



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



INFORME N° 19-2024-UNACH/UI/MAST

A : **Dr. Ing. Luis Alberto Orbegoso Navarro.**
Presidente del jurado de tesis FCI-UNACH.

ASUNTO : Constancia de Originalidad de Turnitin de ERICK OMAR SÁNCHEZ VÁSQUEZ y FRANKLIN RONALDO VÁSQUEZ CAMPOS.

FECHA : Colpa Matara, 08 de junio del 2024.

REFERENCIA: i) Envío de tesis en digital en su versión final
ii) Carta N°054-2024-UNACH-LON/JT / Conformidad por parte del presidente del jurado de tesis.
iii) Carta N° 027-2024- CSLV-EPIC/UNACH / Conformidad por parte del secretario del jurado de tesis.
iv) INFORME N.º 017- 2024- VBLR/UNACH / Conformidad por parte del vocal del jurado de tesis

De mi mayor consideración

Es grato dirigirme a Usted para expresar mi saludo, y a la vez alcanzar la constancia de originalidad de TURNITIN de la tesis denominada: “**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023**”, elaborado por los bachilleres en ingeniería civil **ERICK OMAR SÁNCHEZ VÁSQUEZ y FRANKLIN RONALDO VÁSQUEZ CAMPOS**, para continuar con sus trámites ante la UNACH.

Sin otro particular, es propicia la ocasión para reiterarle las muestras de mi distinguida consideración y estima.

Atentamente,

Ing. Miguel Angel Silva Tarrillo
Jefe de la unidad de investigación
FCI-UNACH

CC.

Archivo

Adjunto:

- 1) Constancia de originalidad.
- 2) Reporte TURNITIN



Colpa Matara, 08 de junio del 2024.

C.O. N° 19-2024-UI-EPIC

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El que suscribe, Jefe de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, hace constar que el Informe Final de Tesis titulado: **“ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023”**, elaborado por los bachilleres en ingeniería civil: **ERICK OMAR SÁNCHEZ VÁSQUEZ y FRANKLIN RONALDO VÁSQUEZ CAMPOS**, para optar el Título Profesional de ingeniero civil, presenta un índice de similitud de 14% excluyendo citas, bibliografía y fuentes que tengan menos de 10 palabras; por lo tanto, cumple con los criterios de evaluación de originalidad establecidos en el acápite g) del artículo 20 del Reglamento de Grados y Títulos UNACH, aprobado mediante la Resolución C.O. N° 120-2022-UNACH con fecha de 03 de marzo de 2022.

Se expide la presente, en conformidad a la directiva antes mencionada, para los fines que estime pertinentes.


Miguel Angel SILVA TARRILLO
INGENIERO CIVIL

Ing. Miguel Angel Silva Tarrillo
Jefe de la unidad de investigación
FCI-UNACH

Análisis y modelamiento computacional de rápida del Túnel Conchano utilizando software Ansys CFX, Chota, 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	docplayer.es Fuente de Internet	1%
4	www.repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	1library.co Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	

<1 %

10

archive.org

Fuente de Internet

<1 %

11

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

12

Submitted to

Trabajo del estudiante

<1 %

13

pdfcookie.com

Fuente de Internet

<1 %

14

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

15

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

16

doku.pub

Fuente de Internet

<1 %

17

repositorio.upla.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

18

repositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

19

Submitted to Universidad Manuela Beltrán

Trabajo del estudiante

<1 %

20

Submitted to Universidad de Cantabria

Trabajo del estudiante

<1 %

21

es.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

22

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

23

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

24

Submitted to Universidad de Antioquia

Trabajo del estudiante

<1 %

25

Submitted to Universidad Nacional Hermilio
Valdizan

Trabajo del estudiante

<1 %

26

Submitted to Universidad de Málaga - Tii

Trabajo del estudiante

<1 %

27

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

28

hmong.es

Fuente de Internet

<1 %

29

Submitted to Corporación Universitaria
Iberoamericana

Trabajo del estudiante

<1 %

30

Submitted to antonionarino

Trabajo del estudiante

<1 %

31	it.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
32	nanopdf.com Fuente de Internet	<1 %
33	Submitted to UTEC Universidad de Ingenieria & Tecnologia Trabajo del estudiante	<1 %
34	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	repositorium.sdum.uminho.pt Fuente de Internet	<1 %
36	roderic.uv.es Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to Submitted on 1686670315305 Trabajo del estudiante	<1 %
38	repositorio.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
39	Submitted to ucol Trabajo del estudiante	<1 %
40	Submitted to Universidad de Cádiz Trabajo del estudiante	<1 %
41	burjcdigital.urjc.es Fuente de Internet	<1 %
42	futur.upc.edu	

Fuente de Internet

<1 %

43

portaluni.unach.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

44

repositorio.uct.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

45

Submitted to Universidad de Almeria

Trabajo del estudiante

<1 %

46

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

47

www.mineria.gov.ar

Fuente de Internet

<1 %

48

Submitted to Universidad Carlos III de Madrid

Trabajo del estudiante

<1 %

49

pt.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

50

repositorio.urp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

51

tesis.pucp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

52

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

53

oa.upm.es

Fuente de Internet

<1 %

54	pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
55	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
56	www.cazame.com Fuente de Internet	<1 %
57	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
58	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
59	phdev.parker.com Fuente de Internet	<1 %
60	qa1.scielo.br Fuente de Internet	<1 %
61	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
62	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
63	webs.uvigo.es Fuente de Internet	<1 %
64	www.clubensayos.com Fuente de Internet	<1 %
65	www.frontiersin.org Fuente de Internet	<1 %

66

www.grafiati.com

Fuente de Internet

<1 %

67

www.vaisala.com

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía

Activo

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
CHOTA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



Análisis y modelamiento computacional de rápida del Túnel Conchano
utilizando software Ansys CFX, Chota, 2023

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Presentado por:

Erick Omar Sánchez Vásquez

Franklin Ronaldo Vásquez Campos

Asesor: Dr. Ing. Martha Gladys Huamán Tanta

Co-asesor: Mg. Ing. Víctor Hugo Sánchez Terrones

Chota – Perú

2024



FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL – UNACH

1. DATOS DEL AUTOR:

Apellidos y nombres: Sánchez Vásquez Erick Omar

Código del alumno: 2017052032

Correo electrónico: 2017052032@unach.edu.pe

Teléfono: 938236234

DNI: 74440156

Apellidos y nombres: Vásquez Campos Franklin Ronaldo

Código del alumno: 2017052038

Correo electrónico: 2017052038@unach.edu.pe

Teléfono: 946917704

DNI: 74596326

2. MODALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

Tesis

3. TÍTULO PROFESIONAL O GRADO ACADÉMICO:

Bachiller

Licenciado

Título

Magister

Segunda especialidad

Doctor

4. TÍTULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023

5. FACULTAD DE: CIENCIAS DE LA INGENIERIA.

6. ESCUELA PROFESIONAL DE: INGENIERIA CIVIL

7. ASESOR:

Apellidos y Nombres: Dr. Ing. Huamán Tanta Martha Gladys

Teléfono: 976995865

Correo electrónico: mghuamant@unach.edu.pe

D.N.I.: 26641956

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Autónoma de Chota publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI)

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNACH, versión digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito en estricto respeto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

SÁNCHEZ VÁSQUEZ ERICK OMAR

DNI: 74440156

VÁSQUEZ CAMPO FRANKLIN RONALDO

DNI: 74596326

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE
RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO
SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023**

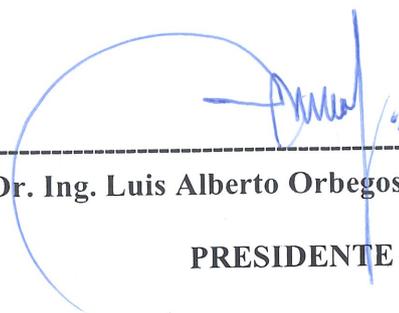
POR:

ERICK OMAR SÁNCHEZ VÁSQUEZ

FRANKLIN RONALDO VÁSQUEZ CAMPOS

**Presentada a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de Chota para optar el título
de
INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR EL JURADO INTEGRADO POR



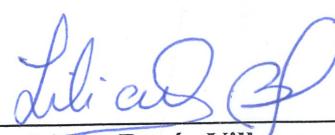
Dr. Ing. Luis Alberto Orbegoso Navarro

PRESIDENTE



Mg. Ing. Cristhian Saul López Villanueva

SECRETARIO



Mg. Ing. Lilian Rocío Villanueva Bazán

VOCAL



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

Ley de Creación N° 29531

LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 160-2018-SUNEDU/CD

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los miembros del jurado de tesis que suscriben, reunidos en la sala de docentes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería del Campus Universitario- Colpamatara, para escuchar y evaluar la sustentación de tesis presentado por los Bachilleres: **Erick Omar Sánchez Vásquez y Franklin Ronaldo Vásquez Campos**, denominado: “ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023”; escuchada la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, la declaramos:

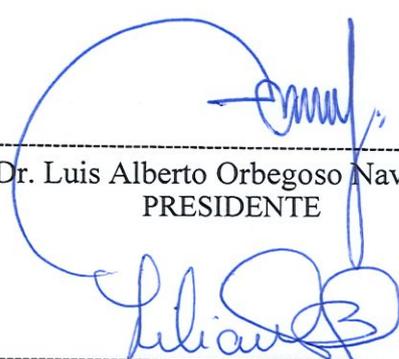
MENTIÓN HONROSA

CON EL CALIFICATIVO (*)

QUINCE (15)

En consecuencia, se le declara **EXPEDITO** para conferirle el Título de Ingeniero civil, elevando la presente acta al coordinador de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería a fin de que se emita el acto resolutivo., en conformidad con la ley universitaria y el estatuto de la Universidad.

Chota, 17 de julio del 2024



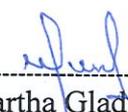
Dr. Luis Alberto Orbegoso Navarro
PRESIDENTE



Mg. Cristhian Saúl López Villanueva
SECRETARIO



Mg. Lilian Rocío Villanueva Bazán
VOCAL



Dra. Martha Gladys Huamán Tanta
Asesora

(*) De acuerdo al reglamento específico del proyecto y tesis de investigación de la EPIC, aprobada con Resolución de coordinación N° 141-2020, Artículo 21, cuya calificación es: (20 Summa Cum Laude); (18-19: Aprobado con excelencia); (15-17: Aprobado con mención honrosa); (12-14: Aprobado); (0-11: Desaprobado).



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

Ley de Creación N° 29531

LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 160-2018-SUNEDU/CD

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



ACTA DE CONFORMIDAD DE TESIS

Los miembros del jurado, luego de evaluar la Tesis denominada: **“ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE RÁPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA, 2023”**; presentado por los Bachilleres: **Erick Omar Sánchez Vásquez y Franklin Ronaldo Vásquez Campos**, sustentada el día de 17 de julio del 2024, por Resolución de Coordinación N°181-2024-FCI/UNACH, la declaramos **CONFORME**.

Chota, 31 de julio del 2024



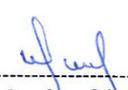
Dr. Luis Alberto Orbegoso Navarro
PRESIDENTE



Mg. Cristhian Saúl López Villanueva
SECRETARIO



Mg. Lilian Rocío Villanueva Bazán
VOCAL



Dra. Martha Gladys Huamán Tanta
Asesora

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a Dios, fuente inagotable de sabiduría y guía, quien ha iluminado nuestro camino y fortalecido nuestra determinación a lo largo de esta travesía académica.

A nuestros queridos familiares, agradecemos a padres, hermanos y demás seres queridos que han compartido con nosotros cada etapa de este proceso, brindándonos aliento y confianza.

A nuestros amigos, compañeros de risas y complicidades, quienes han sido testigos de nuestras luchas y triunfos. Su amistad ha sido un estímulo valioso, haciéndonos sentir respaldados y motivados a alcanzar metas más allá de nuestras expectativas.

Que esta tesis sea un modesto reflejo de nuestra gratitud hacia aquellos que han sido pilares fundamentales en nuestro viaje académico. Con cariño y agradecimiento, dedicamos este logro a Dios, a nuestra querida familia y a los amigos que han compartido con nosotros este valioso camino.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, fuente inagotable de fortaleza y guía, por habernos brindado la sabiduría y perseverancia necesarias para culminar con éxito este importante proyecto de investigación.

Asimismo, extendemos nuestro profundo agradecimiento a nuestra asesora, la Mg. Ing. Martha Gladys Huamán Tanta, por su invaluable orientación, dedicación y apoyo constante a lo largo de esta travesía académica. También queremos reconocer el compromiso y la contribución del Mg. Ing. Víctor Hugo Sánchez Terrones, co-asesor de este trabajo, por su valioso aporte y guía en el desarrollo de nuestro análisis y modelamiento computacional.

No podemos pasar por alto la colaboración fundamental de los encargados del PEOT, quienes generosamente proporcionaron los datos cruciales de caudales y las características del sistema hidráulico, elementos esenciales para la realización de nuestro estudio. Agradecemos sinceramente la colaboración de los responsables del proyecto Túnel Conchano, quienes facilitaron el levantamiento topográfico y brindaron las condiciones necesarias para llevar a cabo nuestras investigaciones.

Finalmente, dedicamos un especial agradecimiento a nuestros amigos y familiares, quienes han sido un pilar fundamental en cada paso de este proceso. Su apoyo incondicional y aliento nos impulsó a superar desafíos y alcanzar nuestros objetivos académicos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Planteamiento del problema	14
1.2. Formulación del problema	16
1.3. Justificación	16
1.4. Delimitación de la investigación	17
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Objetivo general.....	17
1.5.2. Objetivos específicos	17
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes	18
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	18
2.1.2. Antecedentes nacionales	19
2.1.3. Antecedentes regionales	21
2.2. Bases teórico – científicas	22
2.2.1. Modelación hidráulica	22
2.2.2. Teoría de mecánica de fluidos para el diseño hidráulico.....	23
2.2.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	25
2.2.4. Ecuaciones de conservación	27
2.2.5. Turbulencia	30
2.2.6. Elementos finitos (MEF)	35
2.2.7. Ansys CFX.....	39
2.2.8. Optimización de una rápida hidráulica	42
2.3. Marco conceptual	44
2.3.1. Rápida hidráulica	44
2.3.2. Rugosidad de un canal	45
2.3.3. Parámetros de análisis hidráulico de una rápida relacionados con el fluido	47

2.3.4. Fluidos	49
2.3.5. Caudal de un fluido.....	51
2.3.6. Modelación numérica	53
2.3.7. Métodos numéricos.....	54
2.3.8. Ansys CFX.....	56
2.4. Hipótesis	62
2.5. Operacionalización de variables	62
2.5.1. Variable independiente: Software Ansys CFX.....	62
2.5.2. Variable dependiente: Análisis y modelamiento computacional de rápida	62
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	65
3.1. Tipo y nivel de investigación	65
3.2. Diseño de investigación	66
3.3. Métodos de investigación.....	67
3.4. Población, muestra y muestreo	67
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	67
3.5.1. Técnicas de recolección de datos.....	67
3.5.2. Instrumentos de recolección de datos	69
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	69
3.6.1. Proceso de obtención de los datos	69
3.6.2. Procesamiento de datos.....	86
3.6.3. Análisis de datos	87
3.7. Aspectos éticos	88
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
4.1 Modelación numérica tridimensional del comportamiento de la rápida del Túnel Conchano	89
4.1.1. Análisis de la rápida del Túnel Conchano mediante el modelo tridimensional en el software Ansys CFX.....	96
4.1.2. Importancia del uso del software Ansys CFX en futuros proyectos hidráulicos....	103
.....	103
4.2. Discusión de resultados.....	104

4.3. Contrastación de hipótesis.....	108
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
5.1. Conclusiones	118
5.2. Recomendaciones y/o sugerencias	119
CAPÍTULO VI. REFERENCIAS	120
CAPÍTULO VII. ANEXOS	124
Anexo A. Matriz de consistencia.....	124
Anexo B. Panel fotográfico	125
Anexo C. Procedimiento detallado para el modelamiento de una rápida en el programa Ansys CFX	131
Anexo D. Características de la simulación de la rápida e Ansys CFX.....	143
Anexo C. Planos	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coeficientes de Rugosidad Absoluta.....	45
Tabla 2	Ventajas y Restricciones de Modelos Numéricos y Físicos.....	53
Tabla 3	Experimentación vs Simulación CFD	54
Tabla 4	Parámetros de Oblicuidad.....	61
Tabla 5	Matriz de Operacionalización de la Variable Independiente: Software Ansys CFX	64
Tabla 6	Matriz de Operacionalización de la Variable Independiente : Análisis y Modelamiento Computacional de Rápida	64
Tabla 7	Tipo de Investigación Según los Principales Criterios del Reglamento de la Universidad Nacional Autónoma de Chota.....	66
Tabla 8	Principales Obras Ejecutadas Durante la Primera Etapa del Proyecto Olmos	72
Tabla 9	Caudales Mensuales Del Año 2019 – 2023 en el Túnel Conchano según el PEOT	82
Tabla 10	Caudal Mínimo, Máximo y Promedio Registrado en el Túnel Conchano de Acuerdo a Datos del PEOT	82
Tabla 11	Dimensiones de la Rápida Hidráulica del Túnel Conchano Modelada por Medio del Programa Ansys CFX.....	90
Tabla 12	Características del Fluido para el Modelamiento en Ansys CFX.....	97
Tabla 13	Caracterización de la Velocidad y Presión del Modelo Tridimensional Hidráulico General	98
Tabla 14	Caracterización de la Velocidad y Presión del Modelo Tridimensional Hidráulico de Acuerdo al Mallado	99
Tabla 15	Caudales Simulados para el Diseño de la Rápida Hidráulica.....	100
Tabla 16	Relación entre Caudal, Velocidad Máxima y Velocidad Promedio en la Rápida Hidráulica	100
Tabla 17	Problemas que Surgen en el Modelamiento Tradicional y Soluciones que Ofrece el Programa Ansys CFX	103
Tabla 18	Prueba Anova Bi Factorial de la Variable Velocidad (m/s).....	110
Tabla 19	Prueba Tukey para la Velocidad – Mallado	110
Tabla 20	Prueba Tukey para Velocidad – Caudal	111
Tabla 21	Modelo de Estimación Múltiple para la Velocidad.....	112

Tabla 22	Prueba Anova Bi Factorial para la variable presión (Pa)	113
Tabla 23	Prueba Tukey para Presión – Mallado.....	114
Tabla 24	Prueba Tukey para Presión – Caudal.....	114
Tabla 25	Modelo de Estimación Múltiple para la Presión	115
Tabla 26	Parámetros de Calidad de la Malla	133
Tabla 27	Parámetros de Configuración del Modelo	137
Tabla 28	Características de la Simulación de la Rápida en el Programa Ansys CFX	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Flujo Laminar o Turbulento.....	32
Figura 2	Partes de una Rápida.....	45
Figura 3	Representación Gráfica que Muestra las Diferencias Reológicas entre Fluidos	49
Figura 4	División en el Módulo de Volúmenes Finitos	56
Figura 5	Mallado Mixto Usando Multizone.....	60
Figura 6	Calidad del Elemento	60
Figura 7	Relaciones de Aspecto	61
Figura 8	Mapa de Ubicación del Proyecto Olmos Tinajones.....	70
Figura 9	Ubicación Geográfica de la Rápida Hidráulica Túnel Conchano.....	70
Figura 10	Proyecto de Irrigación e Hidro energético Olmos	71
Figura 11	Inicio del Proyecto Túnel Conchano.....	74
Figura 12	Visitas de Campo al Emplazamiento de la Rápida del Túnel Conchano.....	76
Figura 13	Tesistas en el Lugar de Estudio por Iniciar el Procedimiento de Levantamiento Topográfico	77
Figura 14	Levantamiento Topográfico en el Lugar de Estudio.....	78
Figura 15	Plano Topográfico del Emplazamiento de la Rápida Hidráulica.....	79
Figura 16	Documento Técnico de Obtención de los Datos del PEOT	81
Figura 17	Flujograma del Procedimiento de Modelamiento en el software Ansys CFX	85
Figura 18	Vista en Planta de la Rápida Hidráulica.....	90
Figura 19	Área de Trabajo Meshing.....	91
Figura 20	Procedimiento para Aplicar el Método de Mallado	91
Figura 21	Dimensión de la Malla	92
Figura 22	Asignación de las Zonas de Interés.....	92
Figura 23	Configuración del Análisis Transitorio.....	93
Figura 24	Configuración de Output Control para Almacenar Datos de Simulación....	93
Figura 25	Configuración de las condiciones de borde	94
Figura 26	Detalles de la frontera de apertura 1.	95
Figura 27	Configuración Básica de la Frontera de Muro.....	95
Figura 28	Vista Preliminar de la Solution	95

Figura 29	Vista de la Rápida Hidráulica en el programa Ansys CFX.....	97
Figura 30	Visualización de Velocidades del Flujo de Agua en el Modelo de la Rápida Hidráulica en Ansys CFX.....	101
Figura 31	Perfil de la Rápida Hidráulica.....	102
Figura 32	Medias Marginales Estimadas para Velocidad según Mallado	112
Figura 33	Medias Marginales Estimadas para Presión según Mallado.....	115
Figura 32	Área de Trabajo Meshing.....	131
Figura 33	Procedimiento para Aplicar el Método de Mallado	132
Figura 34	Herramienta Sizing en el software Ansys CFX	133
Figura 35	Dimensión de la Malla	134
Figura 36	Asignación de las Zonas de Interés.....	135
Figura 37	Acceso al Área de Trabajo	136
Figura 38	Configuración del Análisis Transitorio.....	138
Figura 39	Configuración de Output Control para Almacenar Datos de Simulación..	139
Figura 40	Configuración de las condiciones de borde	140
Figura 41	Detalles de la frontera de apertura 1.	141
Figura 42	Configuración Básica de la Frontera de Muro.....	142
Figura 43	Vista Preliminar de la Solution	142

RESUMEN

La tesis tuvo como objetivo realizar el análisis del modelamiento computacional de la rápida hidráulica del Túnel Conchano en Chota, utilizando el software ANSYS CFX. El enfoque fue cuantitativo, con un tipo de investigación aplicado y un nivel descriptivo. Para llevar a cabo la investigación, se realizó una modelación numérica tridimensional del comportamiento de la rápida hidráulica en el Túnel Conchano, con dimensiones específicas y utilizando el software Ansys CFX. Los resultados obtenidos permiten comprender el comportamiento hidráulico de la rápida en el túnel Conchano, con dimensiones de 52.85 m de largo, 4.3 m de ancho, 2.3 m de profundidad y una pendiente del 3%. Se logró optimizar el modelo para el mallado 0.50 m y el caudal 12000 l/s, identificando zonas críticas de alta velocidad (107.067 m/s) y presión hidráulica (1,094.637 Pa) a 50 m del inicio de la rápida, no obstante, a pesar de ello la rápida está operando en condiciones normales (caudal de diseño) de acuerdo al análisis computacional. Como conclusión, se destaca la relevancia del software Ansys CFX para proyectos hidráulicos, gracias a su capacidad para modelar el flujo de rápidas en tres dimensiones y simular la velocidad y la presión del flujo hidráulico para la malla 0.3m, 0.4m y 0.5m, facilitando la toma de decisiones informadas en cuanto al diseño y operación de obras hidráulicas.

Palabras clave: presión, velocidad, modelación numérica tridimensional

ABSTRACT

The objective of this thesis was to analyze the computational modeling of the fast hydraulic flow of the Conchano Tunnel in Chota, using ANSYS CFX software. The approach was quantitative, with an applied research type and a descriptive level. To carry out the research, a three-dimensional numerical modeling of the behavior of the hydraulic rapid in the Conchano Tunnel was performed, with specific dimensions and using the Ansys CFX software. The results obtained allow understanding the hydraulic behavior of the rapid in the Conchano Tunnel, with dimensions of 52.85 m long, 4.3 m wide, 2.3 m deep and a slope of 3%. The model was optimized for the 0.50 m grid and 12,000 l/s flow, identifying critical zones of high velocity (107.067 m/s) and hydraulic pressure (1,094.637 Pa) at 50 m from the beginning of the Conchano tunnel, however, despite this, the rapid is operating under normal conditions (design flow) according to the computational analysis. In conclusion, the relevance of Ansys CFX software for hydraulic projects is highlighted, thanks to its ability to model the flow of rapids in three dimensions and simulate the velocity and pressure of the hydraulic flow for the 0.3m, 0.4m and 0.5m mesh, facilitating informed decisions regarding the design and operation of hydraulic works.

Key words: pressure, velocity, three-dimensional numerical modeling.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El desarrollo y mantenimiento de infraestructuras críticas, tales como rápidas hidráulicas, es fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del transporte del agua en regiones montañosas (Tipán, 2023). Las rápidas son infraestructuras utilizadas para conducir agua desde elevaciones superiores a inferiores en distancias cortas, desempeñan un papel crucial en proyectos hidráulicos (Sevilla, 2021).

La evaluación y el análisis convencional de estructuras como una rápida hidráulica son procesos complejos, costosos y prolongados, que requieren de extensas campañas de medición in situ y modelamiento en gabinete (Ngene et al., 2021). Esta aproximación tradicional limita la capacidad de respuesta ante situaciones críticas que demandan intervenciones inmediatas para garantizar la operatividad continua. En este escenario, el uso de herramientas de simulación computacional emerge como una alternativa prometedora, ofreciendo la posibilidad de realizar análisis detallados y precisos en tiempos significativamente reducidos y con menores costos asociados (Wang et al., 2021).

En este contexto, la rápida hidráulica del Túnel Conchano, ubicado en la provincia de Chota, se presenta como un componente crucial social. La rápida hidráulica forma parte de un sistema más amplio vinculado al proyecto Especial Olmos Tinajones, que abastece de agua a gran parte de la costa peruana. Sin embargo, esta rápida enfrenta diversos desafíos, incluyendo problemas hidrológicos y de mantenimiento, que pueden comprometer su funcionalidad y seguridad. Además, la variabilidad climática y los eventos geológicos

impredecibles en la zona aumentan el riesgo de deterioro y daños en la estructura. Siendo así, la falta de análisis detallados y modelamiento computacional puede derivar en ineficiencias operativas.

El software Ansys CFX se destaca como una solución avanzada para el modelamiento y análisis computacional fluidodinámico (CFD) y estructural, permitiendo simular con alta precisión las condiciones reales a las que está sometida una infraestructura como la rápida hidráulica del Túnel Conchano. Pero, a pesar de sus capacidades, la aplicación de Ansys CFX en el contexto específico de rápidas hidráulicas es aún incipiente, con un potencial de aprovechamiento significativamente alto para la optimización de diagnósticos en ingeniería civil.

La problemática radica en la carencia de estudios que utilicen herramientas computacionales avanzadas como Ansys CFX para entender el comportamiento de una rápida hidráulica. Esto genera incertidumbre en la eficacia de la infraestructura. Es imperativo abordar esta brecha de conocimiento y aplicar técnicas modernas de modelamiento para garantizar su operación eficiente.

Por lo tanto, la presente investigación busca llenar este vacío, proponiendo como pregunta central: ¿Cómo puede el análisis y modelamiento computacional avanzado, mediante el uso de Ansys CFX, contribuir a la evaluación rápida y precisa de la rápida hidráulica del Túnel Conchano? La respuesta a esta interrogante no solo aporta al conocimiento técnico en el ámbito y la gestión de infraestructuras hidráulicas en zonas montañosas, sino que también provee una base sólida para que las autoridades locales puedan plantear la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo más eficientes, prolongando la vida útil de este importante activo.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo puede el análisis y modelamiento computacional avanzado, mediante el uso de Ansys CFX, contribuir a la evaluación rápida y precisa de la rápida hidráulica del Túnel Conchano?

1.3. Justificación

La tesis se realizó para abordar la falta de estudios detallados sobre el comportamiento hidráulico de la rápida del Túnel Conchano, una estructura fundamental para el suministro de agua desde el nacimiento del río hacia la ciudad de Chiclayo. La rápida hidráulica ayuda a controlar y regular la velocidad del agua. Sin un control adecuado, el agua podría fluir a velocidades demasiado altas, lo que podría causar erosión y daños a los canales. Siendo así, el uso de Ansys CFX en esta investigación permitió simular y analizar el flujo de agua, proporcionando datos precisos del diseño y operación del sistema.

Esta investigación es esencial por varias razones. Minimiza riesgos de erosión y daños estructurales por medio de la simulación hidráulica de la rápida. Permite a las autoridades competentes tomar decisiones sobre mantenimiento y mejoras necesarias, por medio de la información técnica dada. Contribuye al conocimiento científico en mecánica de fluidos computacional aplicada a infraestructuras hidráulicas. Por último, los métodos y resultados obtenidos son aplicables a otras estructuras similares, proporcionando un marco metodológico robusto para futuras investigaciones.

Esta tesis avanza en el conocimiento técnico y científico en ingeniería hidráulica, beneficiando a comunidades actuales y futuras que dependen de sistemas de transporte de agua bien gestionados, como el sistema del Túnel Conchano.

1.4. Delimitación de la investigación

Este trabajo de delimita dentro del ámbito geográfico de la construcción del túnel chotano que queda aproximadamente a 14 Km de la ciudad de Chota y está ubicado en las coordenadas 06°29'57" Latitud Sur, 78°40'06" Longitud Oeste, a una altura de 2427 m.s.n.m. así como dentro de los alcances de la aplicación del software ANSYS SFX (aplicación de la tecnología CFD Dinámica Computacional de Fluidos) mediante ordenador.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Realizar el análisis y modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, Chota 2023.

1.5.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar la modelación numérica tridimensional del comportamiento de rápida del túnel Conchano, Chota, 2023.
- ✓ Analizar y optimizar la rápida hidráulica mediante un modelo tridimensional utilizando el software de elementos finitos "ANSYS CFX".
- ✓ Determinar la importancia del uso del software "ANSYS CFX" en futuros proyectos hidráulicos.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Dhakal (2023) en su artículo “Análisis computacional de la bifurcación del proyecto hidroeléctrico Raghuganga” tuvo como objetivo determinar el perfil para la bifurcación del Proyecto Hidroeléctrico Raghuganga con una pérdida de carga mínima y determinar analíticamente el espesor de tubería correspondiente para el mismo. Presenta un tipo de investigación cuantitativa, los resultados obtenidos del análisis estructural muestran que la tubería con el material E 250 con un espesor de 40 mm y refuerzos de 75 mm de espesor es adecuada para que la tensión máxima en la tubería con 167 MPa y un factor de seguridad mínimo sea 1.49. El autor concluye que de los resultados obtenidos del estudio analítico se pueden comparar con los resultados experimentales realizando las pruebas del modelo. El artículo aporta al estudio de la tesis proporcionando un ejemplo de análisis estructural computacional aplicado a un proyecto hidroeléctrico.

Žic et al. (2020) en su estudio “Análisis hidráulico de válvula de compuerta mediante dinámica de fluidos computacional (CFD)” tuvo como objetivo realizar análisis de tensión en componentes críticos de válvulas de compuerta utilizando la técnica CFD. Esta investigación es de tipo cualitativo, donde se llegó a los siguientes resultados: Los análisis se realizaron durante 4° de apertura de la válvula de compuerta con velocidades de entrada de 1.0 y 1.5 m·s⁻¹. Después del análisis hidrodinámico se encontró que todos los modelos muestran vórtices en el área detrás de la válvula de compuerta, especialmente en grados de apertura más pequeños. Gracias a esta investigación se pudo obtener un concepto

de valores máximos de velocidades y presión. El trabajo contribuye al estudio al proporcionar información sobre el análisis de tensión en componentes críticos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).

Chávez & Dueñas (2021) en su estudio “Evaluación y optimización hidráulica de las obras de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica palmira-nanegal utilizando el software ansys CFX” analizaron la rápida de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal. Esta investigación fue de tipo cuantitativo, donde se obtuvo los siguientes resultados: velocidad promedio en la rápida que posee una tubería de sección circular y fondo uniforme, rápida de escalones con corriente superficial, y rápida de forma circular equipada con anillos de acero que funcionan como disipadores de energía. Los investigadores determinaron que el método de diseño de anillos en tuberías de acero recomendado por la HEC14 es el más preciso, ya que se observó una concordancia entre los resultados obtenidos mediante análisis analítico y simulación numérica, con un margen de error situado entre el 5 y el 10%. Esta investigación permitió desarrollar de forma más eficaz el modelamiento numérico tridimensional. El estudio aporta al analizar una estructura similar utilizando el software Ansys CFX.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Sevilla (2020) en su investigación “Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy” plantearon un modelo computacional de la rápida hidráulica de Curumuy. La metodología utilizada comprendió una inspección en el terreno con el fin de familiarizarse con la infraestructura hidráulica. Posteriormente, tomó medidas de velocidades y niveles de agua cuyos valores fueron confrontados con el modelamiento. A partir

de los resultados obtenidos, se desarrolló y validó un modelo computacional. El autor concluyó que la disposición representa de forma precisa este fenómeno, ya que, al comparar los niveles y velocidades calculados con aquellos del modelo, se evidenciaron desviaciones mínimas, oscilando entre el 0 y el 16%. Esto propone una guía de instrucción para el proceso de modelación tridimensional para un posterior uso en la modelación de la Rápida Hidráulica del río Chotano.

Rivera (2023) en su estudio “Análisis del comportamiento hidráulico del filtro lento de Piscan – Yamango mediante Ansys CFX” tuvo como finalidad examinar y confirmar el comportamiento hidráulico del filtro de Piscan. La metodología usada se fundamentó en la confrontación de los datos derivados del modelamiento con los observados en la estructura real. Esta investigación fue del tipo cuantitativo, donde se pudo comprobar que la obra hidráulica era eficiente, y que Ansys CFX simuló correctamente los vectores de velocidad y campos de flujo, el autor concluye que los datos derivados son aceptables porque se asemejan a la realidad y será de gran utilidad para construcciones posteriores. Esta investigación contribuyó al modelamiento de la rápida hidráulica (entrada, salida, superficie libre, fondo y paredes).

Artega (2017) en su investigación “Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del Río Quiroz con modelo numérico tridimensional”. Tuvieron como objetivo estudiar el desempeño hidráulico, la metodología empleada en la investigación se basó en la utilización de la dinámica de fluidos computacional software ANSYS-CFX con el que se logró realizar el análisis de comportamiento de flujo hídrico. Los resultados revelaron que al emplear el caudal máximo de 300 m³/s con las compuertas abiertas, se origina erosión por el arrastre de sedimentos. En contraste, al utilizar el caudal promedio de 50 m³/s con

las compuertas cerradas, se evidencia erosión causada por la caída del fluido debido al rebasamiento. La conclusión derivada de la investigación sugiere una probabilidad significativa de erosión. La información recolectada de esta investigación sirve como guía de instrucción para el proceso de modelación tridimensional y análisis de resultados. Esto propone una guía de instrucción para el proceso de modelación tridimensional para un posterior uso en la modelación de la rápida del río chotano.

Montalvan (2021) en su estudio “Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando ANSYS” tuvo como metas describir la dinámica del líquido del sifón Piura mediante el empleo de modelación numérica. Además, buscó validar el diseño hidráulico mediante datos recabados en el campo y verificar la eficacia y confiabilidad del modelo. La ejecución se llevó a cabo utilizando el programa ANSYS CFX, que determinó las propiedades físicas del movimiento del fluido a través del sifón. Esto proporcionó una comprensión más profunda del comportamiento de la estructura hidráulica. Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo, y los resultados obtenidos a través de métodos experimentales y analíticos mostraron variaciones de aproximadamente un 10% por parámetro evaluado. El autor concluye que ANSYS ofrecen una simulación muy precisa, incluso en situaciones de turbulencia. Su aporte permitió determinar si el análisis del flujo era estacionario o transitorio.

2.1.3. Antecedentes regionales

No existen investigaciones sobre modelamiento a nivel local en el que, hayan utilizado el programa en estudio, no obstante, se presentan antecedentes referentes al modelamiento hidráulico.

Chavez (2019) en su tesis “Diseño de la bocatoma y mejoramiento del canal del caserío Potrerillo, distrito de Llama, provincia de Chota, departamento Cajamarca–2015” el propósito principal fue desarrollar el diseño de la entrada de agua (bocatoma), el canal de conducción y las estructuras artísticas requeridas para la captura, transporte y posterior utilización del recurso hídrico proveniente del Río Maychil. La investigación fue del tipo cuantitativo, y como resultados se obtuvo la elaboración del expediente técnico de la bocatoma, por lo que, concluyó que, la modelación hidráulica en proyectos de captación de agua puede ser eficiente si se usan los programas de modelamiento adecuados. La tesis de Chavez (2019) aporta al proyecto al desarrollar el diseño de la bocatoma y el canal del caserío Potrerillo. Su enfoque cuantitativo demuestra la eficiencia de la modelación hidráulica en proyectos de captación de agua, lo que es relevante para el modelamiento de la rápida del Túnel Conchano en Chota.

2.2. Bases teórico – científicas

2.2.1. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica ha sido ampliamente utilizada en diversos estudios de ingeniería e investigación. Consiste en la simulación matemática del comportamiento de fluidos en sistemas hidráulicos, permitiendo predecir y comprender diferentes fenómenos y procesos que ocurren en los sistemas.

La modelación hidráulica se realiza mediante la aplicación de principios físicos y matemáticos en un modelo computacional, que puede variar desde un sistema simple hasta uno complejo que involucre una vasta cantidad de variables interdependientes. Los modelos hidráulicos se basan en ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, las cuales son resueltas

iterativamente mediante métodos numéricos, como los métodos discretos o continuos (Landau et al., 2021).

La modelación hidráulica busca prever el comportamiento del flujo. Estos modelos son útiles para prever posibles errores en la estructura real con antelación (Monge, 2017).

La toma de decisiones se fundamenta en el modelo hidráulico, ya que posibilita la simulación de la reacción del sistema frente a diversas solicitudes. Es esencial que el modelo sea confiable y dinámico, con la capacidad de replicar con exactitud el comportamiento de la red en cualquier momento y situación. Asimismo, es necesario que las simulaciones se lleven a cabo de manera ágil (Conejos et al., 2019).

Es importante destacar que la modelación hidráulica requiere de datos precisos y confiables para la calibración y validación de los modelos. Estos datos pueden ser obtenidos a través de mediciones en campo, análisis estadísticos o modelos numéricos complementarios. Además, la interpretación de los resultados de la modelación hidráulica requiere de un análisis crítico y una comprensión profunda de los fenómenos hidráulicos involucrados (Crespo, 2006).

2.2.2. *Teoría de mecánica de fluidos para el diseño hidráulico*

La teoría de la mecánica de fluidos determina el comportamiento de los fluidos y su interacción con objetos sólidos. En el diseño de una rápida hidráulica tipo canal, la teoría de la mecánica de fluidos es fundamental para entender y predecir el comportamiento del agua en este tipo de estructuras (Crespo, 2006).

Algunos conceptos básicos de la teoría de la mecánica de fluidos que son relevantes para el diseño de una rápida hidráulica tipo canal incluyen: (Landau et al., 2021)

Ecuación de continuidad: Establece que la masa de un fluido que ingresa a una sección debe ser igual a la masa que sale de esa sección. En el caso de una rápida hidráulica tipo canal, la ecuación de continuidad permite determinar la relación entre el caudal de entrada y de salida.

$$A_1v_1 = A_2v_2$$

Donde, A es el área de la sección transversal, v es la velocidad del fluido.

Ecuación de Bernoulli: Esta ecuación relaciona la presión, la velocidad y la altura de un fluido en un tubo o canal. En el diseño de una rápida hidráulica tipo canal, la ecuación de Bernoulli se usa para determinar la variación de la presión y la velocidad del agua a medida que fluye a través de la estructura.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Donde, P es la presión estática, ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, g es la aceleración debido a la gravedad y h es la altura del fluido.

Teoría del flujo gradualmente variado: En rápidas hidráulicas, el flujo puede ser considerado como gradualmente variado en ciertas secciones, lo que significa que los cambios en la profundidad del flujo son graduales. Las ecuaciones de flujo gradualmente variado, como la ecuación de Manning o la ecuación de Chezy, se utilizan para describir el perfil de velocidad y la profundidad del agua:

Ecuación de Manning para canales abiertos:

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

Donde, v es la velocidad del flujo, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, R es el radio hidráulico, S es la pendiente de la energía o línea de agua.

Ecuación de Chezy:

$$v = C\sqrt{RS}$$

Donde, C es el coeficiente de Chezy que depende de la rugosidad del canal y otras características.

Pérdidas de carga: Las pérdidas de carga son las pérdidas de energía que ocurren cuando un fluido fluye a través de una tubería o canal. En el diseño de una rápida hidráulica tipo canal, es importante tener en cuenta las pérdidas de carga para asegurar un flujo eficiente y evitar problemas como la cavitación.

Perfil de velocidad: En el diseño de una rápida hidráulica tipo canal, es necesario analizar y optimizar el perfil de velocidad para garantizar un flujo uniforme y evitar la formación de remolinos y turbulencias.

Simulación numérica. Dado que las condiciones reales de flujo en rápidas hidráulicas pueden ser extremadamente complejas y difíciles de describir con ecuaciones analíticas simples, a menudo se recurre a la simulación numérica (por ejemplo, CFD) para obtener una descripción detallada del perfil de velocidad y otros aspectos del flujo. Estos modelos pueden incorporar efectos de viscosidad, turbulencia, y geometría específica del canal para predecir con precisión el comportamiento del flujo.

Además de estos conceptos, la teoría de la mecánica de fluidos también se utiliza para analizar otros aspectos del diseño de una rápida hidráulica tipo canal, como la sedimentación de sólidos, la erosión del canal y el impacto de las fuerzas hidrodinámicas en las estructuras cercanas (Domingo, 2011).

2.2.3. *Dinámica de fluidos computacional (CFD)*

La dinámica computacional de fluidos (CFD) es un campo que se centra en la simulación numérica de fluidos y los fenómenos asociados, surgiendo de la integración de la mecánica de los fluidos y el cálculo numérico (Kessler, 2016 según lo referido por Sevilla, 2020, p.17).

Este enfoque aborda la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos conexos, como reacciones químicas y combustión, así como Aero acústica, principalmente en disciplinas como la ingeniería. CFD se beneficia de la disponibilidad de supercomputadoras, lo que permite la resolución eficiente de las ecuaciones asociadas. Siendo una herramienta altamente efectiva y con un potencial significativo (Arteaga, 2017).

Para llevar a cabo simulaciones de CFD, se requiere de un software especializado que utiliza métodos numéricos para discretizar las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos. Estas ecuaciones, conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, son complejas y no lineales, por lo que es necesario utilizar técnicas de aproximación y métodos iterativos para resolverlas. Una vez que se resuelven las ecuaciones, se obtienen resultados que proporcionan información detallada sobre el flujo del fluido, como la velocidad, la presión y la distribución de temperatura (Xamán, 2016).

La CFD se ha convertido en una herramienta indispensable en el diseño de sistemas hidráulicos y en la resolución de problemas relacionados con el flujo de fluidos en diversos campos de la ingeniería. Por ejemplo, en el diseño de turbinas hidráulicas, la CFD ha permitido optimizar las geometrías de las paletas de las turbinas para obtener un mayor rendimiento. Además, la CFD se utiliza en el diseño de sistemas de refrigeración, como los radiadores de automóviles, para determinar la distribución de temperatura y, de esta manera, mejorar la eficiencia del sistema (Xamán, 2016).

Diversos estudios han demostrado la eficacia de la CFD en el análisis de problemas hidráulicos complejos. Según un estudio realizado por Oro (2012), la simulación de CFD se utilizó para analizar el flujo de agua en una presa y se

encontró que los resultados obtenidos coincidieron de manera satisfactoria con los datos experimentales. Por otro lado, Cruz et al. (2020) utilizaron la CFD para estudiar el flujo de aire en un túnel de viento, y encontraron que los resultados obtenidos mediante simulación se ajustaron perfectamente a los datos medidos.

2.2.4. Ecuaciones de conservación

El solucionador integrado en ANSYS CFX aborda el sistema de ecuaciones no estacionarias de Navier-Stokes mediante su formulación de conservación. Estas ecuaciones se basan en los principios de transporte de masa, momento y energía. El solucionador utiliza el método de volúmenes finitos, comenzando con la discretización del dominio en un conjunto de volúmenes de control. Posteriormente, resuelve las ecuaciones de transporte o conservación en este conjunto de volúmenes de control (Sevilla, 2022).

2.2.4.1. Conservación de masa

El movimiento del fluido dentro del volumen de control implica también un flujo a través de la superficie de control. Esta condición se define en la ecuación 2, la cual establece que la variación en la masa que entra al volumen de control V debe coincidir con la masa que atraviesa la superficie S (Mongue, 2017).

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho dV = \int_s \rho U \cdot n dS \quad (1)$$

Donde, U : Velocidad en m/s. ρ : Densidad en kg/m³. η : Vector normal unitario.

Empleando el teorema de la divergencia de Gauss, se procederá a modificar la segunda integral y se insertará la derivada en la primera integral, obteniendo así el resultado deseado.

$$\int_V \left[\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho U) \right] dV = 0 \quad (2)$$

La ecuación previamente presentada es aplicable a cualquier volumen de control, y su implicación se refleja en la ecuación 3.

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

La ecuación 3 puede formularse de acuerdo con la ecuación 4, que representa la bien conocida “ecuación de conservación de la masa”.

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (4)$$

2.2.4.2. Conservación de cantidad de movimiento

Conocida también como momentum, esta instituye que la fuerza total en un volumen de control específico es equivalente al producto de su masa infinitesimal por su respectiva aceleración. Además, contempla las fuerzas normales y cortantes que ejercen su acción en el elemento. (Abarca, 2018).

Para cada una de las direcciones se tienen:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (7)$$

Las velocidades u,v,w, son las velocidades en los ejes x, y y z, $\tau\tau$ es el esfuerzo cortante y f es la fuerza resultante en la superficie del fluido.

2.2.4.3. Conservación de la energía

De acuerdo con los principios fundamentales de la termodinámica, si un sistema recibe trabajo o intercambia calor con su entorno, esto provocará una modificación en la energía interna del sistema. La ecuación 8 aplicada a la termodinámica para sistemas cerrados y considerando los signos termodinámicos, se formula de la siguiente manera en la ecuación 9 (Montalvan, 2021).

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (8)$$

$$\Delta U = Q - W \quad (9)$$

Las variables utilizadas son: U para la energía interna del sistema, Q para la cantidad de calor aportado al sistema y W para el trabajo realizado por el sistema. En sistemas abiertos, con un flujo constante, así como interacciones de trabajo y calor con el entorno, la energía total del sistema se define como la suma de la energía interna, que está influenciada por la temperatura y el trabajo del fluido, además de la energía cinética, asociada con la velocidad, y la energía potencial, que cambia en función de la posición del fluido (Montalvan, 2021).

$$E_{sistema} = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgh \quad (10)$$

2.2.5. Turbulencia

La turbulencia se refiere a un fenómeno de flujo caracterizado por su naturaleza oscilante, turbia y aparentemente aleatoria. Todos los flujos son clasificados como turbulentos, originados por la existencia de irregularidades que se generan y eliminan de manera cíclica, dando lugar a la formación de vórtices. El comportamiento de un fluido en el flujo puede ser descrito mediante el número de Reynolds. De este modo, se clasifica como laminar un flujo en el cual los esfuerzos viscosos son predominantes, mientras que la pérdida de esta laminaridad se denomina turbulencia. (Montalvan, 2021).

2.2.5.1. Ecuaciones de Naviere Stokes

Estas ecuaciones, basadas en la segunda ley de Newton aplicada a fluidos newtonianos, gobiernan el comportamiento de fenómenos que involucran tales fluidos, donde los esfuerzos viscosos son directamente proporcionales a la deformación (Montalvan, 2021).

Las características de estas ecuaciones son diversas:

- Dependen del tiempo.
- Son tridimensionales.
- Incluyen esfuerzos viscosos.
- Consideran la compresibilidad del fluido.
- Se presentan como ecuaciones en derivadas parciales elípticas no lineales.
- Están acopladas entre sí, aunque en muchos casos se simplifican mediante:
- Imposición de condiciones de contorno estacionarias.
- Reducción de dimensiones, como problemas estacionarios, bidimensionales o axisimétricos.

- Aproximaciones del comportamiento del fluido, como incompresible o no viscoso.
- Simplificación de las fuerzas actuantes (hidrostáticas, potenciales).
- Aproximaciones basadas en valores medios, como Reynolds medio o profundidad media. (Depthaveraged).

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu \left(D_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right] \quad (11)$$

En esta expresión, ρ denota la densidad, u_i (con $i = 1, 2, 3$) representa las componentes cartesianas de la velocidad, F_i indica las fuerzas externas aplicadas al cuerpo, P es la presión del fluido y μ es la viscosidad dinámica. Además, Δ simboliza la divergencia del fluido, y δ_{ij} es la delta de Kronecker (Arteaga, 2017). Solo en condiciones específicas o situaciones particulares se puede encontrar una solución analítica. Frecuentemente, es forzoso emplear métodos numéricos (Arteaga, 2017).

2.2.5.2. Descripción física del fenómeno

Las ecuaciones de Navier-Stokes proporcionan una herramienta para comprender el movimiento de un fluido y modelar sus parámetros. Sin embargo, la no linealidad intrínseca de estas ecuaciones impide una descripción analítica completa del proceso de transición real, en contraste con las teorías lineales, que pueden tener cierto éxito en la predicción (Montalvan, 2021).

Arteaga (2017), explica que, el flujo laminar o turbulento puede describirse por:

- Fluctuaciones naturales: Se observa una variación en la presión y la velocidad alrededor del promedio, y estas fluctuaciones poseen una naturaleza tridimensional.

- Formación de remolinos: Se generan estructuras coherentes llamadas remolinos o vórtices en las capas de fluido. La distribución de tamaños de estos vórtices abarca desde dimensiones que atraviesan el flujo hasta aquellas donde la viscosidad disipa el movimiento.
- Mantenimiento autónomo: Un flujo turbulento tiene la capacidad de mantener su propia turbulencia.
- La disipación en un flujo turbulento se produce debido a la ruptura sucesiva de vórtices a escalas cada vez más pequeñas, hasta llegar a la escala de Kolmogorov. Una vez que los vórtices alcanzan esta escala, la viscosidad del fluido actúa para disipar la energía cinética, disminuyendo así el movimiento turbulento. En ausencia de un mecanismo que introduzca energía al sistema, el flujo turbulento tiende a disiparse con el tiempo, a menos que se mantenga constantemente un suministro externo de energía.

Figura 1

Flujo Laminar o Turbulento.



Nota: Sánchez Folch, 2016.

2.2.5.3. Modelos de turbulencia

Se explica que para llevar a cabo la simulación en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es necesario expresar en el lenguaje de programación del software las ecuaciones que describen el comportamiento del fluido. La

turbulencia emerge como uno de los parámetros más distintivos en el estudio de los fluidos. (Bayona, Londoño & Nieto,2015 citado por Montalvan,2021).

La turbulencia, siendo tridimensional y dependiente del tiempo, plantea un desafío computacional significativo. Modelar directamente estas fluctuaciones mediante métodos numéricos implica un costo computacional elevado. Con el fin de reducir la carga de procesamiento, se han desarrollado modelos de ecuaciones que eliminan las escalas más pequeñas a través de un promedio temporal o de un conjunto de variables. Esto resulta en ecuaciones menos demandantes para el proceso, aunque con un mayor número de variables que requieren la formulación de más ecuaciones para determinar el valor de las incógnitas (Montalvan,2021).

DNS “Direct Numerical Simulation”

De acuerdo a Menter (2011) se trata de un modelo numérico integral diseñada para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, abordando todas las características de la turbulencia en cualquier situación espacio-temporal. Además, es importante aplicar el modelo DNS en configuraciones geométricas simples y en situaciones con bajos números de Reynolds. Esto se debe a que, para aplicaciones de ingeniería, resulta difícil obtener soluciones numéricas de turbulencia cuando se trabajan con escalas que poseen números relativos a Re^3 , así como en el rango de números de Reynolds comprendidos entre 104 y 109. (Menter,2011 citado por Montalvan, 2021).

RANS (Reynolds –Averaged Navier Stokes)

La formulación RANS se basan en el principio de Reynolds en 1985, donde todas las magnitudes se describen como la suma de componentes individuales. Introduce incógnitas aumentando el número de fórmulas existentes. En consecuencia, los modelos de turbulencia RANS tienen la tarea de complementar

estas ecuaciones para representar de manera completa las características turbulentas de un fluido (Montalvan, 2021).

Estándar k-ε

Destaca como un recurso apropiado en diversas aplicaciones y ha sido extensamente empleado. Entre las ventajas de este modelo se incluye su sencillez de implementación, la relativa facilidad de convergencia en los cálculos, y la obtención de resultados coherentes (Montalvan, 2021).

Para la energía cinética de turbulencia k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2u_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (12)$$

Para la disipación

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} + \frac{\epsilon}{k} 2u_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (13)$$

Estándar K-W

Es uno de los modelos de turbulencia más ampliamente empleados que se basa en dos ecuaciones. Incorpora dos ecuaciones adicionales para describir las características turbulentas del flujo, lo que posibilita mantener un registro de los derivados de convección (Monge, 2017).

$$[k] \dots \frac{2}{3} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta * \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

$$[\omega] \dots \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \omega}{k} P - \beta * \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (15)$$

Ecuaciones de Reynolds (sub de rans)

Las ecuaciones RANS son adecuadas para caracterizar flujos turbulentos, pudiendo aplicarse con aproximaciones basadas en el conocimiento de las propiedades de la turbulencia del flujo. Así, proporcionan soluciones aproximadas en un tiempo promedio a las ecuaciones de Navier-Stokes. (Montalvan, 2021).

$$\rho \bar{u}_j \frac{d \bar{u}_t}{dx_j} = \rho \bar{f}_t + \frac{d}{dx_j} \left[-\bar{\rho} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{d \bar{u}_t}{dx_j} + \frac{d \bar{u}_j}{dx_i} \right) - \rho \bar{u}'_t \right] \quad (16)$$

Numero de Raynolds

De acuerdo con Mott & Untener (2015), según la referencia citada por Montalvan (2021), el número de Reynolds determina el estado del régimen del flujo en relación con el efecto viscoso. En presencia de pequeñas perturbaciones y bajo ciertas condiciones, el flujo permanece en estado laminar; sin embargo, alteraciones mínimas pueden desestructurar la configuración inicial y dar lugar a turbulencia. La expresión para el número de Reynolds es la siguiente:

$$\text{Re} = \frac{v * Rh}{\nu} = \frac{V * D}{\nu} \quad (17)$$

En la expresión dada, V representa la velocidad media del flujo, Rh denota el radio hidráulico, que es la correlación entre el área de la sección transversal del flujo y el perímetro mojado, mientras que D es el diámetro de la tubería. Además, ν representa la viscosidad cinemática del fluido.

2.2.6. Elementos finitos (MEF)

MEF se ha establecido como una herramienta indispensable en el diseño y análisis de infraestructura hidráulica, incluidas las rápidas hidráulicas. Esta técnica numérica permite la simulación de procesos complejos relacionados con

el flujo de fluidos y las interacciones fluido-estructura, proporcionando una comprensión detallada y precisa que es fundamental para el diseño óptimo y la evaluación de la seguridad de dichas estructuras (Zienkiewicz, 2010).

2.2.6.1.Principios básicos

El MEF se basa en dividir un objeto o sistema complejo en un conjunto de elementos más pequeños y manejables, conocidos como elementos finitos. Estos elementos pueden ser de diversas formas, como triángulos, cuadrados, o tetraedros, dependiendo de la forma del objeto y del tipo de análisis. La premisa es que, al analizar estos elementos más simples en conjunto, se puede aproximar con precisión el comportamiento del sistema o estructura completa (Zienkiewicz, 2010).

2.2.6.2.Etapas del método de elementos finitos

Las etapas del método de elementos finitos incluyen: (Zienkiewicz, 2010)

- Discretización: El primer paso en el MEF es la discretización o división del dominio de estudio (por ejemplo, una pieza mecánica, una sección de terreno, etc.) en elementos finitos. Esta red de elementos se conoce como malla.
- Selección de Elementos: Se eligen los tipos de elementos adecuados para la malla, lo que depende de la naturaleza del problema (estructural, térmico, fluido, etc.) y de la geometría del dominio.
- Definición de Propiedades de Material: Se asignan propiedades materiales (como elasticidad, conductividad térmica, viscosidad, etc.) a los elementos de la malla.
- Formulación de Ecuaciones: Para cada elemento, se formulan ecuaciones basadas en las leyes físicas que rigen el problema (leyes de Newton, ecuaciones de Navier-Stokes, ecuaciones de Maxwell, etc.). Estas ecuaciones

relacionan las variables del problema (desplazamientos, temperaturas, presiones, etc.) con las fuerzas, flujos de calor, o campos aplicados.

- Ensamblaje: Las ecuaciones de todos los elementos se ensamblan en un sistema global de ecuaciones.
- Condiciones de Contorno: Se aplican condiciones de contorno (restricciones y cargas) al modelo.
- Solución del Sistema de Ecuaciones: El sistema global de ecuaciones se resuelve utilizando métodos numéricos, lo que proporciona una aproximación del comportamiento del sistema o estructura bajo estudio.
- Post-Procesamiento: Los resultados (por ejemplo, desplazamientos, tensiones, flujos, etc.) se analizan y visualizan.

2.2.6.3. Aplicaciones

El MEF tiene un amplio rango de aplicaciones en diversas disciplinas de la ingeniería y la ciencia: (Zienkiewicz, 2010)

- Ingeniería Mecánica y Aeroespacial: Diseño y análisis de componentes estructurales, análisis de tensiones y deformaciones, dinámica de fluidos, etc.
- Ingeniería Civil: Análisis estructural de edificios, puentes, y presas; estudio del comportamiento del suelo y de las rocas, etc.
- Ingeniería Biomédica: Simulación del comportamiento de tejidos y órganos, diseño de implantes, etc.
- Ingeniería Eléctrica y Electrónica: Diseño y análisis de campos electromagnéticos, circuitos, y sistemas microelectromecánicos (MEMS).

2.2.6.4. Aplicación del MEF en el diseño de rápidas hidráulicas

Las rápidas hidráulicas, estructuras diseñadas para disipar energía y reducir la velocidad del agua en canales o ríos, presentan desafíos significativos

debido a la complejidad de los flujos turbulentos y la erosión potencial del suelo y de las estructuras circundantes. El MEF se utiliza para modelar estas condiciones, permitiendo a los ingenieros prever el comportamiento del flujo, evaluar los efectos de la turbulencia y la presión del agua, y diseñar estructuras que puedan resistir estas fuerzas a lo largo del tiempo (Zienkiewicz, 2010).

2.2.6.5. Modelado de flujos turbulentos

Una de las principales ventajas del MEF en el contexto de las rápidas hidráulicas es su capacidad para modelar flujos turbulentos. Utilizando ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles y aplicando modelos de turbulencia como $k-\varepsilon$ o $k-\omega$, los investigadores pueden simular con precisión el movimiento del agua (Zienkiewicz, 2010). Estos modelos permiten la predicción detallada de patrones de flujo, presiones ejercidas sobre las superficies de la rápida y la distribución de velocidades, lo que es crucial para el diseño estructural y la evaluación de la erosión.

2.2.6.6. Análisis de interacción fluido-Estructural (FSI)

El análisis de interacción fluido-estructura (FSI) es otro aspecto crítico del diseño de rápidas hidráulicas donde el MEF ofrece beneficios significativos. Esta técnica permite a los ingenieros simular cómo los flujos de agua interactúan con las estructuras móviles o deformables, lo cual es esencial para prever el comportamiento de la rápida bajo diversas condiciones de carga hidráulica (Zienkiewicz, 2010). El FSI ayuda en el diseño de estructuras que no solo son capaces de soportar las fuerzas hidráulicas sino también de adaptarse o resistir a los cambios a largo plazo en el entorno fluvial.

2.2.7. *Ansys CFX*

ANSYS CFX es una herramienta utilizada para la modelación numérica de fluidos. Con su amplia configuración, es capaz de abordar una variedad de fenómenos naturales. Aunque se lanzó por primera vez en 1970 como su primer programa de computador comercial, no fue hasta 2006 que ANSYS CFX se consolidó como uno de los líderes globales en el desarrollo de software para simulaciones de fluidos, tras la adquisición de CFX-4 y FLUENT. A lo largo de los años, ANSYS ha continuado desarrollando y adquiriendo diversos códigos numéricos, lo que le otorga la capacidad actual de realizar simulaciones numéricas en áreas como fluidos, estructuras, electromagnetismo, térmica, química, entre otras Ekambara (2009).

Uno de los aspectos más importantes de Ansys CFX es su capacidad para analizar y predecir el flujo de fluidos en situaciones complejas. Según Ekambara et al. (2009), la herramienta utiliza un enfoque de elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transferencia de calor, lo que permite una simulación precisa y detallada del comportamiento del fluido. Esto resulta útil en la resolución de problemas de hidráulica, donde es esencial comprender cómo el flujo de fluidos interactúa con los sistemas y componentes.

Además, dispone de la interfaz de trabajo Workbench, la cual resulta muy fácil de utilizar para el usuario. En esta plataforma se incluyen los distintos códigos de ANSYS, así como las herramientas esenciales para generar geometrías y mallas, requisitos previos a la configuración del CFX. (Noblecilla, 2019).

Otra funcionalidad clave de Ansys CFX es su capacidad para simular el transporte de sustancias contaminantes en los sistemas hidráulicos. Según Śliwa et al. (2012), esta herramienta ha sido utilizada con éxito para modelar y predecir

la dispersión de contaminantes en ríos y cuerpos de agua. Esto resulta fundamental en la evaluación de los impactos ambientales de proyectos hidráulicos y en la implementación de medidas de mitigación adecuadas.

Ansys CFX es un software de simulación utilizado en la investigación hidráulica para comprender y predecir el comportamiento de los fluidos en disímiles condiciones. Esta herramienta brinda la posibilidad de simular el flujo de fluidos, el transporte de contaminantes y la transferencia de calor en sistemas hidráulicos, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones informadas y la optimización del rendimiento de estos sistemas.

2.2.7.1. Algoritmo utilizado en el programa Ansys CFX

El algoritmo utilizado en el programa ANSYS CFX para el diseño hidráulico es el método de Volume de Finito (FVM, por sus siglas en inglés). Este método es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones parciales diferenciales que describen el comportamiento de fluidos en diferentes aplicaciones, incluyendo el diseño hidráulico (Obrovský et al., 2013).

El FVM divide el dominio de estudio en pequeños volúmenes finitos, llamados celdas, y aplica las ecuaciones de conservación de masa y momento a cada celda. Luego, se resuelve el sistema de ecuaciones resultante utilizando técnicas numéricas, como el método de Gauss-Seidel o el método de Newton-Raphson (Watanabe et al., 2021).

El algoritmo utilizado en Ansys CFX para el diseño hidráulico se basa en una serie de métodos y técnicas avanzadas de CFD, que incluyen la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, acoplamiento de presión y velocidad, y modelado de turbulencia (Obrovský et al., 2013).

El corazón del algoritmo de Ansys CFX es la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de los fluidos. Estas ecuaciones son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que representan la conservación de masa (ecuación de continuidad), la conservación de momento y la conservación de energía (Obrovský et al., 2013).

Ecuaciones de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0$$

Ecuaciones de momento

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\nabla p + \nabla \tau + f$$

Ecuaciones de energía

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(u(\rho E + p)) = \nabla(k \nabla T + (u \tau)) + \dot{q}$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, u es la velocidad del fluido, p es la presión, τ es el tensor de tensiones viscosas, f representa las fuerzas externas, E es la energía total por unidad de masa, k es la conductividad térmica, T es la temperatura, \dot{q} es la fuente de calor interna.

Ansys CFX utiliza un enfoque de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes. En este método, el dominio de solución se divide en pequeños volúmenes de control, y las ecuaciones diferenciales se integran sobre estos volúmenes. Esto transforma las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas (Watanabe et al., 2021).

El algoritmo emplea métodos como SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) o PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) para acoplar la presión y la velocidad del fluido. Este acoplamiento es

crucial para asegurar la conservación de la masa y obtener soluciones físicamente realistas (Watanabe et al., 2021).

Para simular flujos turbulentos, Ansys CFX incluye varios modelos de turbulencia, como el modelo $k-\epsilon$, el modelo $k-\omega$, y el modelo de Reynolds Stress. Estos modelos introducen ecuaciones adicionales para resolver las escalas de turbulencia y los efectos promedios de las fluctuaciones turbulentas en el flujo.

Las ecuaciones discretizadas se resuelven iterativamente utilizando métodos numéricos como el método de Newton-Raphson o métodos multigrad. Estas técnicas ayudan a acelerar la convergencia de la solución y mejorar la precisión (Watanabe et al., 2021).

Una vez que se obtiene la solución, Ansys CFX ofrece herramientas de post-procesamiento para visualizar y analizar los resultados, como campos de velocidad, presión, temperaturas, y otros parámetros de interés. Esto permite a los ingenieros evaluar el rendimiento hidráulico y realizar ajustes en el diseño (Watanabe et al., 2021).

2.2.8. Optimización de una rápida hidráulica

La optimización de una rápida hidráulica implica la mejora del diseño y el rendimiento de una estructura de control de flujo que se utiliza en canales abiertos para disipar la energía del agua y controlar su velocidad. Esta optimización puede ser abordada utilizando herramientas de CFD (Computational Fluid Dynamics) como Ansys CFX, combinadas con técnicas de optimización (Villalba Fernández de Castro & Saldarriaga, 2005).

La optimización de una rápida hidráulica se refiere a la aplicación de técnicas y herramientas para mejorar el comportamiento hidráulico y reducir la disipación de energía en estructuras hidráulicas.

El primer paso es definir claramente el problema de diseño y los objetivos de la optimización. Generalmente, los objetivos pueden incluir la reducción de la energía del flujo aguas abajo, la minimización de la erosión en la base de la rampa, el control de la velocidad del agua para evitar daños estructurales y el cumplimiento de restricciones hidráulicas y ambientales. Una vez que se han establecido los objetivos, se procede a crear un modelo CFD detallado del sistema de la rampa hidráulica utilizando Ansys CFX. Este modelo debe incluir la geometría de la rampa, las condiciones de contorno, como el caudal de entrada y los niveles de agua, así como las condiciones de salida y las propiedades del fluido, como la densidad y la viscosidad (Sánchez & Durán, 2020).

Con el modelo en marcha, se realiza una simulación inicial para obtener una línea base del comportamiento hidráulico. Esta simulación ayuda a evaluar el campo de velocidades y presiones, y a identificar áreas de alta energía y posibles problemas de erosión (Villalba Fernández de Castro & Saldarriaga, 2005).

A continuación, se identifican los parámetros de diseño que serán optimizados. Estos parámetros pueden incluir el ángulo de inclinación de la rampa, la forma y el perfil de la rampa, la presencia y ubicación de estructuras adicionales como deflectores o disipadores de energía, y los materiales de revestimiento (Villalba Fernández de Castro & Saldarriaga, 2005).

Luego, se integra el modelo CFD con el algoritmo de optimización. Esto puede realizarse mediante herramientas de optimización integradas en Ansys o mediante scripts personalizados. El proceso de optimización incluye la definición de la función objetivo, como minimizar la energía aguas abajo o la velocidad del flujo, y la definición de restricciones geométricas y operacionales. Se ejecutan iteraciones de diseño y evaluación hasta encontrar la configuración óptima.

Una vez obtenidos los resultados de la optimización, se analizan para identificar el diseño óptimo. Esto implica comparar los resultados de diferentes iteraciones y validar el diseño optimizado mediante simulaciones adicionales. También se consideran factores prácticos como los costos de construcción y mantenimiento (Villalba Fernández de Castro & Saldarriaga, 2005).

Finalmente, después de identificar el diseño óptimo, se desarrollan los planos y especificaciones detalladas para la construcción. El diseño optimizado se implementa en el sitio, y se monitorea su rendimiento post-construcción para asegurar que cumpla con los objetivos planteados. Si es necesario, se realizan ajustes para mejorar su funcionamiento (Sánchez & Durán, 2020).

2.3. Marco conceptual

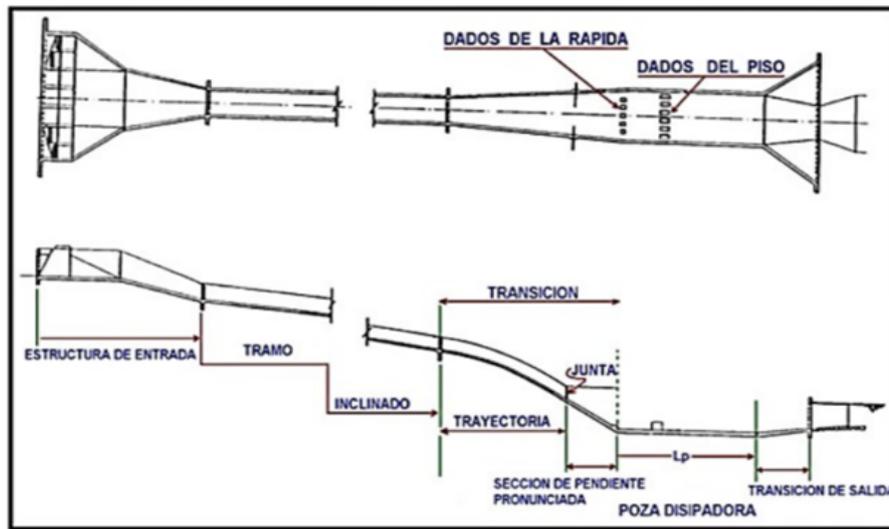
2.3.1. *Rápida hidráulica*

En ingeniería, las obras rápidas hidráulicas se emplean para trasladar agua desde niveles elevados a niveles más bajos, siendo estas estructuras necesarias en áreas donde el terreno natural cuenta con pendientes pronunciadas en distancias cortas. (Lagos, 2019).

En este sentido, es necesario calcular y considerar las pérdidas a través de la entrada al determinar el nivel de energía al inicio del tramo inclinado. Si la pendiente en la parte inferior de la entrada es suave, se puede asumir que el flujo crítico se produce en el punto donde la pendiente suave de la entrada cambia a la pendiente más pronunciada del tramo inclinado. En el caso de que la inclinación de la entrada sea lo suficientemente empinada como para permitir una velocidad superior a la velocidad crítica, se debe calcular esta velocidad y el tirante correspondiente para determinar la gradiente de energía al inicio del tramo inclinado (Félix, 2018).

Figura 2

Partes de una Rápida



Nota: (ANA, 2010).

2.3.2. *Rugosidad de un canal*

La rugosidad es un parámetro crítico en el diseño de rápidas hidráulicas, pues influye directamente en la resistencia al flujo de agua y, por lo tanto, en el comportamiento hidráulico de estas estructuras. La rugosidad se refiere a las irregularidades presentes en la superficie de contacto que componen la rápida, como pueden ser el hormigón, rocas, o materiales sintéticos. Estas irregularidades pueden ser tanto macroscópicas (como las ondulaciones y los obstáculos físicos) como microscópicas (relacionadas con la textura del material) (Morales & Salazar, 2019).

Tabla 1

Coefficientes de Rugosidad Absoluta

Material	Coefficiente de Manning n	Coefficiente de Hazen Williams CH	Coefficiente de rugosidad absoluta e (mm)
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.60
Concreto simple	0.013	135	0.36

Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (nuevo, sin recubrimiento)	0.011	145	0.045
Plástico (PVC)	0.009	120	0.18

Nota: (Xie, 2021).

Aplicación de la Rugosidad en el Diseño de Rápidas Hidráulicas: (Morales & Salazar, 2019)

a) Cálculo del Coeficiente de Rugosidad

La rugosidad se cuantifica mediante coeficientes de rugosidad, como el coeficiente de Manning o el coeficiente de Strickler, los cuales se utilizan para estimar la resistencia al flujo generada por la fricción en las paredes de la rápida. La selección de un coeficiente adecuado es fundamental para el cálculo preciso de la velocidad del flujo, la profundidad del agua, y la capacidad de conducción de la rápida. (Morales & Salazar, 2019)

b) Diseño del Perfil y Sección Transversal

La rugosidad afecta la selección del perfil longitudinal y la sección transversal de la rápida. Un mayor coeficiente de rugosidad podría requerir una pendiente más pronunciada o una sección transversal más amplia para permitir el paso del caudal de diseño aguas arriba de la rápida, evitando así inundaciones o desbordamientos no deseados. (Morales & Salazar, 2019)

c) Disipación de Energía

Las rápidas hidráulicas se diseñan para disipar energía de manera eficiente y reducir la velocidad del agua a niveles seguros antes de que alcance estructuras o zonas críticas aguas abajo. La rugosidad de la superficie tiene un papel significativo en este proceso, ya que superficies más rugosas incrementan la disipación de energía a través del aumento de la turbulencia y la fricción. (Morales & Salazar, 2019)

d) Estabilidad y Erosión

La selección de materiales con la rugosidad adecuada contribuye a la estabilidad de la rápida hidráulica y a la protección contra la erosión. Una rugosidad excesiva, sin embargo, puede aumentar el riesgo de deposición de sedimentos, mientras que una rugosidad demasiado baja podría no proteger adecuadamente contra la erosión. El diseño debe encontrar un equilibrio adecuado, considerando tanto las condiciones hidráulicas como las características del flujo de sedimentos. (Morales & Salazar, 2019)

e) Simulaciones Hidráulicas y Modelado

Los modelos hidráulicos y las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizan el coeficiente de rugosidad como un parámetro de entrada crucial para predecir con precisión el comportamiento del flujo a través de la rápida. Estas herramientas pueden ayudar a optimizar el diseño, evaluando diferentes escenarios y configuraciones para alcanzar el mejor balance entre eficiencia hidráulica y estabilidad estructural. (Morales & Salazar, 2019)

2.3.3. *Parámetros de análisis hidráulico de una rápida relacionados con el fluido*

En el análisis hidráulico de rápidas, estructuras diseñadas para disipar energía y controlar la erosión en canales o ríos, varios parámetros relacionados con el fluido son esenciales para comprender el comportamiento del agua y diseñar eficazmente estas estructuras. A continuación, se definen conceptualmente algunos de los parámetros clave: (Morales & Salazar, 2019)

Presión. La presión en un contexto hidráulico se refiere a la fuerza ejercida por el fluido (en este caso, el agua) por unidad de área en un punto dado. En el análisis de rápidas, la presión es un factor crítico, ya que afecta la estabilidad de la estructura y la capacidad de disipación de energía. La presión hidrostática, por

ejemplo, es la presión ejercida por el agua en reposo y varía con la profundidad debido al peso del agua situada por encima del punto de medida. En movimiento, la presión también incluye componentes dinámicos relacionados con la velocidad y la dirección del flujo. (Morales & Salazar, 2019)

Velocidad. La velocidad del agua en una rápida es un vector que indica tanto la magnitud (qué tan rápido se mueve el agua) como la dirección del flujo. La distribución de la velocidad a lo largo de una rápida es fundamental para determinar cómo se disipa la energía del agua y cómo se pueden formar zonas de alta erosión o sedimentación. La velocidad afecta directamente la capacidad de la rápida para manejar el flujo de agua de manera eficiente y segura, y es crucial para el diseño hidráulico, incluyendo aspectos como el dimensionamiento de la rápida y la estimación de la turbulencia. (Morales & Salazar, 2019)

Tirante. El tirante, también conocido como profundidad hidráulica, se refiere a la altura vertical del flujo de agua en un canal o sobre una rápida, medida desde el fondo hasta la superficie libre del agua. Este parámetro es vital para el análisis hidráulico, ya que influye en la capacidad de flujo del canal, la velocidad del agua, y la presión ejercida en las paredes y el fondo del canal o estructura. El tirante es un indicador de la cantidad de agua que pasa por un punto específico y afecta directamente al régimen de flujo (subcrítico, crítico o supercrítico), que tiene implicaciones significativas en el diseño y comportamiento hidráulico de rápidas y estructuras asociadas. (Morales & Salazar, 2019)

Caudal. Cantidad de agua que pasa por un punto específico del canal o río por unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Es uno de los parámetros más importantes en hidráulica, ya que determina la magnitud del flujo que una rápida debe manejar. El caudal influye en la selección

del diseño de la rápida, incluyendo su tamaño y forma, para asegurar que pueda disipar eficientemente la energía del agua y minimizar el riesgo de erosión aguas abajo o daños estructurales. Además, el caudal es crucial para la evaluación del impacto ambiental y la gestión del agua en la planificación de recursos hídricos. (Morales & Salazar, 2019)

2.3.4. Fluidos

Los fluidos son sustancias que pueden fluir y adaptarse a la forma de su contenedor. Estas sustancias pueden ser líquidos o gases. En un sentido más técnico, un fluido es cualquier sustancia que no mantiene una forma definida y puede fluir cuando se somete a una fuerza externa (Mongue, 2017).

2.3.4.1. Tipos de fluidos

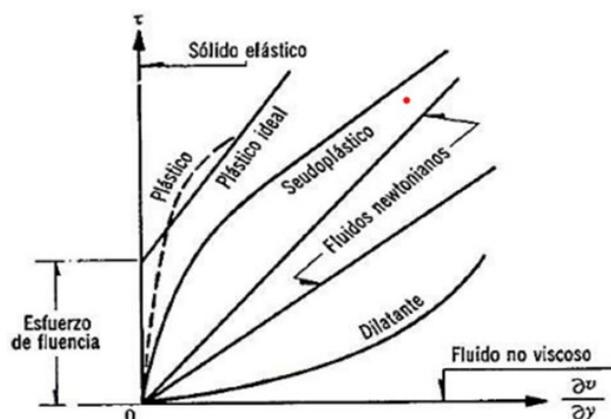
Existen dos tipos: Fluidos newtonianos y no newtonianos

Fluidos no newtonianos

Estos fluidos no siguen la relación descrita por la ecuación 18, ya que el esfuerzo cortante no muestra una proporción lineal con la deformación. Ejemplos de tales fluidos incluyen el fango y la sangre. La Figura 3 ilustra la distinción reológica, evidenciando las diferencias entre ambos tipos de fluidos (Mongue, 2017).

Figura 3

Representación Gráfica que Muestra las Diferencias Reológicas entre Fluidos



Nota: (Monge, 2017).

Fluidos newtonianos

Se hace referencia a fluidos viscosos cuando la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación es lineal. Ejemplos típicos de este tipo de fluidos incluyen el agua y la gasolina. Esta relación se puede expresar matemáticamente mediante la ecuación 1 (Mongue, 2017).

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (18)$$

Donde, τ : Esfuerzo cortante, μ : Viscosidad dinámica, $\Delta u/\Delta y$: Gradiente transversal de velocidad entre una capa relativa a una adyacente.

2.3.4.2. Propiedades del fluido

Un fluido tiene como propiedades: (Mongue, 2017)

Velocidad. Rapidez con la que se mueven las partículas del fluido en una dirección específica. En el estudio de la mecánica de fluidos, la velocidad se considera un vector, lo que significa que tiene tanto magnitud (cuán rápido se mueve el fluido) como dirección. La velocidad en un punto dentro de un campo de flujo puede variar de un punto a otro y puede cambiar con el tiempo, dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento, por ejemplo). (Mongue, 2017)

Densidad. La densidad de un fluido es una medida de su masa por unidad de volumen. Se expresa comúnmente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) en el Sistema Internacional de Unidades. La densidad indica qué tan compactas están las partículas de un fluido; por ejemplo, el agua tiene una densidad aproximada de 1000 kg/m^3 a temperatura y presión ambiente (Mongue, 2017).

Elasticidad. La elasticidad en el contexto de los fluidos se refiere a su capacidad para resistir cambios de volumen bajo presión. Sin embargo, este término es más

comúnmente asociado con sólidos. En los fluidos, un concepto relacionado es el módulo de compresibilidad o módulo volumétrico, que es una medida de la capacidad del fluido para cambiar su volumen bajo presión. Un fluido altamente compresible tiene una baja resistencia a cambios de volumen bajo presión, mientras que un fluido menos compresible tiene una mayor resistencia. (Mongue, 2017)

Viscosidad. Medida de la resistencia de un fluido a fluir. Describe la fricción interna entre las capas del fluido que se mueven a velocidades diferentes. Los fluidos con alta viscosidad, como la miel, fluyen más lentamente porque tienen una mayor resistencia interna al movimiento, mientras que los fluidos con baja viscosidad, como el agua o el aire, fluyen más fácilmente. La viscosidad puede ser influenciada por factores como la temperatura; por ejemplo, el aumento de la temperatura suele disminuir la viscosidad de los líquidos y aumentar la de los gases. (Mongue, 2017)

2.3.5. Caudal de un fluido

El caudal, definido como el volumen de fluido que pasa por un punto dado en un sistema fluvial por unidad de tiempo, es una variable fundamental en el diseño y análisis de infraestructuras hidráulicas, incluyendo las rápidas hidráulicas (Morales & Salazar, 2019).

Aplicación del Caudal en el Diseño de Rápidas Hidráulicas: (Morales & Salazar, 2019)

a) Determinación de Dimensiones y Diseño

El caudal es el primer parámetro que se debe considerar en el diseño de una rápida hidráulica. Este dato permite a los ingenieros determinar las dimensiones adecuadas de la estructura para que sea capaz de transportar el agua de manera

eficiente, evitando desbordamientos y garantizando su funcionalidad durante eventos de caudales máximos esperados. (Morales & Salazar, 2019)

b) Cálculo de Velocidades y Perfiles de Flujo

La velocidad del flujo en diferentes secciones de la rápida es una función directa del caudal. Conocer el caudal permite calcular las velocidades de flujo y, por ende, diseñar el perfil de la rápida de manera que se disipe energía adecuadamente, se minimicen los riesgos de erosión y se facilite la migración de especies acuáticas cuando sea necesario. (Morales & Salazar, 2019)

c) Diseño para la Disipación de Energía

Las rápidas hidráulicas son diseñadas para disipar la energía del agua descendente, protegiendo las estructuras aguas abajo y controlando la erosión. El caudal influye directamente en la cantidad de energía que debe ser disipada. Mediante el uso de saltos de esquí, disipadores de energía, y otras estructuras complementarias, los ingenieros pueden diseñar las rápidas para manejar eficientemente la energía cinética del flujo, basándose en los caudales de diseño. (Morales & Salazar, 2019)

d) Simulaciones Hidráulicas y Modelado

El caudal es una entrada clave para el modelado hidráulico y la simulación computacional de rápidas hidráulicas. Estas herramientas permiten predecir el comportamiento del flujo, identificar posibles problemas, y optimizar el diseño antes de la construcción. Simulaciones avanzadas, incluyendo CFD, utilizan el caudal como uno de los parámetros fundamentales para modelar con precisión la estructura física de la rápida. (Morales & Salazar, 2019)

e) Adaptabilidad y Flexibilidad en el Diseño

Dado que el caudal en un río puede variar considerablemente a lo largo del año debido a las estaciones, el deshielo, o eventos climáticos extremos, el diseño de

rápidas hidráulicas debe ser lo suficientemente adaptable y flexible para manejar estas variaciones. Esto implica la creación de estructuras que puedan operar de manera eficiente en un rango amplio de caudales, desde caudales mínimos hasta eventos de avenida máxima. (Morales & Salazar, 2019)

2.3.6. Modelación numérica

2.3.6.1. Modelos de simulación numérica

La aplicación de modelos de simulación numérica en ingeniería desempeña un papel fundamental en proyectos donde la comprensión detallada del comportamiento del flujo proporciona información crucial para tomar decisiones respecto a su alcance y coste. Permiten anticipar y perfeccionar el comportamiento del flujo en un lapso breve, evitando los gastos y riesgos asociados con llevar a cabo pruebas físicas. Esto hace viable la representación dinámica de dichos elementos en un modelo virtual. (Hualpa, 2021).

Se definen ciertas ventajas y limitaciones del modelo numérico en comparación con el modelo físico.

Tabla 2

Ventajas y Restricciones de Modelos Numéricos y Físicos

Ventajas	Restricciones
Reducción de gastos y tiempo en la creación del modelo	Para llevar a cabo un análisis detallado, se requiere la adquisición del software y computadoras de alto rendimiento.
Examinación de situaciones en varias condiciones desafiantes de replicar físicamente (tales como presión, viscosidad, entre otras)	Se necesita una considerable capacidad de almacenamiento en la computadora para gestionar grandes conjuntos de datos.
Abundancia de datos presentados de manera gráfica en la representación del modelo	Es esencial contar con personal experto en el manejo del software.
Elaboración de ecuaciones de límites y posibilidad de ajuste rápido de parámetros	La falta de disponibilidad de datos de entrada, como las condiciones límite, constituye un desafío.
Prescindencia de la necesidad de espacio físico para su implementación o la obtención de muestras.	La imprecisión en los resultados lleva a la búsqueda de simplificación del fenómeno.

Nota: (Fernández, 2012).

2.3.6.2. Dinámica computacional de fluidos CFD

CFD es una herramienta que posibilita la solución de problemas relacionados con el flujo de fluidos en la aplicación de la ingeniería contemporánea. Esto se logra mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas. La CFD simboliza y analiza de manera lúdica para obtener una comprensión más profunda. Para decidir su aplicación, es necesario examinar las ventajas y desventajas que se presentan en la siguiente tabla (Montalván, 2021).

Tabla 3

Experimentación vs Simulación CFD

Experimentación	Simulación CFD
Se examinan en ciertos puntos específicos y en momentos temporales determinados.	Alta resolución en espacio y tiempo. Para dominio actual de flujo
Elegido para un modelo reducido de laboratorio.	Económico y Rápido. Paralelo.
Se lleva a cabo un único experimento en cada ocasión.	Multipropósito
Implica un costo significativo.	Errores comunes: modelamiento, discretización, implementación
Proceso secuencial.	Se simulan virtualmente cualquier situación y condiciones reales de operación.
Se presentan errores comunes, como mediciones inexactas y distorsiones del flujo a través de las probetas.	Es posible llevar a cabo múltiples simulaciones en una variedad de entornos.
Se examinan en ciertos puntos específicos y en momentos temporales determinados.	

Fuente: Kuzmin.

2.3.7. Métodos numéricos

Resulta fundamental para la resolución efectiva de un problema, y en el amplio abanico de métodos disponibles, se destacan varios en particular (Hualpa, 2021).

2.3.7.1. Método de elementos finitos

Este método divide un sistema continuo en una colección de pequeños elementos interconectados mediante nodos. De este modo, se realiza la transformación de un

sistema continuo con infinitos grados de libertad, regido por un conjunto con un número finito de grados de libertad. Este enfoque proporciona una solución aproximada en cada elemento, que luego se integra en estas funciones. Es particularmente útil en geometrías que permiten un análisis matemático sencillo. A pesar de sus ventajas, es el método menos utilizado en la mayoría de los programas de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) (Hualpa, 2021).

2.3.7.2.Método de diferencias finitas

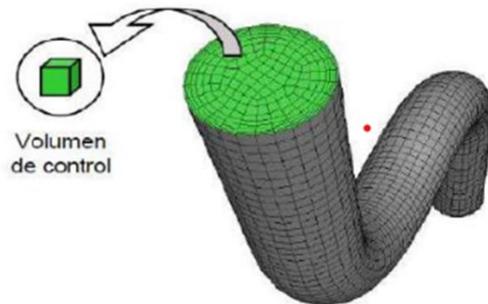
Implica la aproximación de las derivadas parciales mediante ecuaciones algebraicas utilizando los valores de la variable dependiente en grupos específicos, que forman colectivamente un dominio. Este método no asegura resultados precisos en geometrías irregulares, pero muestra un rendimiento satisfactorio en mallas organizadas. (Hualpa, 2021).

2.3.7.3.Método de volúmenes finitos

En cada volumen de control, se realiza la integración de las ecuaciones de conservación de masa, energía, cantidad de movimiento, entre otras. Este método, ampliamente utilizado en el ámbito hidráulico y adoptado por ANSYS, implica operaciones de interpolación, diferenciación e integración, lo que dificulta la obtención de esquemas de alto orden en entornos tridimensionales (Hualpa, 2021).

Figura 4

División en el Módulo de Volúmenes Finitos



Nota: (Ordoñez et al., 2018).

2.3.8. Ansys CFX

Este software se caracteriza por ofrecer soluciones efectivas y rápidas gracias a su avanzada tecnología de resolución. Su enfoque se basa en el método de volúmenes finitos, el cual implica la discretización tridimensional del dominio en un conjunto finito de volúmenes de control (Hualpa, 2021).

Este software permite simular y resolver problemas complejos de flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos térmicos. Utiliza un enfoque de volúmenes finitos para discretizar el dominio en una malla tridimensional y resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para obtener soluciones numéricas precisas (Ekambara et al., 2009).

Ansys CFX cuenta con una interfaz fácil de usar que permite definir la geometría del problema, aplicar condiciones de contorno y propiedades del fluido, y seleccionar modelos de turbulencia y otros modelos físicos adecuados para el análisis. Además, ofrece características avanzadas como la capacidad de simular flujos multifásicos, reacciones químicas y transferencia de masa (Śliwa et al., 2012).

2.3.8.1. Modelos de simulación numérica

Los modelos de simulación numérica son herramientas computacionales que utilizan algoritmos matemáticos para imitar el comportamiento de sistemas reales, permitiendo a los investigadores y profesionales explorar cómo estos sistemas responden bajo diferentes condiciones o variables. Estos modelos pueden clasificarse según distintas características, como el enfoque matemático que utilizan, si incluyen elementos de aleatoriedad o no, y la dimensionalidad que consideran para representar el sistema. A continuación, se definen conceptualmente tres tipos de modelos de simulación numérica: (Hualpa, 2021)

Modelo de Simulación Analítica

Un modelo de simulación analítica utiliza ecuaciones matemáticas basadas en principios teóricos para describir el comportamiento de un sistema. Estos modelos buscan soluciones exactas o aproximadas a problemas que pueden ser expresados a través de formulaciones matemáticas. La simulación analítica es útil en sistemas donde las interacciones y los procesos pueden ser descritos de forma precisa mediante ecuaciones, como en algunos problemas de física, ingeniería y economía. Sin embargo, su aplicabilidad se limita a sistemas que pueden ser adecuadamente modelados con ecuaciones analíticas, lo cual no siempre es posible en sistemas complejos o altamente no lineales. (Hualpa, 2021)

Modelo de Simulación Determinístico

Los modelos de simulación determinísticos son aquellos en los que un conjunto dado de condiciones iniciales y parámetros produce siempre el mismo resultado. No incluyen elementos de aleatoriedad o incertidumbre en su ejecución. Son ampliamente utilizados en ingeniería, física y otras ciencias aplicadas, donde se busca entender el comportamiento preciso de un sistema bajo condiciones

específicas. Por ejemplo, un modelo determinístico puede predecir el movimiento de un proyectil dadas ciertas condiciones iniciales de lanzamiento sin considerar incertidumbres como variaciones en la resistencia del aire. Estos modelos son poderosas herramientas para la predicción y el diseño cuando los sistemas estudiados son bien comprendidos y pueden ser descritos con exactitud por relaciones causa-efecto. (Hualpa, 2021)

Modelo Tridimensional

Los modelos tridimensionales (3D) representan sistemas o procesos considerando tres dimensiones espaciales. Esta característica permite simular la geometría y el comportamiento de sistemas con una alta fidelidad en comparación con los modelos unidimensionales (1D) o bidimensionales (2D). Los modelos 3D son esenciales en campos como CFD, la simulación de procesos químicos, la meteorología, y la visualización arquitectónica, donde la interacción espacial compleja y la distribución de las propiedades físicas son críticas para el análisis. Aunque ofrecen una representación detallada y realista, los modelos 3D requieren mayor capacidad de cálculo y más datos de entrada precisos, lo que puede incrementar el tiempo de simulación y los recursos computacionales necesarios. (Hualpa, 2021)

2.3.8.2. Construcción de la geometría

La elaboración de la geometría representa la fase inicial del modelo. Durante el preprocesamiento, utilizaremos la plataforma Workbench, que exhibe las herramientas proporcionadas por el software ANSYS y constituye la interfaz inicial al abrir el programa (Hualpa, 2021).

La extensa gama de códigos numéricos incorporados en ANSYS facilita la ejecución de todas las tareas dentro del mismo programa. Sin embargo, también

ofrece la posibilidad de importar geometrías 2D o 3D desde otros programas similares, incluyendo uno ampliamente reconocido como AutoCAD. (Monge, 2017).

Las herramientas disponibles en Ansys para la creación de geometrías incluyen Desing Modeler y SpaceClaim. En este caso, se optó por utilizar el módulo Geometry - Desing Modeler debido a su amplia variedad de herramientas, consideradas necesarias y suficientes para llevar a cabo la tarea de modelado geométrico (Monge, 2017).

2.3.8.3. Mallado del dominio de estudio

Mallado no estructurado

Estas mallas utilizan el dominio de volúmenes finitos usando figuras tetraédricas, lo cual resulta altamente beneficioso al modelar cuerpos curvos, ya que se ajustan de manera sencilla a la geometría. (Hualpa, 2021).

Mallado estructurado:

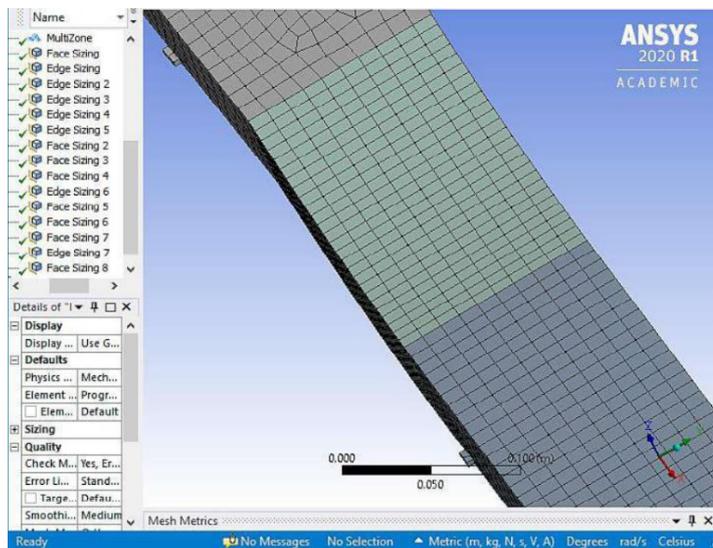
Los elementos para este tipo de malla son cuadriláteros para geometrías en 2D y hexaedros para geometrías en 3D, este mallado presenta una ventaja significativa, esto permite alinear las líneas de corriente con la malla, se logran resultados coherentes en intervalos de cálculo más cortos. (Hualpa, 2021).

Mallado mixto

En el canal de fuerte pendiente objeto de investigación, se determinó que la elección óptima de diseño fue el mallado mixto. En la sección rectangular inclinada, los bloques hexaédricos facilitan la alineación simétrica de los volúmenes finitos, mientras que, en la zona curva del cuenco dissipador, los prismas triangulares permiten lograr un mallado de alta calidad (Monge, 2017).

Figura 5

Mallado Mixto Usando Multizone.



Nota: (Monge, 2017).

2.3.8.4. Parámetros de calidad

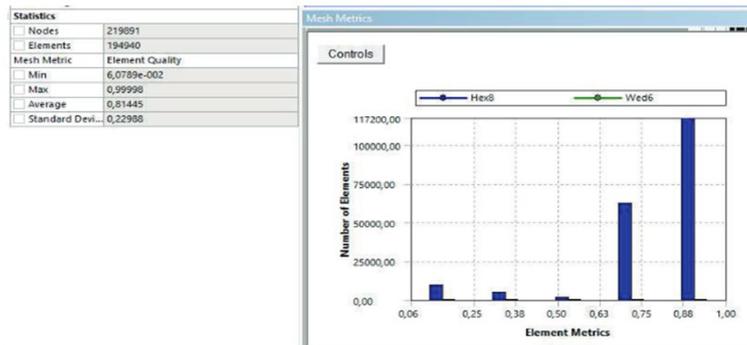
La precisión depende en gran medida del mallado. Por estas razones, es imperativo cumplir con ciertos parámetros de calidad. (Monge, 2017).

Calidad del elemento

Es aconsejable que este parámetro se aproxime a la unidad, ya que reflejará una forma cúbica o cuadrada perfecta según la dimensión considerada, de 0 a 1 (Hualpa, 2021).

Figura 6

Calidad del Elemento



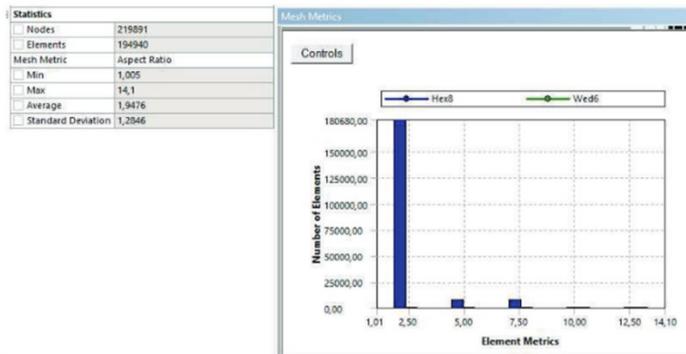
Nota: (Monge, 2017).

Relación de aspecto

La relación de aspecto ideal es aquella que se acerca a la unidad. No obstante, se acepta y se aconseja que no exceda el valor de 3 (Hualpa, 2021).

Figura 7

Relaciones de Aspecto



Nota: (Monge, 2017).

Ortogonalidad

La medida de ortogonalidad, que se ubica en un rango de 0 a 1, se sugiere que esté cerca de la unidad. Esto señala que los ángulos en las celdas tienden a ser de 90 grados (Monge, 2017).

Oblicuidad

Este parámetro es de suma importancia, y los volúmenes de control deben cumplir con el rango de valores indicado en la Tabla 3 (Monge, 2017).

Tabla 4

Parámetros de Oblicuidad

Rango	1.00	0.9 a 1	0.75 a 0.9	0.5 a 0.75	0.25 a 0.50	0 a 0.25	0
	Degenerado	Malo	Pobre	Razonable	Bueno	Excelente	Equilátero

Nota: (Monge, 2017).

2.4. Hipótesis

Al realizar el análisis y modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, se reflejará el comportamiento real de dicha estructura.

2.5. Operacionalización de variables

2.5.1. *Variable independiente: Software Ansys CFX*

El software Ansys CFX representa una herramienta informática de simulación numérica que se utiliza en el campo de la ingeniería para resolver problemas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Este software permite modelar y analizar el comportamiento de fluidos en diversos sistemas, desde el flujo alrededor de objetos sólidos hasta el flujo en sistemas complejos de tuberías o estructuras hidráulicas. Ansys CFX proporciona capacidades avanzadas para simular fenómenos como la mezcla de fluidos, la interacción fluido-estructura, entre otros.

La variable independiente "Software Ansys CFX" se define como la utilización específica de este software en el contexto del estudio de la rápida del Túnel Conchano en Chota. Esto implica la instalación y configuración del software, la preparación de los modelos geométricos y de malla necesarios para la simulación, la definición de las condiciones de contorno y las propiedades del fluido, así como la ejecución de las simulaciones y el análisis de los resultados obtenidos.

2.5.2. *Variable dependiente: Análisis y modelamiento computacional de rápida*

El análisis y modelamiento computacional de rápida se refiere al estudio teórico y práctico de la dinámica de fluidos en sistemas hidráulicos, con un enfoque

particular en el comportamiento de las rápidas. Una rápida hidráulica es una sección del flujo de agua en un canal o túnel donde se produce una aceleración significativa del agua, lo que puede generar turbulencias, remolinos y otros fenómenos hidráulicos complejos.

El análisis y modelamiento computacional de rápida se refiere a la capacidad de realizar cálculos y simulaciones computacionales de manera eficiente y en un corto período de tiempo. Este enfoque utiliza técnicas y algoritmos avanzados para acelerar los procesos de cálculo y optimizar el rendimiento de los modelos computacionales.

La variable dependiente se define como la aplicación de métodos y técnicas computacionales para investigar y comprender la dinámica de fluidos en la rápida del Túnel Conchano en Chota. Esto implica la utilización de herramientas de modelado numérico como Ansys CFX para simular el flujo de agua en la rápida, analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones y evaluar aspectos como la velocidad, la presión, los patrones de flujo y los efectos hidráulicos asociados. Mediante el uso de software especializado y hardware de alto rendimiento, el análisis y modelamiento computacional de rápida velocidad permite simular y analizar de manera precisa y rápida diversos fenómenos físicos y sistemas complejos.

Tabla 5*Matriz de Operacionalización de la Variable Independiente: Software Ansys CFX*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores
Software Ansys CFX.	ANSYS CFX es un software ampliamente utilizado en la modelación numérica de fluidos, ofreciendo soluciones diversos fenómenos naturales.	ANSYS CFX se utilizará la modelación numérica tridimensional. Para medir el comportamiento del flujo de la rápida hidráulica, dentro de ella sus características y las posibles fallas que se puedan presentar en su funcionamiento.	Propiedades del fluido. Modelos de simulación numérica. Modelo tridimensional	Velocidad Densidad Elasticidad Viscosidad Modelo de simulación analítica. Modelo determinístico. Modelos estocásticos. Geometría Mallado Setup Solución Procesamiento de resultados

Tabla 6*Matriz de Operacionalización de la Variable Independiente : Análisis y Modelamiento**Computacional de Rápida*

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores
Análisis y modelamiento computacional de rápida.	La modelación hidráulica propone predecir el comportamiento del flujo hídrico en un modelo a escala reducida. Se refiere al estudio y la simulación de la hidráulica de flujos rápidos para comprender cómo fluyen y se comportan hidráulicamente las rápidas, así como evaluar su eficiencia y seguridad. A través del modelamiento computacional, se pueden realizar simulaciones detalladas y predictivas que permiten optimizar el diseño, la gestión y la operación de estas estructuras hidráulicas (Monge, 2017)	El modelamiento hidráulico CFD nos permitirá verificar el comportamiento real de la rápida hidráulica túnel Conchano.	Presión Velocidad Tirante Caudal	Pascal. m/s m l/s

CAPÍTULO III.

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo porque se centró en la recopilación y análisis de datos numéricos y cuantitativos relacionados con el comportamiento fluidodinámico del túnel. Utilizó el software Ansys CFX para realizar simulaciones numéricas y modelar el flujo de fluidos de la rápida hidráulica. El enfoque cuantitativo se basó en la recolección de datos objetivos y medibles, y en este caso, la investigación se focalizó en cuantificar y analizar el comportamiento del flujo de fluidos en la rápida mediante modelos computacionales. El uso de datos numéricos permitió obtener resultados cuantitativos que ayudan a comprender mejor el fenómeno estudiado y a tomar decisiones informadas en base a evidencia científica.

Es de tipo aplicado porque tiene como objetivo aplicar los conocimientos y herramientas de la ingeniería para resolver un problema o mejorar una situación específica, en este caso, el análisis y modelamiento de la rápida hidráulica túnel Conchano. Se ha identificado el comportamiento real de la rápida hidráulica túnel Conchano bajo el procesamiento de datos del Software ANSYS CFX, para proponer la utilización del mencionado software en lugar de un modelo físico esto conllevará a tener mejores resultados en el campo de estructuras hidráulicas.

Es de nivel descriptivo porque busca describir y entender el comportamiento y características de la rápida del túnel Conchano a través del análisis y modelamiento computacional, sin buscar establecer relaciones causales o inferir conclusiones más allá de la descripción y explicación de los fenómenos observados.

Tabla 7

Tipo de Investigación Según los Principales Criterios del Reglamento de la Universidad Nacional Autónoma de Chota

Criterio	Tipo de investigación
Finalidad	aplicada
Temporalidad	Transversal (sincrónica)
Fuente de datos	mixta
Objetivos	descriptiva
Control de diseño de la prueba	no experimental
Estrategia o enfoque metodológico	Cuantitativa
Contexto donde sucede	Biblioteca, campo

3.2. Diseño de investigación

La investigación se considera de diseño no experimental de corte transversal descriptivo por varias razones:

Diseño no experimental: En este tipo de investigación no se manipulan variables ni se establecen grupos de comparación. En lugar de eso, se recopilan datos existentes y se analizan para obtener conclusiones o descripciones. En este caso, se utiliza el software Ansys CFX para realizar el análisis y modelamiento computacional de un túnel existente, sin modificar sus condiciones o establecer grupos de comparación.

Corte transversal: El estudio se realiza en un solo punto en el tiempo, sin considerar la evolución o los cambios a lo largo del tiempo. Se recopilan datos y se analizan en un momento específico, en este caso, en el año 2023.

Descriptivo: El objetivo principal de la investigación es describir y analizar las características, propiedades y comportamiento del túnel Conchano utilizando el software Ansys CFX. No se busca probar hipótesis ni establecer relaciones causales, sino simplemente obtener información descriptiva sobre el túnel.

3.3. Métodos de investigación

Dado que se pretendía validar la hipótesis formulada y alcanzar los objetivos planteados, este estudio se desarrolló siguiendo el enfoque metodológico cuantitativo. “La metodología cuantitativa se basa en la recopilación y análisis de datos para responder preguntas de investigación y probar hipótesis predefinidas. Se apoya en la medición numérica, el conteo y, con frecuencia, el uso de estadísticas para identificar patrones de comportamiento con precisión en una población” (Sampieri et al., 2014).

3.4. Población, muestra y muestreo

Población: Rápida hidráulica del túnel Conchano- Chota perteneciente al proyecto Tinajones, en Chota.

Muestra: Dado que la muestra es no probabilística por conveniencia. En este caso, la muestra es igual a la población y también se refiere a la rápida del Túnel Conchano en Chota.

Muestreo: En este contexto, no se realiza un proceso de muestreo ya que la muestra es igual a la población. Por lo tanto, no se selecciona una parte representativa de la población para su análisis, sino que se considera toda la información disponible sobre la rápida del Túnel Conchano en Chota. Esto garantiza que se tenga acceso a todos los datos relevantes para llevar a cabo el análisis y modelamiento computacional de manera exhaustiva y completa.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Observación: Esta técnica implica la observación directa del Túnel Conchano y sus alrededores para recolectar información relevante. Esto puede incluir aspectos como la topografía del área, las características de la rápida hidráulica y su entorno,

así como el comportamiento del agua a través de la rápida. La observación puede realizarse visualmente o utilizando herramientas y equipos especializados.

Análisis documental: En esta técnica, se recopila y analiza información previamente registrada sobre el Túnel Conchano. Esto incluye planos, informes técnicos, estudios previos, documentos legales y cualquier otra documentación relevante que brinde información sobre las características del túnel, su funcionamiento y su impacto en el entorno.

Mediciones de campo: Esta técnica consiste en realizar mediciones directas en el sitio del Túnel Conchano y su área circundante. Esto puede incluir mediciones de caudal de agua, niveles de presión, velocidades de flujo, y otros parámetros relevantes como la topografía. Para la topografía, las mediciones se han realizado utilizando equipos especializados y se registran para su posterior análisis.

Modelamiento en gabinete: Esta técnica implica la creación de un modelo computacional de la rápida hidráulica del Túnel Conchano utilizando el software Ansys CFX. En este modelo se ingresan los datos recopilados previamente, como las mediciones de campo y la información documental. El modelo permite simular y analizar el comportamiento del túnel y el flujo de agua a través de él, lo que permite obtener resultados y conclusiones relevantes para la investigación.

Análisis del modelo: Una vez desarrollado el modelo computacional, se analizan los resultados obtenidos. Esto implica el estudio de variables como el caudal de agua, las presiones, las velocidades de flujo y otros parámetros relevantes para comprender el comportamiento de la rápida hidráulica Túnel Conchano. El análisis del modelo permite realizar evaluaciones y proyecciones sobre el impacto y el funcionamiento del túnel, así como identificar posibles mejoras o soluciones a problemas identificados.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos

Registro documental. Se refiere a la recopilación de documentos relacionados con el Túnel Conchano, como planos, especificaciones técnicas, informes técnicos, informes de avance de la obra, entre otros. Estos documentos son analizados para obtener datos relevantes sobre el túnel y su comportamiento.

Modelo en gabinete. El modelo en gabinete utilizando el software Ansys CFX se refiere al proceso de creación de la rápida hidráulica del Túnel Conchano en Ansys CFX. Este modelo es utilizado para simular el flujo de aire dentro de la rápida hidráulica, y obtener información sobre su comportamiento.

Matriz de análisis del modelo. Es una herramienta utilizada para evaluar y analizar los resultados obtenidos del modelo computacional. Se utilizan diferentes criterios y variables para evaluar el desempeño de la rápida del túnel y tomar decisiones en cuanto a su diseño, construcción o mantenimiento.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Proceso de obtención de los datos

3.6.1.1. Ubicación geográfica

El Túnel Conchano se encuentra a unos 14 km al norte de la ciudad de Chota, en la provincia y distrito de Chota. Mientras que la rápida hidráulica se encuentra comprendido entre las coordenadas 06°29'57" de Latitud Sur y 78°40'06" de Longitud Oeste a 2427 msnm.

Figura 8

Mapa de Ubicación del Proyecto Olmos Tinajones



Nota: (Santos, 2013)

Figura 9

Ubicación Geográfica de la Rápida Hidráulica Túnel Conchano



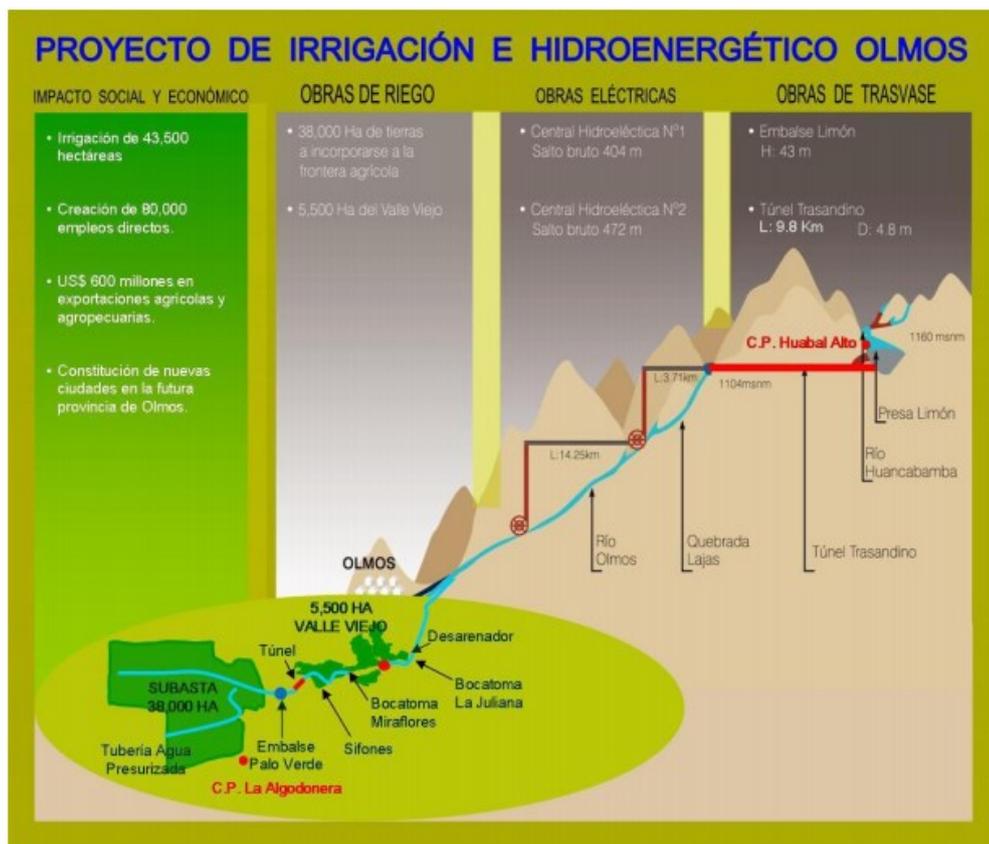
Nota: (Google earth, 2023).

3.6.1.2. Descripción del proyecto Tinajones

El Proyecto Olmos Tinajones fue creado para trasvasar el agua del río Huancabamba a través de obras hidráulicas, con el objetivo de irrigar las tierras de Olmos, generar energía eléctrica y aumentar la producción agropecuaria en la costa. La empresa encargada de supervisar estas obras fue el consorcio franco-peruano Supervisión Olmos. El proyecto incluye las Centrales Hidroeléctricas de Carhuaquero y Chiriconga, que proporcionan 1.100 m³ de agua al año para irrigar 80,000 hectáreas en la Región Lambayeque (Gobierno Regional de Lambayeque, 2016).

Figura 10

Proyecto de Irrigación e Hidro energético Olmos



Nota: (Santos, 2013)

El Proyecto Olmos Tinajones ha permitido el riego de más de 68.000 hectáreas de cultivos en el valle de Chancay - Lambayeque, gracias a las obras hidráulicas de la primera etapa del proyecto. Esto se logra a través de la desviación de los ríos Chotano, Conchano y Chancay, y la construcción de obras de captación, almacenamiento y distribución de agua.

Siendo así, el Proyecto Olmos Tinajones ha permitido el riego de miles de hectáreas de cultivos, la generación de energía eléctrica y ha representado una importante inversión en infraestructura hidráulica en la Región Lambayeque.

Tabla 8

Principales Obras Ejecutadas Durante la Primera Etapa del Proyecto Olmos

Obras ejecutadas	Finalidad	Ubicación	Longitud (Km)	Capacidad
Túnel Chotano y Obras Conexas	Transporte de las aguas del Río Chotano al Río Chancay.	Cochabamba – Chota – Cajamarca.	5.3	100 MMC
Bocatoma Raca Rumi	Desvío de las aguas del Río Chancay mediante el Canal Alimentador hacia el Reservorio Tinajones.	Llama – Chota – Cajamarca.		930 MMC
Canal Alimentador	Desviación de las aguas del Río Chancay hacia el Embalse Tinajones, ubicado en Llama y Chongoyape, abarcando las regiones de Chota, Chiclayo, Lambayeque y Cajamarca.		16	70 m3/seg.
Reservorio Tinajones	Almacenamiento de las aguas del Río Chancay con el propósito de regular el riego en el Valle Chancay – Lambayeque.	Chongoyape – Chiclayo – Lambayeque		320 MMC
Canal de Descarga	Libre evacuación de las aguas desde el Reservorio Tinajones hacia el sistema de distribución del riego en el Valle Chancay Lambayeque.	Chongoyape – Chiclayo – Lambayeque.	3.9	70 m3/seg
Repartidor La Puntilla	Distribución de las aguas del Río Chancay hacia la parte baja del Valle Chancay Lambayeque mediante los cursos del Río Taymi y del Río Reque.	Pucalá – Chiclayo – Lambayeque.		849 MMC

Obras ejecutadas	Finalidad	Ubicación	Longitud (Km)	Capacidad
Repartidor Desaguadero	Conducción de las aguas del Río Chancay hacia la parte inferior del Valle Chancay Lambayeque por medio del Canal Taymi, Canal Pátapo y Río Lambayeque.	Pucalá – Chiclayo – Lambayeque.		782 MMC
Canal Taymi	Transporte de las aguas desde el Río Taymi, iniciando en el Repartidor Desaguadero hasta el Repartidor Cachinche.	Mesones Muro y Pítipo - Ferreñafe y Lambayeque – Lambayeque	48.88	65 m3/seg
Bocatoma Monsefú- Reque	Captación de las aguas del Río Reque para su distribución	Reque – Chiclayo – Lambayeque		49.5 MMC

3.6.1.3.Descripción de la obra hidráulica

El Túnel Conchano es un lugar que alberga dos obras de ingeniería importantes: la rápida hidráulica para la desviación de aguas del río y la extensión de bombeo de agua potable. Estas obras benefician tanto a la agricultura de la zona como al suministro de agua potable para la ciudad de Chota.

Algunas de sus características son: (Gobierno Regional de Lambayeque, 2016)

- Finalidad Trasvase de las aguas del Río Conchano al Río Chotano.
- Ubicación Conchán – Chota – Cajamarca
- Longitud 4.2 kilómetros
- Caudal 12 m3/seg

Figura 11

Inicio del Proyecto Túnel Conchano.



3.6.1.4. Visitas de campo al emplazamiento de la rápida del Túnel Conchano

El procedimiento seguido para realizar las visitas de campo al emplazamiento del Túnel Conchano como parte de la investigación ha consistido de forma general en:

Planificación: Se realiza una planificación previa de las visitas de campo, teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, los datos que se deben recolectar y las fechas disponibles para las visitas.

Equipamiento: Se prepara el equipamiento necesario para realizar las visitas de campo, como cámaras fotográficas, libretas topográficas, dispositivos de medición, entre otros.

Coordinación: Se coordina con los responsables del Túnel Conchano para obtener los permisos y autorizaciones necesarios para acceder al emplazamiento y realizar las observaciones y mediciones requeridas.

Desplazamiento: Se realiza el desplazamiento al emplazamiento del Túnel Conchano, siguiendo las rutas o caminos establecidos.

Registro fotográfico: Durante la visita, se lleva a cabo un registro fotográfico detallado del túnel y su entorno. Se capturan imágenes desde diferentes ángulos y perspectivas, documentando el estado actual de la infraestructura, las condiciones de seguridad, los materiales utilizados, entre otros aspectos relevantes.

Registro documental: Durante la visita, se recopilan documentos relacionados con el Túnel Conchano, como planos, especificaciones técnicas, informes técnicos, entre otros. Estos documentos son revisados posteriormente para obtener información relevante sobre el túnel.

Mediciones topográficas: Se realizan mediciones topográficas utilizando una libreta topográfica y equipos de medición apropiados. Se toman coordenadas, alturas, distancias y cualquier otra información relevante para el análisis y modelización del túnel.

Análisis del entorno: Durante la visita, se observan y registran las características del entorno del túnel, como vegetación, ríos, pendientes, entre otros elementos que puedan tener influencia en el comportamiento del túnel.

Recopilación de datos: Se recopilan todos los datos obtenidos durante la visita de campo, como fotografías, notas de la libreta topográfica, documentación recopilada, entre otros.

Procesamiento de datos: Los datos recopilados durante la visita se procesan y preparan para su posterior análisis y uso en la modelización computacional del túnel.

Figura 12

Visitas de Campo al Emplazamiento de la Rápida del Túnel Conchano



3.6.1.5. Levantamiento topográfico al emplazamiento de la rápida del Túnel Conchano

Para realizar el levantamiento topográfico con estación total del emplazamiento de la rápida del Túnel Conchano se ha seguido el siguiente procedimiento:

Preparación de equipos: Se ha garantizado que la estación total esté en perfectas condiciones y se ha calibrado correctamente antes de comenzar el levantamiento. Además, se han preparado los trípodes, prismas y otros accesorios necesarios.

Establecimiento de la base de referencia: Se ha colocado un punto de referencia conocido y establecido en el emplazamiento, el cual ha servido como base de referencia para todas las mediciones posteriores.

Configuración de la estación total: Se han configurado los parámetros necesarios en la estación total, como el sistema de coordenadas utilizado y las unidades de medida. También se ha calibrado correctamente el instrumento.

Estacionamiento de la estación total: Se ha nivelado la estación total y se ha centrado correctamente.

Mediciones: Utilizando la estación total, se han realizado mediciones precisas de los puntos de interés en el emplazamiento, ubicando las miras en estos puntos. Esto ha incluido puntos de control, cotas de terreno, detalles de relieve y cualquier otro dato relevante para el análisis y modelado computacional.

Toma de BMS: Se han monumentado BMS y puntos fijos en el emplazamiento.

Registro de datos: Se ha registrado cuidadosamente cada medición realizada, asegurándose de incluir información como las coordenadas XYZ de cada punto, las lecturas de los ángulos horizontales y verticales, y cualquier otra información adicional relevante.

Figura 13

Tesistas en el Lugar de Estudio por Iniciar el Procedimiento de Levantamiento Topográfico



Figura 14

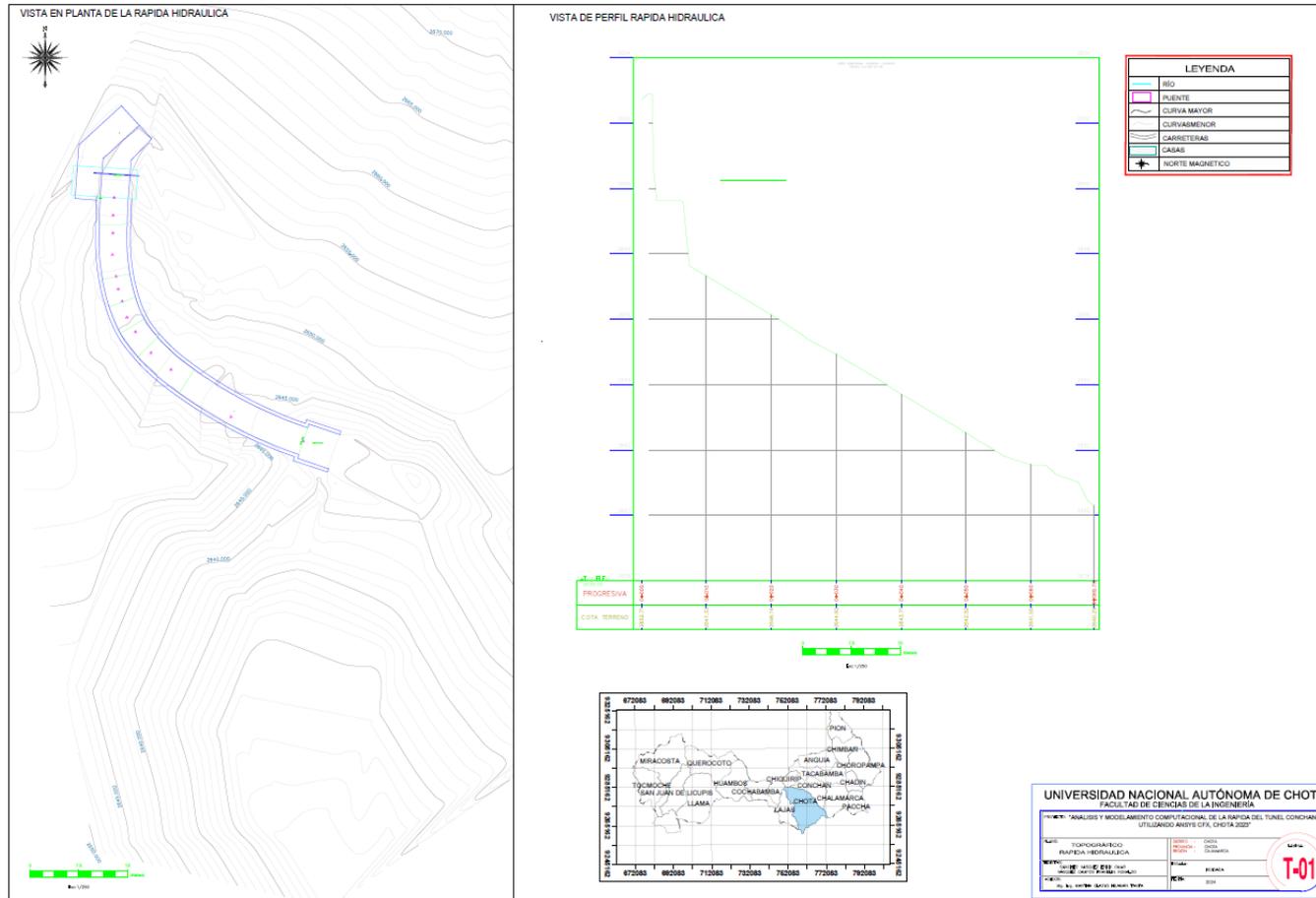
Levantamiento Topográfico en el Lugar de Estudio



Procesamiento de datos: Una vez finalizado el levantamiento topográfico, se ha llevado a cabo el procesamiento de los datos recopilados. Esto implica la organización y limpieza de los datos, la conversión a csv, la importación a civil 3D y la generación de un archivo georreferenciado para su posterior uso en el análisis y modelado computacional.

Figura 15

Plano Topográfico del Emplazamiento de la Rápida Hidráulica



Nota: (Ver anexos).

3.6.1.6. Obtención de información hidráulica a través del proyecto especial Olmos Tinajones (PEOT) Lambayeque para el diseño de la rápida del Túnel Conchano

El procedimiento seguido para solicitar y obtener información hidráulica del lugar a través del proyecto especial Olmos Tinajones (PEOT) ha sido el siguiente:

Identificación de la necesidad de obtener información hidráulica del lugar:

En el desarrollo de la investigación, se determinó la importancia de contar con datos hidráulicos del proyecto especial Olmos Tinajones para el análisis y modelamiento del Túnel Conchano.

Investigación preliminar: Se identificaron fuentes de información, como informes técnicos, estudios hidrológicos y datos recopilados por el PEOT en la página web del proyecto y en investigaciones afines.

Contacto con el proyecto especial Olmos Tinajones: Se estableció contacto con el PEOT para solicitar formalmente la información hidráulica necesaria para la investigación, a través de una carta solicitando la información que se requiere.

Revisión y aprobación de la solicitud: El PEOT revisó la solicitud y determinó la viabilidad de proporcionar la información solicitada por los tesisistas.

Obtención de la información hidráulica: Una vez aprobada la solicitud, el PEOT proporcionó la información hidráulica solicitada. Esta información incluyó datos de caudal y características del sistema hidráulico. Las características del sistema se han detallado en acápites anteriores y los datos de causales se detallan en la Tabla 8 y Tabla 9 del presente estudio.

Verificación y validación de la información: Una vez obtenida la información, se realizó una revisión exhaustiva para verificar la precisión y confiabilidad de los datos consignados.

Figura 16

Documento Técnico de Obtención de los Datos del PEOT

PROYECTO ESPECIAL OLMOS TINAJONES.

CONSTANCIA.

Túnel Chotano, 15 - 03 - 2024

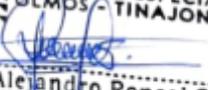
SEÑORES: ALUMNOS- ERICK OMAR SANCHEZ VASQUEZ
FRANKLIN RONALDO VASQUEZ CAMPOS

ASUNTO: Información de datos Estadísticos de Caudales del Túnel Conchano

Tengo el agrado de dirigirme a Ustedes para saludarles y a la vez dar validez a la información de acuerdo de las explicaciones que se les dio en campo, el cual tuvo como resultados la optimización de su aprendizaje para calcular los datos estadísticos de caudales en lo que crean conveniente.

Aprovecho la oportunidad para reiterarles mi especial consideración.

ATENTAMENTE

 PROYECTO ESPECIAL
OLMOS - TINAJONES


Mario Alejandro Roncal Salazar
DNI: 28620540
OPERADOR HIDRÁULICO TUNEL CHOTANO

Tabla 9

Caudales Mensuales Del Año 2019 – 2023 en el Túnel Conchano según el PEOT

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Caudales (m3/s)
2019	2.72	4.31	6.69	3.92	6.98	4.20	1.02	0.57	0.42	1.33	0.58	3.27	3.002
2020	2.93	4.70	6.84	4.02	5.75	3.55	0.89	0.50	0.39	1.02	0.66	2.29	2.794
2021	3.62	3.25	6.35	5.23	7.60	6.60	1.35	0.48	0.31	0.55	0.47	4.26	3.339
2022	1.61	4.98	6.89	2.52	7.60	2.47	0.84	0.72	0.57	2.15	0.86	0.33	2.629
2023	3.56	5.86	7.28	4.32	2.04	1.57	0.47	0.29	0.27	0.35			2.601

Nota: Datos obtenidos a partir de la solicitud de información de caudales al PEOT en noviembre del año 2023.

Tabla 10

Caudal Mínimo, Máximo y Promedio Registrado en el Túnel Conchano de Acuerdo a Datos del PEOT

	Caudales	
	(m3/s)	(l/s)
Mínimo	0.27	271.00
Máximo	12.00	12000.00
Promedio	2.87286	2872.86019

Nota: Datos obtenidos a partir de la solicitud de información de caudales al PEOT en noviembre del año 2023.

Utilización de la información en la investigación: La información hidráulica obtenida se utilizó como base para el análisis y modelamiento de la rápida hidráulica del Túnel Conchano en ANSYS CFX. Se utilizaron los datos hidráulicos (caudales promedio) para calibrar y validar el modelo y realizar las simulaciones correspondientes.

3.6.1.7. Diseño y modelamiento de la rápida del Túnel Conchano utilizando el software Ansys CFX

El procedimiento seguido para diseñar y modelar la rápida del Túnel Conchano utilizando el software ANSYS CFX fue:

Definición de los objetivos y requisitos del estudio: Se establecen los objetivos específicos del modelamiento de la rápida del Túnel Conchano, así como los requisitos y limitaciones del proyecto.

Recopilación de información: Se recopilan todos los datos disponibles relacionados con el túnel, como dimensiones físicas, características del material, condiciones de flujo, entre otros. La información se obtiene de estudios previos (levantamiento topográfico), registros técnicos, información proporcionada por el proyecto especial Olmos Tinajones y otros documentos relevantes.

Creación del modelo: Se crea un modelo tridimensional de la rápida hidráulica del Túnel Conchano en ANSYS CFX. Esto implica la definición de las geometrías, las condiciones de contorno y las propiedades del material. Se tiene en cuenta la topografía del lugar, las características hidráulicas y los efectos de la entrada y salida de agua del túnel.

Selección del tipo de fluido y las propiedades: Se selecciona el tipo de fluido que se simulará en el modelo, teniendo en cuenta las características del agua que fluye a través del túnel. Se definen las propiedades físicas del fluido, como la densidad y la viscosidad, y se establecen las condiciones de presión.

Definición de las condiciones de contorno: Se definen las condiciones de contorno en el modelo, como la entrada y salida de agua en el túnel, la presión, las condiciones de flujo en las superficies y cualquier otra condición relevante. Estas condiciones se ajustan de acuerdo con la información recopilada.

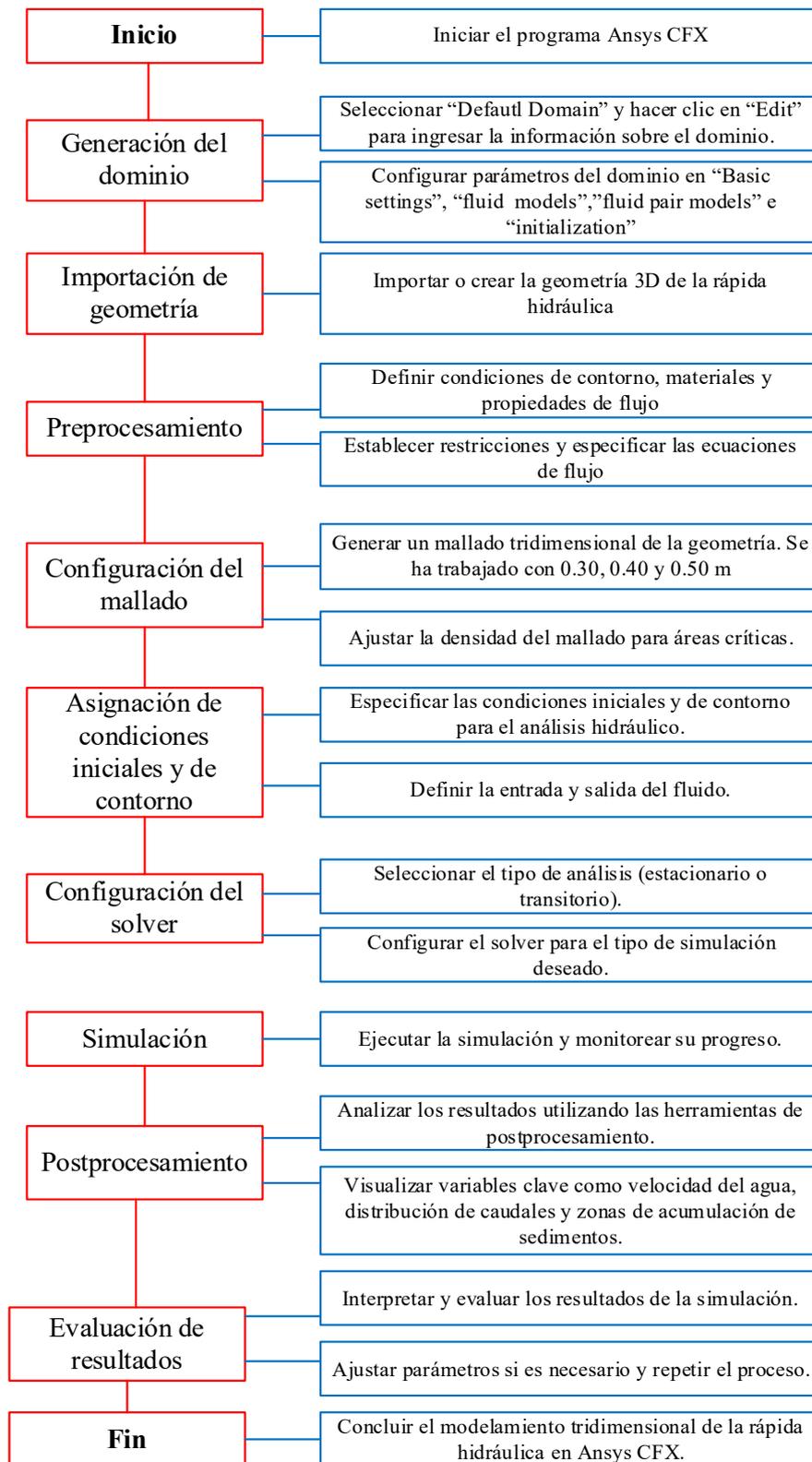
Definición de las ecuaciones y parámetros: Se definen las ecuaciones y parámetros necesarios para describir el comportamiento del flujo de agua en la rápida. Esto incluye la definición de las ecuaciones correspondientes.

Resolución del modelo: Se resuelve el modelo utilizando el software ANSYS CFX, aplicando las ecuaciones y condiciones de contorno definidas, y se realiza la simulación del flujo de agua de la rápida. Se utilizan algoritmos numéricos y métodos de resolución adecuados.

Análisis de los resultados: Se analizan los resultados obtenidos de la simulación, incluyendo la distribución de velocidades, presiones y otras variables de interés. Se comparan los resultados con valores esperados o con información obtenida de estudios o mediciones previas.

Figura 17

Flujograma del Procedimiento de Modelamiento en el software Ansys CFX



3.6.2. *Procesamiento de datos*

Para realizar el procesamiento de datos de la investigación se ha utilizado el software Ansys CFX y Microsoft Excel 2022.

En primer lugar, se ha utilizado el software Ansys CFX para crear y presentar el modelo hidráulico de la rápida hidráulica Túnel Conchano. Este software es conocido por su capacidad para realizar simulaciones fluidodinámicas computacionales y permite analizar el comportamiento de los fluidos en sistemas complejos como la rápida en cuestión. El modelo hidráulico ha sido creado teniendo en cuenta los parámetros y variables relevantes para el estudio, como la velocidad del flujo y la presión.

Una vez realizado el modelamiento en el software Ansys CFX, se han obtenido los resultados de la simulación. Estos resultados incluyen una gran cantidad de datos, como valores numéricos de las variables analizadas, distribución de la velocidad y presión de la rápida. Para presentar estos resultados de manera clara y comprensible, se ha utilizado una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2022.

En dicha hoja de cálculo, se han organizado los datos obtenidos en tablas y se han creado gráficos para visualizar los resultados de manera más intuitiva. Las tablas permiten presentar la información de manera ordenada, facilitando su análisis y comparación. Por otro lado, los gráficos proporcionan una representación visual de los resultados, permitiendo identificar patrones o tendencias.

El uso de Microsoft Excel 2022 para presentar los resultados también permitió realizar cálculos adicionales, como promedios, desviaciones estándar o análisis estadísticos. Esto fue útil para obtener conclusiones más precisas y establecer relaciones entre las variables estudiadas.

3.6.3. *Análisis de datos*

En la metodología estadística utilizada en la tesis, se ha empleado el software SPSS para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos. Se ha aplicado la prueba Kolmogorov-Smirnov para verificar la normalidad de los datos y se han utilizado pruebas paramétricas, como el análisis de varianza (ANOVA), para comparar las medias entre grupos de datos, seguido de la prueba de Tukey para identificar diferencias significativas entre grupos.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: La elección de esta prueba se justifica por su capacidad para verificar si una muestra proviene de una distribución normal. Dado que muchos métodos estadísticos paramétricos, como el ANOVA, asumen normalidad en los datos, es crucial confirmar esta suposición antes de su aplicación para garantizar la validez de los resultados.

Análisis de Varianza (ANOVA): El ANOVA se emplea para comparar las medias de más de dos grupos. En el contexto de la tesis, donde se pueden estar evaluando diferentes configuraciones o condiciones de modelado de la rápida, el ANOVA permite determinar si existen diferencias significativas entre estos grupos en términos de los resultados obtenidos del modelamiento computacional.

Prueba de Tukey: Después de identificar diferencias significativas mediante el ANOVA, la prueba de Tukey se utiliza para realizar comparaciones múltiples entre todos los pares de grupos, ayudando a determinar específicamente cuáles grupos difieren entre sí. Esto proporciona a detalle de las diferencias observadas y permite identificar qué configuraciones o condiciones específicas podrían ser más efectivas o relevantes en el diseño de la rápida del Túnel Conchano.

3.7. Aspectos éticos

En el artículo N° 1 del Decreto Legislativo N° 822, publicado en el Diario El Peruano (2021) dispone que la presente ley tiene como objetivo primordial la protección de los autores de las obras literarias y de sus derechohabientes.

El código de ética para la investigación científica de la Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), establecido en 2016, tiene como propósito principal promover y reafirmar los principios y valores éticos que orientan la conducta, decisiones y acciones de los investigadores durante el desarrollo de su labor investigativa en la institución. Este código se alinea con la visión y misión de la UNACH, sirviendo como un referente ético antes, durante y después del proceso de elaboración y ejecución de propuestas de investigación. Además, se enfoca en salvaguardar los derechos de los participantes de dichas investigaciones, especialmente aquellos que pertenecen a poblaciones vulnerables, garantizando su protección y bienestar en todo momento.

La investigación cumple con los criterios éticos y de rigor científico dados por la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, siendo así, el porcentaje de similitud no supera el límite establecido, además de que, toda información utilizada como base para la investigación ha sido debidamente citada y referenciada evitando así el plagio o copia de información teórica.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelación numérica tridimensional del comportamiento de la rápida del Túnel

Conchano

La modelación numérica de la rápida hidráulica del Túnel Conchano, con dimensiones de 52.82 m de largo, 4.30 m de ancho y 2.30 m de profundidad, ha sido realizada de manera exhaustiva. Para llevar a cabo esta simulación, se empleó el programa Ansys CFX a través de su plataforma denominada "Ansys Workbench". Esta herramienta posibilita el desarrollo del análisis de fluidos computacional a través de los siguientes pasos:

a) Generación de la geometría de la rápida hidráulica

b) Creación de la estructura hidráulica

- Creación de la malla
- Método de mallado
- Dimensionamiento y calidad del mallado
- Condiciones de borde
- Configuración
- Generación del dominio
- Configuración del tipo de análisis
- Configuración de las condiciones de borde

c) Esquema del proyecto: Procesamiento

A lo largo del proceso de modelación, se ejecutaron diversas simulaciones con el objetivo de analizar variables clave, tales como la velocidad del agua, la distribución del caudal y las posibles zonas de acumulación de sedimentos. Estas simulaciones fueron fundamentales para obtener resultados detallados que

proporcionan una visión clara y completa del comportamiento hidráulico de la rápida en el Túnel Conchano.

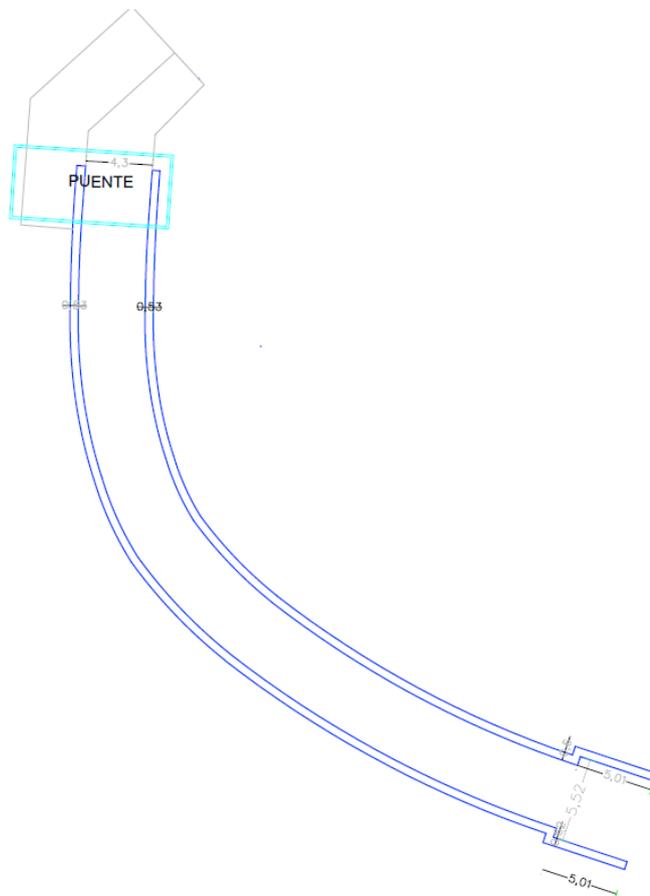
Tabla 11

Dimensiones de la Rápida Hidráulica del Túnel Conchano Modelada por Medio del Programa Ansys CFX

	Dimensiones			
	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Pendiente
Rápida hidráulica	52.85	4.3	2.3	3%
Colchón amortiguador	5.01	5.52	2.6	

Figura 18

Vista en Planta de la Rápida Hidráulica



Nota: (ver en anexos planos).

Figura 19

Área de Trabajo Meshing

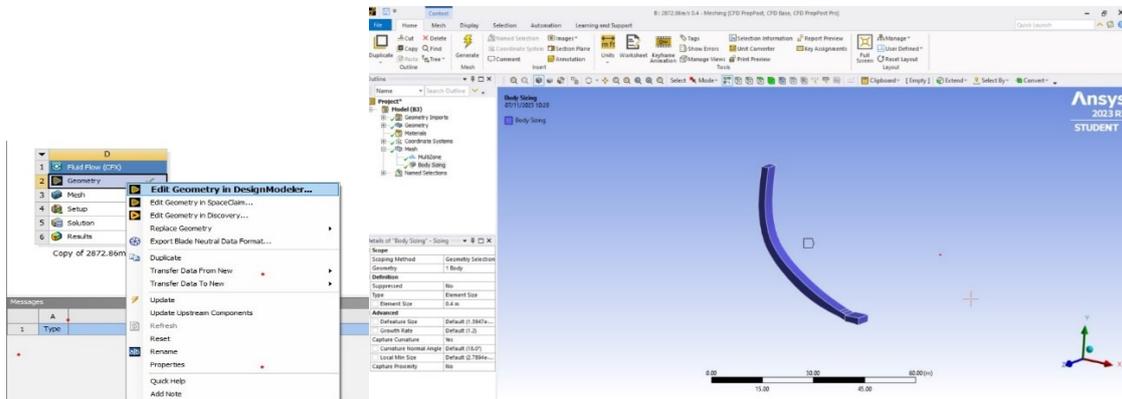
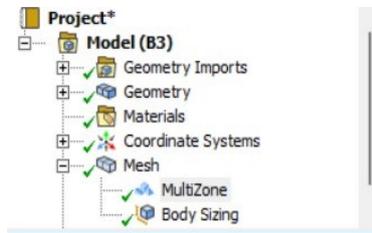


Figura 20

Procedimiento para Aplicar el Método de Mallado

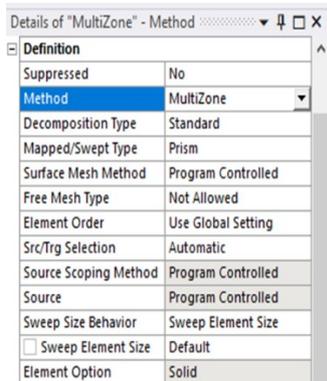
Mesh control



Opciones de mesh control



Opciones de mesh control



Generate mesh

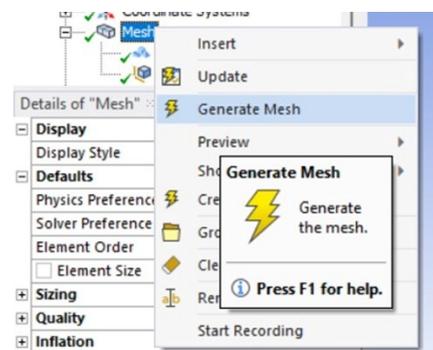


Figura 21

Dimensión de la Malla

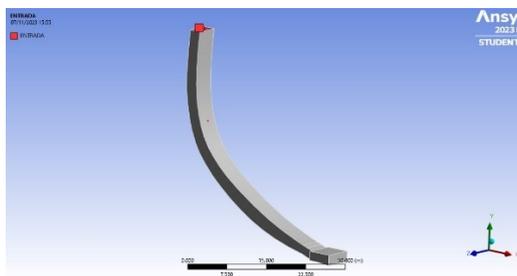


Nota: Se han realizado evaluaciones de las dimensiones utilizando tamaños de 0.3 m, 0.4 m y 0.5 m.

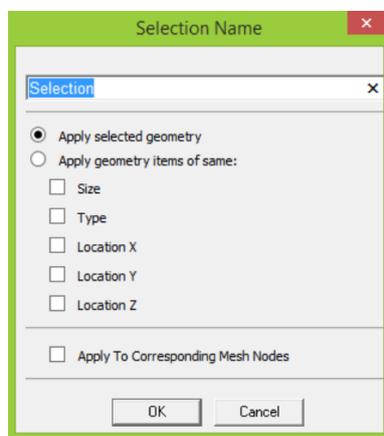
Figura 22

Asignación de las Zonas de Interés

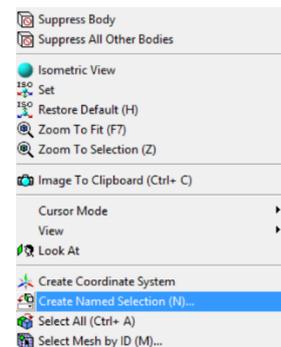
Seleccionar la superficie del plano o frontera que deseamos nombrar



Asignar un nombre a la superficie seleccionada



Hacer clic derecho en la zona de interés y seleccionar la opción "Create Named Selection (N)"



Las secciones asignadas aparecerán en la opción de "Named Selections" en la pestaña "Outline"

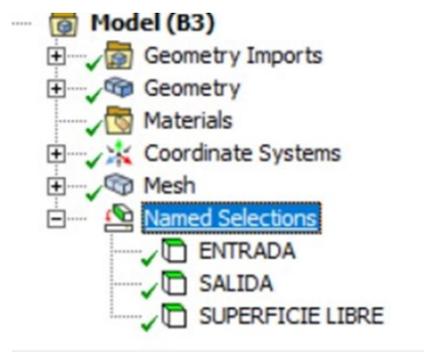


Figura 23

Configuración del Análisis Transitorio

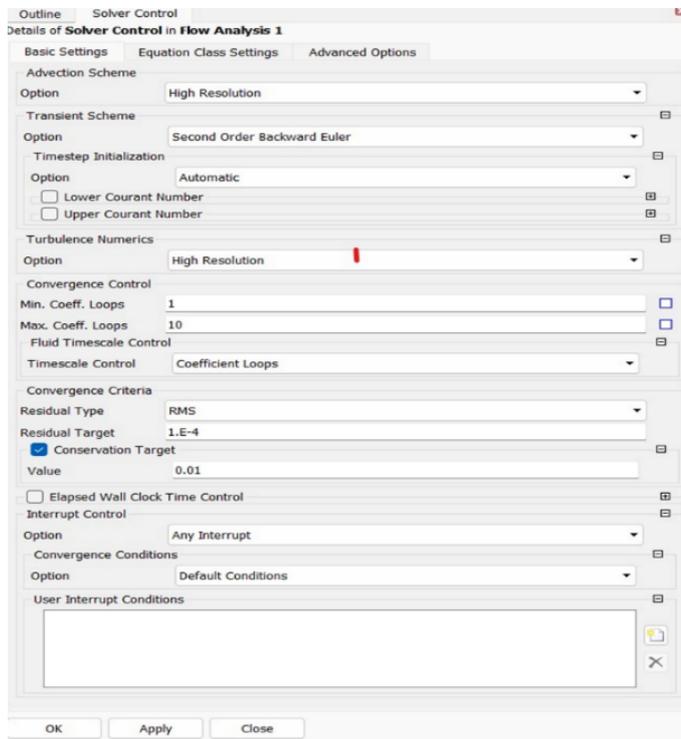


Figura 24

Configuración de Output Control para Almacenar Datos de Simulación

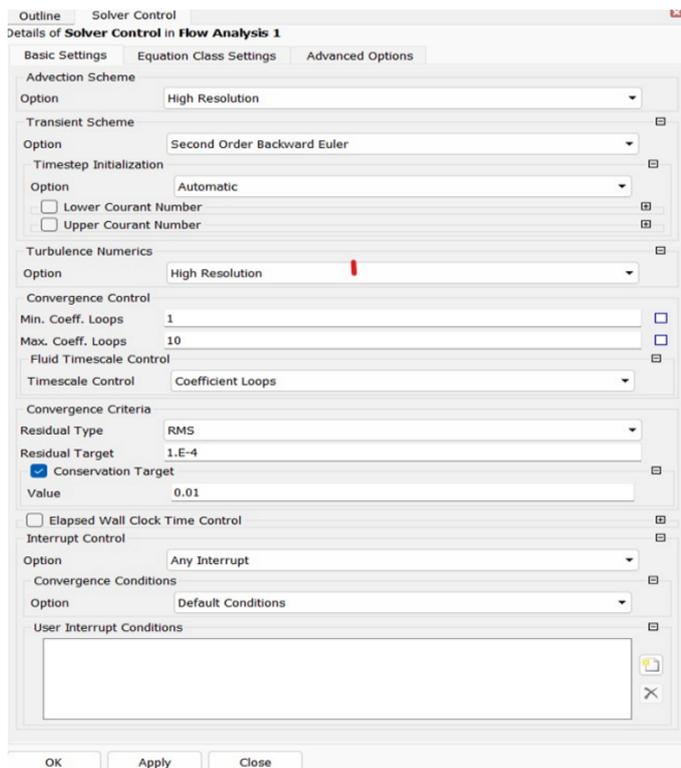


Figura 25

Configuración de las condiciones de borde

Detalles de entrada

Details of **ENTRADA** in **Default Domain** in **Flow Analysis 1**

Basic Settings | **Boundary Details** | Fluid Values | Sources | Plot Options

Flow Regime
Option: Subsonic

Mass And Momentum
Option: Bulk Mass Flow Rate
Mass Flow Rate: 2872.86 [kg s⁻¹]

Flow Direction
Option: Normal to Boundary Condition

Turbulence
Option: Medium (Intensity = 5%)

Frotera Inlet (entrad)

Condiciones de frontera

Masa y momento: Bulk Mass Flow Rate

Caudal másico:

Intensidad de turbulencia: medium 5%

Valor de Agua: 1 - Valor de Aire:

Detalles de salida

Details of **SALIDA** in **Default Domain** in **Flow Analysis 1**

Basic Settings | **Boundary Details** | Fluid Values | Sources | Plot Options

Flow Regime
Option: Subsonic

Mass And Momentum
Option: Opening Pres. and Dirn
Relative Pressure: 0 [Pa]

Flow Direction
Option: Normal to Boundary Condition

Loss Coefficient

Turbulence
Option: Medium (Intensity = 5%)

Figura 26

Detalles de la frontera de apertura 1.

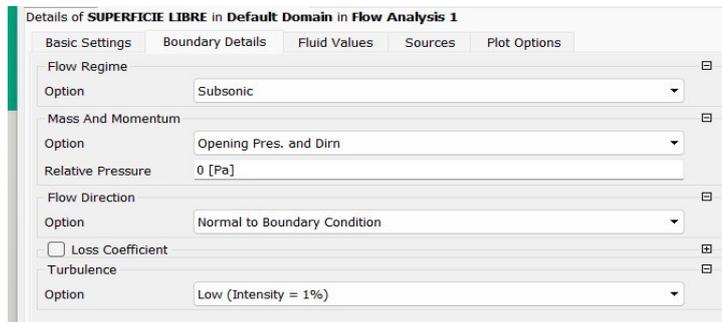
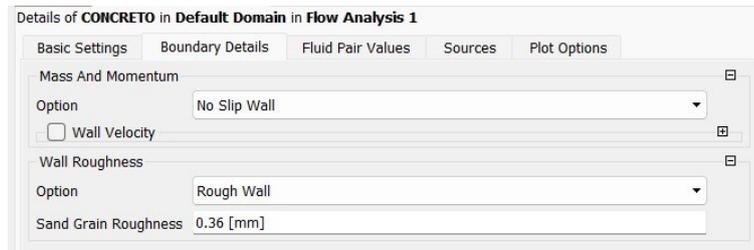


Figura 27

Configuración Básica de la Frontera de Muro.

Detalles de frontera



Condiciones de frontera

Masa y momento: Bulk Mass Flow Rate

Caudal másico: 2872.86 kg/s

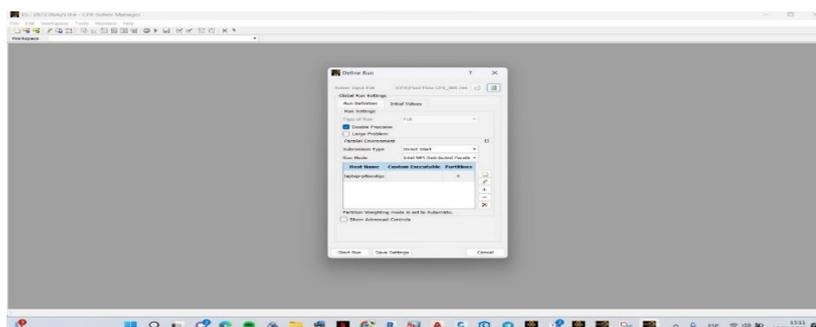
Intensidad de turbulencia: medium 5%

Valor de Agua: 1 - Valor de Aire

Nota: Es importante tener en cuenta que el coeficiente de rugosidad absoluta (mm) no es igual al coeficiente de rugosidad de Manning, ya que la rugosidad real no tiene unidades. Para este caso, el material es de concreto simple el valor de la rugosidad absoluta es 0.36 mm.

Figura 28

Vista Preliminar de la Solution



4.1.1. Análisis de la rápida del Túnel Conchano mediante el modelo tridimensional en el software Ansys CFX

El Túnel Conchano es una estructura de gran importancia. Es fundamental que se realicen análisis exhaustivos para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad, tal como el diseño y modelamiento de una rápida hidráulica. En este contexto, se llevó a cabo un análisis de la rápida hidráulica del Túnel Conchano utilizando el modelo tridimensional en el software Ansys CFX. El objetivo de este análisis fue evaluar el comportamiento del flujo de velocidades y la distribución de la presión dentro del túnel en distintas condiciones de funcionamiento. Para ello, se emplearon datos precisos sobre las dimensiones y características del túnel, así como las velocidades de entrada y salida del flujo de aire.

En el módulo de configuración, se han establecido las propiedades del fluido de la siguiente manera:

- Se ha definido un fluido multifásico de agua-aire, donde se considera el fluido como un medio continuo y el programa calcula automáticamente el porcentaje de mezcla entre ambos fluidos.
- La presión que domina el dominio es la atmosférica, con un valor de 1[atm].
- Se ha asumido modelo de flotabilidad con una fuerza gravitatoria de 9.8 m/s².
- La densidad de flotabilidad entre agua-aire se ha fijado en 1,185 kg/m³.
- El modelo de fluido multifásico empleado es homogéneo, con el agua como el fluido primario.
- Se ha utilizado el modelo de turbulencia (k-εRNG). No se han proporcionado valores para la energía cinética k ni para la disipación ε, ya que se utilizan los valores predeterminados.

- No se ha considerado la transferencia de calor ni la combustión, ya que no son relevantes para el proyecto.
- El coeficiente de tensión superficial del agua empleado es de 0.072 N/m.

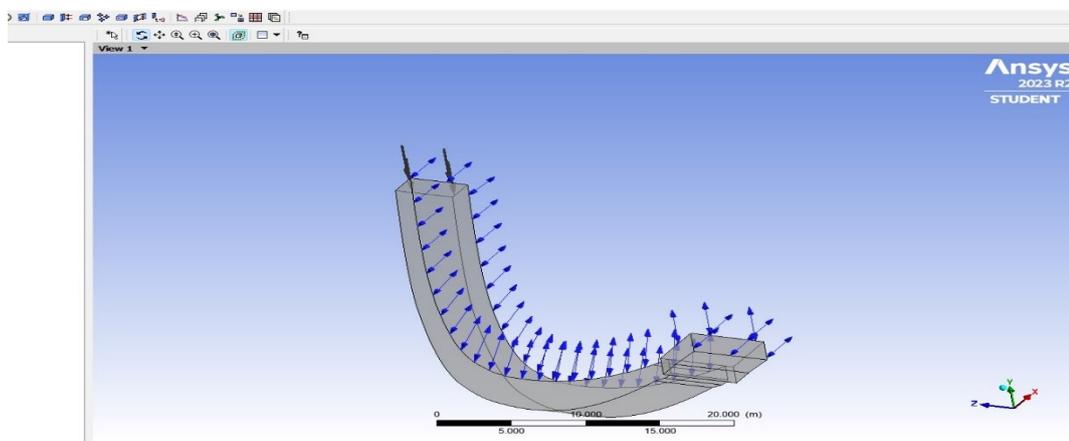
Tabla 12

Características del Fluido para el Modelamiento en Ansys CFX

Característica	Descripción
Tipo de fluido	Agua: Incompresible, continuo, newtoniano Aire: Compresible, continuo, newtoniano
Tipo de flujo	Turbulento
Tipo de régimen	transitorio
Tipo de dominio	Dominio Fluido
Modelo multifásico	Homogéneo
Fuerza gravitacional	Sí
Tipo de modelo de turbulencia	k-ε
Transmisión de calor	No
Presión de referencia	1 atm
Densidad de referencia	1.2 kg/m ³
Coefficiente de tensión superficial	0.072 N m ⁻¹
Modelo de tensión superficial	Superficie continua
Transferencia en interfaces	Superficie libre
Transferencia de masa	No
Método de resolución	Método de volúmenes finitos.

Figura 29

Vista de la Rápida Hidráulica en el programa Ansys CFX



Los resultados obtenidos a través de esta simulación tridimensional en Ansys CFX permitieron identificar zonas de alta presión y velocidades de flujo que podrían generar inestabilidades. Además, se pudo evaluar la eficiencia de las medidas de control de flujo y diseñar posibles mejoras para optimizar el transporte de agua en la rápida hidráulica.

Tabla 13

*Caracterización de la Velocidad y Presión del Modelo Tridimensional
Hidráulico General*

	Velocidad (m/s)	Presión (Pa)
Media	107.067	1.094.637
Error estándar de la media	,01704	257.176
Mediana	104.700	-,1600
Desv. Desviación	766.465	115.689.895
Asimetría	.166	.661
Error estándar de asimetría	.005	.005

Los datos estadísticos resumidos revelan características importantes de las distribuciones de velocidad y presión en tu conjunto de datos. La velocidad es aproximadamente de 107.067 m/s, con una desviación estándar considerable de alrededor de 766.465 Pa, lo que sugiere una dispersión relativamente amplia en torno a esta media. Además, la asimetría cercana a cero (0.166) indica una distribución casi simétrica de los datos en torno a la media. Por otro lado, la presión muestra una media mucho más alta de 1.094.637 y una desviación estándar notablemente grande de aproximadamente 115.689.895. La asimetría positiva (0.661) sugiere una cola más larga en el extremo derecho de la distribución, lo que indica una concentración de valores más altos de presión, mientras que la mediana negativa (-0.1600) contrasta con la alta media, sugiriendo una posible presencia de valores atípicos hacia el extremo inferior de la

distribución. Estos estadísticos son fundamentales para comprender la forma y la dispersión de los datos, así como para detectar posibles características notables, como la presencia de valores extremos o sesgos en las distribuciones de velocidad y presión.

Tabla 14

Caracterización de la Velocidad y Presión del Modelo Tridimensional

Hidráulico de Acuerdo al Mallado

Mallado_V			Velocidad (m/s)	Presión (Pa)
0.3 m	N	Válido	102222	102222
		Perdidos	0	0
	Media		10.3432	94.1610
	Error estándar de la media		.02309	3.26739
	Desv. Desviación		7.38235	1044.65622
	Asimetría		.196	5.451
	Error estándar de asimetría		.008	.008
0.4 m	N	Válido	59031	59031
		Perdidos	0	0
	Media		10.7917	117.6525
	Error estándar de la media		.03208	5.28221
	Desv. Desviación		7.79443	1283.38147
	Asimetría		.147	-3.507
	Error estándar de asimetría		.010	.010
0.5 m	N	Válido	41109	41109
		Perdidos	0	0
	Media		11.4883	135.7566
	Error estándar de la media		.03991	6.05738
	Desv. Desviación		8.09207	1228.15486
	Asimetría		.081	.097
	Error estándar de asimetría		.012	.012

Visualización del comportamiento del flujo y caudales

Se han obtenido gráficos y representaciones visuales en 3D que muestran cómo se comporta el flujo en el túnel. Esto ayuda a comprender mejor los patrones y características del flujo en diferentes secciones del túnel.

Tabla 15*Caudales Simulados para el Diseño de la Rápida Hidráulica*

Q (lt/s)	entrada	Caudales simulados		Tiempo de simulación (S)
		salida	% de variación	
A	2872	2898	-0.91%	9000
B	12000	12002	-0.02%	10800
C	271	269.94	0.39%	7200

Distribución de velocidad

Se han obtenido mapas de velocidad en diferentes puntos y secciones del túnel. Estos mapas mostrarán la distribución espacial de la velocidad del flujo, lo que ha permitido identificar áreas de alta o baja velocidad y comprender cómo influyen en el comportamiento global de la rápida.

Tabla 16*Relación entre Caudal, Velocidad Máxima y Velocidad Promedio en la Rápida Hidráulica*

Caudal (l/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
271.00	18.8	12.5
2876.86	25.47	18.95
120000	25.49	18.89

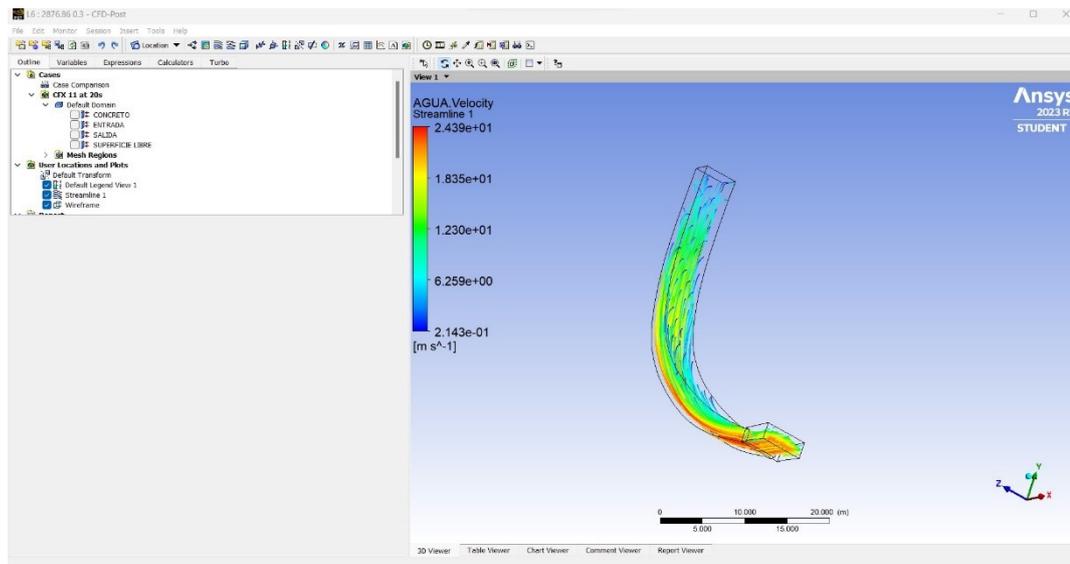
Para el mallado de 0.3 m, la media de velocidad es de aproximadamente 10.3432, con una desviación estándar de alrededor de 7.38235. La asimetría es leve (0.196), indicando una distribución ligeramente sesgada.

En el mallado de 0.4 m, la media de velocidad aumenta ligeramente a 10.7917, con una desviación estándar de aproximadamente 7.79443. La asimetría es mínima (0.147), sugiriendo una distribución cercana a la simetría.

Con respecto al mallado de 0.5 m, la media de velocidad es de aproximadamente 11.4883, con una desviación estándar de alrededor de 8.09207. La asimetría es aún más mínima (0.081), indicando una distribución casi simétrica.

Figura 30

Visualización de Velocidades del Flujo de Agua en el Modelo de la Rápida Hidráulica en Ansys CFX



Perfiles de presión

Se han obtenido perfiles de presión a lo largo de la rápida. Estos perfiles muestran cómo varía la presión a medida que el flujo avanza a lo largo del túnel. Esto puede ayudar a identificar áreas de alta o baja presión y comprender cómo afecta al comportamiento de la rápida.

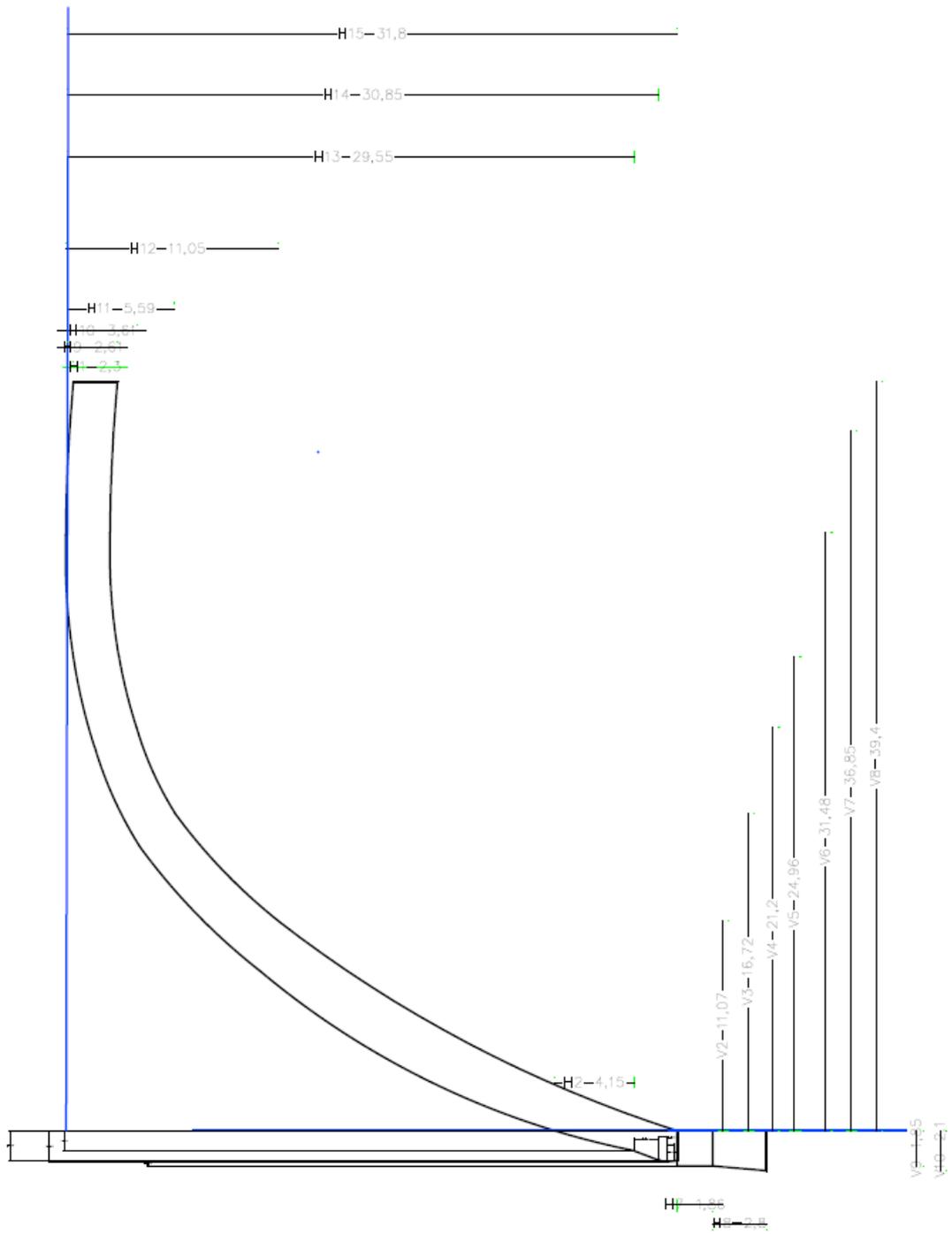
Para el mallado de 0.3 m, la media de presión es de aproximadamente 94.1610, con una desviación estándar de alrededor de 1044.65622. La asimetría es alta (5.451), lo que sugiere una fuerte sesgadura hacia valores extremadamente altos.

En el mallado de 0.4 m, la media de presión es de alrededor de 117.6525, con una desviación estándar de aproximadamente 1283.38147. La asimetría es negativa (-3.507), indicando una distribución sesgada hacia valores más bajos.

En cuanto al mallado de 0.5 m, la media de presión es de aproximadamente 135.7566, con una desviación estándar de alrededor de 1228.15486. La asimetría es mínima (0.097), indicando una distribución cercana a la simetría.

Figura 31

Perfil de la Rápida Hidráulica



4.1.2. *Importancia del uso del software Ansys CFX en futuros proyectos hidráulicos*

La simulación numérica se ha convertido en un componente esencial para comprender y prever el comportamiento de sistemas complejos. En este contexto, el software Ansys CFX emerge como una herramienta invaluable, marcando una diferencia significativa en comparación con los métodos tradicionales de modelamiento hidráulico.

Tabla 17

Problemas que Surgen en el Modelamiento Tradicional y Soluciones que Ofrece el Programa Ansys CFX

Problemas del modelamiento tradicional	Soluciones con Ansys CFX
Limitaciones en Precisión y Complejidad del Modelo	Alta Precisión: Ansys CFX ofrece una precisión mejorada y manejo eficaz de geometrías complejas.
Dificultades en Simulaciones Transitorias	Capacidad para Simulaciones Transitorias: Ansys CFX permite análisis dinámicos y transitorios de manera eficiente.
Restricciones en la Gama de Modelos de Fluidos	Amplia Gama de Modelos de Fluidos: Ansys CFX proporciona una variedad de modelos que abordan diferentes comportamientos de fluidos.
Interfaz y Pos procesamiento Limitados	Interfaz Intuitiva y Pos procesamiento Avanzado: Ansys CFX cuenta con herramientas de interfaz fácil de usar y pos procesamiento avanzado.
Desafíos en la Configuración y Adaptación a Nuevos Proyectos	Integración con Ansys Workbench y Configuración Versátil: Ansys CFX se integra con Ansys Workbench y se adapta a diversas configuraciones de proyectos.

Nota: Esta tabla destaca los problemas comunes asociados con programas de modelamiento tradicional y las soluciones que ofrece Ansys CFX. Las limitaciones en precisión y complejidad del modelo son abordadas mediante la alta precisión de Ansys CFX y su capacidad para manejar geometrías complejas. Las dificultades en simulaciones transitorias se resuelven con la capacidad específica para este tipo de análisis. La restricción en modelos de fluidos se supera mediante la amplia gama de opciones en Ansys CFX. Además, la interfaz intuitiva y las herramientas de pos procesamiento avanzado de Ansys CFX resuelven problemas relacionados con la usabilidad.

4.2. Discusión de resultados

A través del modelamiento del software, se han obtenido velocidades y presiones medias de 107.067 m/s y 1,094.637 Pa, respectivamente, que son diferentes al trabajo realizado por Dhakal (2023), quien modeló la bifurcación del proyecto hidroeléctrico de Raghuganga, donde alcanzó presiones de hasta 3,088,000 Pa, pero con velocidad mucho menores de tan solo 4.68 m/s, por lo que se planteó una rápida que permitiese disminuir la presión e incrementar la velocidad. Así mismo, Žic et al. (2020) también determinaron velocidades de entrada mucho menores (1 a 1.5 m/s) que, para la rápida hidráulica, pero las velocidades medias eran similares, aun cuando Žic et al. (2020) diseñaron una válvula de compuerta. También, los resultados del modelamiento de la rápida hidráulica del Túnel Conchano concuerdan con los resultados encontrados por Sevilla (2021) durante la modelación numérica de la rápida hidráulica en la Central Hidroeléctrica de Curumuy de Piura, con desviaciones bajas entre 0% a 16%. Siendo así, al modelar una misma obra hidráulica, en este caso la rápida hidráulica del Túnel Conchano, se pueden encontrar similitudes en sus presiones y velocidades, siendo estas las variables críticas durante el modelamiento en el programa Ansys CFX.

Respecto al programa de modelamiento, en el contexto de la literatura existente, varios autores respaldan la eficacia de Ansys CFX en el modelamiento hidráulico. Rojas-Sola et al. (2016) resaltan la importancia de utilizar herramientas de simulación avanzadas como Ansys CFX para obtener resultados detallados y confiables en estudios hidráulicos. Además, Mrope et al. (2021) destacan la capacidad de Ansys CFX para modelar con precisión flujos complejos, lo cual coincide con nuestras observaciones en el proyecto del Túnel Conchano.

El análisis efectuado mediante el modelo tridimensional desarrollado con el software Ansys CFX ha arrojado resultados para la comprensión del comportamiento hidráulico de la rápida en el Túnel Conchano. La influencia de variables como el tipo de mallado y el nivel de caudal en la velocidad y presión del flujo de la rápida hidráulica del túnel Conchano es evidente, según los resultados obtenidos. Estos resultados señalan que el mallado de 0.5 m y un caudal de 12000 l/s podrían ser la combinación más eficiente para optimizar el flujo en el túnel. Además, se observa que tanto el tipo de mallado como el nivel de caudal son predictores tanto para la velocidad como para la presión, lo que destaca la importancia en el diseño y la predicción del comportamiento del flujo.

Por tanto, la optimización del modelo se llevó a cabo con un mallado de 0.50 m y un caudal de 12000 l/s, condiciones que generaron las máximas velocidades y presiones en el flujo hídrico. Esta elección permitió una comprensión detallada de la distribución de los flujos en la rápida hidráulica, identificando zonas críticas, entre los 40 y 50 m del inicio del Túnel Conchano, con variaciones significativas en la velocidad y presión hidráulica. Como resultado de este análisis detallado, se propuso la implementación de un colchón amortiguador adicional a la rápida. Este colchón, con dimensiones de 5.52 m de largo, 5.01 m de ancho y 2.6 m de profundidad, se plantea como una medida para mitigar posibles problemas identificados en las zonas críticas. La decisión de incorporar este colchón amortiguador se fundamenta en la necesidad de optimizar la estabilidad y la eficiencia del sistema hidráulico de la rápida en el Túnel Conchano.

Según Chávez & Dueñas (2021), las interacciones entre las variables en el modelamiento hidráulico pueden tener impacto en los resultados obtenidos.

Además, Žic et al. (2020) sostienen que la optimización de las variables en un modelo hidráulico puede mejorar la eficiencia del flujo y garantizar un diseño adecuado de la red de distribución de agua.

En relación con los valores atípicos en la distribución de presión, es esencial realizar una evaluación más detallada para comprender la naturaleza de estos comportamientos anómalos y cómo podrían afectar la eficacia del modelo hidráulico. Sevilla (2021) han señalado la importancia de identificar y gestionar valores atípicos en el análisis hidráulico para garantizar la precisión de los resultados obtenidos.

Así mismo, Ventimiglia et al. (2020) subrayan la importancia de considerar medidas de control y mitigación en proyectos hidráulicos para garantizar la seguridad y la eficacia del flujo. Asimismo, los resultados obtenidos son consistentes con las observaciones de Tu et al. (2023), quienes enfatizan la utilidad de la simulación tridimensional para identificar zonas críticas en el comportamiento hidráulico.

La adopción del software Ansys CFX se revela como un componente fundamental para proyectos hidráulicos venideros. Este software de elementos finitos ha demostrado su relevancia al permitir la ejecución de un análisis detallado y preciso del comportamiento hidráulico. La capacidad distintiva de modelar flujos de rápidas en tres dimensiones y simular variables críticas, como velocidad y presión, proporciona una comprensión más profunda del funcionamiento de las estructuras hidráulicas.

La contribución de Ansys CFX a la comprensión hidráulica va más allá de la simple simulación, ya que brinda resultados confiables y realistas. Este nivel de precisión es esencial para la toma de decisiones informadas en cuanto al diseño y

operación de obras hidráulicas. En particular, los resultados obtenidos en el estudio de la rápida hidráulica destacan la capacidad del software para aclarar complejidades y ofrecer una visión detallada de los flujos, lo que constituye información valiosa para diseñadores y planificadores.

Al respecto, varios autores han destacado la utilidad y eficacia de Ansys CFX en el modelamiento hidráulico. Rivera (2023) señaló que este software permite realizar análisis detallados de flujos complejos y brinda resultados realistas que pueden ser utilizados para tomar decisiones en el diseño y operación de obras hidráulicas. Asimismo, Artega (2017) mencionó que la capacidad de Ansys CFX para simular diferentes escenarios hidráulicos es fundamental para comprender mejor el comportamiento de las estructuras y optimizar su rendimiento.

Montalvan (2021) y Dhakal (2023) resaltan la importancia de herramientas de simulación avanzadas en proyectos hidráulicos, señalando que la capacidad de modelado tridimensional permite una representación más fiel del comportamiento del agua en diversas situaciones. Además, los resultados obtenidos con Ansys CFX están alineados con las observaciones de Žic et al. (2020), quienes destacan la necesidad de análisis detallados y precisos para garantizar la eficiencia y seguridad en proyectos hidráulicos.

4.3. Contrastación de hipótesis

Para explicar cómo se contrastan los resultados obtenidos en el programa SPSS con la hipótesis indicada en la tesis primero es importante entender el contexto de la investigación y las hipótesis planteadas.

En la tesis la hipótesis principal que sugiere que ciertas variables de diseño o configuraciones del modelamiento computacional de la rápida del Túnel Conchano tendrán un impacto significativo en la eficiencia hidráulica o en la capacidad de disipación de energía de la rápida. En este caso, se han utilizado técnicas estadísticas para comparar los resultados obtenidos bajo diferentes condiciones y determinar si hay diferencias significativas entre ellas.

En el programa SPSS según los resultados obtenidos, se contrasta con la hipótesis indicada.

a) Formulación de hipótesis

Hipótesis Nula (H0): No hay diferencias significativas en la eficiencia hidráulica o la capacidad de disipación de energía entre las diferentes configuraciones de modelamiento de la rápida del Túnel Conchano.

Hipótesis Alternativa (H1): Hay diferencias significativas en la eficiencia hidráulica o la capacidad de disipación de energía entre las diferentes configuraciones de modelamiento de la rápida del Túnel Conchano.

b) Recolección de datos y análisis en SPSS

Se recolectan los datos de los diferentes modelos de rápida del Túnel Conchano utilizando Ansys CFX.

Se introducen los datos en SPSS para realizar análisis estadísticos, como ANOVA o pruebas t de Student, para comparar las medias de los resultados obtenidos bajo diferentes condiciones de modelamiento.

c) Interpretación de resultados

Si el valor p obtenido del análisis estadístico es menor que el nivel de significancia predefinido (generalmente $\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa.

Esto indicaría que existen diferencias significativas entre las diferentes configuraciones de modelamiento de la rápida del Túnel Conchano en términos de eficiencia hidráulica o capacidad de disipación de energía.

d) Resultados del análisis estadístico

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la investigación, acerca del modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, se demuestran las hipótesis planteadas. El análisis descriptivo y los resultados inferenciales; además, los instrumentos utilizados fueron analizados por los procedimientos estadísticos de Kolmogórov-Smirnov para la normalidad y la prueba ANOVA.

a) Velocidad

La variable velocidad juega un papel fundamental en el análisis del flujo dentro del Túnel Conchano. Se busca determinar cómo varía la velocidad del flujo en diferentes puntos y contrastarlo en relación a los otros parámetros del modelo en el software Ansys CFX.

Tabla 18*Prueba Anova Bi Factorial de la Variable Velocidad (m/s)*

Pruebas de efectos Inter sujetos					
Variable dependiente:					
Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	575000.075 ^a	8	71875.009	1285.604	0.000
Intersección	20848340.435	1	20848340.435	372907.177	0.000
TIPO DE MALLADO	39042.916	2	19521.458	349.174	0.000
TIPO DE CAUDAL	447516.562	2	223758.281	4002.288	0.000
MALLADO*CAUDAL	35379.616	4	8844.904	158.206	0.000
Error	11313067.940	202353	55.908		
Total	35085406.106	202362			
Total, corregido	11888068.015	202361			

Nota: P valor<0.05 , existe efecto entre las variables dependientes.

Los resultados de la prueba ANOVA bifactorial para la variable de velocidad en el modelamiento computacional del túnel Conchano indican un modelo (F=1285.604, p=0.000), demostrando la influencia del tipo de mallado (F=349.174, p=0.000), el tipo de caudal (F=4002.288, p=0.000) y su interacción (F=158.206, p=0.000) en la velocidad del flujo. Estos hallazgos sugieren que estos factores o sus combinaciones tienen un impacto estadísticamente significativo en la velocidad observada en la rápida hidráulica.

Tabla 19*Prueba Tukey para la Velocidad – Mallado*

VELOCIDAD				
HSD Tukey				
MALLADO_V	N	Subconjunto		
		1	2	3
0.3 M	102222	10.3432		
0,4 M	59031		10.7917	
0.5 M	41109			11.4883
Sig.		1.000	1.000	1.000

En la prueba Tukey para la variable de velocidad en relación con los diferentes tipos de mallado, se observan diferencias entre las medias de la velocidad para los distintos tipos de mallado (0.3 m, 0.4 m y 0.5 m). Las comparaciones múltiples indican diferencias en las velocidades entre 0.3 m y 0.4 m (Diferencia de medias = -0.4485, $p=0.000$), 0.3 m y 0.5 m (Diferencia de medias = -1.1450, $p=0.000$), y 0.4 m y 0.5 m (Diferencia de medias = -0.6965, $p=0.000$). esto indica que a medida que el tipo de mallado va aumentado el promedio óptimo de velocidad aumenta.

Tabla 20

Prueba Tukey para Velocidad – Caudal

VELOCIDAD				
HSD Tukey				
CAUDAL_V	N	Subconjunto		
		1	2	3
caudal 271	67454	8.4983		
caudal 12000	67454		11.5810	
caudal 2876.86	67454			12.0407
Sig.		1.000	1.000	1.000

En la prueba Tukey para la variable de velocidad en relación con los diferentes niveles de caudal, se observan diferencias entre las medias de velocidad para los distintos niveles de caudal (caudal 271, caudal 2872.86 y caudal 12000). Las comparaciones múltiples indican diferencias en las velocidades entre caudal 271 y caudal 2872.86 (Diferencia de medias = -3.5424, $p=0.000$), caudal 271 y caudal 12000 (Diferencia de medias = -3.0827, $p=0.000$), y caudal 2872.86 y caudal 12000 (Diferencia de medias = 0.4597, $p=0.000$). Esto Significa que el caudal más óptimo es de 2872.86 ya que presenta mejores promedios.

Figura 32

Medias Marginales Estimadas para Velocidad según Mallado

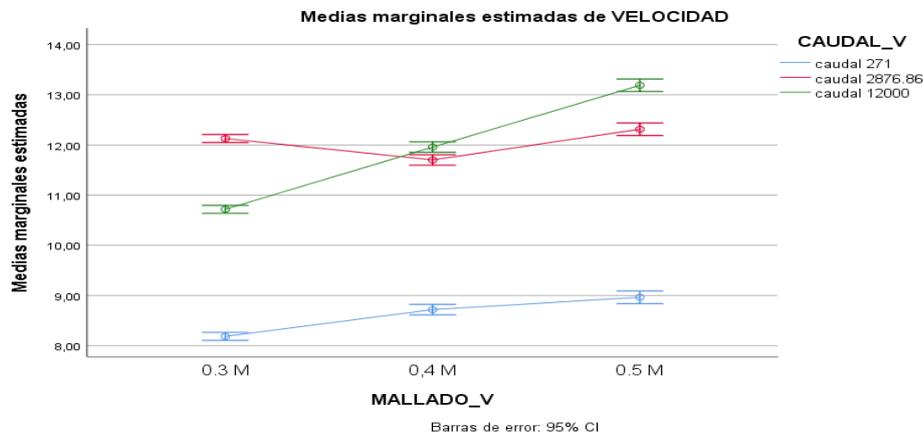


Tabla 21

Modelo de Estimación Múltiple para la Velocidad

Coeficientes					
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1 (Constante)	6.682	0.057		116.560	0.000
MALLADO	0.555	0.021	0.057	25.975	0.000
CAUDAL	1.541	0.021	0.164	75.004	0.000

$$velocidad = 6.682 + 0.555MALLADO + 1.541CAUDAL \quad (1)$$

Los valores t altos (25.975 para MALLADO Y 75.004 para CAUDAL) y los valores de p muy bajos (0.000) sugieren que ambos predictores (tipo de mallado y nivel de caudal) sirven para predecir la velocidad de la rápida hidráulica.

b) Presión

La variable presión también fue objeto de estudio en este trabajo. Se pretende analizar cómo varía la presión en distintos puntos.

Tabla 22*Prueba Anova Bi Factorial para la variable presión (Pa)*

Pruebas de efectos Inter sujetos					
Variable dependiente:					
Origen	suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	2221168116.868	8	277646014.609	209.151	0.000
Intersección	2366476065.342	1	2366476065.342	1782.668	0.000
TIPO MALLADO	56315472.211	2	28157736.106	21.211	0.000
TIPO CAUDAL	2095141597.089	2	1047570798.544	789.136	0.000
MALLADO * CAUDAL	85185221.436	4	21296305.359	16.043	0.000
Error	268621867902.618	202353	1327491.403		
Total	273267796610.835	202362			
Total, corregido	270843036019.486	202361			

La prueba ANOVA bifactorial para la variable de presión en el modelamiento del túnel Conchano revela un modelo ($F=209.151$, $p=0.000$). Esto indica que al menos una de las variables independientes (tipo de mallado, tipo de caudal o su interacción) tiene un efecto en la presión. Los resultados detallan la contribución tanto del tipo de mallado ($F=21.211$, $p=0.000$) como del tipo de caudal ($F=789.136$, $p=0.000$) en la variación de la presión. Además, la interacción entre el tipo de mallado y caudal también muestra un efecto ($F=16.043$, $p=0.000$). Estos hallazgos sugieren que estos factores y sus combinaciones tienen un impacto estadísticamente en la presión observada en la rápida hidráulica.

Tabla 23*Prueba Tukey para Presión – Mallado*

PRESION				
HSD Tukey				
MALLADO	N	Subconjunto		
		1	2	3
0.3 M	102222	34.1610		
0,4 M	59031		117.6525	
0.5 M	41109			135.7566
Sig.		1.000	1.000	1.000

La prueba Tukey realizada para la variable de presión en relación con los distintos tipos de mallado (0.3 m, 0.4 m y 0.5 m) revela diferencias entre las medias de presión para estos grupos. Se observan diferencias entre todos los pares de tipos de mallado: 0.3 m y 0.4 m (Diferencia de medias = -23.4916, $p=0.000$), 0.3 m y 0.5 m (Diferencia de medias = -41.5956, $p=0.000$), y 0.4 m y 0.5 m (Diferencia de medias = -18.1041, $p=0.038$). Estos hallazgos sugieren que las variaciones en los tipos de mallado tienen un impacto en los niveles de presión registrados en el túnel Conchano. El tipo de mallado para la presión mejora cuando la presión aumenta.

Tabla 24 Prueba Tukey para Presión – Caudal

PRESION				
HSD Tukey				
CAUDAL	N	Subconjunto		
		1	2	3
caudal 271	67454	7.5571		
caudal 2876.86	67454		73.0857	
caudal 12000	67454			247.7481
Sig.		1.000	1.000	1.000

La prueba Tukey aplicada a la variable de presión en relación con los diferentes niveles de caudal (271, 2872.86 y 12000) muestra diferencias entre las medias de presión para estos distintos niveles de caudal. Las comparaciones indican diferencias en las presiones entre los niveles de caudal 271 y 2872.86 (Diferencia de medias = -65.5286, p=0.000), caudal 271 y 12000 (Diferencia de medias = -240.1910, p=0.000), y caudal 2872.86 y 12000 (Diferencia de medias = 174.6624, p=0.000). Estos resultados sugieren el caudal más óptimo es a 12000 con mejores promedios de presión óptima en 247.75 Pa.

Figura 33

Medias Marginales Estimadas para Presión según Mallado

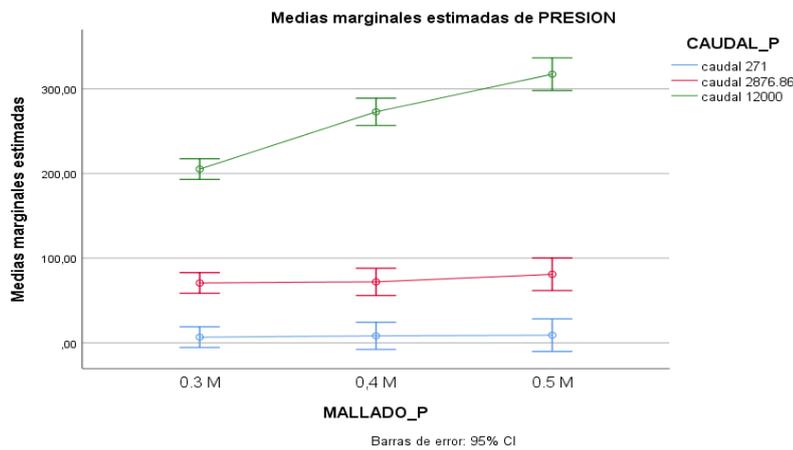


Tabla 25

Modelo de Estimación Múltiple para la Presión

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
(Constante)	-166.695	8.754		-19.042	0.000
MALLADO	21.182	3.262	0.014	6.494	0.000
CAUDAL	120.096	3.138	0.085	38.270	0.000

$$presion = -166.695 + 21.182mallado + 120.096caudal \quad (2)$$

Los valores t altos (6.494 para MALLADO y 38.270 para CAUDAL) y los valores de p muy bajos (0.000) sugieren que ambos predictores (tipo de mallado y nivel de caudal) sirven para predecir la velocidad de la rápida hidráulica.

c) Inferencias

Impacto de las variables en velocidad y presión: Los resultados sugieren que el tipo de mallado, el nivel de caudal y sus interacciones tienen un impacto tanto en la velocidad como en la presión del flujo en el túnel Conchano. La prueba ANOVA y los análisis Tukey indican diferencias notables entre los distintos niveles de estas variables, revelando la influencia sustancial de estos factores en las mediciones de velocidad y presión.

Optimización del mallado y caudal: Los datos muestran que el mallado de 0.5 m ofrece una velocidad más alta en comparación con el mallado de 0.3 m y 0.4 m. Además, el nivel de caudal de 12000 parece ser el más óptimo, ya que produce una mayor velocidad y presión, según los análisis Tukey. Esto sugiere que la configuración de 0.5 m y un caudal de 12000 l/s podrían ser las condiciones más eficientes para el flujo de la rápida hidráulica.

Relación entre velocidad, presión y factores de diseño: Los modelos de estimación múltiple revelan que tanto el tipo de mallado como el nivel de caudal son predictores significativos tanto para la velocidad como para la presión. Los coeficientes altos y significativos para ambas variables indican que son elementos cruciales en el diseño y la predicción del comportamiento del flujo en la rápida.

Comportamiento atípico en presión: Las asimetrías detectadas en la distribución de presión, particularmente en el mallado de 0.3 m y 0.4 m, sugieren un comportamiento atípico, con colas más largas en la distribución, indicando la presencia de valores extremos hacia los extremos superior e inferior. Esto podría

requerir una evaluación más profunda para comprender y gestionar estos valores atípicos.

Validación del modelo: Los resultados respaldan la validez del modelo de análisis utilizado para este estudio, ya que las pruebas de ANOVA bifactorial y las pruebas Tukey revelan diferencias significativas entre los grupos estudiados, lo que sugiere una aplicación efectiva de estos métodos estadísticos para comprender el comportamiento del flujo de la rápida hidráulica.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se ha realizado el análisis y modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, Chota, llegando a concluir que:

- 1) El modelamiento hidráulico de la rápida en el Túnel Conchano, empleando el software Ansys CFX, se ha realizado sobre la base de caudales mínimos, medios y máximos de diseño, es decir, para: 0.27, 2.84 y 12.00 m³/s, respectivamente.
- 2) El análisis mediante el modelo tridimensional desarrollado con el software Ansys CFX arrojó resultados que permite comprender el comportamiento hidráulico de la rápida en el Túnel Conchano. Durante el proceso, se llevó a cabo una mejora en el modelo, ajustando el mallado a una escala de 0.5 m y considerando un caudal de 12000 l/s, lo cual resultó en la observación de la mayor velocidad y presión del flujo hídrico. Este análisis permitió comprender la distribución de los flujos, identificando zonas críticas de alta y baja velocidad y presión hidráulica, ubicadas aproximadamente a 50 m del inicio de la rápida del Túnel Conchano. Además, se ha confirmado que el colchón amortiguador, con dimensiones de 5.52 m de largo, 5.01 m de ancho y 2.6 m de profundidad es eficaz en el control del flujo hídrico, asegurando así la estabilidad y funcionalidad de la rápida hidráulica en el Túnel Conchano.
- 3) La utilización del software Ansys CFX ha demostrado ser de gran relevancia para futuros proyectos hidráulicos, de acuerdo a Chávez & Dueñas (2021) debido a su capacidad para realizar análisis detallados y precisos del comportamiento hidráulico, proporcionando resultados confiables. Este

software permite modelar el flujo en tres dimensiones y simular variables como la velocidad y la presión, lo que facilita una comprensión profunda del funcionamiento de las obras hidráulicas. Pero tiene limitaciones en términos de altos requerimientos computacionales, costo elevado, curva de aprendizaje pronunciada, necesidad de datos precisos y desafíos en interoperabilidad. Por lo que, para maximizar su uso en la optimización del diseño de una rampa hidráulica, es esencial optimizar la geometría y malla, definir correctamente las condiciones de contorno, seleccionar modelos de turbulencia adecuados, mejorar el hardware, capacitar a los usuarios, mantener el software actualizado y validar los resultados con datos experimentales. En consecuencia, Ansys CFX es una herramienta imprescindible para garantizar un análisis adecuado y una toma de decisiones informada en proyectos hidráulicos.

5.2. Recomendaciones y/o sugerencias

Se sugiere el uso del software Ansys CFX para proyectos de infraestructura hidráulica en Chota. Este programa ofrece precisión y confiabilidad en el análisis de flujos hidráulicos, así como versatilidad y cobertura para abordar diversos escenarios. Además, permite optimizar el diseño y realizar simulaciones en tiempo real para monitorear el comportamiento hidráulico de manera eficiente. Su implementación garantizará decisiones informadas y la seguridad y eficiencia de las estructuras hidráulicas en Chota.

CAPÍTULO VI.

REFERENCIAS

- Abarca Mora, D. (2018). *Modelamiento numérico de la vibración Inducida por flujo en una tubería horizontal que transporta flujo bifásico turbulento agua – aire*. Lima. ANA. (2010).
- Arteaga Acuña, F. (2017). *Análisis hidráulico de la bocatoma maría auxiliadora del río Quiroz con modelo numérico tridimensional*. Piura: Optar por el Título de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Piura.
- Chavez Idrogo, G. C. (2019). *Diseño de La bocatoma y mejoramiento del canal del caserío Potrerillo, distrito de Llama, provincia de Chota, departamento Cajamarca – 2015*. Chiclayo: Tesis para optar el título de Ingeniería Civil Ambiental, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrobejo.
- Chávez Loor, L. G., & Dueñas Cherres, D. P. (2021). *Evaluación y optimización hidráulica de las obras de excesos del tanque de carga de La central hidroeléctrica Palmira-Nanegal utilizando el software Ansys Cfx*. [Tesis para optar el título de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana sede Quito].
- Conejos, P., Gamón, A., Hervás, M., Barba, J., Muñoz, O., Alonso, J., & Martínez Alzamora, F. (2019). Retos en la conexión de un modelo hidráulico al sistema Scada. *ResearchGate*, 9.
- Crespo, A. (2006). *Mecánica de fluidos*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Cruz Gavilan, Y., Valdés Hernández, P. A., Laffita Leyva, A., Gómez Águila, M. V., & Chuairey, C. M. (2020). Dinámica de fluido computacional: Revisión y análisis de las aplicaciones en la ingeniería. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(4), 1-10.
- Dhakal, R. (2023). *Computational Analysis of Bifurcation of Raghuganga Hydropower Project*. [Doctoral dissertation, IOE Pulchowk Campus]. <https://elibrary.tucl.edu.np/handle/123456789/18371>
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de mecánica de fluidos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ekambara, K., Sanders, R. S., Nandakumar, K., & Masliyah, J. H. (2009). Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS-CFX. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(17), 8159-8171.

- Felix Carbajal, M. (2018). *Diseño hidráulico de una rápida en canales principales en el anexo de piscopampa distrito de Lirca, provincia de Angarae*. Huancavelica. Gobierno Regional de Lambayeque. (2016). *Proyecto Especial Olmos Tinajones*.
- Hualpa, K. P. (2021). *Comparacion entre Mmodelo numérico y fisico del segundo aliviadero de excedencia- presa Sabana Yegua*. Piura.
- Lagos Mnedoza, M. (2019). *Diseño hidráulico y estructura de una rápida*. PIURA - PERU.
- Landau, L. D., Lifshitz, E. M., Berestetskii, V. B., & Pitaevskii, L. P. (2021). *Mecánica de fluidos*. Reverté.
- Monge Jingo, C. F. (2017). *Modelo numérico de un canal de Fuerte Pendiente con rugosidad variable aplicando al software Ansys Cfx y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFoam*. Quito.
- Montalvan Portero, X. F. (2021). *Modelación numérica del flujo y comportamiento del sifón piura utilizando Ansys*. Piura: Tesis para optar el título profesional de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Piura.
- Morales, F. B., & Salazar, K. D. (2019). *Estimación de pérdidas de caudal y coeficiente de rugosidad del tramo comprendido entre el óvalo 12 al 19 del canal de riego Ambato-Huachi-Pelileo, cantón Cevallos, provincia de Tungurahua*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://doi.org/https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30174>
- Mrope, H. A., Chande Jande, Y. A., & Kivevele, T. T. (2021). A review on computational fluid dynamics applications in the design and optimization of crossflow hydro turbines. *Journal of Renewable Energy*, 2021, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/5570848>
- Ngene, B. U., Nwafor, C. O., Bamigboye, G. O., Ogbiye, A. S., Ogundare, J. O., & Akpan, V. E. (2021). Assessment of water resources development and exploitation in Nigeria: A review of integrated water resources management approach. *Heliyon*, 7(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05955>
- Noblecilla Palomino, L. A. (2019). *Modelación numerica para determinar la orientacion de una bifurcación en el tramo B del río Piura*. Piura.
- Obrovský, J., Krausová, H., Špidla, J., & Zouhar, J. (2013). Development of high specific speed Francis turbine for low head HPP. *Engineering Mechanics*, 20(2), 139-148. <https://doi.org/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/104366481/DEVELOPME>

NT_OF_HIGH_SPECIFIC_SPEED-libre.pdf?1689744977=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDEVELOPMENT_OF_HIGH_SPECIFIC_SPEED_FRANC.pdf&Expires=1718221298&Signature=MZvbd9OYU1ZWAjU5XMnfoIQuZY

- Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté.
- Rivera Lalangui, V. R. (2023). *Análisis del comportamiento hidráulico del filtro lento de piscan – yamango mediante Ansys CFX*. Piura: Tesis para optar el Título de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Piura.
- Rojas-Sola, J. I., García-Baena, C., & Hermoso-Orzáez, M. J. (2016). A review of the computational fluid dynamics simulation software: Advantages, disadvantages and main applications. *Journal of Magnetohydrodynamics and Plasma Research*, 21(4), 417-424.
<https://www.proquest.com/openview/15c04f72fcea01e49d8d754636cce6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2034836>
- Sánchez, P. D., & Durán, D. A. (2020). *Optimización experimental de la geometría de ingreso a una rápida escalonada desde un canal rectangular con flujo supercrítico de aproximación*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional].
<https://doi.org/http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20687>
- Santos, L. M. (2013). *Impactos socio ambientales de reasentamiento por proyectos de desarrollo caso: caserío de huabal – Cajamarca por el proyecto especial olmos tinajones (peot)*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/5194>
- Sevilla, C. (2021). *Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la central hidroeléctrica de Curumuy*. Piura: [Tesis para optar el Título de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Piura].
<https://hdl.handle.net/11042/4779>
- Śliwa, T., Gołaś, A., Wołoszyn, J., & Gonet, A. (2012). Numerical model of borehole heat exchanger in ANSYS CFX software. *Archives of Mining Sciences*, 57(2), 375-390.
- Tipán, A. V. (2023). *Análisis numérico de transientes hidráulicos en el túnel de carga Pilatón Sarapullo del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón*. [Tesis de posgrado,

- Tu, J. Y. (2023). *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Elsevier.
- Ventimiglia, U., Candela, A., & Aronica, G. T. (2020). A cost efficiency analysis of flood proofing measures for hydraulic risk mitigation in an urbanized riverine area. *Water*, 12(9), 1-10. <https://doi.org/https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2395>
- Villalba Fernández de Castro, G., & Saldarriaga, J. G. (2005). Algoritmos de Optimización Combinatoria (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. *revista de ingeniería*, 1(22), 118-125. https://doi.org/http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-49932005000200014&script=sci_arttext
- Wang, G., Xiao, C., Qi, Z., Meng, F., & Liang, X. (2021). Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China. *Ecological Indicators*, 122, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107232>
- Watanabe, R., Miyagawa, K., Khozaei, M. H., Yamaguchi, N., & Masuko, T. (2021). Optimization procedure to design a Francis turbine runner using 2D Through-flow analysis. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1909(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1909/1/012031>
- Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.
- Xie, K. P. (2021). *Comparación ente modelo número y físico del segundo aliviadero de excedencia - Presa Sabana Yegua*. [Tesis para optar el título de ingeniero civil, Universidad de Piura].
- Žic, I., Banko, P., & Luka, L. (2020). Hydraulic analysis of gate valve using computational fluid dynamics (CFD). *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 29(3), 275-288.
- Zienkiewicz, O. C. (2010). *El método de los elementos finitos*. Reverté.

CAPÍTULO VII. ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

Tesis: Análisis y modelamiento computacional de rápida del Túnel Conchano utilizando software Ansys CFX, Chota, 2023

Tesistas: Erick Omar Sánchez Vásquez, Franklin Ronaldo Vásquez Campos

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensión	Indicadores	Metodología
¿Cómo puede el análisis y modelamiento computacional avanzado, mediante el uso de Ansys CFX, contribuir a la evaluación rápida y precisa del estado hidrológico de la rápida hidráulica del Túnel Conchano?	Objetivo general Realizar el análisis y modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, Chota 2023.	Al realizar el análisis y modelamiento computacional de rápida del túnel Conchano utilizando software ANSYS CFX, se reflejará el comportamiento real de dicha estructura.	Software Ansys CFX.	Propiedades del fluido.	Velocidad Densidad Elasticidad Viscosidad	Enfoque: CUANTITATIVO Tipo: APLICADO Nivel: Descriptivo Diseño: No experimental de corte transversal Población, muestra y muestreo: La rápida hidráulica del túnel Conchano-Chota perteneciente al proyecto Tinajones, definida por muestreo no probabilístico por conveniencia.
	Objetivos específicos Realizar la modelación numérica tridimensional del comportamiento de rápida del túnel Conchano, Chota, 2023.	utilizando software ANSYS CFX,		Modelos de simulación numérica.	Modelo de simulación analítica. Modelo determinístico. Modelos estocásticos.	
	Analizar y optimizar la rápida hidráulica mediante un modelo tridimensional utilizando el software de elementos finitos “ANSYS CFX”.	ANSYS CFX,		Modelo tridimensional	Geometría Mallado Setup Solución Procesamiento de resultados	
	Determinar la importancia del uso del software “ANSYS CFX” en futuros proyectos hidráulicos.	se reflejará el comportamiento real de dicha estructura.		Análisis y modelamiento computacional de rápida.	Presión Velocidad Tirante Caudal	

Anexo B. Panel fotográfico

Fotografía 1. Vista del emplazamiento de la rápida hidráulica durante las visitas de campo al lugar de estudio en el Túnel Conchano



Fotografía 2 Tesistas en el punto de estacionamiento de la Estación Total para realizar el levantamiento topográfico de la rápida hidráulica en el Túnel Conchano Chota



Fotografía 3 Verificación de dimensiones en el puente, rápida hidráulica existente y otros elementos del Túnel Conchano



Fotografía 4 Tesistas previo al inicio del levantamiento topográfico del emplazamiento de la rápida hidráulica en el Túnel Conchano Chota



Fotografía 5 Cambio de ubicación de la estación para poder detallar todos los puntos del emplazamiento del levantamiento topográfico



Fotografía 6 Toma de puntos topográfico en el emplazamiento de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 7 Toma de puntos topográficos en el inicio de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 8 Toma de puntos topográficos en el trayecto de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 9 Toma de puntos topográfico en la carretera que da acceso al Túnel Conchano y al emplazamiento de la rápida hidráulica



Fotografía 10 Toma de puntos topográficos en los alrededores de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 11 Toma de puntos topográficos en el puente que da inicio a la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 12 Toma de puntos topográficos en el trayecto de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 13 Toma de puntos topográficos en la estructura del Túnel Conchano por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 14 Toma de puntos topográficos en los alrededores de la rápida hidráulica por parte de los tesistas durante el levantamiento topográfico



Fotografía 15 Registro de puntos topográfico con la estación total en la rápida hidráulica



Anexo C. Procedimiento detallado para el modelamiento de una rápida en el programa Ansys CFX

a) Generación de la geometría de la rápida hidráulica

En el emplazamiento de la rápida hidráulica Túnel Conchano se ha realizado el levantamiento topográfico, lo que ha permitido que, se obtengan mapas topográficos precisos, de los cuales se deduce que la topográfica es accidentada con pendiente de 3% en un tramo de 55 m.

b) Creación de la estructura hidráulica

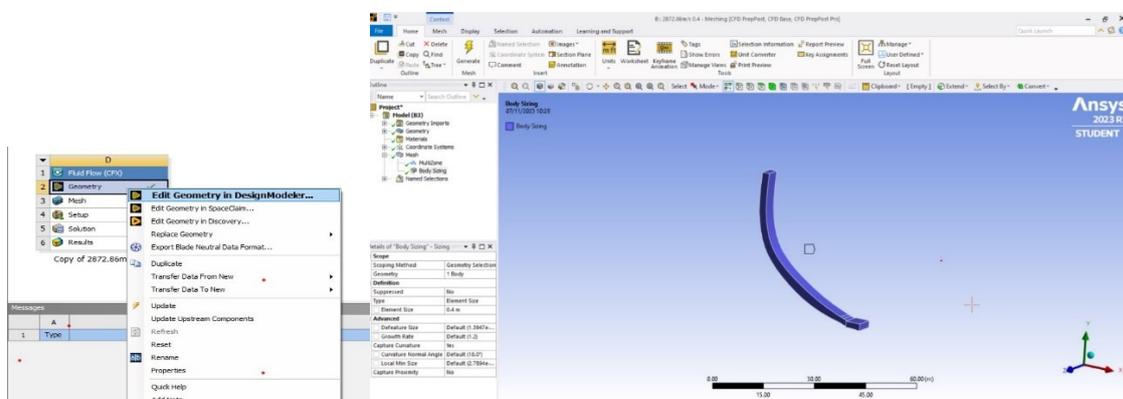
La geometría de la rápida hidráulica se elaboró bajo las herramientas del programa AutoCAD para posteriormente ser exportado al ANSYS CFX.

Creación de la malla

El mallado se crea utilizando la herramienta Mesh, con el objetivo de generar una malla eficiente. Para elegir la malla adecuada, se comparan diferentes métodos de mallado, teniendo en cuenta el dimensionamiento y la calidad de la malla. Dentro de la ventana de trabajo de Mesh, se realiza el mallado sobre la geometría realizada, como se muestra en la Figura 17.

Figura 34

Área de Trabajo Meshing

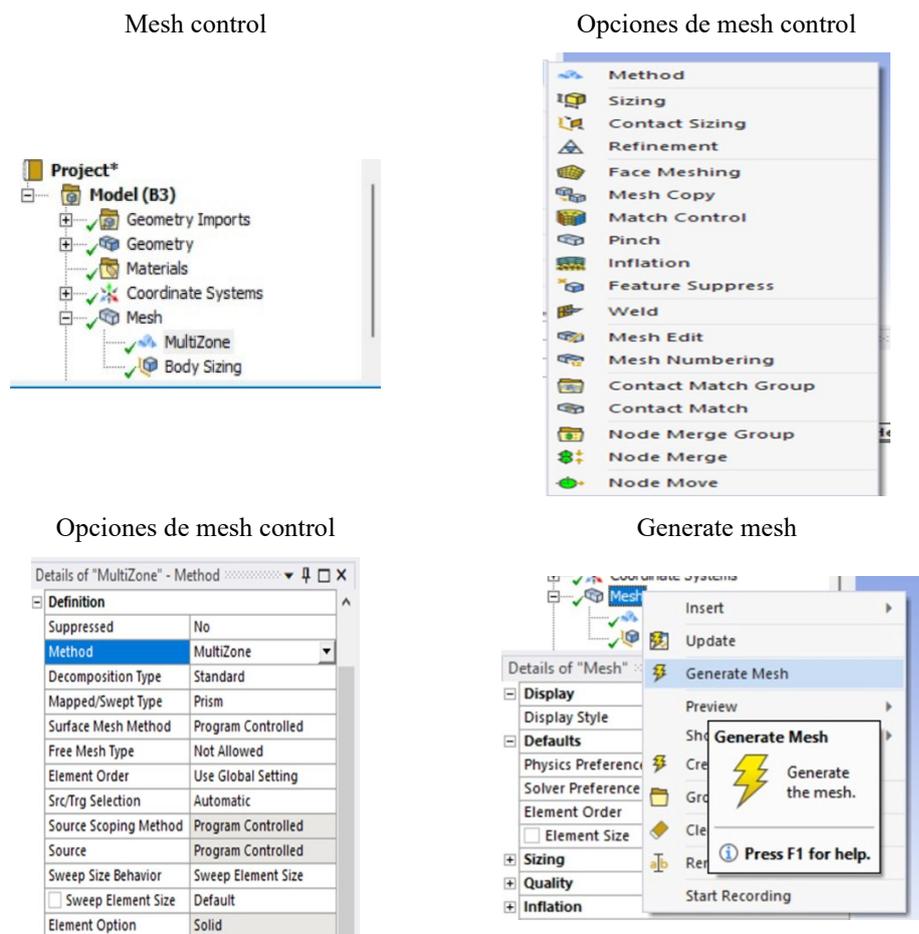


Método de mallado

En este proyecto, se realizó una comparación de resultados para determinar el método de mallado más adecuado. Debido a la influencia de la geometría, se descartaron otros tipos de mallado y se optó por utilizar mallas no estructuradas de tipo hexaédrica. Estas mallas ofrecen ventajas como una relación de aspecto más alta y menos tiempo de elaboración de la malla, con cálculos rápidos. El método hexaédrico es más adecuado para geometrías con tramos rectos. El proceso de aplicación de este método se realiza siguiendo los siguientes pasos.

Figura 35

Procedimiento para Aplicar el Método de Mallado

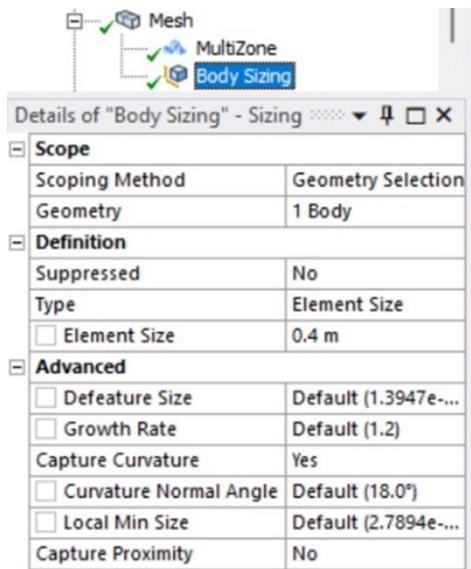


Dimensionamiento y calidad del mallado

En primer lugar, se procede a determinar el tamaño de la malla, lo cual permite obtener resultados más precisos. Manteniendo las condiciones iniciales y el método hexaédrico elegido para el proyecto, se evalúa la variación en los resultados al modificar las dimensiones del elemento de la malla. Para ello, se utiliza la herramienta Sizing, que permite reemplazar las dimensiones y obtener nuevos resultados.

Figura 36

Herramienta Sizing en el software Ansys CFX



Nota: En la herramienta Sizing, se selecciona la geometría que se desea modificar: entrada, salida, superficie libre y las paredes de la ráfaga. Además, se elige el tipo de Sizing que se aplicará, es decir, el tipo de tamaño de elemento (Element Size), tal como se muestra en la Figura 19.

Tabla 26

Parámetros de Calidad de la Malla

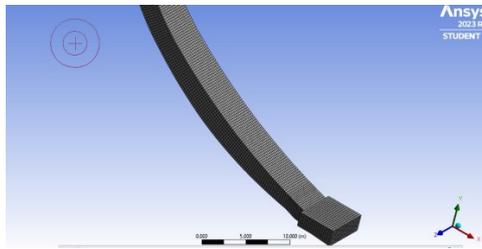
Dimensiones de mallado	Tipo de mallado	Element Quality	Orthogonal Quality	Skewness	aspecto ratio
0.3 Tetrahedro	no estructural	0.81988	0.74968	0.24922	1.9029
0.4 Tetrahedro	no estructural	0.81844	0.74755	0.25124	1.9096
0.5 Tetrahedro	no estructural	0.81653	0.7439	0.25493	1.916
0.3 hibrido	estructural	0.96643	0.98615	0.084379	1.2096
0.4 hibrido	estructural	0.90793	0.98572	0.086553	1.4939
0.5 hibrido	estructural	0.82464	0.985	0.089666	1.827

Se han realizado evaluaciones de las dimensiones utilizando tamaños de 0.3 m, 0.4 m y 0.5 m. A continuación, se genera la malla correspondiente a cada tamaño. Este proceso se muestra en la Figuras 20, donde se visualizan las mallas aplicadas para cada una de las dimensiones evaluadas.

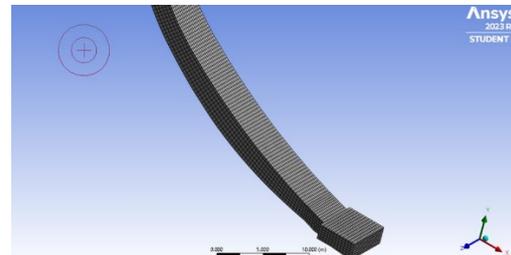
Figura 37

Dimensión de la Malla

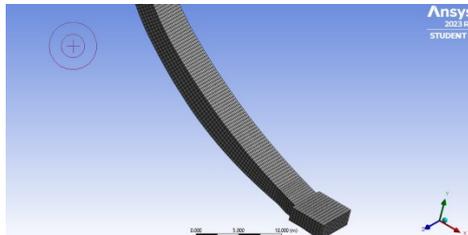
0.30



0.40



0.50



Se obtuvieron un total de 19.677 nodos y 15.792 elementos. Se puede acceder a la opción de descarga del programa ANSYS STUDENT a través del sitio web de ANSYS, lo cual brinda a los estudiantes y personas interesadas en aprender a utilizar el software. Esta versión cuenta con una configuración de mallado que tiene un límite de 512.000 nodos y 1.200.000 elementos. Si se superan estos valores, el programa mostrará un mensaje de error durante el proceso de simulación.

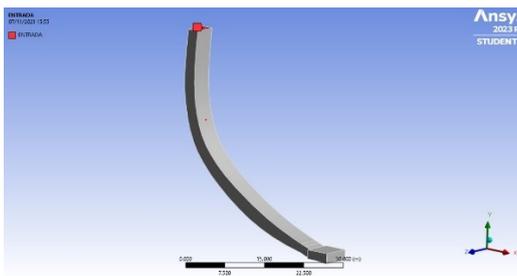
Condiciones de borde

Las condiciones de frontera son necesarias para determinar las condiciones reales del flujo. Cada superficie del cuerpo del fluido requiere un nombre distintivo para asignar las propiedades adecuadas. Estos nombres característicos incluyen: entrada (inlet), salida (outlet), superficie libre (opening) y paredes (wall). Después de crear el mallado, se puede asignar las zonas de interés.

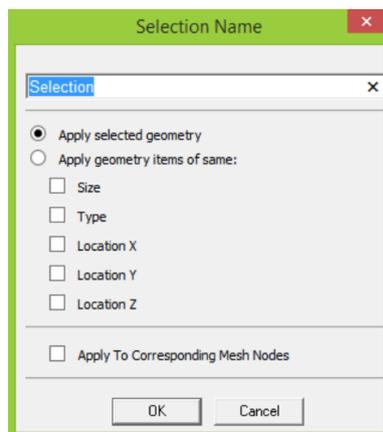
Figura 38

Asignación de las Zonas de Interés

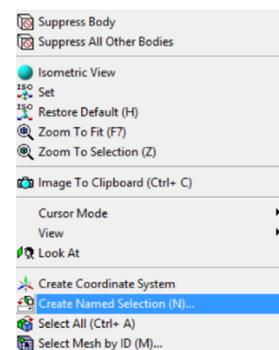
Seleccionar la superficie del plano o frontera que deseamos nombrar



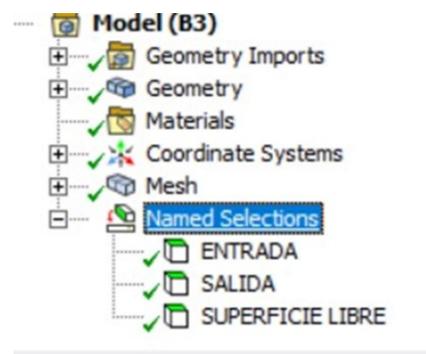
Asignar un nombre a la superficie seleccionada



Hacer clic derecho en la zona de interés y seleccionar la opción "Create Named Selection (N)"



Las secciones asignadas aparecerán en la opción de "Named Selections" en la pestaña "Outline"

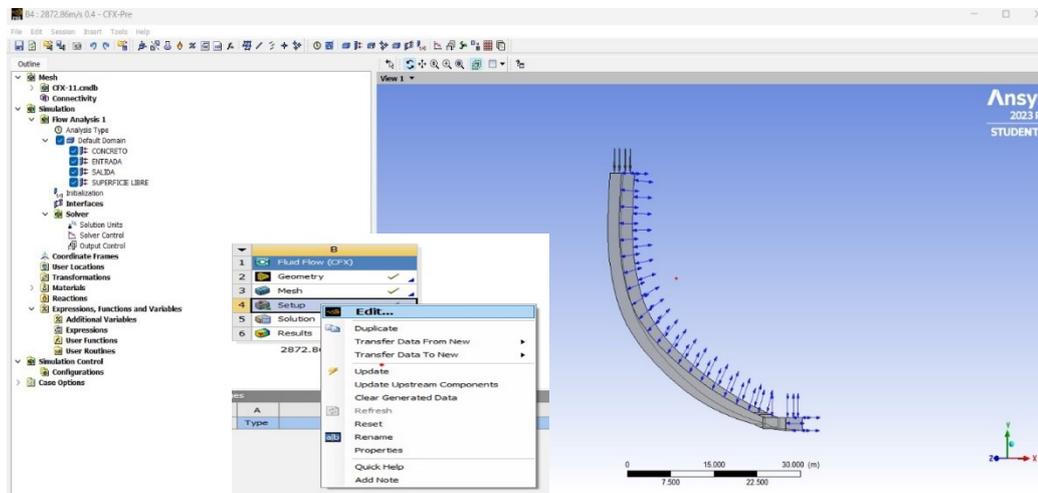


Configuración

En la pestaña "Setup" se puede realizar configuraciones en la estructura a analizar y verificar posibles errores o falta de información antes de la simulación. Para acceder al área de trabajo en "Setup", se debe hacer clic derecho y seleccionar la opción "Edit".

Figura 39

Acceso al Área de Trabajo



Generación del dominio

La creación del dominio es un paso esencial en el proceso de modelación, ya que establece la naturaleza de la región y sus propiedades inherentes. El dominio, entendido como las áreas donde se aplican las ecuaciones que describen el flujo del fluido, es fundamental para definir el escenario de estudio. Para introducir la información pertinente al dominio en el software Ansys CFX, se procede seleccionando la opción "Default Domain" y posteriormente haciendo clic en "Edit".

Dentro de las ventanas de configuración, como "Basic Settings", "Fluid Models", "Fluid Pair Models" e "Initialization", se encuentran las opciones para ajustar los

parámetros específicos del dominio. Es en estas secciones donde se definen propiedades cruciales, tales como las condiciones iniciales, modelos de fluidos, y demás variables que impactan directamente en la simulación.

Resulta especialmente relevante destacar que en la Tabla 12 se presenta un resumen detallado de los parámetros de configuración del dominio, específicamente diseñada para un análisis estacionario. Esta tabla sirve como guía, proporcionando una visión general de los ajustes clave que se deben considerar durante la fase de configuración del dominio, facilitando así la correcta implementación de las simulaciones estacionarias en el estudio de la rápida hidráulica del Túnel Conchano.

Tabla 27

Parámetros de Configuración del Modelo

Análisis del proyecto	
Tipo de análisis	Transitorio
Características del fluido	
Tipo de fluido	AGUA AIRE
Morfología	Fluido continuo
Presión de referencia	1 atm
Masa Molar	
Densidad	
Viscosidad dinámica	
Modelo de flotabilidad	Buoyant
Gravedad X y Z	0
Gravedad Y	-9.81 m/s ²
Coeficiente de flotabilidad	
Modelo multifásico	la
Modelo de superficie libre	
Modelo de turbulencia	
Transmisión de calor	
Coeficiente de tensión superficial	
Transferencia en interfaces	
Transferencia de masa	ninguno
Método de resolución	Volúmenes finitos
Inicialización	

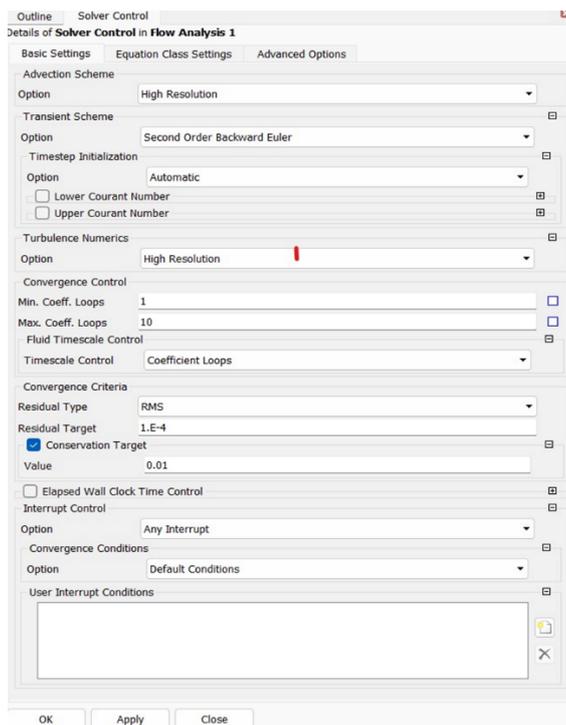
Configuración del tipo de análisis

La configuración del análisis se enfoca en el flujo transitorio, con el objetivo de lograr la estabilidad del sistema mediante la convergencia del proceso y la normalización del fluido multifásico. Se presenta una imagen que muestra la opción "Total Time", que representa el periodo en el que ocurre el fenómeno de principio a fin. También se muestra la opción "Time Steps", que indica el cambio incremental en el tiempo para resolver las ecuaciones de gobierno. Se recomienda seleccionar un paso de tiempo pequeño para capturar todas las fluctuaciones de flujo. En este caso, se asignan 20 segundos para "Total Time" y 0.01 segundos para "Time Steps".

Se utiliza la herramienta "Initialization" en el análisis transitorio para definir las condiciones iniciales de la simulación. Esta herramienta debe ser activada y se encuentra en las herramientas de Default Domain.

Figura 40

Configuración del Análisis Transitorio

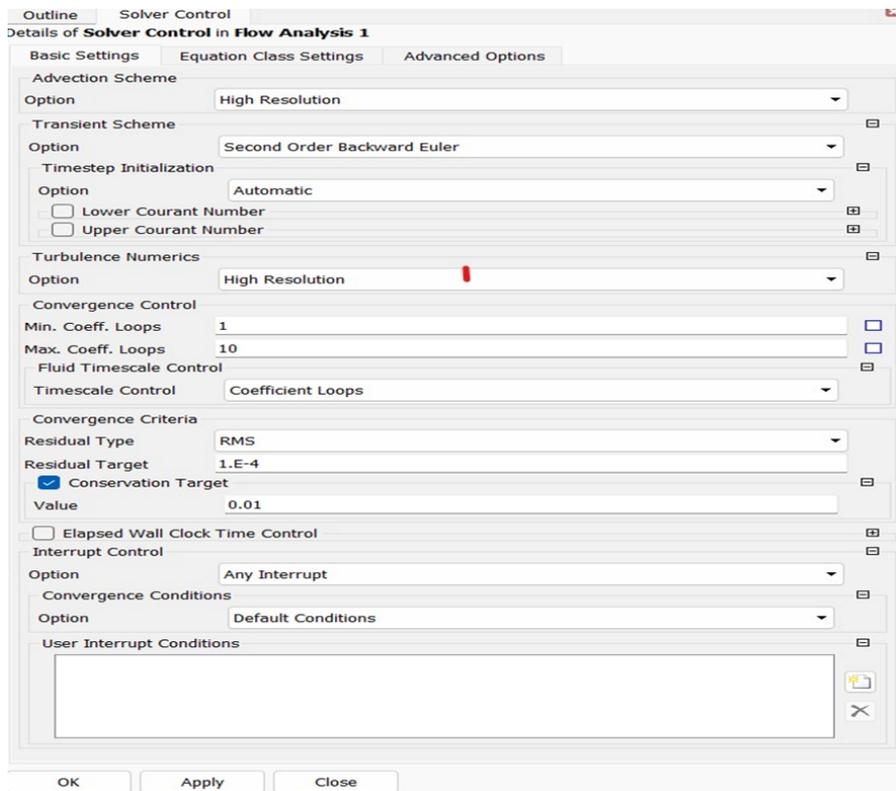


Para mejorar el tiempo de simulación y la calidad de los resultados, es necesario configurar las opciones del Control del Solucionador. Se puede establecer el número de iteraciones, el tipo de residuo RMS y la calidad de la turbulencia en los resultados. Además, en las opciones avanzadas se puede seleccionar un control sobre la fracción de volumen de los fluidos.

La herramienta "Output Control" permite configurar la forma en que se almacenarán los datos durante la simulación. En este caso, se ha establecido un intervalo de tiempo de 10 segundos para cada guardado de datos. Esto significa que cada 10 segundos, el programa guardará los datos calculados para su posterior representación en el post procesamiento. Después de agregar los valores, se cierra la ventana de configuración y se verá automáticamente un check verde junto a la opción de configuración.

Figura 41

Configuración de Output Control para Almacenar Datos de Simulación



Configuración de las condiciones de borde

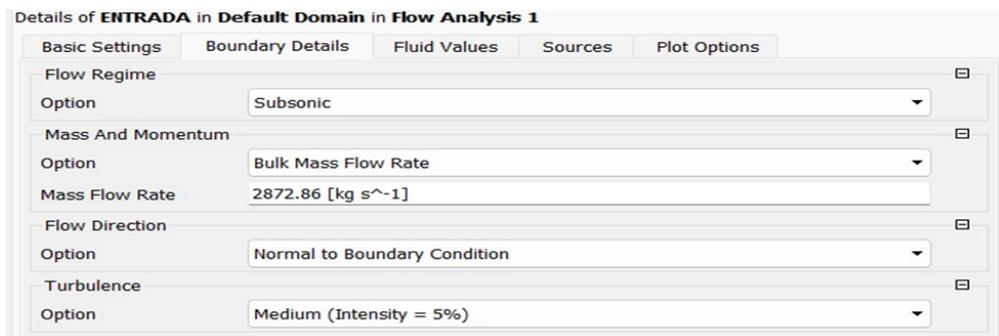
Para configurar las condiciones de borde, se hace clic derecho sobre la opción Default Domain y se selecciona la opción Boundary. Se puede establecer el nombre de la frontera y definir las condiciones de frontera.

La opción de entrada, o "inlet", se utiliza para las regiones donde se espera que entre el flujo. Se pueden utilizar entradas de velocidad para flujos incompresibles y entradas de presión y flujo másico para flujos compresibles e incompresibles. El caudal másico es calculado por Ansys en kg/s, y se puede convertir a m³/s teniendo en cuenta la densidad del agua. En este caso, 31.807 m³/s sería igual a 31.807 kg/s. Así mismo, la fracción de volumen de los dos fluidos está representada por los valores de 1 y 0. En este caso, el valor para el agua es 1 y el valor para el aire es 0. Mientras que, las salidas, como se muestra en la Figura 25, son ubicadas en las regiones donde se espera que el flujo salga. La presión relativa 0 [Pa] está relacionada con la presión atmosférica 1 [atm] del dominio.

Figura 42

Configuración de las condiciones de borde

Detalles de entrada



Frotera Inlet (entrad)

Condiciones de frontera

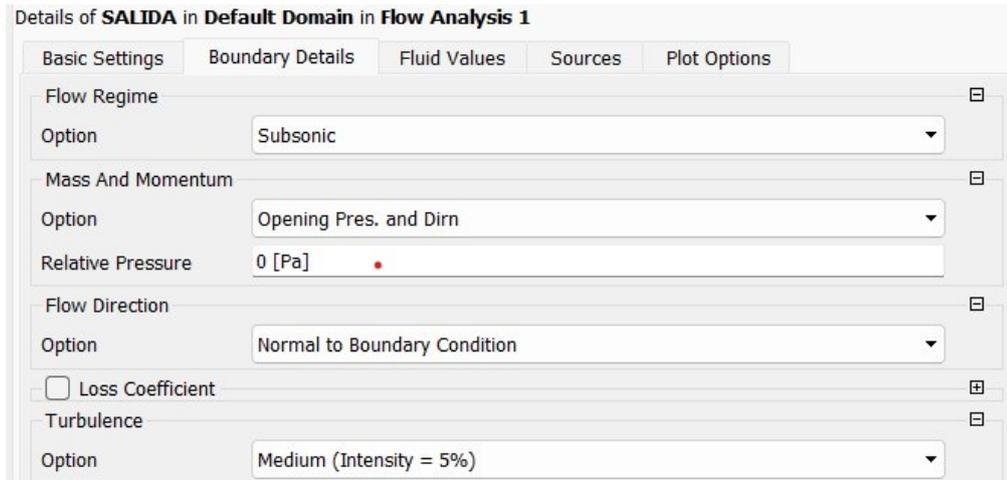
Masa y momento: Bulk Mass Flow Rate

Caudal másico:

Intensidad de turbulencia: medium 5%

Valor de Agua: 1 - Valor de Aire:

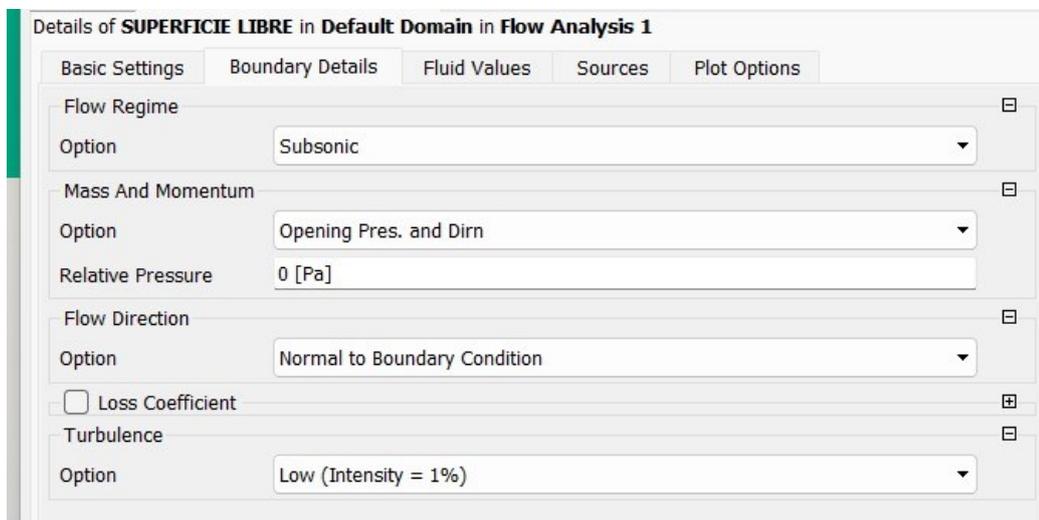
Detalles de salida



Las superficies o aperturas, como se muestra en la Figuras 26, son ubicadas en las regiones donde el agua entra en contacto con el aire, es decir, donde el agua está expuesta a la atmósfera.

Figura 43

Detalles de la frontera de apertura 1.

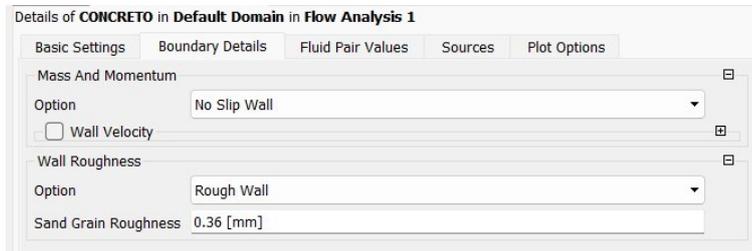


Las paredes son ubicadas en las regiones limitadas que estarán en contacto con el fluido. La opción de "No slip wall" hace que la pared no tenga deslizamiento libre, como se muestra en la Figura 26.

Figura 44

Configuración Básica de la Frontera de Muro.

Detalles de frontera



Condiciones de frontera

Masa y momento: Bulk Mass Flow Rate

Caudal másico: 2872.76 kg/s

Intensidad de turbulencia: medium 5%

Valor de Agua: 1 - Valor de Aire

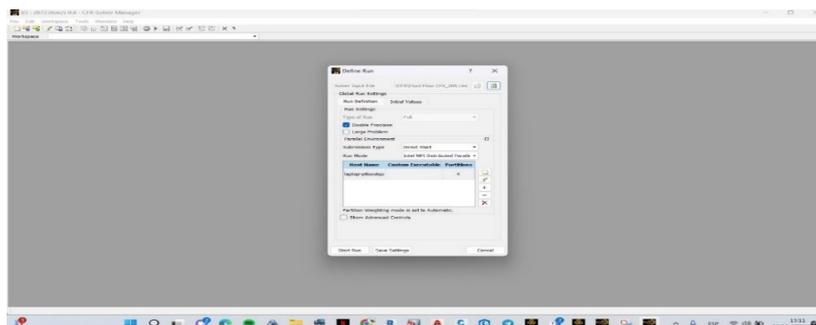
Nota: Es importante tener en cuenta que el coeficiente de rugosidad absoluta (mm) no es igual al coeficiente de rugosidad de Manning, ya que la rugosidad real no tiene unidades. Para este caso, el material es de concreto simple el valor de la rugosidad absoluta es 0.36 mm.

c) Esquema del proyecto: Procesamiento

En esta etapa, se presenta el proceso de simulación destinado a lograr la convergencia de las variables bajo investigación. La función principal de la celda Solution es garantizar la estabilidad y convergencia de los datos. Posteriormente, en la ventana Define Run, se opta por la elección de Doble Precisión con el fin de obtener resultados más precisos y rápidos. La ejecución del proceso se inicia seleccionando Start Run.

Figura 45

Vista Preliminar de la Solution



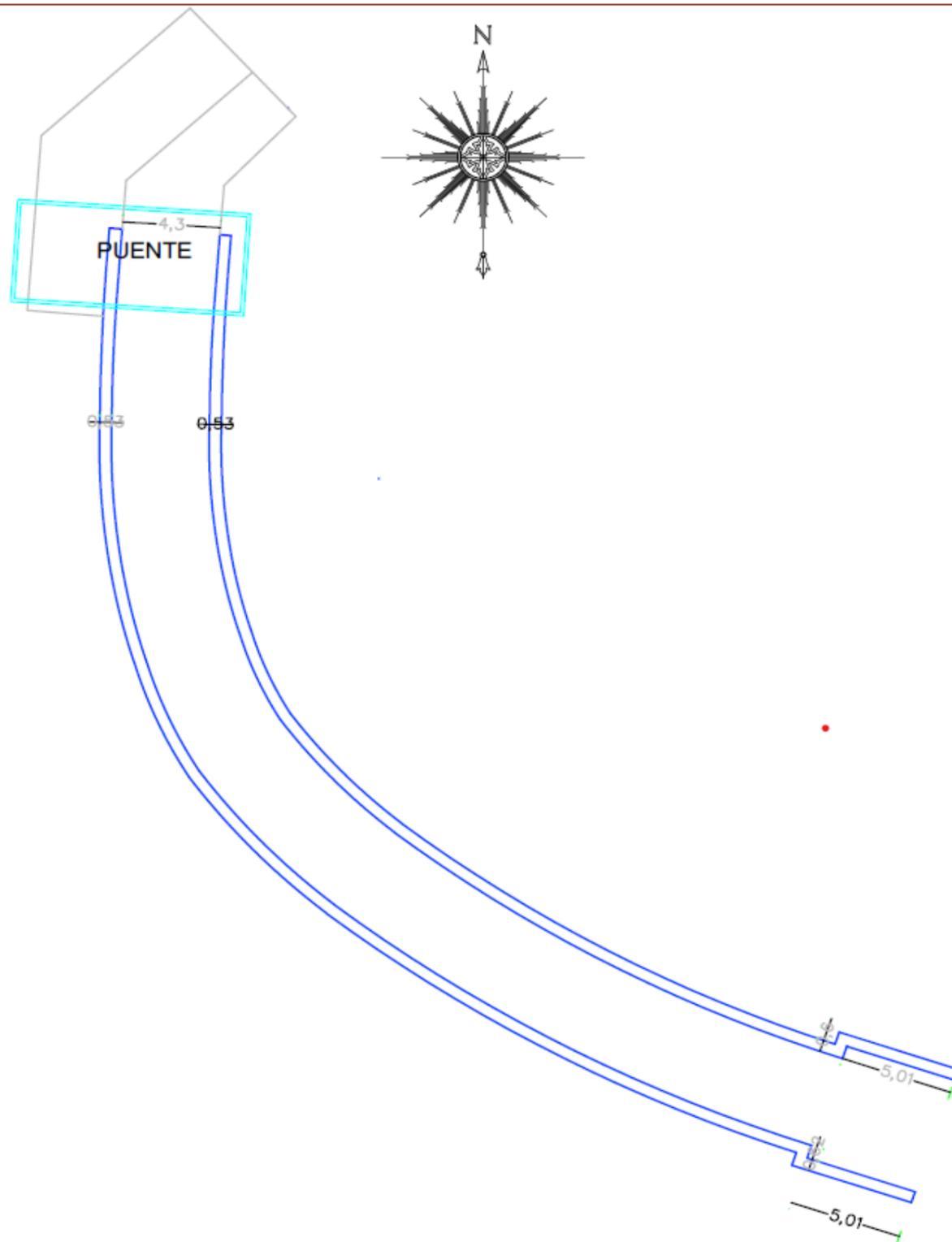
Anexo D. Características de la simulación de la rápida e Asys CFX

Tabla 28

Características de la Simulación de la Rápida en el Programa Ansys CFX

Características		A	B	C
Caudal (lts/s)	Entrada	2872	12000	271
	Salida	2898	12002	269.94
	· Hexaedros	15792	15792	15792
	Calidad de elemento	0.90793	0.90793	0.90793
Mallado	Relación aspecto	1.4939	1.4939	1.4939
	Ortogonalidad	0.98572	0.98572	0.98572
	Oblicuidad	0.086553	0.086553	0.086553
	Tipo de simulación	Transitorio	Transitorio	Transitorio
	Inicialización	water VF \neq 0	water VF \neq 0	water VF \neq 0
CFX- SIM	Esquema advección	High resolution	High resolution	High resolution
	Esquema transitorio	second order	second order	second order
	Modelo de turbulencia	K- epsilon RNG	K- epsilon RNG	K- epsilon RNG
	Resolución de turbulencia	first orden	first orden	first orden
Rugosidad	liso(concreto)	0.36	0.36	0.36
	numero de courant(CFL)	0.89310	0.95651	0.85161
	Estabilidad o convergencia	ok	ok	ok
	Tiempo de simulación(h)	2.5	3	2

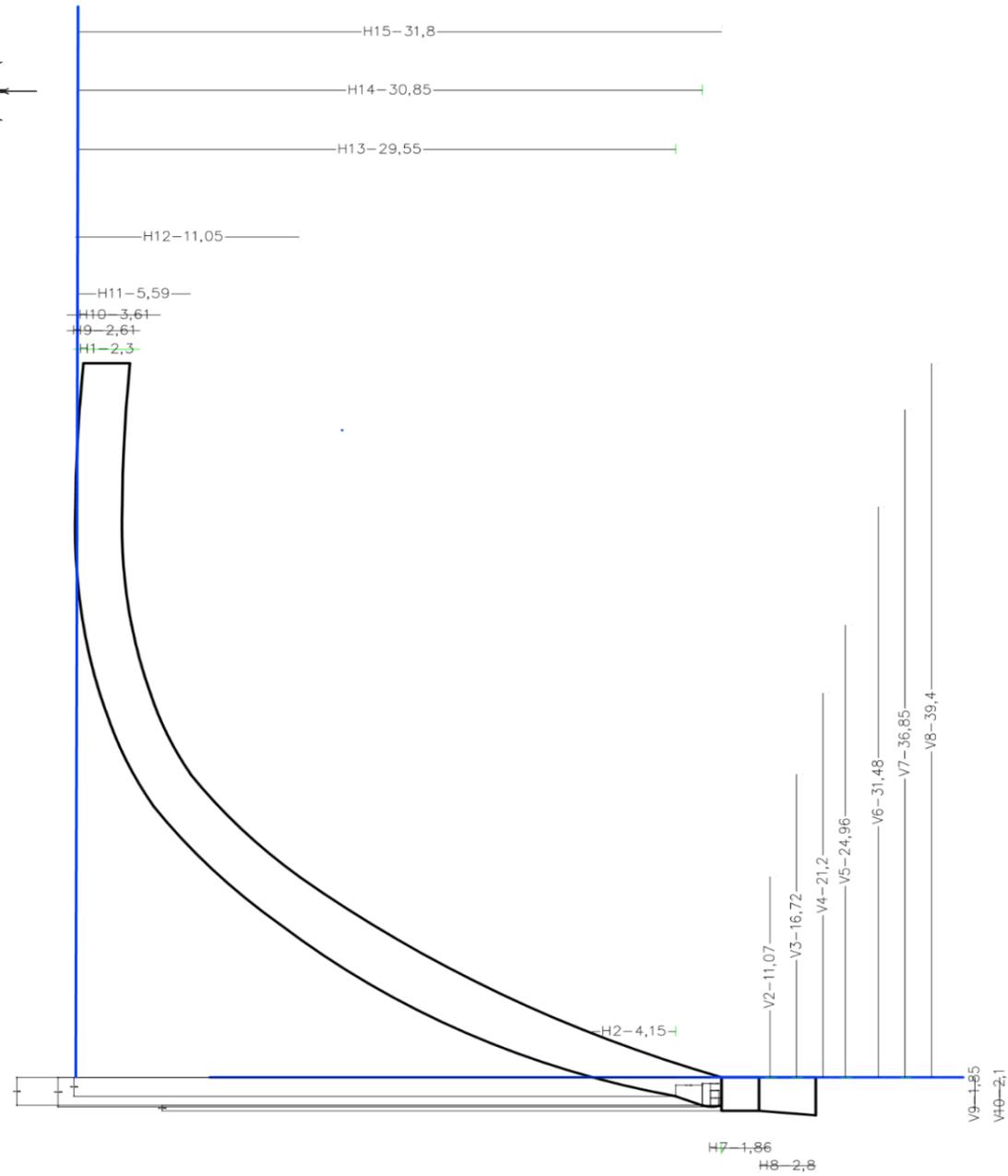
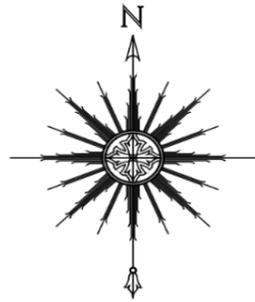
Anexo C. Planos



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PROYECTO: "ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE LA RAPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA 2023"

PLANO: PERFIL RAPIDA TUNEL CONCHANO	DISTRITO : CHOTA PROVINCIA : CHOTA REGION : CAJAMARCA	LAMINA: T-01
TESISTAS: SANCHEZ VASQUEZ ERICK OMAR VASQUEZ CAMPOS FRANKLIN RONALDO	ESCALA: INDICADA	
ASESOR: Dr. Ing. Martha Gladys Huamán Tanta	FECHA: 2023	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PROYECTO: "ANÁLISIS Y MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE LA RAPIDA DEL TÚNEL CONCHANO UTILIZANDO SOFTWARE ANSYS CFX, CHOTA 2023"

PLANO: PERFIL RAPIDA TUNEL CONCHANO	DISTRITO : CHOTA PROVINCIA : CHOTA REGIÓN : CAJAMARCA
TESISTAS: SÁNCHEZ VÁSQUEZ ERICK OMAR VÁSQUEZ CAMPOS FRANKLIN RONALDO	ESCALA: SN
ASESOR: Dr.Ing. Martha Gladys Huamán Tanta	FECHA: 2024

LAMINA:
T-02