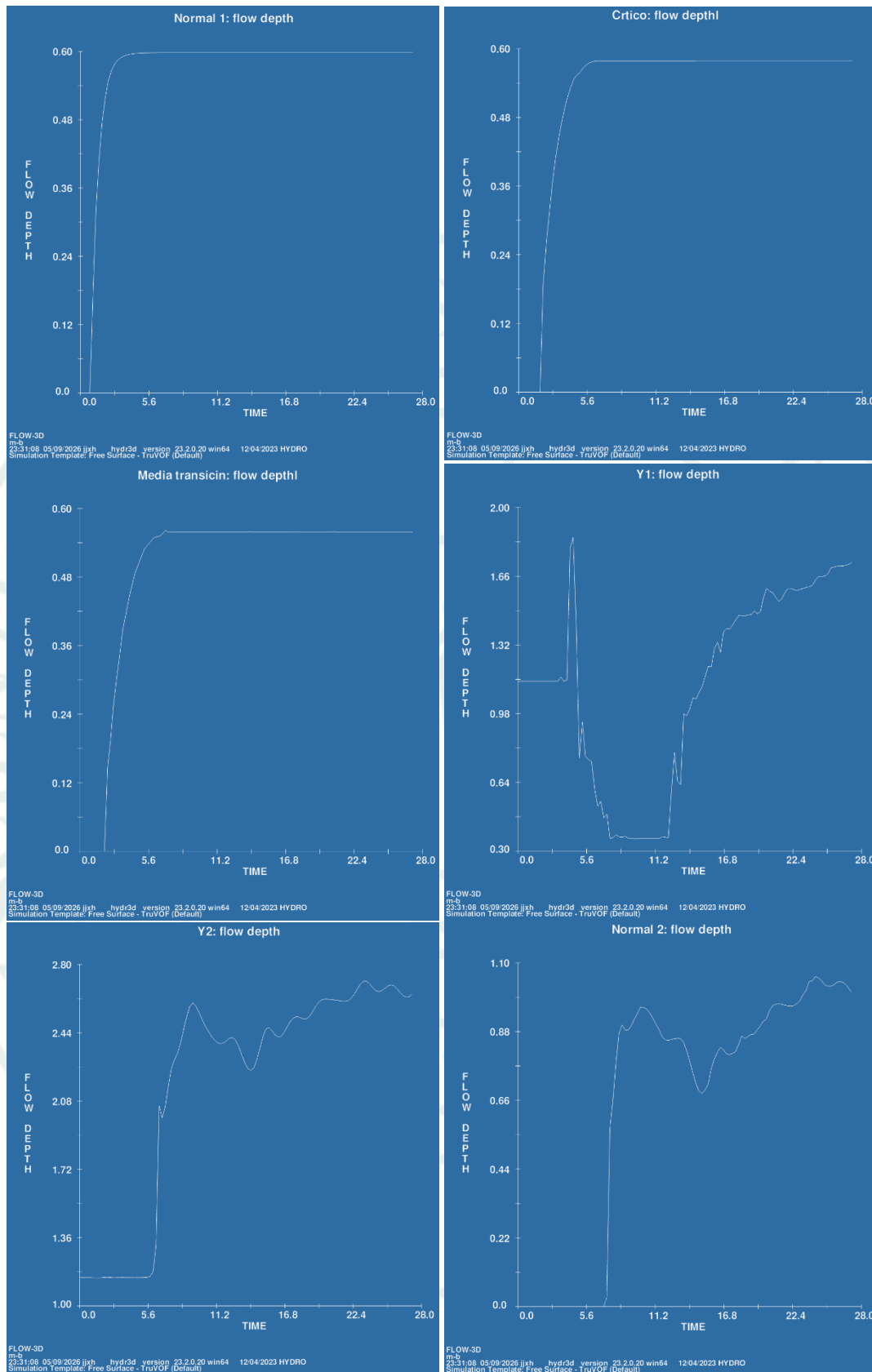


Figura 37.
Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal $30 \text{ m}^3/\text{s}$
Captura de resultados del software Flow 3D

5.1.5 Diseño 4: caudal 40 m³/s

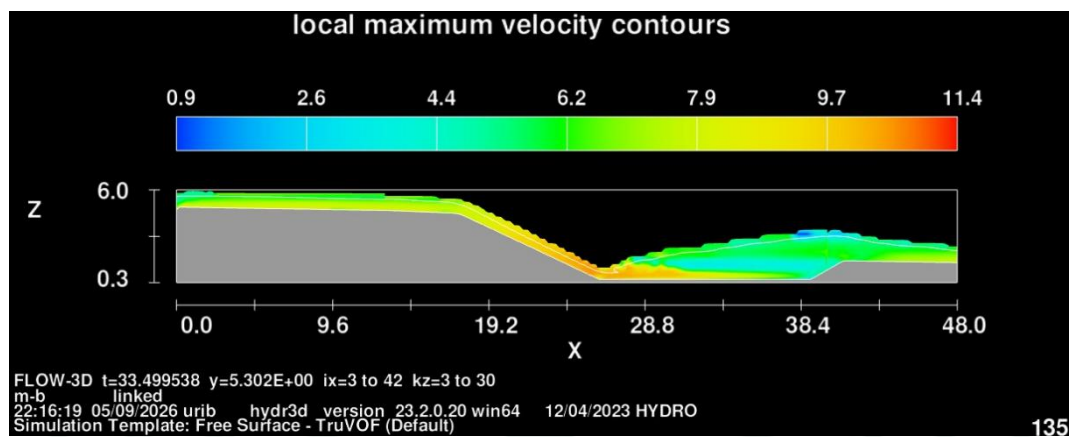


Figura 38.

*Perfil de agua de la simulación del escenario de caudal 40 m³/s
Captura de resultados del software Flow 3D*

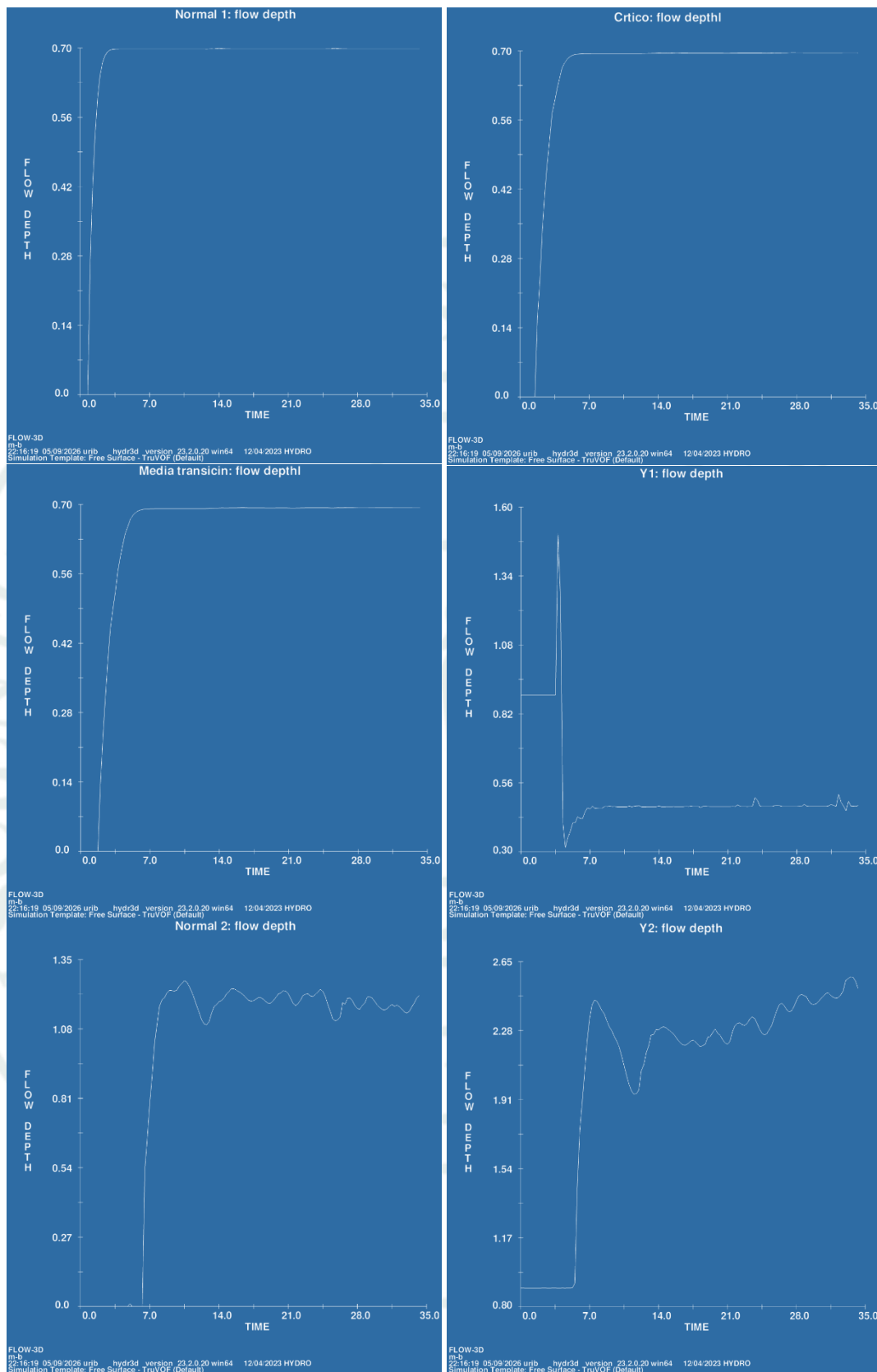


Figura 39.
 Gráficas tirante vs tiempo de simulación del escenario de caudal 40 m³/s
 Captura de resultados del software Flow 3D

5.2 Discusión

Las simulaciones fueron corridas implementando el modelo de turbulencia RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) con el esquema de cierre k- ϵ (k-épsilon). No obstante, no se analizó otro esquema de cierre del modelo de turbulencia RANS, como podría ser el esquema de cierre de Grupo Renormalizado (RNG), por dos motivos: por conveniencia de menor tiempo de cómputo y menor almacenamiento utilizado, y porque la turbulencia, si bien influye en los tirantes, no tiene una participación notablemente mayor en el fenómeno hidráulico analizado, como sí lo tiene las fuerzas inerciales de gravedad.

El tiempo de simulación se detuvo antes de completar todo el tiempo indicado en la configuración debido a que el programa permite visualizar los resultados según los va obteniendo antes de completar la simulación en todo el tiempo indicado inicialmente, y al ver los resultados de tirantes en los puntos establecidos se observó que comenzaban a estabilizarse. Haber esperado a que la simulación termine no habría conducido a resultados muy diferentes debido a que para la comparación posterior con otros resultados, se tomará el valor promedio de la región de tiempo estable.

VI. CONTRASTE DE APLICACIÓN DE AMBOS MÉTODOS

6.1 Validación mediante errores promedio

Luego de comparar los resultados de la formulación teórica con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el software Flow 3D en las 6 locaciones mostradas, se calculó el error absoluto porcentual de los primeros respecto de los últimos. Posteriormente, se elevó al cuadrado estos errores pero expresados en decimal. Finalmente, se calculó el promedio de los errores porcentuales directamente y se obtuvo la raíz cuadrada del promedio de los errores elevados al cuadrado, expresando al final ambos promedios en porcentaje.

Este procedimiento se aplicó a 14 combinaciones juntando 1, 2, 3 y 4 escenarios en simultáneo para su comparación.

La nomenclatura de los escenarios que se muestra en las siguientes tablas corresponde de la siguiente manera: Escenario 1 es el del caudal de 10 m³/s, Escenario 2 es el del caudal de 20 m³/s, Escenario 3 es el del caudal de 30 m³/s y Escenario 4 es el del caudal de 40 m³/s.

Comparaciones entre combinaciones de 1 escenario

Tabla 45.

Errores formulación teórica – simulación – Escenario 1
Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
	Promedio		27.3%	41.7%

Tabla 46.

Errores formulación teórica – simulación – Escenario 2
Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
	Promedio		34.3%	43.6%

Tabla 47.

Errores formulación teórica – simulación – Escenario 3

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
	Promedio		40.3%	49.0%

Tabla 48.

Errores formulación teórica – simulación – Escenario 4

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
	Promedio		29.1%	37.7%

Comparaciones entre combinaciones de 2 escenarios

Tabla 49.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
	Promedio		30.8%	42.7%

Tabla 50.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-3

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
	Promedio		33.8%	45.5%

Tabla 51.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-4

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
	Promedio		28.2%	39.8%

Tabla 52.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-3

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
	Promedio		37.3%	46.4%

Tabla 53.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-4

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
	Promedio		31.7%	40.8%

Tabla 54.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 3-4

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
	Promedio		34.7%	43.7%

Comparaciones entre combinaciones de 3 escenarios

Tabla 55.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-3

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
	Promedio		33.9%	44.9%

Tabla 56.*Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-4**Elaboración propia*

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
		Promedio	30.2%	41.1%

Tabla 57.*Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-3-4**Elaboración propia*

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
		Promedio	32.2%	43.1%

Tabla 58.*Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 2-3-4**Elaboración propia*

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
		Promedio	34.5%	43.7%

Comparaciones entre combinaciones de 4 escenarios

Tabla 59.

Errores formulación teórica – simulación – Combinación de escenarios 1-2-3-4

Elaboración propia

Tirante (m)	Flow 3D	Teórico	% Error Abs	(Error Abs)²
Canal de aproximación - Escenario 1	0.423	0.418	1.2%	0.000140
Inicio de transición - Escenario 1	0.367	0.467	27.2%	0.074245
Mitad de transición - Escenario 1	0.246	0.251	2.0%	0.000413
Tirante anterior - Escenario 1	1.717	0.109	93.7%	0.877064
Tirante conjugado - Escenario 1	1.841	1.314	28.6%	0.081943
Canal de salida - Escenario 1	0.469	0.418	10.9%	0.011825
Canal de aproximación - Escenario 2	0.574	0.500	12.9%	0.016620
Inicio de transición - Escenario 2	0.528	0.742	40.5%	0.164271
Mitad de transición - Escenario 2	0.458	0.491	7.2%	0.005192
Tirante anterior - Escenario 2	1.861	0.210	88.7%	0.787048
Tirante conjugado - Escenario 2	2.374	1.869	21.3%	0.045250
Canal de salida - Escenario 2	0.771	0.500	35.1%	0.123546
Canal de aproximación - Escenario 3	0.598	0.588	1.7%	0.000280
Inicio de transición - Escenario 3	0.579	0.972	67.9%	0.460710
Mitad de transición - Escenario 3	0.559	0.744	33.1%	0.109527
Tirante anterior - Escenario 3	1.704	0.312	81.7%	0.667328
Tirante conjugado - Escenario 3	2.660	2.274	14.5%	0.021058
Canal de salida - Escenario 3	1.028	0.588	42.8%	0.183197
Canal de aproximación - Escenario 4	0.698	0.644	7.7%	0.005985
Inicio de transición - Escenario 4	0.696	1.177	69.1%	0.477608
Mitad de transición - Escenario 4	0.694	0.967	39.3%	0.154741
Tirante anterior - Escenario 4	0.476	0.427	10.3%	0.010597
Tirante conjugado - Escenario 4	2.491	2.560	2.8%	0.000767
Canal de salida - Escenario 4	1.173	0.644	45.1%	0.203383
	Promedio		32.7%	43.2%

Como resultado, el mínimo error promedio directo de entre todas las combinaciones es 27.3% y se da en la combinación de únicamente el escenario 1. Por otro lado, el mínimo error porcentual obtenido hallando la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado es 37.7% y ocurre en la combinación de únicamente el escenario 4.

6.2 Discusión

Las diferencias entre los resultados de la simulación en Flow 3D y de la formulación teórica podrían haber sido comparadas usando otro tipo de error, pero al notar que el error de estos dos tipos analizados es significativo en todas las combinaciones de escenarios, se descarta la necesidad de implementar otros criterios de error y variabilidad.

Así mismo, la cantidad de puntos para comparar podría haber sido mayor, pero, nuevamente, la diferencia es tan severa que incluir nuevos puntos no hubiera disminuido los errores.



VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La diferencia de los resultados de la metodología de diseño de la formulación teórica es de mínimo 31.9% y máximo 454.8% con respecto a los resultados de la experimentación con prototipo, tomando en cuenta los tirantes en puntos trascendentes de la rápida en esenario único. Además, el resalto hidráulico se reproduce normalmente en la formulación teórica mientras que en la experimentación ocurre en los primeros segundos mientras se llena la poza y posteriormente se ahoga sin formarse resalto.

Luego de realizar una simulación en CFD se obtuvieron perfiles de elevación de agua esperados, notándose el resalto hidráulico en diferentes escenarios simulados.

Al contrastar los resultados de tirantes en puntos específicos de la rápida, de cuatro escenarios con diferentes caudales, del método de la formulación teórica con sus correspondientes de las simulaciones en CFD, se obtuvo el mínimo error promedio de 27.3% y el máximo error promedio de 37.7%, considerando dos criterios para la ponderación de diferencias.

El método de diseño de la formulación teórica se da por descartado (no válido) al obtenerse errores promedios mayores a 10%, tanto con respecto a la experimentación con prototipo en esenario único como con respecto a la simulación en CFD en cuatro escenarios.

Finalmente, viendo que los errores relativos de los tirantes de la formulación teórica con respecto tanto de la experimentación con prototipo como de la simulación en CFD, son mayores a 10%, se determina que el método de la formulación teórica no es confiable, validando así la hipótesis formulada.

7.2 Recomendaciones

Escenarios con diferentes caudales podrían experimentarse con prototipo si se contara en laboratorio con un sistema de bomba – regulador de caudal, ya que en la presente investigación solo se disponían bancos hidráulicos con un caudal bajo para las dimensiones del canal de ensayo.

Es recomendable que las bombas de agua que se implementen cuenten con un caudalímetro analógico toda vez que uno digital no permite ver el cambio o fluctuación de la medida en un instante. Además, la precisión de 0.01 galón por minuto en la lectura de los caudalímetros digitales empleados no es acorde con la inestabilidad de su medición, y tal estabilidad podría haber conducido a resultados erróneos para la comparación con otros métodos de diseño.

Se sugiere realizar simulaciones en CFD con el esquema de cierre de Grupo Renormalizado del modelo de turbulencia RANS y validarlo con una experimentación muy precisa para poder determinar cuál de los dos esquemas de cierre representa mejor la influencia de la turbulencia en el escenario hidráulico dado.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar comparaciones más específicas entre la experimentación y simulación en CFD considerando transistores para la medición de velocidad instalados tanto al eje como en las paredes del canal, y “Puntos de Sondeo” colocados en el software en los correspondientes puntos.



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, A., Sánchez Juny, M., & Dolz Ripollés, J. (2006). Diseño hidráulico de aliviaderos escalonados en presas de HCR. *Ingeniería del Agua*, 13(4), 289-302. <https://doi.org/10.4995/ia.2006.10492>
- Amal, I., Fatimah, E., Refika, C. D., & Fauzi, M. (2024). Evaluation of Side Spillway Cavitation of Krueng Kluet Dam Using Computational Fluid Dynamic. *E3S Web of Conferences*,
- Autoridad Nacional del Agua del Perú. (2010). *Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico*.
- Babaali, H., Shamsai, A., & Vosoughifar, H. (2015). Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes [Article]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 381-395. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1466-z>
- Biswas, S. K., & Anand, N. K. (2023). Three-dimensional laminar flow using physics informed deep neural networks [Article]. *Physics of Fluids*, 35(12), Article 121703. <https://doi.org/10.1063/5.0180834>
- Dashtban, H., Kabiri-Samani, A., Fazeli, M., & Rezashahreza, M. (2024). Hydraulic jump in a circular stilling basin by using angled baffle blocks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 96, 102562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102562>
- De Padova, D., & Mossa, M. (2021). Hydraulic jump: A brief history and research challenges [Review]. *Water (Switzerland)*, 13(13), Article 1733. <https://doi.org/10.3390/w13131733>
- El Bohoty, M., Ghamry, E., Hamed, A., Khalifa, M., Taha, A., & Meneisy, A. (2024). Surface and subsurface structural mapping for delineating the active emergency spillway fault, Aswan, Egypt, using integrated geophysical data [Article]. *Acta Geophysica*, 72(2), 807-827. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01133-1>
- Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa SA. (2024). *PROYECTO: ELABORACIÓN DE EXPEDIENTE TÉCNICO "MEJORAMIENTO DEL CANAL DE CONCRETO EN LA ZONA DE DESCARGA DEL TÚNEL DE TRASVASE - PRESA PILLONES (SEGUNDO ENTREGABLE: Plan de trabajo, Informe de revisión de antecedentes evaluados e Informe de diagnóstico situacional sobre las condiciones actuales de servicio del canal., Issue.*
- Franck Boyer, P. F. (2010). *Mathematical Tools for the Study of the Incompressible Navier-Stokes Equations and Related Models* (1 ed., Vol. 183). Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/798-1-4614-5975-0>
- Gobbetti, L. E. C. (2013). Design of the filling and emptying system of the new Panama canal locks [Article]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1(1), 28-38. <https://doi.org/10.1080/23249676.2013.827899>
- Hassanpour, N., Dalir, A. H., Farsadizadeh, D., & Gualtieri, C. (2017). An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed [Article]. *Water (Switzerland)*, 9(12), Article 945. <https://doi.org/10.3390/w9120945>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Institute of Engineering Simulation and Scientific Software. (2016). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?* <https://www.esss.com/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

- Jiang, X., Wörman, A., Chen, X., Zhu, Z., Zou, Z., Xiao, W., Li, P., Liu, G., & Kang, D. (2023). Internal erosion of debris-flow deposits triggered by seepage [Article]. *Engineering Geology*, 314, Article 107015. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107015>
- Klimberg, R., Sillup, G., Boyle, K. & Tavva, V. (2010). Forecasting performance measures - What are their practical meaning?. *Advances in Business and Management Forecasting*. 7. 137-147. 10.1108/S1477-4070(2010)0000007012.
- Krochin, S. (1982). *Diseño Hidráulico*. Loja.
- Liu, L., Sun, Z., Wan, C., & Wu, J. (2015). Jet flow field calculation & mechanism analysis on hot-air drying oven based on RNG K-E model [Article]. *International Journal of Heat and Technology*, 33(1), 77-82. <https://doi.org/10.18280/ijht.330111>
- Macián-Pérez, J. F., Vallés-Morán, F. J., Sánchez-Gómez, S., De-Rossi-Estrada, M., & García-Bartual, R. (2020). Experimental Characterization of the Hydraulic Jump Profile and Velocity Distribution in a Stilling Basin Physical Model. *Water*, 12(6), 1758. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1758>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Navarro Gárate, K. J. (2019). *Recuperación del barranco San Francisco para evitar la erosión del casco urbano colindante, creando espacios públicos recreacionales turísticos en la ciudad de Moyobamba* <https://hdl.handle.net/20.500.12692/103734>
- Panfilov, I., Beskopylny, A. N., & Meskhi, B. (2023). Numerical Simulation of Heat Transfer and Spread of Virus Particles in the Car Interior. *Mathematics*, 11(3), 784. <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/3/784>
- Rodriguez Guevara, C. A. (2018). *Diseño de la rápida en la progresiva 1+675-1+725 para el proyecto: revestimiento del Canal Julquillas-Pacar distrito de Pativilca, provincia de Barranca, región Lima* Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10794>
- Sanchez Gutierrez, A. B. P. N., Kevin. (2023). Análisis y evaluación del comportamiento hidráulico con aliviaderos de tormentas en el sistema de alcantarillado sanitario del casco urbano de la ciudad de Pucallpa. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/6047>
- Sevilla Becerra, C. (2020). *Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy* Universidad de Piura]. Piura. <https://hdl.handle.net/11042/4779>
- Stantec. (2023). Acomodando a más barcos con un tercer juego de esclusas. *Stantec*. <https://www.stantec.com/es/projects/panama-canal-expansion>
- Thompson, P. L., & Kilgore, R. T. (2006). Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels: Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition [Tech Report]. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/44356>
- U. S. Bureau of Reclamation. (2011). *Design Standards No. 13: Hydraulic Design of Spillways*. <https://www.usbr.gov/library/reclamationpubs/hydrology-manual.html>

VI. ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO DE LA FASE EXPERIMENTAL



Comprobación de caudal del banco hidráulico por el método volumétrico



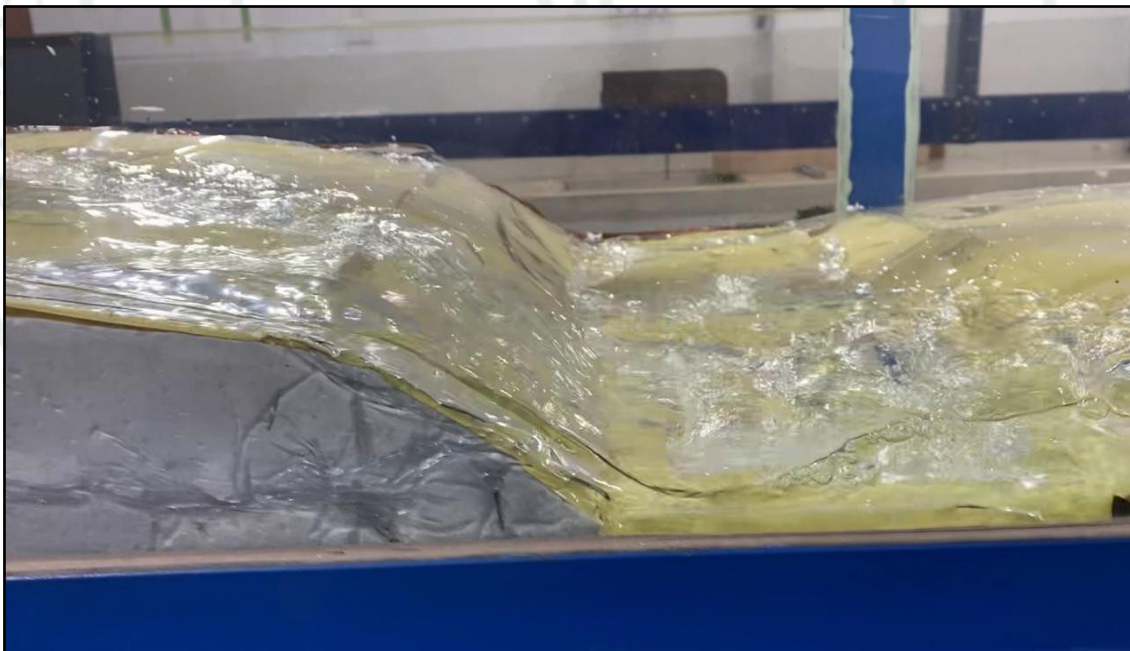
Medición del ancho del canal de ensayo, registro de participación en laboratorio



Canal de prueba para la obtención de rugosidad del material "Vinifan"



Preparación de modelo físico para probar rugosidades de diferentes materiales



Perfil de agua de la experimentación con prototipo en la zona de ingreso a la poza de disipación



Registro de participación en laboratorio

ANEXO 2: TABLAS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN FLOW 3D

Resultados de la simulación en Flow 3D – Caudal = 10 m³/s

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
0.00	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
0.02	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
0.25	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
0.50	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
0.75	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
1.00	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
1.25	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
1.50	0.000	0.000	0.000	1.041	1.050	0.009
1.75	0.000	0.000	0.000	1.041	1.049	0.010
2.01	0.000	0.000	0.000	1.041	1.049	0.010
2.26	0.105	0.000	0.000	1.041	1.048	0.011
2.51	0.135	0.000	0.000	1.041	1.049	0.012
2.75	0.160	0.000	0.000	1.041	1.050	0.012
3.00	0.181	0.000	0.000	1.041	1.050	0.012
3.26	0.199	0.000	0.000	1.041	1.049	0.012
3.49	0.214	0.000	0.000	1.041	1.049	0.012
3.75	0.229	0.000	0.000	1.040	1.050	0.012
4.00	0.241	0.073	0.000	1.040	1.050	0.012
4.25	0.252	0.099	0.000	1.040	1.049	0.012
4.50	0.262	0.115	0.000	1.040	1.050	0.012
4.75	0.279	0.129	0.000	1.039	1.049	0.012
5.00	0.283	0.143	0.000	1.039	1.049	0.012
5.25	0.290	0.156	0.000	1.039	1.050	0.012
5.50	0.297	0.168	0.124	1.040	1.049	0.012
5.75	0.304	0.179	0.126	1.040	1.049	0.012
6.00	0.310	0.189	0.119	1.040	1.050	0.012
6.25	0.316	0.196	0.122	1.040	1.049	0.012
6.50	0.321	0.203	0.126	1.040	1.049	0.012
6.75	0.326	0.211	0.130	1.039	1.049	0.012
7.00	0.331	0.218	0.142	1.039	1.049	0.012
7.25	0.335	0.225	0.159	1.039	1.049	0.012
7.50	0.339	0.232	0.160	1.039	1.049	0.012
7.75	0.343	0.238	0.168	1.040	1.049	0.012
8.00	0.346	0.244	0.172	1.040	1.049	0.012
8.25	0.349	0.250	0.176	1.044	1.049	0.012
8.50	0.352	0.255	0.178	1.159	1.049	0.012
8.75	0.355	0.260	0.183	1.469	1.049	0.012
9.00	0.358	0.265	0.186	1.312	1.049	0.012
9.25	0.361	0.269	0.190	1.215	1.049	0.012
9.50	0.363	0.273	0.193	1.239	1.051	0.012
9.75	0.365	0.277	0.196	1.244	1.058	0.012
10.00	0.368	0.281	0.197	1.262	1.076	0.013
10.25	0.370	0.285	0.204	1.231	1.127	0.013

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
10.50	0.372	0.289	0.205	1.205	1.338	0.013
10.75	0.374	0.295	0.207	1.208	1.461	0.013
11.00	0.376	0.295	0.208	1.210	1.348	0.013
11.25	0.377	0.299	0.211	1.175	1.275	0.013
11.50	0.379	0.298	0.213	1.125	1.275	0.014
11.75	0.381	0.302	0.214	1.099	1.332	0.227
12.00	0.382	0.303	0.216	1.086	1.412	0.218
12.25	0.383	0.305	0.217	1.085	1.446	0.188
12.50	0.385	0.307	0.217	1.092	1.431	0.158
12.75	0.386	0.310	0.221	1.107	1.420	0.136
13.00	0.387	0.312	0.224	1.119	1.435	0.130
13.25	0.389	0.314	0.223	1.111	1.455	0.161
13.50	0.390	0.315	0.222	1.107	1.464	0.189
13.75	0.391	0.317	0.222	1.110	1.451	0.185
14.00	0.392	0.319	0.223	1.140	1.442	0.167
14.25	0.393	0.321	0.223	1.195	1.443	0.154
14.50	0.394	0.322	0.224	1.222	1.454	0.160
14.75	0.395	0.324	0.224	1.256	1.476	0.176
15.00	0.396	0.325	0.225	1.305	1.495	0.184
15.25	0.397	0.327	0.226	1.341	1.504	0.180
15.50	0.398	0.328	0.227	1.354	1.499	0.174
15.75	0.398	0.330	0.228	1.353	1.491	0.181
16.00	0.399	0.331	0.228	1.368	1.487	0.194
16.25	0.400	0.332	0.229	1.397	1.492	0.205
16.50	0.401	0.333	0.230	1.430	1.508	0.217
16.75	0.401	0.334	0.231	1.470	1.531	0.215
17.00	0.402	0.335	0.231	1.497	1.557	0.211
17.25	0.403	0.337	0.232	1.509	1.581	0.207
17.50	0.403	0.338	0.232	1.501	1.597	0.210
17.75	0.404	0.339	0.234	1.492	1.610	0.221
18.00	0.405	0.340	0.234	1.507	1.624	0.238
18.25	0.405	0.340	0.234	1.514	1.639	0.262
18.50	0.406	0.341	0.235	1.510	1.656	0.276
18.75	0.406	0.342	0.235	1.507	1.671	0.289
19.00	0.407	0.343	0.235	1.512	1.683	0.299
19.25	0.407	0.344	0.236	1.512	1.690	0.309
19.50	0.408	0.345	0.236	1.506	1.692	0.321
19.75	0.408	0.345	0.236	1.517	1.693	0.331
20.00	0.409	0.346	0.236	1.522	1.694	0.339
20.25	0.409	0.347	0.236	1.519	1.697	0.342
20.50	0.410	0.347	0.240	1.536	1.702	0.343
20.75	0.410	0.348	0.238	1.558	1.707	0.344
21.00	0.411	0.349	0.238	1.564	1.713	0.344
21.25	0.411	0.349	0.238	1.573	1.716	0.345
21.50	0.411	0.350	0.238	1.588	1.719	0.348
21.75	0.412	0.350	0.239	1.595	1.721	0.351

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
22.00	0.412	0.351	0.239	1.590	1.723	0.356
22.25	0.412	0.351	0.239	1.595	1.727	0.360
22.50	0.413	0.352	0.239	1.598	1.733	0.363
22.75	0.413	0.353	0.240	1.600	1.742	0.366
23.00	0.413	0.353	0.240	1.605	1.752	0.369
23.25	0.414	0.353	0.240	1.626	1.761	0.372
23.50	0.414	0.354	0.240	1.650	1.768	0.377
23.75	0.414	0.355	0.241	1.651	1.772	0.386
24.00	0.415	0.355	0.241	1.641	1.774	0.394
24.25	0.415	0.355	0.241	1.625	1.775	0.404
24.50	0.415	0.356	0.241	1.609	1.777	0.407
24.75	0.415	0.356	0.241	1.606	1.782	0.410
25.00	0.416	0.356	0.242	1.623	1.788	0.412
25.25	0.416	0.357	0.242	1.655	1.795	0.412
25.50	0.416	0.357	0.242	1.692	1.801	0.413
25.75	0.416	0.357	0.242	1.706	1.804	0.415
26.00	0.417	0.358	0.242	1.682	1.804	0.418
26.25	0.417	0.358	0.243	1.635	1.801	0.424
26.50	0.417	0.358	0.243	1.605	1.798	0.425
26.75	0.417	0.359	0.243	1.616	1.798	0.429
27.00	0.418	0.359	0.243	1.664	1.802	0.429
27.25	0.418	0.359	0.243	1.698	1.811	0.429
27.50	0.418	0.359	0.243	1.701	1.822	0.428
27.75	0.418	0.360	0.243	1.682	1.832	0.430
28.00	0.418	0.360	0.243	1.647	1.835	0.434
28.25	0.419	0.360	0.244	1.629	1.829	0.437
28.50	0.419	0.360	0.244	1.658	1.817	0.443
28.75	0.419	0.361	0.244	1.714	1.803	0.447
29.00	0.419	0.361	0.244	1.757	1.793	0.447
29.25	0.419	0.361	0.244	1.773	1.790	0.446
29.50	0.419	0.361	0.244	1.745	1.793	0.440
29.75	0.420	0.362	0.244	1.720	1.803	0.431
30.00	0.420	0.362	0.244	1.701	1.814	0.426
30.25	0.420	0.362	0.244	1.696	1.824	0.424
30.50	0.420	0.362	0.245	1.705	1.831	0.426
30.75	0.420	0.362	0.245	1.711	1.835	0.433
31.00	0.420	0.363	0.245	1.715	1.838	0.439
31.25	0.420	0.363	0.245	1.713	1.844	0.448
31.50	0.421	0.363	0.245	1.706	1.850	0.448
31.75	0.421	0.363	0.245	1.696	1.855	0.464
32.00	0.421	0.363	0.245	1.689	1.856	0.470
32.25	0.421	0.363	0.245	1.684	1.852	0.484
32.50	0.421	0.364	0.245	1.686	1.845	0.475
32.75	0.421	0.364	0.245	1.691	1.838	0.480
33.00	0.421	0.364	0.245	1.695	1.834	0.480
33.25	0.421	0.364	0.245	1.699	1.834	0.477

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
33.50	0.422	0.365	0.245	1.699	1.837	0.472
33.75	0.422	0.365	0.245	1.701	1.841	0.466
34.00	0.422	0.365	0.245	1.700	1.844	0.463
34.25	0.422	0.365	0.245	1.701	1.844	0.462
34.50	0.422	0.365	0.245	1.704	1.842	0.464
34.75	0.422	0.365	0.245	1.706	1.839	0.467
35.00	0.422	0.366	0.245	1.708	1.838	0.469
35.25	0.422	0.366	0.246	1.707	1.838	0.470
35.50	0.422	0.366	0.247	1.707	1.840	0.470
35.75	0.422	0.366	0.246	1.710	1.842	0.468
36.00	0.422	0.366	0.247	1.712	1.843	0.467
36.25	0.423	0.366	0.247	1.713	1.843	0.466
36.50	0.423	0.367	0.246	1.715	1.842	0.467
36.75	0.423	0.367	0.246	1.716	1.840	0.469
37.00	0.423	0.367	0.246	1.719	1.840	0.470
37.25	0.423	0.367	0.246	1.722	1.840	0.470
37.50	0.423	0.367	0.246	1.727	1.841	0.470
37.75	0.423	0.367	0.246	1.731	1.842	0.468
37.80	0.423	0.367	0.246	1.732	1.842	0.468
PROMEDIO ESTABLE	0.423	0.367	0.246	1.717	1.841	0.469

Resultados de la simulación en Flow 3D – Caudal = 20 m³/s

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
0.00	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
0.02	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
0.24	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
0.50	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
0.75	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
1.00	0.000	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
1.26	0.150	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
1.51	0.190	0.000	0.000	1.241	1.230	0.008
1.74	0.235	0.000	0.000	1.241	1.229	0.008
2.00	0.304	0.000	0.000	1.241	1.229	0.008
2.25	0.340	0.082	0.000	1.241	1.228	0.009
2.50	0.372	0.128	0.000	1.241	1.228	0.009
2.75	0.399	0.160	0.000	1.241	1.228	0.009
3.00	0.423	0.202	0.085	1.241	1.228	0.010
3.25	0.443	0.230	0.149	1.241	1.229	0.010
3.50	0.460	0.253	0.181	1.241	1.230	0.010
3.75	0.474	0.277	0.196	1.241	1.229	0.010
4.00	0.495	0.300	0.223	1.241	1.228	0.010
4.25	0.497	0.320	0.240	1.254	1.228	0.010
4.50	0.511	0.340	0.262	1.241	1.229	0.010

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
4.75	0.519	0.355	0.286	1.254	1.230	0.010
5.00	0.526	0.370	0.289	1.240	1.229	0.010
5.25	0.533	0.384	0.302	1.236	1.229	0.010
5.50	0.538	0.397	0.317	1.266	1.230	0.010
5.75	0.543	0.397	0.328	1.389	1.230	0.010
6.00	0.547	0.418	0.340	1.891	1.230	0.010
6.25	0.551	0.427	0.349	1.652	1.231	0.010
6.50	0.554	0.435	0.358	1.668	1.233	0.010
6.75	0.557	0.443	0.367	1.751	1.232	0.010
7.00	0.559	0.450	0.373	1.594	1.234	0.010
7.25	0.561	0.457	0.384	1.425	1.241	0.010
7.50	0.563	0.463	0.391	1.380	1.262	0.010
7.75	0.564	0.469	0.394	1.166	1.319	0.010
8.00	0.566	0.474	0.402	1.053	1.504	0.010
8.25	0.567	0.478	0.407	1.157	1.957	0.010
8.50	0.568	0.483	0.411	1.228	1.837	0.010
8.75	0.569	0.487	0.419	1.252	1.770	0.010
9.00	0.569	0.491	0.420	1.214	1.834	0.243
9.25	0.570	0.494	0.424	1.163	1.948	0.419
9.50	0.570	0.497	0.427	1.094	1.991	0.426
9.75	0.571	0.500	0.431	1.076	2.006	0.413
10.00	0.571	0.503	0.433	1.099	2.053	0.437
10.25	0.572	0.506	0.433	1.136	2.092	0.528
10.50	0.572	0.508	0.434	1.244	2.095	0.516
10.75	0.572	0.511	0.438	1.233	2.082	0.508
11.00	0.572	0.513	0.441	1.136	2.066	0.512
11.25	0.572	0.514	0.443	1.105	2.055	0.524
11.50	0.573	0.514	0.444	1.169	2.049	0.517
11.75	0.573	0.519	0.444	1.153	2.047	0.500
12.00	0.573	0.519	0.452	1.163	2.051	0.484
12.25	0.573	0.520	0.450	1.209	2.062	0.472
12.50	0.573	0.520	0.451	1.251	2.082	0.463
12.75	0.573	0.521	0.452	1.272	2.111	0.457
13.00	0.573	0.521	0.453	1.357	2.145	0.458
13.25	0.573	0.521	0.454	1.403	2.177	0.477
13.50	0.573	0.521	0.454	1.437	2.197	0.493
13.75	0.573	0.525	0.455	1.468	2.203	0.522
14.00	0.573	0.525	0.455	1.482	2.195	0.548
14.25	0.573	0.525	0.456	1.487	2.178	0.579
14.50	0.573	0.525	0.456	1.526	2.154	0.594
14.75	0.573	0.525	0.456	1.628	2.130	0.594
15.00	0.573	0.525	0.457	1.664	2.111	0.586
15.25	0.573	0.526	0.458	1.623	2.102	0.573
15.50	0.573	0.526	0.458	1.554	2.103	0.557
15.75	0.573	0.526	0.458	1.591	2.114	0.543
16.00	0.573	0.526	0.458	1.676	2.134	0.533

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
16.25	0.573	0.526	0.458	1.743	2.158	0.531
16.50	0.573	0.526	0.458	1.778	2.178	0.537
16.75	0.573	0.526	0.458	1.758	2.191	0.552
17.00	0.573	0.527	0.458	1.674	2.195	0.571
17.25	0.573	0.527	0.458	1.617	2.191	0.594
17.50	0.573	0.527	0.458	1.686	2.185	0.606
17.75	0.573	0.527	0.458	1.773	2.181	0.622
18.00	0.573	0.527	0.458	1.751	2.185	0.624
18.25	0.573	0.527	0.458	1.746	2.194	0.629
18.50	0.573	0.527	0.458	1.788	2.208	0.625
18.75	0.573	0.527	0.458	1.778	2.228	0.625
19.00	0.573	0.527	0.458	1.732	2.246	0.631
19.25	0.573	0.527	0.458	1.743	2.258	0.641
19.50	0.573	0.527	0.458	1.754	2.259	0.647
19.75	0.573	0.527	0.458	1.759	2.253	0.669
20.00	0.573	0.527	0.458	1.804	2.245	0.682
20.25	0.573	0.527	0.458	1.838	2.242	0.693
20.50	0.573	0.527	0.458	1.826	2.246	0.687
20.75	0.573	0.527	0.458	1.759	2.259	0.684
21.00	0.573	0.527	0.458	1.649	2.279	0.682
21.25	0.573	0.527	0.458	1.635	2.303	0.683
21.50	0.573	0.527	0.458	1.788	2.324	0.690
21.75	0.573	0.527	0.458	1.883	2.338	0.705
22.00	0.573	0.527	0.458	1.914	2.344	0.714
22.25	0.573	0.527	0.458	1.876	2.343	0.733
22.50	0.574	0.527	0.458	1.807	2.338	0.742
22.75	0.574	0.527	0.458	1.757	2.330	0.750
23.00	0.574	0.527	0.458	1.701	2.322	0.752
23.25	0.574	0.527	0.458	1.671	2.316	0.750
23.50	0.574	0.527	0.458	1.701	2.315	0.744
23.75	0.574	0.527	0.458	1.783	2.320	0.737
24.00	0.574	0.527	0.458	1.835	2.332	0.733
24.25	0.574	0.527	0.458	1.848	2.349	0.731
24.50	0.574	0.527	0.458	1.833	2.365	0.734
24.75	0.574	0.527	0.458	1.833	2.375	0.741
25.00	0.574	0.527	0.458	1.855	2.372	0.752
25.25	0.574	0.527	0.458	1.878	2.354	0.762
25.50	0.574	0.527	0.458	1.871	2.328	0.770
25.75	0.574	0.527	0.458	1.849	2.303	0.771
26.00	0.574	0.527	0.458	1.832	2.287	0.763
26.25	0.574	0.527	0.458	1.833	2.285	0.750
26.50	0.574	0.527	0.458	1.838	2.301	0.736
26.75	0.574	0.527	0.458	1.832	2.330	0.726
27.00	0.574	0.527	0.458	1.830	2.366	0.725
27.25	0.574	0.527	0.458	1.836	2.398	0.735
27.50	0.574	0.527	0.458	1.846	2.412	0.750

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
27.75	0.574	0.527	0.458	1.848	2.405	0.769
28.00	0.574	0.527	0.458	1.840	2.384	0.801
28.25	0.574	0.527	0.458	1.832	2.362	0.819
28.50	0.574	0.527	0.458	1.840	2.347	0.818
28.75	0.574	0.527	0.458	1.861	2.341	0.808
29.00	0.574	0.527	0.458	1.877	2.343	0.792
29.25	0.574	0.527	0.458	1.877	2.351	0.775
29.50	0.574	0.527	0.458	1.864	2.359	0.763
29.75	0.574	0.527	0.458	1.851	2.366	0.759
30.00	0.574	0.527	0.458	1.845	2.369	0.759
30.25	0.574	0.527	0.458	1.847	2.368	0.764
30.50	0.574	0.527	0.458	1.852	2.366	0.769
30.75	0.574	0.527	0.458	1.858	2.365	0.773
31.00	0.574	0.527	0.458	1.862	2.367	0.774
31.25	0.574	0.528	0.458	1.864	2.371	0.773
31.50	0.574	0.528	0.458	1.864	2.377	0.772
31.75	0.574	0.528	0.458	1.866	2.382	0.772
32.00	0.574	0.528	0.458	1.868	2.385	0.773
32.25	0.574	0.528	0.458	1.871	2.384	0.775
32.40	0.574	0.528	0.458	1.874	2.383	0.777
PROMEDIO ESTABLE	0.574	0.528	0.458	1.861	2.374	0.771

Resultados de la simulación en Flow 3D – Caudal = 30 m³/s

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
0.00	0.000	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
0.02	0.000	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
0.25	0.000	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
0.50	0.000	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
0.75	0.000	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
1.01	0.171	0.000	0.000	1.141	1.150	0.000
1.25	0.320	0.000	0.000	1.141	1.149	0.000
1.50	0.408	0.000	0.000	1.141	1.148	0.000
1.75	0.472	0.000	0.000	1.141	1.149	0.000
2.00	0.517	0.187	0.000	1.141	1.151	0.000
2.25	0.547	0.259	0.146	1.141	1.150	0.000
2.50	0.565	0.311	0.196	1.141	1.151	0.000
2.75	0.577	0.364	0.258	1.141	1.149	0.000
3.00	0.584	0.407	0.304	1.141	1.150	0.000
3.25	0.588	0.441	0.345	1.141	1.150	0.000
3.50	0.591	0.471	0.388	1.161	1.150	0.000
3.75	0.593	0.495	0.415	1.140	1.150	0.000
4.00	0.595	0.516	0.443	1.147	1.150	0.000

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
4.25	0.596	0.532	0.466	1.799	1.150	0.000
4.50	0.596	0.547	0.487	1.853	1.150	0.000
4.75	0.597	0.554	0.501	1.419	1.150	0.000
5.00	0.597	0.558	0.515	0.760	1.150	0.000
5.25	0.597	0.567	0.529	0.939	1.150	0.000
5.50	0.597	0.571	0.535	0.768	1.151	0.000
5.75	0.598	0.575	0.541	0.754	1.156	0.000
6.00	0.598	0.577	0.548	0.743	1.180	0.000
6.25	0.598	0.578	0.551	0.608	1.320	0.000
6.50	0.598	0.578	0.551	0.522	2.056	0.000
6.75	0.598	0.578	0.556	0.547	1.991	0.000
7.00	0.598	0.578	0.562	0.465	2.051	0.000
7.25	0.598	0.578	0.559	0.483	2.155	0.029
7.50	0.598	0.578	0.559	0.362	2.250	0.569
7.75	0.598	0.578	0.559	0.367	2.297	0.661
8.00	0.598	0.579	0.559	0.380	2.331	0.779
8.25	0.598	0.578	0.559	0.371	2.385	0.876
8.50	0.598	0.579	0.559	0.369	2.456	0.901
8.75	0.598	0.579	0.559	0.373	2.522	0.885
9.00	0.598	0.579	0.559	0.363	2.577	0.885
9.25	0.598	0.579	0.559	0.362	2.598	0.899
9.50	0.598	0.579	0.559	0.361	2.582	0.920
9.75	0.598	0.579	0.559	0.361	2.550	0.938
10.00	0.598	0.579	0.559	0.362	2.514	0.958
10.25	0.598	0.579	0.559	0.362	2.479	0.957
10.50	0.598	0.579	0.559	0.362	2.452	0.952
10.75	0.598	0.579	0.559	0.362	2.426	0.940
11.00	0.598	0.579	0.559	0.362	2.404	0.924
11.25	0.598	0.579	0.559	0.362	2.389	0.905
11.50	0.598	0.579	0.559	0.362	2.382	0.887
11.75	0.598	0.579	0.559	0.372	2.386	0.864
12.00	0.598	0.579	0.559	0.369	2.397	0.854
12.25	0.598	0.579	0.559	0.365	2.411	0.852
12.50	0.598	0.578	0.559	0.595	2.415	0.854
12.75	0.598	0.578	0.559	0.787	2.402	0.857
13.00	0.598	0.578	0.559	0.645	2.371	0.858
13.25	0.598	0.579	0.559	0.629	2.328	0.858
13.50	0.598	0.579	0.559	0.981	2.285	0.846
13.75	0.598	0.579	0.559	0.969	2.254	0.820
14.00	0.598	0.579	0.559	1.004	2.240	0.787
14.25	0.598	0.579	0.559	1.058	2.254	0.750
14.50	0.598	0.579	0.559	1.053	2.297	0.715
14.75	0.598	0.579	0.559	1.084	2.356	0.691
15.00	0.598	0.579	0.559	1.113	2.418	0.682
15.25	0.598	0.579	0.559	1.164	2.459	0.693

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
15.50	0.598	0.579	0.559	1.214	2.468	0.710
15.75	0.598	0.579	0.559	1.212	2.452	0.759
16.00	0.598	0.579	0.559	1.301	2.430	0.790
16.25	0.598	0.579	0.559	1.334	2.418	0.813
16.50	0.598	0.579	0.559	1.283	2.422	0.829
16.75	0.598	0.579	0.559	1.387	2.443	0.822
17.00	0.598	0.579	0.559	1.401	2.472	0.810
17.25	0.598	0.579	0.559	1.399	2.500	0.806
17.50	0.598	0.579	0.559	1.420	2.517	0.810
17.75	0.598	0.579	0.559	1.445	2.525	0.816
18.00	0.598	0.579	0.559	1.467	2.523	0.839
18.25	0.598	0.579	0.559	1.464	2.515	0.865
18.50	0.598	0.579	0.559	1.464	2.512	0.858
18.75	0.598	0.579	0.559	1.469	2.521	0.864
19.00	0.598	0.579	0.559	1.471	2.543	0.871
19.25	0.598	0.579	0.559	1.488	2.571	0.872
19.50	0.598	0.579	0.559	1.475	2.596	0.885
19.75	0.598	0.579	0.559	1.484	2.611	0.898
20.00	0.598	0.579	0.559	1.555	2.617	0.913
20.25	0.598	0.579	0.559	1.601	2.617	0.919
20.50	0.598	0.579	0.559	1.586	2.616	0.946
20.75	0.598	0.579	0.559	1.579	2.614	0.962
21.00	0.598	0.579	0.559	1.555	2.612	0.967
21.25	0.598	0.579	0.559	1.536	2.609	0.969
21.50	0.598	0.579	0.559	1.549	2.606	0.967
21.75	0.598	0.579	0.559	1.580	2.605	0.965
22.00	0.598	0.579	0.559	1.600	2.610	0.962
22.25	0.598	0.579	0.559	1.599	2.623	0.961
22.50	0.598	0.579	0.559	1.593	2.645	0.963
22.75	0.598	0.579	0.559	1.590	2.671	0.970
23.00	0.598	0.579	0.559	1.596	2.697	0.979
23.25	0.598	0.579	0.559	1.600	2.712	0.998
23.50	0.598	0.579	0.559	1.606	2.711	1.012
23.75	0.598	0.579	0.559	1.608	2.698	1.040
24.00	0.598	0.579	0.559	1.617	2.678	1.042
24.25	0.598	0.579	0.559	1.643	2.662	1.056
24.50	0.598	0.579	0.559	1.659	2.657	1.052
24.75	0.598	0.579	0.559	1.659	2.662	1.043
25.00	0.598	0.579	0.559	1.661	2.674	1.030
25.25	0.598	0.579	0.559	1.672	2.687	1.025
25.50	0.598	0.579	0.559	1.702	2.693	1.025
25.75	0.598	0.579	0.559	1.706	2.688	1.029
26.00	0.598	0.579	0.559	1.710	2.672	1.037
26.25	0.598	0.579	0.559	1.711	2.652	1.040
26.50	0.598	0.579	0.559	1.712	2.635	1.037

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
26.75	0.598	0.579	0.559	1.716	2.628	1.029
27.00	0.598	0.579	0.559	1.721	2.631	1.016
27.21	0.598	0.579	0.559	1.729	2.641	1.006
PROMEDIO ESTABLE	0.598	0.579	0.559	1.704	2.660	1.028

Resultados de la simulación en Flow 3D – Caudal = 40 m³/s

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
0.00	0.000	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
0.02	0.000	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
0.25	0.000	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
0.50	0.000	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
0.75	0.000	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
1.00	0.259	0.000	0.000	0.891	0.899	0.000
1.25	0.418	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
1.50	0.524	0.000	0.000	0.891	0.900	0.000
1.75	0.598	0.158	0.000	0.891	0.900	0.000
2.00	0.644	0.233	0.136	0.891	0.900	0.000
2.25	0.670	0.337	0.229	0.891	0.900	0.000
2.50	0.684	0.411	0.311	0.891	0.900	0.000
2.75	0.692	0.473	0.384	0.891	0.900	0.000
3.00	0.696	0.522	0.449	0.891	0.900	0.000
3.25	0.697	0.575	0.486	0.891	0.900	0.000
3.50	0.698	0.597	0.522	0.891	0.900	0.000
3.75	0.698	0.624	0.564	1.501	0.900	0.000
4.00	0.698	0.645	0.594	1.265	0.900	0.000
4.25	0.698	0.666	0.618	0.409	0.900	0.000
4.50	0.698	0.675	0.641	0.315	0.900	0.000
4.75	0.698	0.683	0.654	0.353	0.900	0.000
5.00	0.698	0.688	0.669	0.377	0.900	0.011
5.25	0.698	0.691	0.677	0.408	0.901	0.000
5.50	0.698	0.692	0.683	0.409	0.927	0.000
5.75	0.698	0.693	0.686	0.432	1.436	0.000
6.00	0.698	0.694	0.688	0.425	1.742	0.000
6.25	0.698	0.694	0.690	0.425	1.896	0.000
6.50	0.698	0.694	0.690	0.451	2.064	0.531
6.75	0.698	0.694	0.691	0.465	2.225	0.652
7.00	0.698	0.694	0.691	0.461	2.346	0.788
7.25	0.698	0.694	0.691	0.472	2.418	0.901
7.50	0.698	0.694	0.691	0.463	2.445	1.026
7.75	0.698	0.694	0.691	0.464	2.436	1.101
8.00	0.698	0.694	0.691	0.465	2.415	1.169
8.25	0.698	0.694	0.691	0.465	2.388	1.194

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
8.50	0.698	0.694	0.691	0.471	2.369	1.202
8.75	0.698	0.694	0.691	0.471	2.333	1.220
9.00	0.698	0.694	0.691	0.472	2.300	1.230
9.25	0.698	0.694	0.691	0.470	2.280	1.230
9.50	0.698	0.694	0.691	0.471	2.249	1.227
9.75	0.698	0.694	0.691	0.470	2.225	1.231
10.00	0.698	0.694	0.691	0.469	2.193	1.247
10.25	0.698	0.694	0.691	0.469	2.143	1.257
10.50	0.698	0.694	0.691	0.469	2.094	1.268
10.75	0.698	0.694	0.691	0.469	2.040	1.262
11.00	0.698	0.694	0.691	0.473	1.993	1.245
11.25	0.698	0.694	0.691	0.469	1.957	1.224
11.50	0.698	0.694	0.691	0.472	1.939	1.199
11.75	0.698	0.694	0.691	0.473	1.942	1.170
12.00	0.698	0.694	0.691	0.473	1.963	1.144
12.25	0.698	0.694	0.691	0.469	2.064	1.116
12.50	0.698	0.695	0.691	0.469	2.098	1.100
12.75	0.698	0.695	0.691	0.470	2.160	1.096
13.00	0.698	0.695	0.692	0.470	2.200	1.108
13.25	0.698	0.695	0.692	0.470	2.257	1.141
13.50	0.698	0.695	0.692	0.470	2.260	1.166
13.75	0.699	0.695	0.692	0.470	2.286	1.175
14.00	0.699	0.696	0.693	0.473	2.284	1.186
14.25	0.699	0.695	0.693	0.470	2.295	1.190
14.50	0.698	0.695	0.693	0.470	2.301	1.200
14.75	0.698	0.695	0.693	0.470	2.296	1.215
15.00	0.698	0.695	0.693	0.470	2.285	1.225
15.25	0.698	0.695	0.693	0.470	2.276	1.237
15.50	0.698	0.696	0.693	0.470	2.263	1.236
15.75	0.698	0.696	0.693	0.470	2.246	1.231
16.00	0.698	0.696	0.693	0.470	2.227	1.225
16.25	0.698	0.696	0.693	0.470	2.213	1.219
16.50	0.698	0.696	0.693	0.470	2.203	1.211
16.75	0.698	0.695	0.693	0.471	2.202	1.201
17.00	0.698	0.695	0.693	0.471	2.211	1.191
17.25	0.698	0.695	0.693	0.472	2.224	1.188
17.50	0.698	0.695	0.693	0.471	2.229	1.190
17.75	0.698	0.695	0.693	0.471	2.221	1.196
18.00	0.698	0.695	0.693	0.471	2.205	1.202
18.25	0.698	0.695	0.693	0.467	2.194	1.201
18.50	0.698	0.695	0.693	0.472	2.200	1.195
18.75	0.698	0.695	0.693	0.472	2.208	1.186
19.00	0.698	0.695	0.693	0.471	2.245	1.179
19.25	0.698	0.695	0.693	0.471	2.249	1.181
19.50	0.698	0.695	0.693	0.471	2.269	1.190
19.75	0.698	0.695	0.693	0.471	2.289	1.203

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
20.00	0.698	0.695	0.693	0.471	2.266	1.216
20.25	0.698	0.695	0.693	0.471	2.256	1.220
20.50	0.698	0.695	0.693	0.470	2.232	1.229
20.75	0.698	0.695	0.693	0.470	2.215	1.227
21.00	0.698	0.695	0.693	0.470	2.207	1.218
21.25	0.698	0.695	0.692	0.470	2.222	1.199
21.50	0.698	0.695	0.692	0.471	2.274	1.179
21.75	0.698	0.695	0.693	0.471	2.305	1.171
22.00	0.698	0.695	0.693	0.477	2.320	1.179
22.25	0.698	0.696	0.693	0.471	2.322	1.192
22.50	0.698	0.696	0.693	0.471	2.312	1.210
22.75	0.698	0.696	0.693	0.471	2.308	1.215
23.00	0.698	0.696	0.693	0.471	2.319	1.217
23.25	0.698	0.696	0.693	0.471	2.341	1.208
23.50	0.698	0.696	0.693	0.471	2.354	1.206
23.75	0.698	0.696	0.693	0.504	2.346	1.214
24.00	0.698	0.696	0.693	0.494	2.320	1.223
24.25	0.698	0.696	0.693	0.472	2.289	1.234
24.50	0.698	0.696	0.693	0.471	2.267	1.227
24.75	0.698	0.695	0.693	0.471	2.257	1.206
25.00	0.698	0.695	0.693	0.471	2.264	1.176
25.25	0.698	0.695	0.693	0.471	2.286	1.149
25.50	0.699	0.696	0.693	0.471	2.309	1.120
25.75	0.699	0.696	0.693	0.474	2.349	1.111
26.00	0.699	0.696	0.693	0.474	2.388	1.115
26.25	0.698	0.696	0.693	0.474	2.418	1.126
26.50	0.698	0.696	0.693	0.471	2.427	1.182
26.75	0.698	0.696	0.693	0.471	2.414	1.177
27.00	0.698	0.696	0.693	0.471	2.394	1.200
27.25	0.698	0.696	0.693	0.471	2.380	1.201
27.50	0.698	0.696	0.694	0.471	2.386	1.189
27.75	0.698	0.697	0.694	0.471	2.409	1.171
28.00	0.698	0.696	0.694	0.471	2.440	1.159
28.25	0.698	0.696	0.694	0.472	2.466	1.157
28.50	0.698	0.696	0.694	0.471	2.475	1.172
28.75	0.698	0.696	0.694	0.479	2.469	1.181
29.00	0.698	0.696	0.694	0.472	2.462	1.204
29.25	0.698	0.696	0.694	0.471	2.439	1.206
29.50	0.698	0.696	0.694	0.471	2.423	1.200
29.75	0.698	0.696	0.694	0.471	2.420	1.187
30.00	0.698	0.696	0.694	0.471	2.424	1.174
30.25	0.698	0.696	0.694	0.471	2.436	1.164
30.50	0.698	0.696	0.694	0.471	2.452	1.156
30.75	0.698	0.696	0.694	0.471	2.466	1.154
31.00	0.698	0.696	0.694	0.471	2.479	1.159
31.25	0.698	0.696	0.694	0.473	2.484	1.169

Tiempo de simulación	Canal de aproximación	Inicio transición	Media transición	Tirante anterior	Tirante conjugado	Canal de salida
31.50	0.698	0.696	0.694	0.478	2.468	1.175
31.75	0.698	0.696	0.694	0.474	2.458	1.168
32.00	0.698	0.696	0.694	0.472	2.453	1.173
32.25	0.698	0.696	0.694	0.517	2.457	1.166
32.50	0.698	0.696	0.694	0.486	2.472	1.157
32.75	0.698	0.696	0.694	0.472	2.493	1.146
33.00	0.698	0.696	0.694	0.454	2.549	1.142
33.25	0.698	0.696	0.694	0.491	2.559	1.148
33.50	0.698	0.696	0.694	0.472	2.569	1.166
33.75	0.698	0.696	0.694	0.472	2.567	1.181
34.00	0.698	0.696	0.694	0.471	2.545	1.201
34.25	0.698	0.696	0.694	0.474	2.508	1.209
PROMEDIO ESTABLE	0.698	0.696	0.694	0.476	2.491	1.173

