

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**MODELAMIENTO COMPUTACIONAL 1D, 2D Y 3D DEL
COMPORTAMIENTO DEL AGUA PARA LAS
ESTRUCTURAS DE DESCARGA Y DEMASIAS DE LA
PRESA NINAHUISA**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

Ronald Yitzhak Medina Palomino

ASESOR: Mg. Julio Benjamín Rodríguez Uceda

Lima, 02 de noviembre del 2018

RESUMEN

ANTECEDENTE

De acuerdo a la información estadística del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) hacia el último trimestre del 2012 la producción de energía eléctrica generada de manera hidráulica representó el 53.7% del total. La importancia de este recurso radica en el gran potencial hídrico que el Perú posee. Así como en el auge de medidas medioambientales que buscan reducir los gases tóxicos generados por la generación de energía térmica.

Para el correcto aprovechamiento de este recurso es importante desarrollar proyectos hidroeléctricos eficientes que consideren todos los parámetros involucrados en la captación de agua. Es sumamente importante analizar el comportamiento del agua, así como la obtención de sus características y valores para optimizar el diseño del mismo y sistemas similares.

En este contexto, se generó la necesidad de analizar un sistema hidráulico de mediana envergadura cuyo fin es afianzar el recurso hídrico de la hidroeléctrica San Gabán II ya en operación.

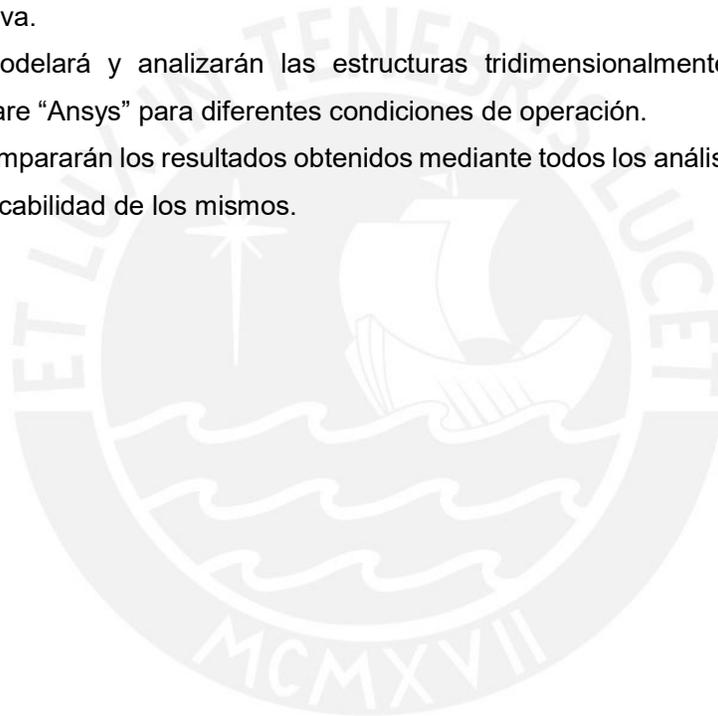
OBJETIVO

Analizar la aplicabilidad de modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales en estructuras conexas de presas.

1. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo unidimensional y a partir de criterios del Bureau of Reclamation.
2. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo bidimensional utilizando el software de elementos finitos "Ansys".
3. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo tridimensional utilizando el software de elementos finitos "Ansys".
4. Comparar los análisis y definir a partir del cual diseñar dichas estructuras.

METODOLOGÍA

1. Se analizarán las secciones y perfiles de las estructuras hidráulicas a analizar.
2. Se modelarán y analizarán las estructuras unidimensionalmente a partir de los diferentes criterios indicados en el Bureau of Reclamation.
3. Se definirán los perfiles que podrán ser modelados bidimensionalmente
4. Se modelarán y analizarán las estructuras bidimensionalmente mediante el software de elementos finitos "Ansys".
5. Se definirán y segregarán los diferentes componentes de las estructuras analizadas para realizar el diseño geométrico tridimensional.
6. Se generará la grilla más adecuada a partir de la calibración de una grilla primitiva.
7. Se modelará y analizarán las estructuras tridimensionalmente mediante el software "Ansys" para diferentes condiciones de operación.
8. Se compararán los resultados obtenidos mediante todos los análisis y se definirá la aplicabilidad de los mismos.



INDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. General.....	1
1.2.2. Específicos.....	2
1.3. Limitaciones.....	2
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	3
CONCEPTOS GENERALES.....	3
2.1 Utilización del recurso hídrico en la generación de energía eléctrica.....	3
2.2 Estructuras civiles involucradas en la generación de energía hidráulica.....	4
2.2.1 Estructuras de derivación (Bocatomas).....	5
2.2.1.1 Captación de curso.....	5
2.2.1.2 Captación de embalse.....	8
2.2.2 Estructuras de retención (Presas).....	9
2.2.2.1 Presa de gravedad.....	10
2.2.2.2 Presa de enrocamiento con cara de hormigón (CFRD).....	12
2.2.2.3 Presa de almacenamiento.....	13
2.2.3 Estructuras de alivio (Aliviaderos).....	14
2.2.3.1 Aliviaderos no controlados.....	14
2.2.3.2 Aliviaderos controlados.....	15
2.3 Conceptos de la hidrología.....	16
2.4 Conceptos de la mecánica de fluidos computacional.....	20
2.4.1 Conceptos matemáticos involucrados en el CFD.....	20
2.4.1.1 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	20
2.4.1.2 Turbulencia y sus modelos para el análisis computacional.....	23
2.4.2 Métodos Numéricos.....	25

2.4.2.1 Método de elementos finitos (MEF)	26
2.5 Conceptos de la aplicación del software Ansys para la simulación del comportamiento de un fluido	29
2.5.1 Presentación del software Ansys	29
2.5.2 Definición de los sistemas utilizados para la simulación CFD - CFX en el software Ansys	29
2.5.3 Análisis CFD mediante el software Ansys alrededor del mundo	32
2.5.3.1 Diseño de la ampliación de la presa Cotter en Canberra, Australia.	32
2.5.3.2 Actualización del Aliviadero Googong en Canberra, Australia.	33
2.5.3.3 Actualización de la presa Elidon en Canberra, Australia.	33
2.5.3.4 Diseño de la presa Burrum en el río N° 1 en Hervey Bey, Queensland.....	34
CAPITULO III: DATOS Y MÉTODOS	35
MODELACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO	35
3.1 Características del proyecto hidráulico	35
3.2 Análisis y tratamiento de la información meteorológica e hidrológica.....	35
3.2.1 Precipitación	35
3.2.1.1 Análisis de consistencia.....	37
3.2.1.2 Análisis de la distribución temporal de la precipitación	38
3.2.1.3 Análisis de la distribución espacial de la precipitación	39
3.2.2 Aporte del río	40
3.2.3 Evaporación	43
3.2.4 Temperatura	43
3.2.5 Humedad relativa	44
3.3 Características de las estructuras hidráulicas en análisis	45
3.3.1 Obra de toma.....	45
3.3.2 Aliviadero de excedencias	46
3.3.3 Tramos de los túneles de descarga	47
3.3.4 Presentación de las características hidrológicas, topográficas, climáticas y geológicas del proyecto.	47
3.3.4.1 Características Hidrológicas	47

3.3.4.2	Características Topográficas	48
3.3.4.3	Características Geológicas	49
3.4	Modelamiento geométrico de las estructuras hidráulicas mediante el uso del software ANSYS	50
3.5	Análisis unidimensional de las estructuras hidráulicas	53
3.5.1	Análisis de la obra de toma.....	54
3.5.2	Análisis de aliviadero de excedencias	60
3.5.3	Análisis de tramos críticos del túnel de desvío - aliviadero.	63
3.6	Análisis tridimensional de las estructuras hidráulicas.....	64
3.7	Análisis bidimensional de las estructuras hidráulicas.....	74
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES		75
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS		75
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		91
COMENTARIOS Y CONCLUSIONES		91
CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		94
BIBLIOGRAFÍA		94

CAPITULO I: GENERALIDADES

ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

El presente trabajo de tesis pretende analizar el diseño de un sistema hidráulico para afianzar el recurso hídrico utilizado en la central hidroeléctrica San Gabán II. El sistema estará ubicado aguas abajo de la cuenca del río Ninahuisa. Río cuya longitud es de 36.7 Km y área de cuenca es de 217Km² El punto de inicio nace en el nevado Cintillo y desemboca en el río Macusani. Ambos puntos ubicados en el distrito de Macusani, provincia de Carabaya, departamento de Puno. Dentro del polígono formado por las siguientes coordenadas, P1: 324000-E 8445000-N, P2: 345000-E 8445000-N, P3: 345000-E 8439000-N, P4: 324000-E 8439000-N. El eje de la presa se ubica entre los hitos con coordenada UTM WGS 84 N 8 443 261.09 y E 327465.06 y N 8443188.42 y E 327480.00.

De manera recurrente el suministro hídrico en un proyecto hidroeléctrico es complicado debido a las dificultades geológicas, hidráulicas y topográficas usuales que conlleva el mismo. Este efecto se acrecienta debido a que la ubicación de esta hidroeléctrica se encuentra en la serranía del Perú, donde las condiciones climáticas y de acceso son de mayor complejidad que en la costa o selva. Estas características son usuales en proyectos gestados en la zona alto andinas debido a que su altura es cercana a los picos de las montañas y nevados.

Por otro lado, es importante el desarrollo técnico y tecnológico de los procedimientos realizados para el diseño, modelación y posterior construcción de la infraestructura utilizada en proyectos de gestión hídrica.

En este contexto, se generó la necesidad de analizar un sistema hidráulico de mediana envergadura capaz de abastecer el requerimiento hídrico de la hidroeléctrica. Cabe recalcar que este proyecto se realizó tomando en cuenta las obras de responsabilidad social de acuerdo a su estudio de impacto ambiental.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

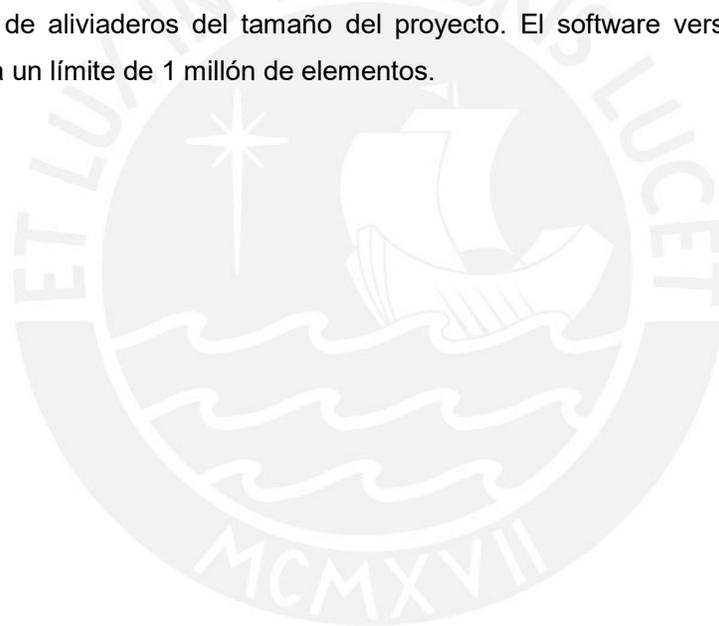
El objetivo principal es analizar la aplicabilidad de modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales en estructuras conexas de presas.

1.2.2. Específicos

1. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo unidimensional y a partir de criterios del Bureau Reclamation.
2. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo bidimensional utilizando el software de elementos finitos "Ansys".
3. Analizar el diseño de una estructura de descarga y demasías mediante un modelo tridimensional utilizando el software de elementos finitos "Ansys".
4. Comparar los análisis y definir a partir del cual diseñar dichas estructuras.

1.3. Limitaciones

Se utilizará la versión estudiantil del software Ansys. De acuerdo a la literatura se recomienda utilizar 10 millones de elementos finitos para modelaciones de la envergadura de aliviaderos del tamaño del proyecto. El software versión estudiantil permite hasta un límite de 1 millón de elementos.



CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

CONCEPTOS GENERALES

El presente trabajo de tesis se concentrará en cuatro puntos principales desarrollados en el contenido de la misma. En esta sección se revisará el estado del arte para estas partes involucradas.

2.1 Utilización del recurso hídrico en la generación de energía eléctrica

En la actualidad, la utilización del agua en la industria energética es una actividad ampliamente conocida y aceptada en nuestra sociedad puesto que una gran mayoría de la misma ha reconocido que es la alternativa más amigable con el medio ambiente. Dados los requerimientos de las legislaciones, los proyectos en los cuales esté involucrado la captación de un río o cualquier modificación importante del entorno próximo, deberá contar con un estudio de impacto ambiental y las acciones de remediación pertinentes. A pesar de ser considerada un tipo de generación energética limpia y renovable puede generar un gran impacto ambiental debido a la construcción de grandes estructuras que modifican las condiciones del entorno y la calidad del agua.

El agua como fuente energética es también llamada energía hidráulica, esta se entiende como la explotación de las energías cinéticas y potenciales que contienen grandes masas de agua en corrientes, saltos o mareas. Básicamente, la energía potencial, durante la caída del agua, se convierte en cinética y mueve una turbina para aprovechar esa energía. De esta manera este recurso puede obtenerse aprovechando los recursos tal y como surgen en la naturaleza, por ejemplo, una garganta o catarata natural, o bien mediante la construcción de presas que pueden tener diferentes fines para el efecto de una hidroeléctrica.

En la **Figura 2.1**, se presenta un esquema completo del flujo de agua en el uso hidroeléctrico.

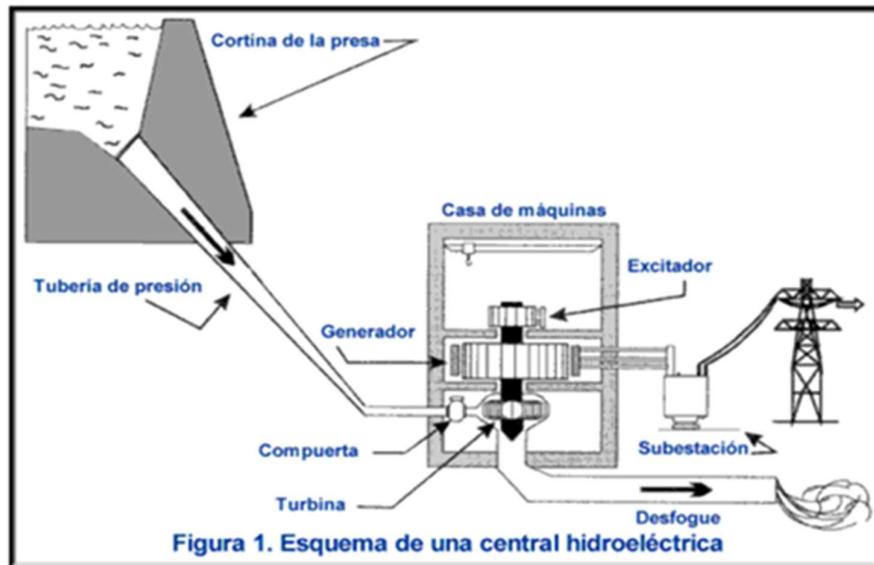


Fig. 2.1. Esquema de una central hidroeléctrica

<http://catalina--energia.blogspot.pe/2015/03/central-hidroelectrica.html>

De acuerdo a la **Figura 2.1** el agua es captada desde una presa hasta la casa de máquinas mediante una tubería de presión. Pasa a través de la compuerta abierta para poder accionar las turbinas y hacerlas rotar. Posteriormente, el agua que no es utilizada se envía por el desfogue hacia un cuerpo de agua que no necesariamente puede ser el río de origen. Este esquema es sencillo y rápido de comprender, sin embargo, en la realidad existen diferentes variaciones al mismo en todas sus componentes.

El sistema de captación puede ser un conjunto de represas que convergen y alimentan una última fuente hídrica que finalmente será aprovechada por la presa. Para efectos de la presente tesis resulta importante mencionar que se analizará una presa cuya función es afianzar el recurso hídrico en un río para aprovecharlo a conveniencia de la central hidroeléctrica sin afectar el ecosistema del mismo.

2.2 Estructuras civiles involucradas en la generación de energía hidráulica

Para el aprovechamiento hídrico de una fuente de agua muchas veces es necesario el diseño y construcción de diferentes estructuras que formen parte de este proceso. Para la presente tesis el recurso hídrico requiere de dichas estructuras ya que no tiene características perenes. Es decir, existen periodos de avenidas y estiajes en los cuales se tiene que acumular y consumir el recurso hídrico, respectivamente.

En este proyecto se analizarán tres diferentes estructuras: de derivación, de retención y de alivio.

2.2.1 Estructuras de derivación (Bocatomas)

Existen varias hipótesis respecto al comportamiento del flujo libre y se deberán tomar diferentes consideraciones debido a los diversos elementos presentes en una bocatoma fluvial. Para este proyecto el diseño se tratará de más de una estructura hidráulica pues la unión de estas trabaja como un sistema en conjunto.

El objetivo de los elementos hidráulicos involucrados es el de captación y conducción de agua y en general el sistema es llamado bocatoma. Las bocatomas se pueden clasificar de diferente manera, la variación más importante es de acuerdo al tipo de captación que requiere el proyecto.

2.2.1.1 Captación de curso

Dentro de esta clasificación existe la bocatoma fluvial o toma convencional. Este tipo de sistemas se caracterizan por ser los más comunes de acuerdo a las necesidades de proyectos de captación hídrica.

La toma convencional consiste en un dique vertedero que cierra el cauce del río y capta las aguas por un orificio o vertedero lateral (Krochin,1982). A pesar de que esta es la toma más típica y hasta cierto punto rutinaria, las dimensiones y características particulares serán obtenidas de acuerdo a la necesidad en el diseño propio. En la **Figura 2.2** se presenta el esquema de una toma convencional.

De acuerdo a Sviatoslav Krochin, existen criterios técnicos por los cuales se debería considerar el diseño de una toma convencional. Cuando los ríos de montaña tienen caudales relativamente pequeños, gradientes relativamente grandes y corren por valles no muy amplios. En crecientes llevan cantidades apreciables de material sólido.

Otro criterio importante para la elección de este tipo de captación es el área de cuenca disponible real. A mayor caudal, disponibilidad de recurso o afluentes disponibles será más sustentable el hecho de construir un dique que retenga el fluido para acrecentar su tirante y así conseguir captar lateralmente el agua.

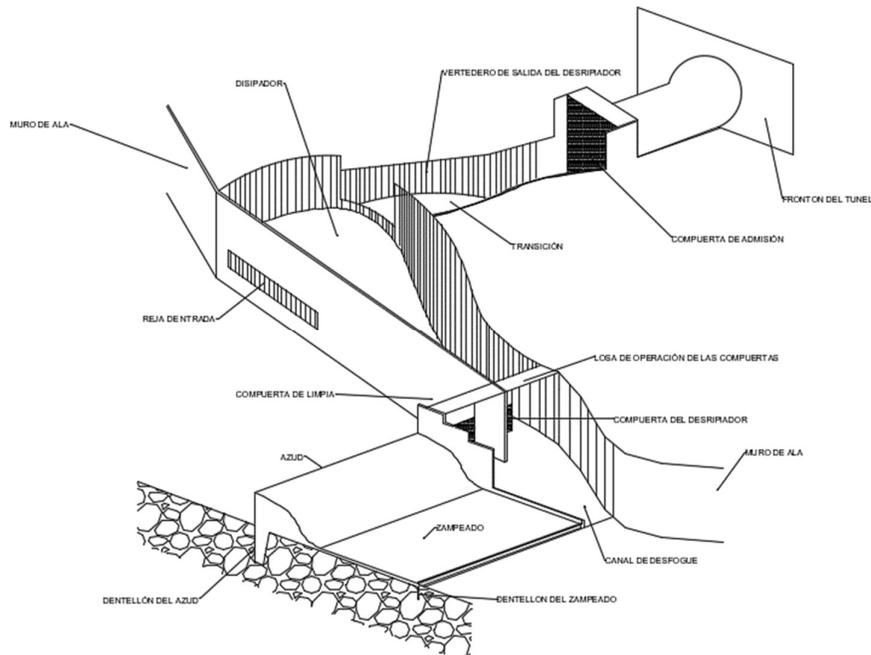


Fig. 2.2. Toma convencional

Fuente: Diseño propio basado en el libro Diseño Hidráulico – Sviatoslav Krochin

También se pueden encontrar dentro de este conjunto las tomas de fondo también llamadas tomas tirolesa, alpina o caucasiona. Para las captaciones de curso, este tipo de tomas se caracterizan por ofrecer una opción diferente y más adecuada ante diferentes dificultades presentadas si se proyectará las tomas convencionales.

La toma de fondo consiste en una rejilla fina de fondo ubicada horizontalmente, o con pequeña inclinación, sobre una galería hecha en el cuerpo del azud y que conecta con el canal de toma. Asimismo, también se construye una pequeña presa que cierra el río la cual se compone de tres partes (Krochin, 1982):

Un tramo en la orilla opuesta del canal que se compone de un azud macizo sobre el cual vierte el agua en creciente. Este azud debe tener un perfil hidrodinámico que normalmente se diseña con las coordenadas de Creager. Un tramo central con la rejilla. Y un tramo hueco que tiene en su interior la galería que conduce al agua desde la rejilla al canal. La galería está tapada con una losa de hormigón armado y que en su parte superior sigue el mismo perfil que el azud macizo. Cuando la rejilla está pegada a la orilla, este tramo se suprime. (Krochin, 1982).

Al igual que para las tomas convencionales, existen criterios específicos por los cuales debería considerarse este tipo de tomas. Estos criterios son: pendientes fuertes mayores a 10%, crecientes súbitas causadas por lluvias con gran cantidad de piedras,

grandes variaciones diarias de caudal, pequeño contenido de sedimentos finos y agua relativamente limpia. En las **Figuras 2.3 y 2.4** se puede apreciar las secciones típicas de una toma tirolesa.

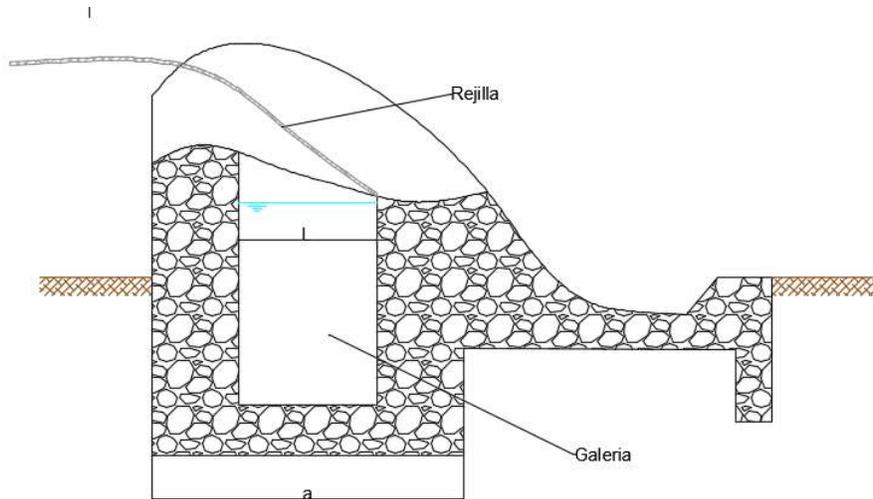


Fig. 2.3. Sección Transversal del Azud en una toma tirolesa

Fuente: Diseño propio basado en el libro Diseño Hidráulico – Sviatoslav Krochin

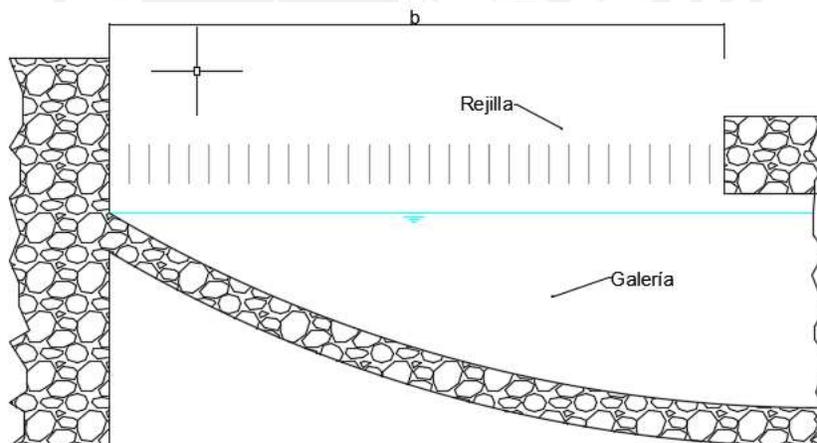


Fig. 2.4. Sección Longitudinal del Azud en una toma tirolesa

Fuente: Diseño propio basado en el libro Diseño Hidráulico – Sviatoslav Krochin

Cabe mencionar que otro criterio importante para la elección de este tipo de captación es el área de cuenca disponible real. Este tipo de tomas se adecuan muy bien a cursos de ríos cuya área de cuenca disponible sea baja y que no pueda desarrollar un tirante suficiente para ser tomado por una captación lateral encima del NAMO (Nivel de aguas máximas ordinarias).

2.2.1.2 Captación de embalse

Respecto a la captación por embalse es más común en proyectos de centrales hidroeléctricas ya que se ahorran las pérdidas por conducción y tienen una mayor carga hidráulica de producción energética neto. Asimismo, no es usual encontrar este tipo de captaciones en el Perú ni en Latinoamérica debido a su alto nivel de ingeniería, tanto en construcción como en diseño. Existen dos tipos de captación de embalse:

En primer lugar, se puede encontrar la captación por torre. Como se aprecia en la **Figura 2.5** Las torres de toma son estructuras adosadas a la presa o cerca de ella, en las que se encuentran las compuertas que permiten la captación de agua a distintos niveles del embalse. En las captaciones del interior de una presa se intenta obtener el agua en una cota tal que no se vea influenciada por la presencia de algas y otros flotantes, e incluso con una temperatura relativamente baja, por lo que se procura captar bajo la termoclina (U.S. Army Corps, 2003)



Fig. 2.5. Torre de toma

Fuente: <http://www.eadic.com/torres-de-toma-bocatomas-captacion-de-agua/>

En segundo lugar, existe la captación por galería que en comparación a la captación por torre está es más utilizada para proyectos de irrigación. El sistema de captación por galería es construido para alcanzar un acuífero cuya estructura permeable permita el flujo casi horizontal del recurso hídrico. La galería puede terminar en una cámara de captación donde generalmente se instalan las bombas hidráulicas para extraer el agua acumulada. En otros casos la galería puede tener una finalidad mixta de captación y conducción prolongándose directamente o mediante obras auxiliares (acueductos, canalizaciones) hasta el lugar donde se va a aprovechar el agua por ejemplo fuentes.

En la **Figura 2.6** se pueden encontrar las secciones de planta y corte de un elemento de captación por galería típico.

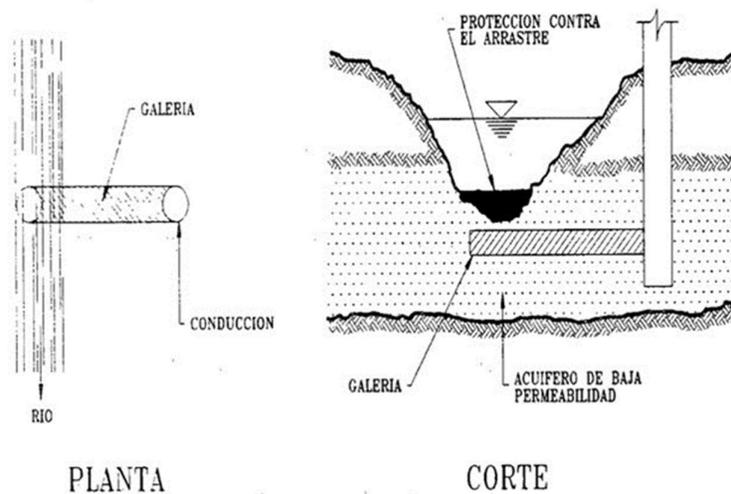


Fig. 2.6. Captación por Galería

Fuente: <http://civilgeeks.com/2010/10/08/obras-de-captacion-sistema-de-agua-potable/>

Excepcionalmente en la india cuentan con el 'Indian Standard Hydraulic Design of Barrages and Weirs – Guidelines' que tiene el carácter de norma en ese país y sus barrajes están diseñados de acuerdo a la misma (Bureau of Indian Standars, 1989).

2.2.2 Estructuras de retención (Presas)

Una estructura de retención o presa restringe el flujo del agua con el objetivo de contenerla y así poderla aprovechar. Las presas son usualmente ubicadas en lugares con características muy particulares para poder cumplir de manera efectiva su objetivo.

Por otro lado, las presas se comportan de diferente manera dependiendo del tipo y el requerimiento. La elección dependerá de diferentes criterios propios del proyecto. Existen diferentes tipos de clasificación para estas estructuras.

Según su estructura, se pueden clasificar de la siguiente manera: presa de gravedad, aquella que tiene una geometría triangular y su propio peso resiste el empuje del agua; presa de arco simple, que tiene una forma curva y su propia geometría resiste el empuje del agua ya que la presión se transfiere a las laderas; presa de bóveda, con geometría de doble curva y utilizada en terrenos complicados; presa arco-gravedad, la cual combina características de las dos primeras. (U.S. Army Corps, 2003)

Según sus materiales, se pueden clasificar en tres principales: presa de hormigón, utilizada si es económicamente viable y se pueda asegurar la calidad del hormigón; presa de materiales sueltos, las cuales funcionan por gravedad ya que la baja cohesión de los materiales no permite la transmisión del empuje al terreno; presa de enrocamiento con cara de hormigón, la cual es una variación de la presa de materiales sueltos puesto que funcionalmente son similares con la diferencia que estas utilizan el hormigón como elemento impermeabilizador. (U.S. Army Corps, 2003)

Según su aplicación, presas de retención, son aquellas que son utilizadas para retener sólidos transportadas por un flujo de agua; presas de control de avenidas, su finalidad es laminar el caudal de las avenidas excedentes para evitar daño en los terrenos aguas abajo; presas de derivación, su objetivo es elevar la cota del río para permitir su derivación y retención de los sólidos en la base; presas de almacenamiento, tiene como finalidad almacenar agua para su uso regulado; presas de relaves, las cuales funcionan como presas de retención pero para desechos tóxicos. (U.S. Army Corps, 2003)

No corresponde a los alcances de este proyecto detallar cada tipo de presa por lo que se especificará aquella que cumpla con las características propias del proyecto, es decir la presa de gravedad, la presa de enrocamiento con cara de hormigón y la presa de almacenamiento.

2.2.2.1 Presa de gravedad

Una presa de gravedad como se ve en la **Figura 2.7** consiste en una estructura simplemente apoyada en un extremo con un tope estrecho y otro angosto. Este tipo de presas tienen un centro de gravedad bastante bajo que es aprovechado para resistir las cargas de empuje del fluido, sedimentos y otras cargas. Las presas de gravedad requieren cantidades máximas de material para su construcción comparado con otros tipos de presas. por lo tanto, Si se diseña una de concreto, esta deberá tener una geometría de triángulo recto. (Díez-Cascón, Bueno, 2015)



Fig. 2.7. Presa de gravedad

Fuente: www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/inventario_de_presas_0.pdf

Un sitio favorable por lo general es un en una construcción para una presa de gravedad es en un valle donde la base esté razonablemente cerca de la superficie tanto en el piso como en las laderas de la presa (Díez-Cascón, Bueno, 2015). Así, en la **Figura 2.8** se puede apreciar que el lugar donde se encontrará la presa cumple estas condiciones.



Fig. 2.8. Vista en planta de la topografía de la zona donde se ubican las estructuras analizadas

Fuente: Estudio topográfico San Gabán S.A.

Una característica especial que se debe considerar en estas presas es la subpresión, representada como flechas superiores en la **Figura 2.9**, que es de peculiar efectividad en este tipo de estructuras por su gran área de contacto con el terreno. Este efecto

genera un peligro de elevación y deslizamiento los cuales fueron destacado por el fracaso de la presa Austin, en Estados Unidos. (Díez-Cascón, Bueno, 2015)

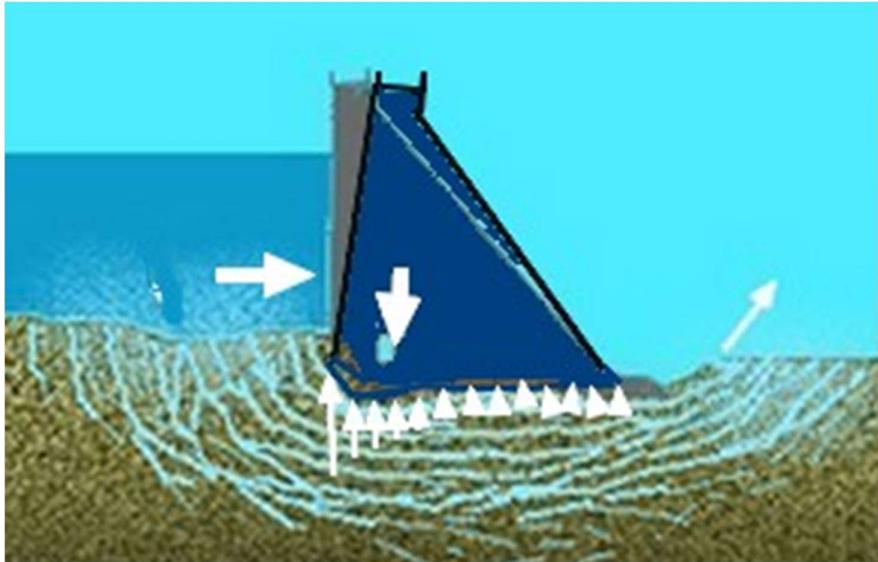


Fig. 2.9. Esquema del efecto de las subpresiones y otras cargas en una presa

Fuente: <http://users.tpg.com.au/houlsby1/Use.htm>

2.2.2.2 Presa de enrocamiento con cara de hormigón (CFRD)

De acuerdo a la autoridad nacional del agua (ANA) en la actualidad las presas de enrocado con cara de concreto (CFRD) son el tipo de presa mayormente construida, esto se debe a las excelentes características de estabilidad, a la optimización en cuanto a los recursos materiales y menor cantidad en los tiempos de construcción, así como a que los requerimientos y tratamientos en la cimentación son menos exigentes y más sencillos de llevar a cabo en comparación con otros tipos de presas.

A pesar de la gran acogida de este tipo de presas su actual estado empírico de la ha sido cuestionado, debido a que varias CFRDs de gran altura experimentaron agrietamiento significativo en la parte central de la cara de concreto durante el primer llenado del embalse (Cooke, 1984). Estas afectaciones pueden presentarse en la **Figura 2.10**.



Fig. 2.10. Roturas presentadas en la cara de concreto de la CFRD Lesotho durante el primer llenado del embalse

Fuente: Lessons learned from mohale. International Water Power and Dam Construction July

El diseño y desarrollo de las presas de enrocado con cara de concreto ha sido basado primordialmente en precedente y empirismo; sin embargo, los incidentes recientes han mostrado que la extrapolación del pasado con los procedimientos actuales puede tener serias consecuencias. (Cruz et al, 2009)

2.2.2.3 Presa de almacenamiento

Como se indicó previamente, las presas de almacenamiento son estructuras que sirven para acumular grandes cantidades de agua provenientes de precipitaciones o fuentes aguas arriba en época de avenidas, esto se puede observar en la **Figura 2.11**. Posteriormente este recurso es liberado mediante una gestión hídrica de acuerdo a las necesidades del proyecto en cuestión.



Fig. 2.11. Presa de embalse con almacenamiento parcialmente completo

Fuente: <http://www.eadic.com/cursos/agua-energia-medioambiente/presas-y-canales/>

2.2.3 Estructuras de alivio (Aliviaderos)

Las estructuras de descarga de demasías o aliviaderos se encargan de tomar los excedentes de agua provenientes de avenidas extremas que elevan el nivel de aguas máximo ordinario y que de acuerdo a los estudios deberían llegar como máximo al nivel de aguas máximas extraordinarias. Existen diferentes tipos de aliviaderos que se escogen de manera que cumplan los requisitos del proyecto. La elección de estos responde a diferentes criterios de ingeniería como son la topografía, geografía, geología e hidrogeología. A continuación, se definirán los principales tipos de aliviaderos construidos en el mundo, precisando con especial detalle el utilizado en el presente proyecto. (GSOFDS, 2000)

2.2.3.1 Aliviaderos no controlados

Los aliviaderos no controlados son los más seguros y de operatividad más sencilla. Estos no requieren de mayor mantenimiento y debido a que no tienen equipos mecánicos asociados, no están sujetos a eventuales errores humanos. Por otro lado, este tipo de aliviaderos resultan más caros en comparación con aliviaderos controlados y diseñados para el mismo rango de caudal, ya que requieren de dimensiones mayores y obras diferentes obras auxiliares extras (Borrero, Marin, 2000).

En la **Figura 2.12** se puede observar un tipo de aliviadero no controlado pues no tiene algún tipo de estructura electromecánica que regule el paso del agua a través del mismo y sus componentes.

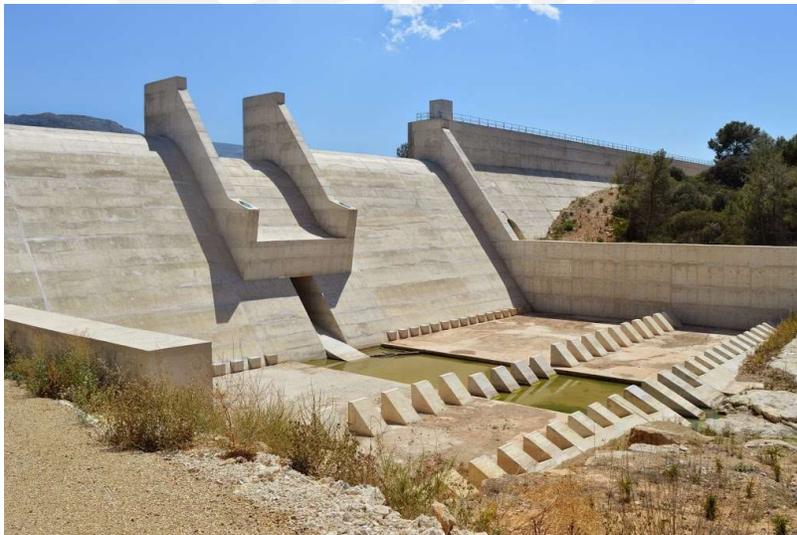


Fig. 2.12. Aliviadero no controlado

Fuente: <https://presamania.wordpress.com/tag/presa/>

En general no existen normas oficiales que establezcan criterios para elegir entre aliviaderos controlados y no controlados; sin embargo, tal como se resalta en una comunicación, en Francia los aliviaderos no controlados se suelen usar en presas con cuencas vertientes reducidas, con menos de 150 km² de superficie. (Borrero, Marin, 2000)

Una gran alternativa para proyectos que requieren de un aliviadero no controlado son los aliviaderos tipo Morning Glory. Este tipo de aliviaderos son empleados fundamentalmente en presas de materiales sueltos. En la **Figura 2.13** se presenta la forma de operación del aliviadero.

Su característica especial es que se trata de una estructura vertical cuyo borde inicial capta el agua al ras del nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO). En este sentido, añade una capacidad extra de desagüe para eventos de avenidas extremas o nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME).



Fig. 2.13. Operación de un aliviadero tipo Morning Glory

Fuente: <https://masqueingenieria.com/blog/morning-glory-un-aliviadero-espectacular/>

2.2.3.2 Aliviaderos controlados

Los aliviaderos controlados son considerados una opción interesante cuando se tienen ciertas características como por ejemplo cuando el valle es estrecho y no hay espacio para disponer de la longitud de vertido que requiere un aliviadero no controlado. O existe una necesidad de controlar los caudales de salida para evitar inundaciones en el tramo aguas abajo u optimizar el embalse como se puede observare en la **Figura 2.14**. También se puede considerar dentro de las opciones si es que el ahorro generado es considerablemente alto en comparación a otras soluciones. En este sentido, en una de

las comunicaciones se afirma que, en Rumanía, un aliviadero con compuertas cuesta entre el 25 y 30 % menos que uno no controlado equivalente. (GSOFDS, 2000)



Fig. 2.14. Operación de un aliviadero controlado

Fuente: <http://www.arqhys.com/construccion/vertederos-hidraulicos.html>

2.3 Conceptos de la hidrología

El análisis hidrológico del presente proyecto fue realizado en el informe de disponibilidad hídrica superficial compartido por la empresa de generación hidroeléctrica San Gabán mediante un modelo WEAP de tipo precipitación – escorrentía. En esta sección se presentará la base teórica de dicho modelo y en el siguiente capítulo los resultados del mismo, presentando su ejecución como Anexos.

El desarrollo del río en análisis se da dentro de una quebrada, la cual es parte de un sistema hidrológico llamado cuenca hidrográfica. En este sentido, es importante conocer que tipo de procesos se desarrollan en este espacio y cuáles son los factores que desencadenan estos procesos.

Para el presente análisis los eventos más significantes son las avenidas extremas y el régimen de un próximo represamiento. El cálculo de dichas avenidas y el régimen de caudal represado se determina mediante un estudio hidrológico para diversos periodos de retorno (Chow et al., 1998)

El enfoque empleado en el análisis hidrológico de cuencas se basa en la conservación del fluido dentro de este volumen de control. De acuerdo a Chow et al. Considerando que la cuenca es un volumen de control, entonces el cambio del volumen de agua debe ser igual a la diferencia entre egresos e ingresos. Este fenómeno se ve representado en la **Figura 2.15**

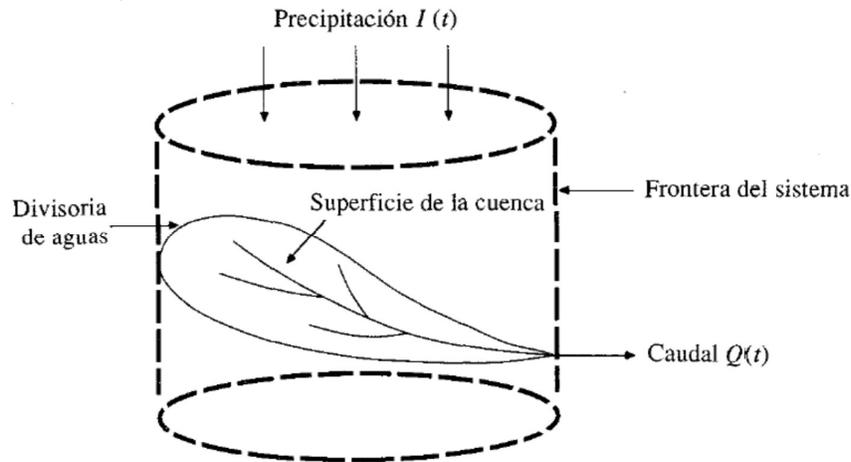


Fig. 2.15. Asimilación de cuenca como sistema hidrológico.

Fuente: Chow et al.

De acuerdo a lo mencionado y al esquema presentado se infiere que los ingresos y egresos son variables en función del tiempo. El ingreso proviene de diversas fuentes siendo la precipitación la que tiene mayor influencia, asimismo el egreso normalmente es el caudal del río Q . De esta manera se consigue lo detallado en la **Ecuación (2.1)**

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

En la **Ecuación (2.1)** la expresión a la izquierda de la igualdad representa la variación de agua en el sistema, esta puede ser de acumulación o pérdida. La expresión a la derecha de la igualdad se compone de la diferencia entre los eventos que aportan - precipitaciones, acuíferos aportantes y otros procesos desconocidos- y los que sustraen líquido al volumen de control -escorrentía, infiltración, evapotranspiración y flujo subsuperficial-.

El modelo WEAP realizado en el estudio hidrológico mencionado previamente amplifica la ecuación (2.1) de acuerdo a la base teórica de dicho modelo. La base teórica del modelo WEAP se presenta a continuación, mediante el modelo conceptual mostrado en

la **Figura 2.16** y las expresiones matemáticas de balance hidrológico que realiza el modelo.

Una unidad de la cuenca puede ser dividida en N áreas fraccionales representando distintos usos y tipos de suelo. Un balance de agua se calcula para cada área, j de los N considerados. El clima se asume uniforme sobre cada área discretizada y el balance de agua viene dado por la **Ecuación (2.2)**:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = \underbrace{P_e(t)}_{\text{precipitación}} - \underbrace{PET(t)k_{e,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right)}_{\text{evapotranspiración}} - \underbrace{P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j}}_{\text{escorrentía}} - \underbrace{f_j k_{s,j} z_{1,j}^2}_{\text{Flujo subsuperficial}} - \underbrace{(1-f_j)k_{s,j} z_{1,j}^2}_{\text{percolación}}$$

(2.2)

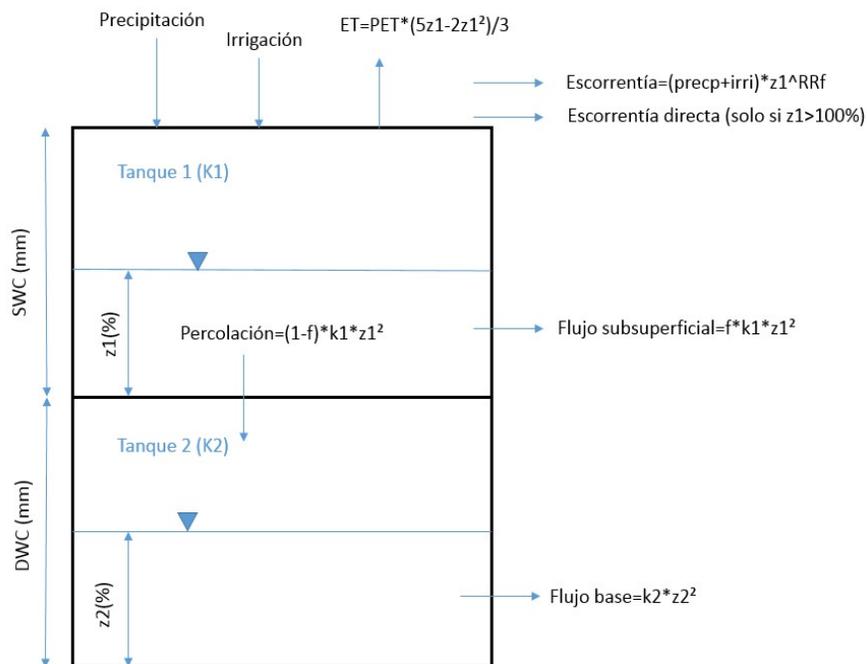


Fig. 2.16. Modelo conceptual Soil Moisture Method

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

Dónde:

$Z_{1,j} = [1,0]$. Es el almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo en la zona de raíces.

R_d_j (mm). Es la capacidad de almacenamiento efectivo en la zona de raíces para la fracción j de cobertura de uso de suelo.

P_e : Es la precipitación efectiva incluyendo el derretimiento de nieve en la subcuenca, calculada como $P_e = P_i * (m_c + m_r)$, siendo:

m_c : Es el coeficiente de derretimiento definido en función de las temperaturas de derretimiento y congelación.

m_r : Es la tasa de derretimiento calculada como $m_r = (A_{c_i}) * (m_c)$, donde A_{c_i} es la acumulación de nieve calculada con la siguiente expresión: $A_{c_i} = A_{c_{(i-1)}} + (1 - m_c) P_i$.

PET. Es la evapotranspiración potencial calculada según Penman-Monteith, donde k_{c_j} es el coeficiente de cultivo para cada fracción de cobertura de suelo.

$P_e(t) Z_{1,j}^{RRF_i}$. Este término representa la escorrentía superficial, donde RRF_j es el Factor de Resistencia a la Escorrentía de la cobertura del suelo. Valores elevados de este parámetro implican menor escorrentía superficial.

$f_j * k_{s,j} * z_{1,j}^2$. Este término representa el flujo interno.

$(1 - f_j) * k_{s,j} * z_{1,j}^2$. Este término representa la percolación.

$k_{s,j}$. Es la conductividad en zona de raíces (mm/tiempo)

f_j . Es la dirección de flujo preferente. Concebible también como el coeficiente de reparto relacionado con el tipo de suelo, la cobertura y la topografía que divide el agua horizontal y verticalmente.

El flujo base procedente de la segunda capa, en los casos en los que no exista un nodo de agua subterránea, se calcula con la **Ecuación (2.3)**

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s,2} z_2^2$$

percolación
Flujo base

↓
 Variación en el almacenamiento del segundo tanque

(2.3)

Dónde:

S_{max} : Representa la percolación profunda procedente del almacenamiento superior dado en la **Ecuación (2.2)**

k_{s2} : Es la conductividad en la zona profunda (mm/tiempo), que es dada como un único valor para la subcuenca.

2.4 Conceptos de la mecánica de fluidos computacional

La simulación computacional de los fenómenos presentados en la mecánica de fluidos se realiza mediante la herramienta “dinámica de fluidos computacional” o también conocida como CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics). El CFD es una herramienta computacional para la simulación del comportamiento de los sistemas envueltos en fenómenos de flujo, transferencia de calor y otros procesos físicos relacionados. Trabaja a partir de resolución de ecuaciones diferenciales sobre la región de interés con condiciones de borde conocidas para dicha región.

2.4.1 Conceptos matemáticos involucrados en el CFD

El conjunto de ecuaciones que describen los procesos de momento, calor y transferencia de masa son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas son ecuaciones diferenciales parciales que no cuentan con una solución analítica general, pero que puede ser discretizada y resuelta mediante métodos numéricos (Henk, Weeratunge, 1995).

Existen ecuaciones que describen otros procesos, como la turbulencia, que pueden ser resueltas en conjunto con las ecuaciones de Navier-Stokes. Usualmente, se utiliza un modelo aproximado para resolver estas ecuaciones.

2.4.1.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido son representaciones matemáticas de la conservación de las leyes de la física. La masa de un fluido se conserva. La razón del cambio del momento es igual a la suma de las fuerzas en una partícula de fluido. La razón del cambio de energía es igual a la suma de la razón de cambio de calor más la razón del trabajo hecho en una partícula de fluido (Henk, Weeratunge, 1995).

Para el desarrollo de dichas expresiones matemáticas se considera un elemento infinitesimal con lados de tamaño δx , δy y δz como se muestra en la **Figura 2.17**

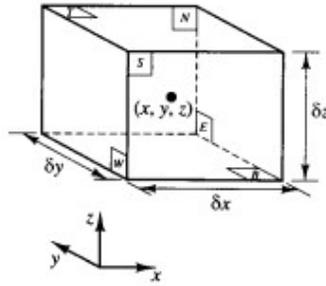


Fig. 2.17. Elemento infinitesimal de fluido

Fuente: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method

En este sentido todas las propiedades del fluido son funciones de la ubicación de la partícula y el tiempo por lo tanto es estrictamente necesario escribirlo en su forma dependiente de la siguiente manera: $\rho(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ y $u(x,y,z,t)$ para la densidad, presión, temperatura y velocidad, respectivamente.

Para las expresiones de conservación de la masa en tres dimensiones se debe definir el balance de masa para un elemento del fluido como la razón del incremento de masa en dicho elemento es igual la razón neta de flujo de masa en el mismo elemento. En la **Figura 2.18** se muestra la representación gráfica del flujo de masa.

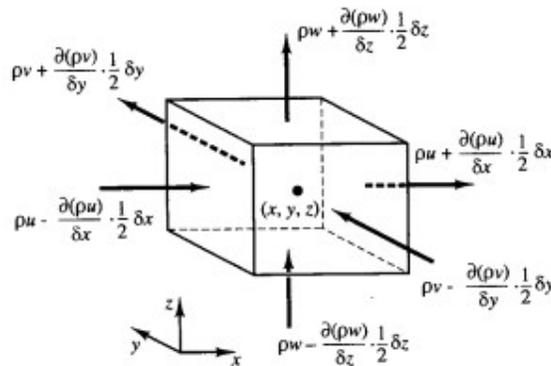


Fig. 2.18. Flujo de masa en el elemento infinitesimal

Fuente: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method

El balance descrito en el párrafo anterior se puede escribir matemáticamente como la **Ecuación (2.4)**

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dicha ecuación se puede simplificar en la **Ecuación (2.5)**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

Tras un desarrollo matemático se pueden construir las tres componentes de las ecuaciones de momento y la ecuación de energía. Estas quedan definidas en la **Figura 2.19**.

x-momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u})$
y-momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u})$
z-momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u})$
Energy	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \mathbf{u})$

Fig. 2.19. Componentes cartesianas de la ecuación de momento y energía.

Fuente: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method

De este modo, las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser escritas de la manera más útil de acuerdo a las **Ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8)**.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (2.7)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (2.8)$$

Finalmente, en la **Figura 2.20** se resume todas las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido Newtoniano compresible.

Mass	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$
x-momentum	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx}$
y-momentum	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My}$
z-momentum	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz}$
Internal energy	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{ div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i$
Equations of state	$p = p(\rho, T)$ and $i = i(\rho, T)$ e.g. perfect gas $p = \rho RT$ and $i = C_v T$

Fig. 2.20. Ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido Newtoniano compresible

Fuente: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method

2.4.1.2 Turbulencia y sus modelos para el análisis computacional

La turbulencia consiste en fluctuaciones en el fluido a través del tiempo y el espacio. Es un proceso complejo pues se trata de un fenómeno tridimensional inestable y de muchas escalas. Este proceso debe ser monitoreado pues puede tener efectos significantes en las características del fluido. Este efecto ocurre cuando las fuerzas de inercia en el fluido se tornan significantes con relación a las fuerzas de viscosidad, y es denotada cuando se genera un número de Reynolds grande.

En principio, las ecuaciones de Navier-Stokes describen comportamientos laminares y turbulentos sin necesidad de información adicional a las condiciones de frontera. Sin embargo, los flujos turbulentos a números de Reynolds realistas abarcan una diversa gama de amplitud de turbulencias y escalas de tiempo. Esta amplitud de las turbulencias generalmente se encuentra en escalas más pequeñas que el elemento más pequeño de la malla generada, lo cual puede ser utilizado de manera práctica en otros tipos de análisis numérico, pero requieren de una capacidad computacional extremadamente elevada para aplicar los métodos de elementos finitos.

Para lograr predecir y simular los efectos de turbulencia generados, se debe hacer uso de modelos de turbulencia. Estos modelos han sido especialmente desarrollados para considerar los efectos de turbulencia sin recurrir a una malla extremadamente fina o una simulación directa mediante otros análisis numéricos. La gran mayoría de modelos de turbulencia son modelos de turbulencia estadística, la excepción de estos utilizados en

CFX Ansys son el modelo “Large Eddy” y “Detached Eddy”, ninguno de estos dos últimos será utilizados en el presente proyecto pero se explicará el primero.

La técnica del modelo Large Eddy se basa en separar las escalas grandes de las pequeñas. El proceso de filtro busca segregar efectivamente los eddies cuya escala es más pequeña que el tamaño del filtro o el tamaño de la malla definida para la simulación. El filtrado de las ecuaciones de Navier-Stokes lleva a cantidades desconocidas, por lo tanto, la ecuación de momento considerando el filtro realizado se puede reescribir de acuerdo a la **Ecuación (2.9)**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

Donde τ_{ij} denota el esfuerzo producido por las escalas pequeñas y es definido por la **Ecuación (2.10)**

$$\tau_{ij} = -\rho \bar{U}_i \bar{U}_j + \bar{\rho} \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (2.10)$$

Como se mencionó previamente, existe una gran variedad de modelos de turbulencia estadísticos como el modelo laminar, el modelo K-epsilon, el modelo K-omega, el modelo de esfuerzos Reynolds, etc. Para el presente proyecto se explicarán solo los dos primeros y será el segundo el modelo utilizado en esta simulación.

El modelo laminar se basa en que el comportamiento del flujo analizado se sepa laminar antes de iniciada la simulación. Este modelo se aplica generalmente a números de Reynolds bajos como en tuberías donde el flujo es laminar porque tiene un número de Reynolds aproximadamente menor a 1000. La transferencia de energía en el fluido es realizada por interacción molecular llamada difusión. En el caso de altas velocidades, los trabajos de los esfuerzos viscosos también pueden contribuir en la transferencia de energía. Siempre se debe revisar en los valores de salida que el máximo número de Reynolds se encuentra en el régimen laminar ya que, si se establece una simulación utilizando el modelo laminar, y ésta en realidad es turbulenta, la convergencia será complicada y los resultados no serán correctos

El modelo K-epsilon es uno de los modelos más prominentes en la actualidad, ha sido implementado en la mayoría de códigos CFD y es considerado el modelo estándar en la industria. Se ha probado que es estable, numéricamente robusto y tiene un régimen

bien establecido de capacidad predictiva. En general, el modelo K-epsilon ofrece una gran certeza y robustez.

K es la energía cinética de la turbulencia y se define como la varianza de las fluctuaciones de la velocidad. Tiene dimensiones de ($L^2 T^{-2}$); Por ejemplo, m^2 / s^2 . Epsilon es la disipación de turbulencias (la velocidad a la que se disipan las fluctuaciones de la velocidad), y tiene dimensiones por unidad de tiempo ($L^2 T^{-3}$); Por ejemplo, m^2 / s^3 .

El modelo K-epsilon introduce dos nuevas variables dentro del sistema de ecuaciones. De esta manera la ecuación de continuidad se reescribe de acuerdo a la **Ecuación (2.11)**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2.11)$$

Finalmente, la ecuación de momento se presenta de acuerdo a la **Ecuación (2.12)**

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2.12)$$

Donde S_M es la suma de las fuerzas de los cuerpos, μ_{eff} es la viscosidad efectiva considerada en la turbulencia y p' es la presión modificada.

2.4.2 Métodos Numéricos

Los métodos numéricos o el análisis numérico es la rama de las matemáticas encargada de diseñar algoritmos que simplifican procesos matemáticos complejos aplicados en el mundo real. Esta simplificación se da a través de números y reglas matemáticas simples que en su conjunto y acoplamiento pueden brindar una solución aproximada a los procesos complejos.

Se debe definir también la estabilidad del algoritmo como el número de iteraciones o ciclos que debe realizar el algoritmo utilizando su propiedad de retroalimentación de manera que el resultado sea una convergencia y no una divergencia.

En general, estos métodos se aplican cuando se necesita un valor numérico como solución a un problema matemático, y los procedimientos "exactos" o "analíticos" (manipulaciones algebraicas, teoría de ecuaciones diferenciales, métodos de integración, etc.) son incapaces de dar una respuesta. Debido a ello, son procedimientos

de uso frecuente por físicos e ingenieros, y cuyo desarrollo se ha visto favorecido por la necesidad de éstos de obtener soluciones, aunque la precisión no sea completa.

Los problemas de esta disciplina son de dimensión finita, aquellos cuya respuesta son un conjunto finito de números y los de dimensión infinita, aquellos en cuya solución o planteamiento intervienen elementos descritos por una cantidad infinita de números, como integración y derivación numéricas, cálculo de ecuaciones diferenciales, interpolación, etc.

Por otro lado, los problemas se pueden subclasificar en tres categorías atendiendo a su naturaleza para el empleo del cálculo numérico. Problemas muy complejos sin solución analítica, problemas con solución analítica pero que por complejidad u otros motivos no es de aplicación práctica y problemas con soluciones sencillas pero que para elementos reales requieren una cantidad excesiva de cálculos.

Existen diferentes métodos de solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y modelos asociados, que son usados en los códigos CFD. El más común y el que utiliza el software utilizado en el presente proyecto, Ansys, es conocido como la técnica de los volúmenes finitos.

2.4.2.1 Método de elementos finitos (MEF)

En la técnica de elementos finitos, la región de interés es subdividida en pequeñas sub regiones llamadas volúmenes de control. Así, las ecuaciones son discretizadas y resueltas iterativamente para cada volumen de control. El resultado de esta aplicación es una aproximación del valor para cada variable en todos los puntos específicos discretizados a través del dominio. En este sentido, finalmente se obtiene una imagen total del comportamiento del fluido en forma de resultados cuantitativos y cualitativos (Shaw, 1992).

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales cuya solución es solo una aproximación del fenómeno exacto, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es

exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito" (Sabzi A.E., Afrous A., 2015)..

Para llevar a cabo un cálculo mediante un programa de elementos finitos las tareas se dividen en tres. Este fue es el proceso lógico llevado a cabo en el modelamiento de la presente tesis.

El Pre procesamiento, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades.

Es importante realizar operaciones de regularización de la malla, también llamado refinamiento de malla para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

El objetivo de este paso es el de generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que pueda ser resuelto con algún algoritmo diseñado para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales.

Al tomar en cuenta los puntos previos se obtendrá un modelo geométrico conformado por diferentes cuerpos que podrían incluso no parecerse al diseño construido. Esto debido a que se deben hacer las simplificaciones necesarias para modelar un correcto flujo del agua.

La generación de la grilla o mesh, forma parte del pre procesamiento de la información. Como se indicó previamente, la correcta definición de esta grilla influye en la correcta simulación de los datos. Para cumplir satisfactoriamente este paso el parámetro de calidad más importante es la uniformidad. El software cuenta con diferentes herramientas para asegurar una uniformidad y continuidad en el grillado. Con estas herramientas se pueden subdividir los elementos y así generar una mayor cantidad de estos de acuerdo a la precisión de análisis deseada. Finalmente, se puede verificar la calidad de la grilla en cada dominio definido mediante parámetros de calidad que el software arroja. Los parámetros de calidad más importantes de la grilla son la ortogonalidad que debe estar en un rango de 0.6 a 1.0 para calificarse como buena y la oblicuidad que debe encontrarse entre 0.0 y 0.25 para lo propio (Musavi-Jahromi, et al., 2008).

El Procesamiento, en un problema mecánico lineal no dependientes del tiempo, como un problema de análisis estructural estático o un problema elástico, el cálculo

generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.

Para un problema de CFD en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y considerar incrementos numéricos. En este sentido se debe calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos para los que se considera una sucesión de instantes. Los instantes considerados son bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio instantáneo en cada instante. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo sustancialmente más elevado que en un problema estacionario y lineal (Henk, Weeratunge, 1995)..

El objetivo final de esta etapa es el de proporcionar valores del conjunto de funciones en los nodos de la malla que se definió en la discretización los cuales deben poseer una aproximación elevada al fenómeno real.

En la etapa del procesamiento se debe configurar apropiadamente las condiciones de convergencia del modelamiento tomando en cuenta las consideraciones iniciales y la discretización previamente realizada. Por otro lado, en esta etapa también es necesaria la definición de los resultados que se desean obtener a partir del análisis realizado. Para el presente proyecto se procesarán los resultados del comportamiento del agua en las estructuras analizadas, sin embargo, para proyectos de diseño esta etapa de CFD se debería acoplar con el comportamiento de la estructura en una interfaz definida entre ambas.

El Post procesamiento, en esta etapa se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación para mayor exactitud.

Actualmente, el MEF es usado para calcular problemas tan complejos, que los ficheros que se generan como resultado del MEF tienen tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensible e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de post procesamiento los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representaciones gráficas y obtener magnitudes derivadas que permitan extraer conclusiones del problema.

El post procesamiento del MEF generalmente requiere un entorno adicional para organizar los datos de salida, de tal manera que sea más fácilmente comprensible el resultado y permita decidir si ciertas consecuencias del problema son o no aceptables.

2.5 Conceptos de la aplicación del software Ansys para la simulación del comportamiento de un fluido

2.5.1 Presentación del software Ansys

El software Ansys es una plataforma muy utilizada alrededor del mundo y no solo por sus aplicaciones en la hidráulica sino también en diferentes especialidades de ingeniería. Ansys Inc. Fue fundada en 1970 con aproximadamente 1700 empleados, la mayoría con experiencia en elementos finitos y dinámica de fluido computacional (Nuno M.C. et al., 2014)

ANSYS desarrolla, comercializa y brinda soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otros softwares para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos (Farrokh Mahnamfar, Abdüsselam Altunkaynak, 2017).

ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. En el presente trabajo se optará por la utilización del software Ansys ya que, de acuerdo a la reputación de sus productos, permite predecir con seguridad como se comportarán sus modelos en el mundo real (Hui Xia Yang, et al., 2016).

2.5.2 Definición de los sistemas utilizados para la simulación CFD - CFX en el software Ansys

Como se mencionó previamente, el software Ansys es un programa que desarrolla las hipótesis de los elementos finitos y volúmenes finitos en un entorno completo y práctico. Dichas hipótesis fueron conceptualizadas en la sección 2.4 y serán particularizadas para el software en cuestión.

El software Ansys se desarrolla en torno a un núcleo llamado Ansys Workbench que funge de hoja de trabajo en la cual se añaden módulos que cumplen una función en específico. Los módulos se ordenan de tal manera que se pueda establecer un orden determinado y se asemeje a un diagrama de flujo que represente el flujo de los datos a través del proyecto. Cada módulo está compuesto por una o más celdas las cuales representan de forma secuencial los pasos necesarios para desarrollar el tipo de análisis específico. Una vez añadidos los componentes se pueden enlazar entre ellos para compartir o transferir información entre dichos sistemas.

Para el análisis de la presente tesis se procederá a desarrollar un esquema básico de tres módulos dentro de la hoja de trabajo. En la **Figura 2.21** se observa la hoja de trabajo Ansys Workbench y los módulos utilizados para desarrollar el proyecto.

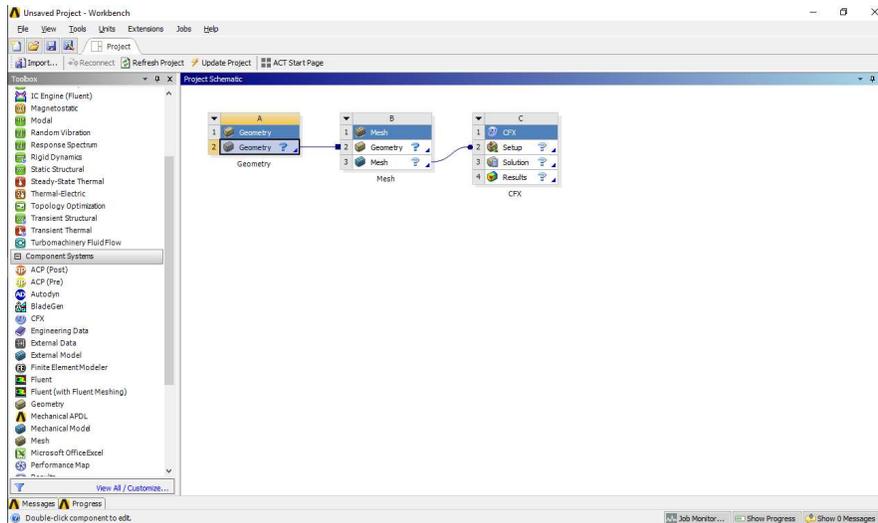


Fig. 2.21. Hoja de trabajo Workbench y esquema del proyecto

El primer módulo corresponde a la geometría del proyecto la cual puede ser generada o importada desde otros softwares. El entorno que ofrece este primer módulo es un sub software llamado SpaceClaim, recientemente lanzado y promocionado por Ansys inc. Dicho software tiene diversas fortalezas que pueden ser aprovechadas. Sin embargo, existe la opción de utilizar otro sub software llamado DesignModeler, este software ha sido el entorno de diseño principal por muchos años del software Ansys y para el presente proyecto ha sido seleccionado por su interfaz más rápida y completa.

En este proyecto de tesis se ha desarrollado la geometría en el software AutoCad para luego ser importado al sub software Design Modeler mediante un archivo de extensión común llamado parasolido (.x_b). En dicho software se realizaron las modificaciones pertinentes para generar una geometría posible de simular.

El segundo módulo corresponde al mallado de la geometría del proyecto. Como se mencionó en la sección previa, el mallado corresponde a la discretización de subdominios en pos de definir la cantidad de elementos que conformaran el volumen de control general. Este módulo consta de dos celdas, en la primera se presenta la geometría del proyecto y en la segunda el mallado propiamente dicho.

La primera celda será enlazada con el módulo de geometría previamente desarrollado y en la segunda celda se generará la malla mediante las diversas herramientas que el sub software posee.

En el tercer módulo se encuentra el componente CFD (Computational Fluids Dynamics) propiamente dicho y llamado por Ansys como CFX. En este módulo se encuentran tres celdas.

La primera es un sub software llamado Setup que se encarga de la definición de condiciones de frontera. Los datos ingresados en esta sección son definidos mediante los estudios realizados y la expectativa de comportamiento del fluido a través de la estructura analizada.

La segunda celda se trata de un sub software llamado Solution que se encarga del proceso matemático y computacional del software Ansys. En esta sección la interacción del usuario es mínima ya que solo define la cantidad de recursos de computo asignados al software y monitorea los puntos de monitoreo definidos y la convergencia de las ecuaciones desarrolladas iteración tras iteración.

El producto final de la simulación se muestra cuantitativamente y cualitativamente en la tercera celda del módulo CFX. Esta celda es llamada Results y evidencia los resultados obtenidos de la simulación. Dentro de este sub software existen diversas herramientas que son de basta utilidad para la observación de los resultados.

Como se explicó en la sección 2.4 la simulación computacional del comportamiento de un fluido se subdivide en tres etapas: pre procesamiento, procesamiento y post procesamiento. En el software Ansys inc. Las celdas de los módulos corresponden a alguna de estas tres etapas. En la **Figura 2.22** se presenta la correspondencia entre la celda, el módulo y la etapa de la simulación.

ETAPA	MÓDULO	CELDA
ETAPA DE PRE PROCESAMIENTO	A	
	1 Geometry	Geometry
ETAPA DE PROCESAMIENTO	B	
	1 Mesh	Mesh
	2 Geometry	Geometry
ETAPA DE POST PROCESAMIENTO	C	
	1 CFX	Setup
	2 Setup	Solution
	3 Solution	Results
	4 Results	Results

LEYENDA	
ETAPA DE PRE PROCESAMIENTO	
ETAPA DE PROCESAMIENTO	
ETAPA DE POST PROCESAMIENTO	

Fig. 2.22. Correspondencia de etapa-módulo-celda

2.5.3 Análisis CFD mediante el software Ansys alrededor del mundo

A continuación, se presentarán algunos ejemplos de proyectos reales y operativos en la actualidad que fueron modelados exitosamente con el software ANSYS.

2.5.3.1 Diseño de la ampliación de la presa Cotter en Canberra, Australia.

La ampliación de la presa Cotter, una gran estructura de hormigón compactado con rodillo de 85m. Para el diseño se utilizó ANSYS CFX CFD, así llevar a cabo el modelo 2D y 3D, modelando el complejo paso del vertedero. El modelo fue indispensable para que la empresa encargada pueda optimizar el diseño de la peculiar cuenca de amortiguamiento y la evaluación de la interacción entre los aliviaderos centrales y secundarios. En la **Figura 2.23** se pueden observar los resultados de velocidad obtenidos al analizar la presa con el software ANSYS.

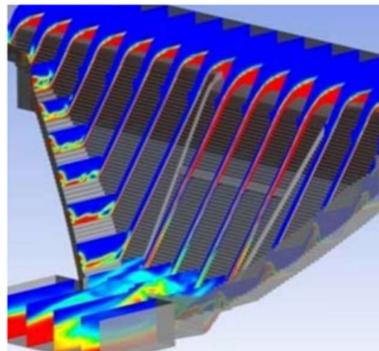


Fig. 2.23. Diseño de la ampliación de la presa Cotter

2.5.3.2 Actualización del Aliviadero Googong en Camberra, Australia.

La actualización del Aliviadero Googong consistió en trabajos de reparación el daño por la extensa erosión presentada en las rocas. Para la fase de diseño se utilizó ANSYS en pos de generar un modelo físico a escala 1:60 del aliviadero el cual se puede observar en la **Figura 2.24**. Los aspectos clave que se consideraron en el modelo de estudio fueron la alineación de las paredes de la tolva, los efectos de onda de la tolva, optimización de la excavación en la piscina de inmersión y la evaluación de los impactos sobre la infraestructura inmediatamente aguas abajo.



Fig. 1.24. Diseño de la actualización del Aliviadero Googong

Fuente: <http://www.ghd.com/pdf/Hydraulic-modelling-for-dams.pdf>

2.5.3.3 Actualización de la presa Elidon en Camberra, Australia.

Como parte de los trabajos de restauración en la presa de Eildon, se realizó la investigación de la capacidad del vertedero existente para hacer frente a los flujos significativamente mayores esperados. Esta investigación se basó en gran medida en los resultados de las pruebas físicas a escala presentada en la **Figura 1.25**. GHD fue responsable de la dirección técnica y la gestión del proyecto. El estudio mostró que la combinación de un canal de aproximación suavemente curvado y las grandes ranuras que se habían construido para las compuertas elevadoras verticales causan inestabilidad hidráulica significativa en el flujo sobre la cresta y abajo del canal del aliviadero. Las opciones para modificaciones se ensayaron con el enfoque adoptado la inclusión de francobordo adicional para tener en cuenta el aumento de la turbulencia del flujo.



Fig. 1.25. Diseño de la actualización de la presa Elidon

Fuente: <http://www.ghd.com/pdf/Hydraulic-modelling-for-dams.pdf>

2.5.3.4 Diseño de la presa Burrum en el río N° 1 en Hervey Bay, Queensland.

El modelado de dos y tres dimensiones fue realizado en ANSYS para el diseño de las condiciones hidráulicas complejas en la presa Burrum en el río N°1 y sus resultados se puede observar en la **Figura 1.26**. El diseño incorpora un alto flujo y flujo bajo para facilitar dos condiciones hidrológicas muy diferentes: uno siendo bajos caudales en la estación seca limitados a emisiones al medio ambiente de la presa y altos caudal durante los eventos de derrames e inundaciones. Los perfiles de velocidad y condiciones de turbulencia se modelaron, así como los niveles de agua a través de la escala para peces. El modelado fue fundamental para asegurar que el diseño se reuna con los criterios de diseño, tanto biológicas y de ingeniería.

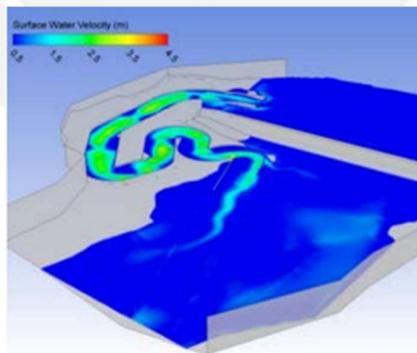


Fig. 1.26. Diseño de la presa Burrum

Fuente: <http://www.ghd.com/pdf/Hydraulic-modelling-for-dams.pdf>

CAPITULO III: DATOS Y MÉTODOS

MODELACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

3.1 Características del proyecto hidráulico

El objetivo de las estructuras del presente proyecto es un aprovechamiento óptimo del recurso hídrico del río Ninahuisa en la generación de la central hidroeléctrica San Gabán II con la instalación de una presa en la cuenca del río Ninahuisa, para el afianzamiento hídrico de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

Tras precisar las características de cada tipo de estructuras hidráulicas presentes en el proyecto se procederá a caracterizar al proyecto de acuerdo al marco teórico previo. Los componentes analizados son: obras de desvío, aliviadero de excedencias y túnel de desvío. De este último solo se analizarán los tramos más críticos.

Por otro lado, es importante también analizar y tratar la información meteorológica e hidrométrica del estudio hidrológico para estudiar las condiciones de análisis de los modelos computacionales.

Cabe recalcar que todos los datos geométricos, hidrológicos, geográficos y topográficos provienen de la información recabada del expediente técnico del proyecto “Instalación de una presa en la cuenca del río Ninahuisa, para el afianzamiento hídrico de la Central Hidroeléctrica San Gabán II”.

3.2 Análisis y tratamiento de la información meteorológica e hidrológica

3.2.1 Precipitación

Para el análisis de precipitación se seleccionaron un total de 11 estaciones, las cuales cuentan con un registro de información por lo general mayor a 10 años, ubicadas dentro y próximas a la cuenca del río San Gabán. La fuente de información corresponde al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.

A continuación, se muestran en la **Tabla 3.1** y la **Figura 3.1**, la relación de estaciones meteorológicas cercanas con datos de precipitación disponibles. En la **Tabla 3.2** el inventario de datos y en la **Figura 3.2**, se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas.

Tabla 3.1. Estaciones meteorológicas

N°	Estación	Cuenca	Altitud (msnm)	Coordenadas	
				Latitud	Longitud
P-01	Nuñoa	Titicaca	4135	14° 29'	70° 38'
P-02	Crucero	Titicaca	4130	14° 22'	70° 02'
P-03	Macusani	San Gabán	4331	14° 04'	70° 25'
P-04	Sta. Rosa	Titicaca	3966	14° 37'	70° 47'
P-05	Antauta	Titicaca	4150	14° 20'	70° 25'
P-06	Corani	San Gabán	4010	13° 52'	70° 36'
P-07	Ollachea	San Gaban	3420	13° 48'	70° 29'
P-08	Progreso	Azangaro	3905	14° 41' 21.1"	70° 21' 55.8"
P-09	Sicuni	Urubamba	3574	14° 15' 13"	71° 14' 14"
P-10	Combapata	Urubamba	3464	14° 6'	71° 26'
P-11	Tabinapampa	San Gaban	2100	13° 43'	70° 27'

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

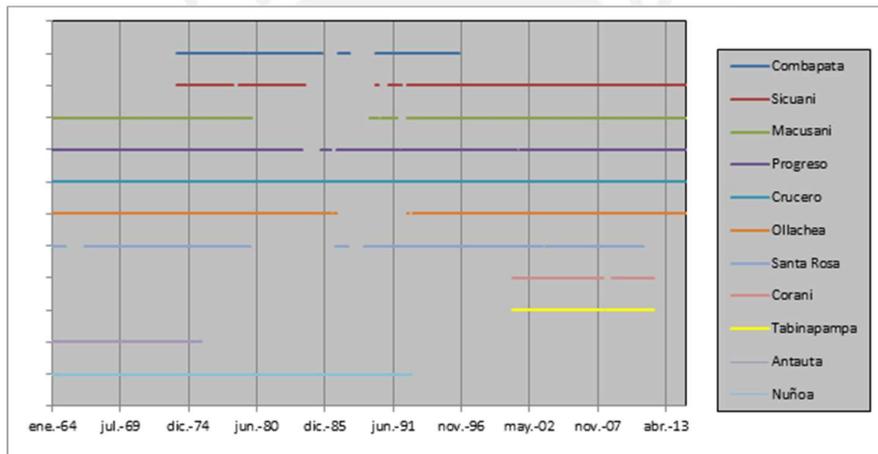


Fig. 3.1 Datos disponibles por estación

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

Tabla 3.2. Inventario de datos

Id Estación	Nombre	No Valores	Fecha Inicio	Fecha Final	% lagunas	Duración
000756	Combapata	233	16/01/1964	16/12/2014	61.928	19.38
000759	Sicuani	406	16/01/1964	16/12/2014	33.66	33.78
000777	Macusani	490	16/01/1964	16/12/2014	19.935	40.77
000778	Progreso	590	16/01/1964	16/12/2014	3.595	49.09
007415	Crucero	611	16/01/1964	16/12/2014	0.163	50.83
110695	Ollachea	540	16/01/1964	16/12/2014	11.765	44.93
110823	Santa Rosa	459	16/01/1964	16/12/2014	25	38.19
12112	Corani	129	16/01/1964	16/12/2014	78.922	10.73
12113	Tabinapampa	134	16/01/1964	16/12/2014	78.105	11.15
157406	Antauta	145	16/01/1964	16/12/2014	76.307	12.06
7404	Nuñoa	348	16/01/1964	16/12/2014	43.137	28.95

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

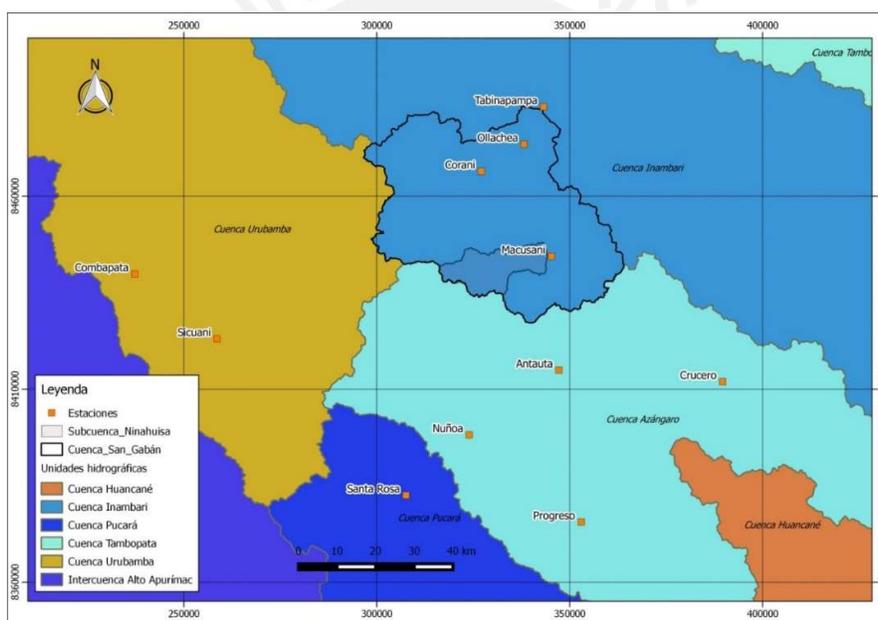


Fig. 3.2. Mapa de estaciones meteorológicas

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

3.2.1.1 Análisis de consistencia

Uno de los aspectos más importantes en el estudio hidrológico viene a ser el análisis de consistencia u homogeneidad de los datos hidrometeorológicos. De no realizarse este procedimiento se pueden incurrir en errores significativos en los análisis posteriores, tales como en la determinación de la oferta hídrica o el modelamiento precipitación-escorrentía.

La metodología del análisis de consistencia radica en la identificación de saltos y tendencias, tanto en la media como en la desviación estándar, los mismos que pueden ser eliminados cuando se comprueban que los datos se alejan demasiado de la realidad, corregidos cuando la naturaleza de los errores lo permite, o simplemente señalados cuando el valor anormal (inconsistente) puede ser considerado como localmente posible.

En el estudio hidrológico se realizaron tres diferentes métodos: gráfico, vector regional y estadístico de los cuales se concluyó que todos los valores de precipitación son consistentes en el periodo de 1964-2014 con excepción de un periodo dudoso en la estación Crucero. Para completar estos datos en el periodo incierto se realizó en base a un análisis de regresión lineal múltiple, con ayuda del software Hec-4.

Finalmente, la información completada para el periodo 1964-2014 se adjunta en los anexos.

3.2.1.2 Análisis de la distribución temporal de la precipitación

En base a la información completada y consistente de precipitación para el periodo 1964-2014 se muestra en la **Tabla 3.3** los promedios mensuales.

Tabla 3.3. Precipitación promedio mensual

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Sicuni	133.1	134.8	118.4	57.3	10.3	2.6	2.5	5.8	20.8	51.2	71.9	115.5	724.2
Macusani	132.0	124.9	100.6	38.3	9.1	2.6	4.0	7.7	22.5	44.4	57.7	109.1	652.9
Progreso	131.5	103.6	99.3	40.6	7.3	1.4	2.9	6.0	21.9	45.4	61.1	95.6	616.6
Crucero	159.0	134.9	121.9	58.8	15.5	6.4	4.3	12.1	39.7	56.8	83.5	137.2	830.1
Ollachea	239.8	200.7	171.4	73.4	23.5	13.5	16.6	32.1	53.6	91.8	97.7	177.3	1191.3
Santa Rosa	189.5	153.1	150.9	55.0	10.8	3.9	3.1	12.6	32.3	65.7	89.3	153.5	919.6
Corani	110.1	83.8	71.3	37.8	12.8	5.9	9.2	12.6	14.9	45.2	52.1	82.1	537.9
Tabinapampa	172.4	175.5	149.8	64.2	22.7	7.3	16.4	25.1	28.1	79.3	86.6	125.0	952.5
Nuñoa	145.9	140.7	120.9	36.4	12.0	4.3	3.0	5.6	23.5	58.5	66.8	105.7	723.5

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

Aproximadamente un 70% de la precipitación se concentra en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, lo cual se puede observar en la **Figura 3.3**.

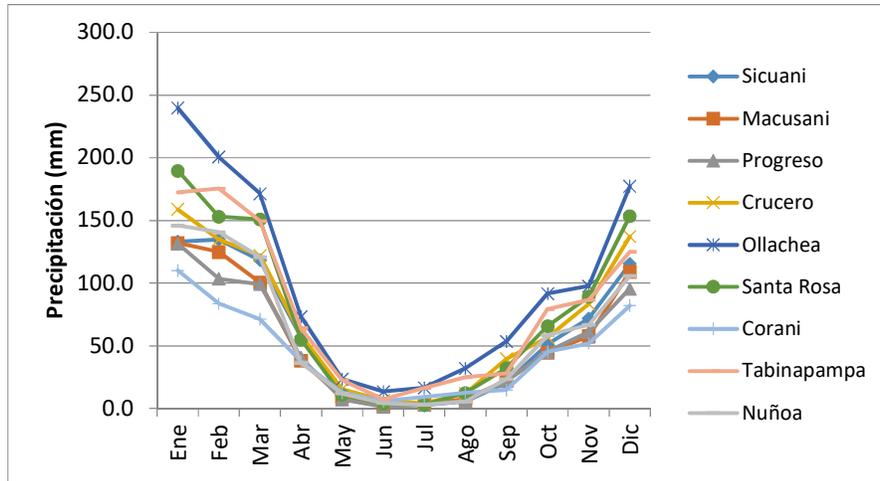


Fig. 3.3. Distribución mensual de la precipitación

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

3.2.1.3 Análisis de la distribución espacial de la precipitación

Se ha elaborado un mapa de isoyetas como resultado de la interpolación de los valores de precipitación mediante el método geoestadístico de Kriging. Se han interpolados los datos mensuales de la serie 1964-2014 con el uso del software Hydracces. En la **Figura 3.4** se muestra la interpolación obtenida para la cuenca en estudio a partir de los promedios multianuales de cada estación.

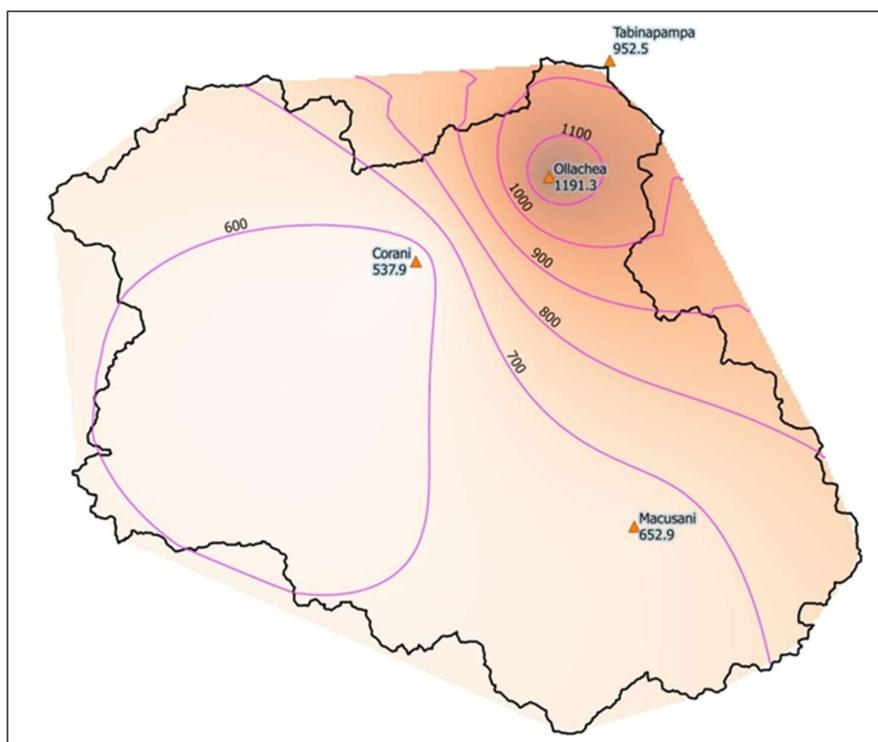


Fig. 3.4. Mapa de isoyetas

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

3.2.2 Aporte del río

De acuerdo al estudio hidrológico se utilizaron cuatro estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca, los detalles se detallan en **Tabla 3.4**:

Tabla 3.4. Estaciones hidrométricas

Id_Station	Nombre	Río	Fuente	Latitud	Longitud	Altitud
H001	Ollachea	Ollachea	Senamhi	-13.800	-70.466	2690
H002	Pte_Caquene	Macusani	Senamhi	-14.016	-70.450	4255
H003	Corani	Corani	Senamhi	-13.866	-70.600	4020
H004	Camatani	SanGaban	Senamhi	-13.733	-70.450	2240

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

La disponibilidad de datos hidrométricos se encuentra de acuerdo a la **Figura 3.5**, en esta se puede observar que la estación con mayor tiempo de registros es la estación Ollachea (desde el año 1982) y el resto corresponde a los últimos 20 años:

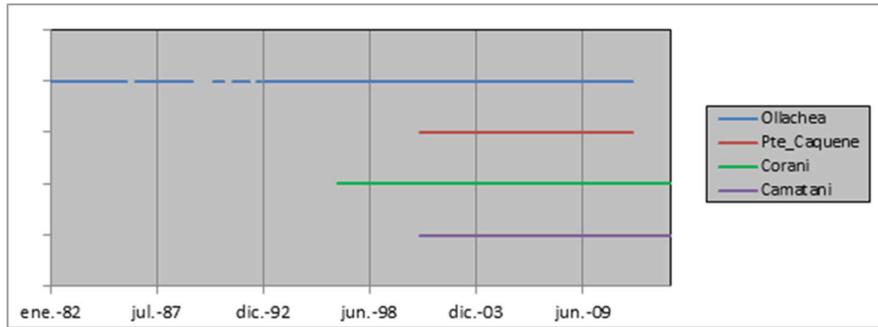


Fig. 3.5. Disponibilidad de datos

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

En las **Figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9**, se muestran los hidrogramas de los caudales medios mensuales registrados por las cuatro estaciones de acuerdo a los datos disponibles. Estas figuras representan el potencial hídrico de las cuencas de interés ya que muestran indicadores de caudal vs tiempo y esto sirve para un tratamiento estadístico de manera que se puedan obtener valores máximos de avenidas y así diseñar las estructuras.

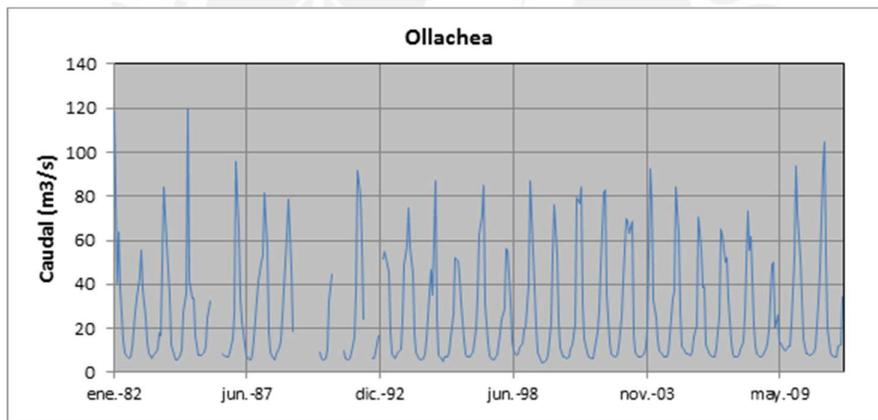


Fig. 3.6. Histograma de caudales de estación Ollachea

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

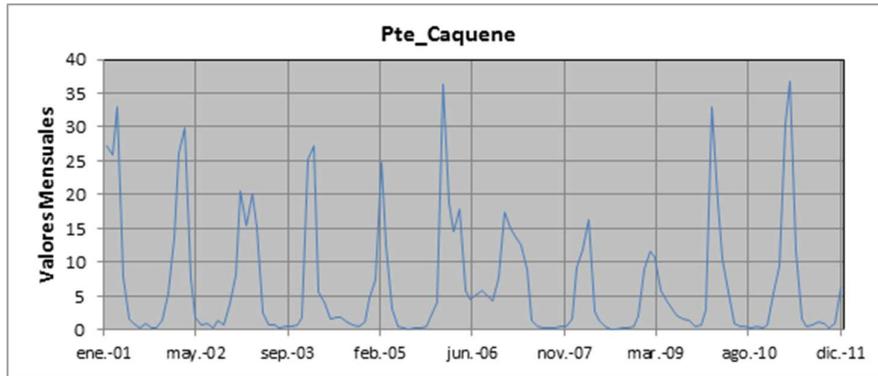


Fig. 3.7. Histograma de caudales de estación Pte_Caquene

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

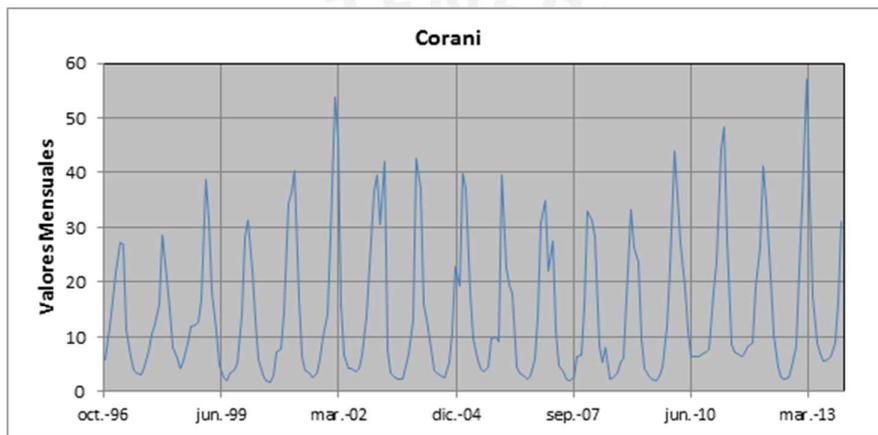


Fig. 3.8. Histograma de caudales de estación Corani

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

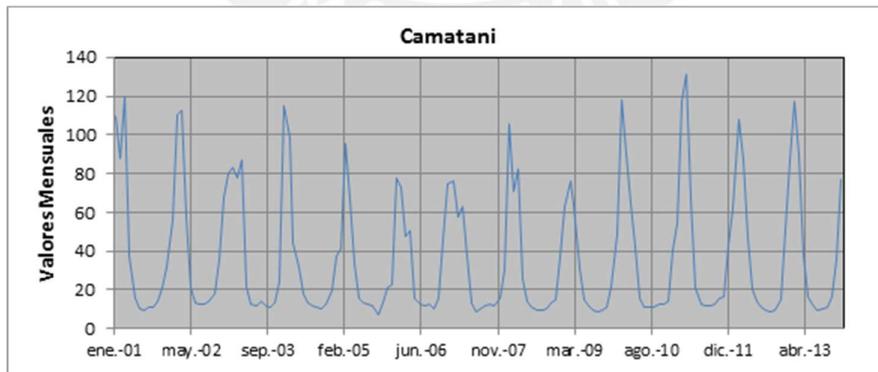


Fig. 3.9. Histograma de caudales de estación Camatani

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

En la **Figura 3.10**, se analizará la consistencia de datos gráficamente superponiendo los histogramas previamente presentados.

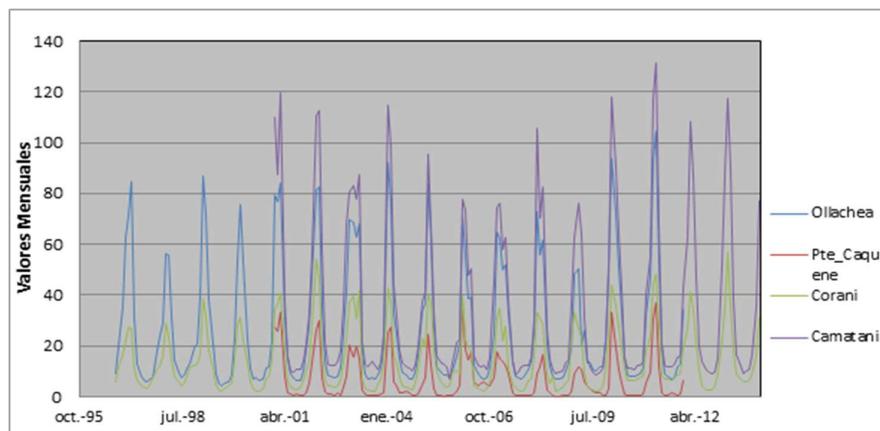


Fig. 3.10. Superposición de histogramas

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

Los histogramas de los caudales medios mensuales de las estaciones Ollachea, Pte. Caquene, Corani y Camatani, no muestran saltos ni tendencias significativas.

3.2.3 Evaporación

En la subcuenca Ninahuisa no existen estaciones meteorológicas instaladas que puedan permitir un análisis directo del área de interés. Sin embargo, en la cuenca del río Macusani, a la que pertenece el río Ninahuisa, existe la estación meteorológica Macusani (ubicada a una altitud de 4331 msnm) que registra las variables climatológicas cuyo comportamiento puede inferirse es similar al del área en estudio por encontrarse en una zona cercana.

3.2.4 Temperatura

El análisis de la temperatura es de gran importancia dentro del balance hídrico debido a que esta variable climática tiene alta incidencia en el proceso de la evapotranspiración y por ende en los procesos del ciclo hidrológico. La temperatura anual media en el área del proyecto depende principalmente de la altitud con una gradiente de temperatura de aproximadamente 0.6% por cada 100 m de incremento en la altitud.

En general el área del proyecto muestra un amplio ciclo diurno de temperatura, durante el invierno Austral la temperatura más fría se encuentra por debajo de 0 °C. Sin embargo, las temperaturas diarias en el área son siempre sustancialmente más altas (alrededor de 12 °C). Durante el verano Austral el cielo a menudo se encuentra nublado

con temperaturas máximas que alcanzan los 12°C y temperaturas mínimas de 1 °C. En la **Figura 3.11** se puede observar la variación mensual de la temperatura en la estación Macusani.

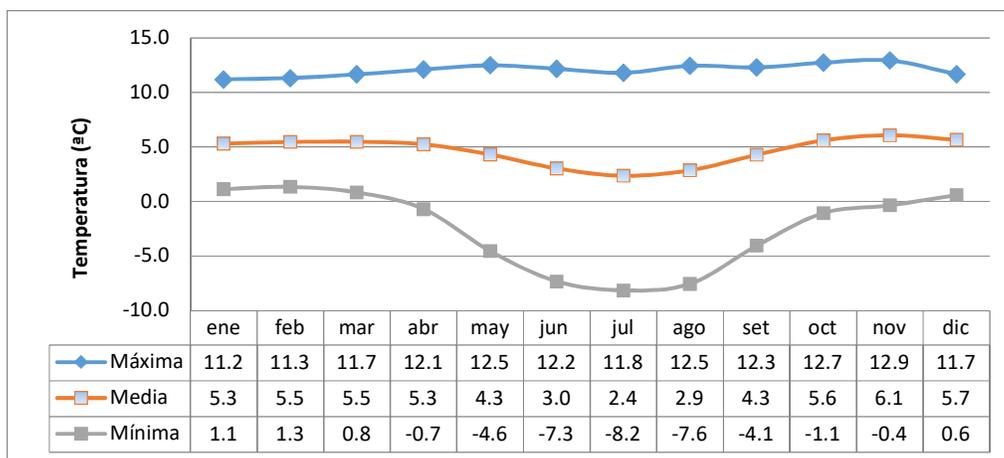


Fig. 3.11. Variación mensual de la temperatura en la estación Macusani

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

3.2.5 Humedad relativa

La humedad relativa es una expresión que nos indica en términos relativos cuanto de vapor de agua existe como porcentaje de la cantidad máxima que puede contener el aire saturado a una determinada temperatura y se expresa en tanto por ciento.

La fluctuación estacional de la humedad relativa es relativamente pequeña. La humedad relativa media medida en la estación de Macusani es del 76% con una distribución durante todo el año tal como se muestra en la **Tabla 3.5**:

Tabla 3.5. Variación mensual de la humedad relativa (%) en la estación Macusani

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AG	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM.
Macusani	79.0%	79.9%	79.1%	78.0%	76.9%	74.7%	72.6%	71.2%	73.8%	75.9%	75.9%	75.5%	76.0%

Fuente: Estudio hidrológico de E.G.E. San Gabán S.A.

Por lo tanto, de los resultados del análisis se puede indicar que la evaporación media mensual multianual varía entre 29.01mm/mes (enero) y 41.53mm/mes (diciembre).

3.3 Características de las estructuras hidráulicas en análisis

3.3.1 Obra de toma

Se ha diseñado la obra de toma de manera de aprovechar el túnel de desvío como elemento de descarga. Para ello, se ha considerado una torre de compuertas en el portal de entrada del túnel de desvío, la cual está conformada por dos pozos verticales de 8.10 x 1.60 m que se desarrollan desde la cota 4553.60 msnm hasta la cota 4522.50 msnm, es decir, cubren una altura de 31.10 m.

Cada pozo tendrá tres pantallas verticales de concreto que cuentan con tres aberturas de 1.00 x 1.00 m en su parte inferior. La primera abertura, servirá para colocar ataguías metálicas caso se requiera algún trabajo de inspección y/o mantenimiento de uno de los pozos. En el segundo y tercer orificio se colocarán compuertas, para permitir la regulación de los caudales entregados aguas abajo.

Los orificios están dimensionados para permitir normalmente la descarga del caudal de diseño de 1.5 m³/s por cada uno de ellos y excepcionalmente, para 3.0 m³/s por uno de los pozos; de esta manera, no dejará de suministrarse el gasto máximo cuando se realice el mantenimiento de las compuertas de uno de los pozos.

La disipación de la carga hidráulica fijada por el nivel del embalse, se efectuará por intermedio de un dissipador del tipo de pantalla de impacto. Dada las limitaciones de carga que tiene este tipo de dispositivo con velocidades máximas del chorro de agua en el impacto de 15 m/s, la primera compuerta servirá para lograr que aguas abajo de la misma, se configure la carga máxima que soportan tales dissipadores. La pantalla del dissipador en contacto con el chorro de agua lleva una protección de concreto armado de alta resistencia a la abrasión de 0.10m de espesor.

El caudal entregado por las compuertas se mide en un aforador tipo "Vertedero CRUMP" que está ubicado inmediatamente aguas abajo de los dissipadores. El nivel de la carga de agua sobre este vertedero se mide por medio de sensores ultrasónicos instalados en pozos de medición ubicados en el pilar central de la torre de compuertas que se conectan con tuberías con los aforadores.

En los pozos aguas arriba de la primera compuerta, se han instalado 02 válvulas de compuerta de diámetro 0.15m que permita el llenado de estos pozos y el de aguas abajo y que facilite la remoción de las ataguías cuando se terminen las labores de mantenimiento que se requieran.

3.3.2 Aliviadero de excedencias

El aliviadero de excedencias es del tipo "Morning Glory", dimensionado para evacuar un caudal máximo instantáneo de 22 m³/s

La estructura se ha implantado en el flanco izquierdo rocoso del río Ninahuisa en un lugar apropiado para alojar la estructura, que tiene como cota de coronación el nivel 4550.60 msnm, con los menores volúmenes de excavación posibles. Se ha sobre-excavado una plataforma al nivel 4549.80 msnm alrededor del Morning Glory de diámetro 12.50 m, que permita el libre ingreso del agua al aliviadero.

El diámetro de la corona del aliviadero es 4.75 m con cota 4550.60 msnm, que tiene un primer tramo con el perfil de la napa vertiente hasta la cota 4549.30 msnm, en que el diámetro es 2.20 m.

Un segundo tramo es un pozo vertical, de sección circular de 2.20 m de diámetro que se desarrolla desde la cota 4549.30 msnm a la cota 4527.91 msnm.

Un tercer tramo, es una curva vertical de 5.0 m de radio medido al eje; la sección transversal de la curva es circular de 2.20 m de diámetro, que se desarrolla desde la cota 4527.91 msnm a la cota 4521.81 msnm. El ángulo de deflexión de la curva es de 91.077°. La curva se desarrolla desde la progresiva 0+000 (eje del aliviadero) a la progresiva 0+005.

Al final de su desarrollo, la curva empalma con una transición de 25 m de longitud que va de la progresiva 0+005 a 0+030 pasando de la sección circular de 2.20 m de diámetro a la sección tipo baúl de 2.20 m de ancho y 2.55 m de altura. A partir del inicio de la transición, la rasante del piso tiene una pendiente de 0.0188 a lo largo del conducto del aliviadero.

El final de la transición empalma con el conducto del desvío y se desarrolla desde la progresiva 0+030 a la progresiva 0+ 055.24 con la sección transversal de la conducción indicada en la transición de las obras de desvío.

A partir de la progresiva 0+055.24 la conducción es la misma que la del desvío indicado anteriormente.

Al final del túnel del aliviadero, se tiene el trampolín de salto de sky de 4.00 m de longitud con un radio de 10 m y ángulo del labio de salida de 20°.

3.3.3 Tramos de los túneles de descarga

De acuerdo a la descripción de las obras de los anteriores puntos, existen dos conductos bien diferenciados por donde se dará flujo de agua. Asimismo, también se describe que estos dos conductos se unen y forman un solo conducto. Por lo tanto, estos tres conductos serán los seleccionados para un análisis más profundo de la criticidad de análisis del fluido dinámico de los mismos.

3.3.4 Presentación de las características hidrológicas, topográficas, climáticas y geológicas del proyecto.

3.3.4.1 Características Hidrológicas

Como se mencionó en la sección 2.3, los datos o *inputs* del modelo analizado se obtienen del expediente técnico del proyecto en cuestión. Específicamente las características hidrológicas provienen de un balance hídrico realizado mediante el método WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) cuya base teórica se encuentra en la sección referenciada. No es materia del presente trabajo desarrollar con mayor profundidad estas variables ya que las mismas representarán únicamente los inputs requeridos para el desarrollo del modelamiento.

Área de Cuenca	217 km ²
Volumen de almacenamiento útil	22 hm ³
Nivel máximo de operación normal (NAMO)	4550.60 msnm
Nivel máximo de operación de avenidas (NAME)	4551.37 msnm
Avenida Máxima de Diseño que ingresa al embalse	112 m ³ /s (Tr: 10000 años)

El tiempo de retorno definido se establece a partir de la decisión del volumen de almacenamiento útil. Dicho volumen fue calculado conforme a un análisis y modelamiento de la curva elevación volumen de la sección definida en el software Hec – Hms cuyo resultado arrojó 22 hm³ debido a que este valor posee una garantía mayor al 90% para poder abastecer de la demanda impuesta aguas abajo del reservorio. En este sentido la altura correspondiente de la presa para obtener un volumen de almacenamiento útil de 22 hm³ y colocando esta altura en término de cotas define el Nivel de aguas máximo ordinarias (NAMO) en 4550.60 msnm lo cual corresponde a un tiempo de retorno de avenidas de 1 000 años.

De acuerdo a los parámetros anteriores se hizo una simulación entre los caudales de ingreso y salida del embalse considerando diferentes valores para el vertedero tipo Morning Glory obteniendo un caudal de ingreso total de 112 m³/s el cual corresponde para un tiempo de retorno de avenidas de 10 000 años

3.3.4.2 Características Topográficas

En pos de realizar una evaluación y análisis coherente de las estructuras diseñadas se analizarán las características topográficas del proyecto, analizando algunas las secciones más importantes para el análisis. En la **Figura 3.12** se tiene la vista de planta del plano topográfico del sector en el cual se encuentran diseñadas las estructuras analizadas. En la **Figura 3.13** se encuentran las secciones del río almacenado por la presa desde la progresiva Km 0+400 a la 0+600 con un paso de 50m respectivamente. Dichas secciones tienen áreas parecidas y una pendiente en su lecho de 0.4%. Desde la 0+400 hasta la 0+450 se tratan de secciones cóncavas y a partir de la sección 0+500 está reduce su área en la ladera izquierda del río.

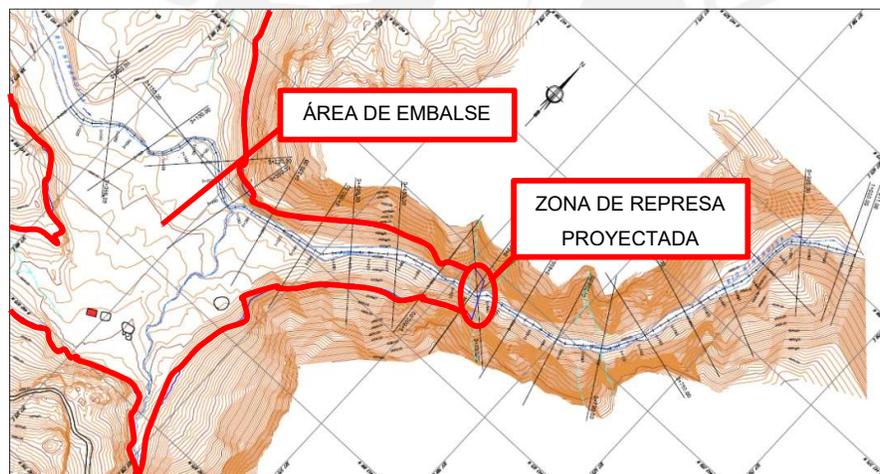


Fig. 3.12. Eje del río que será represado

Fuente: Estudio topográfico de E.G.E. San Gabán

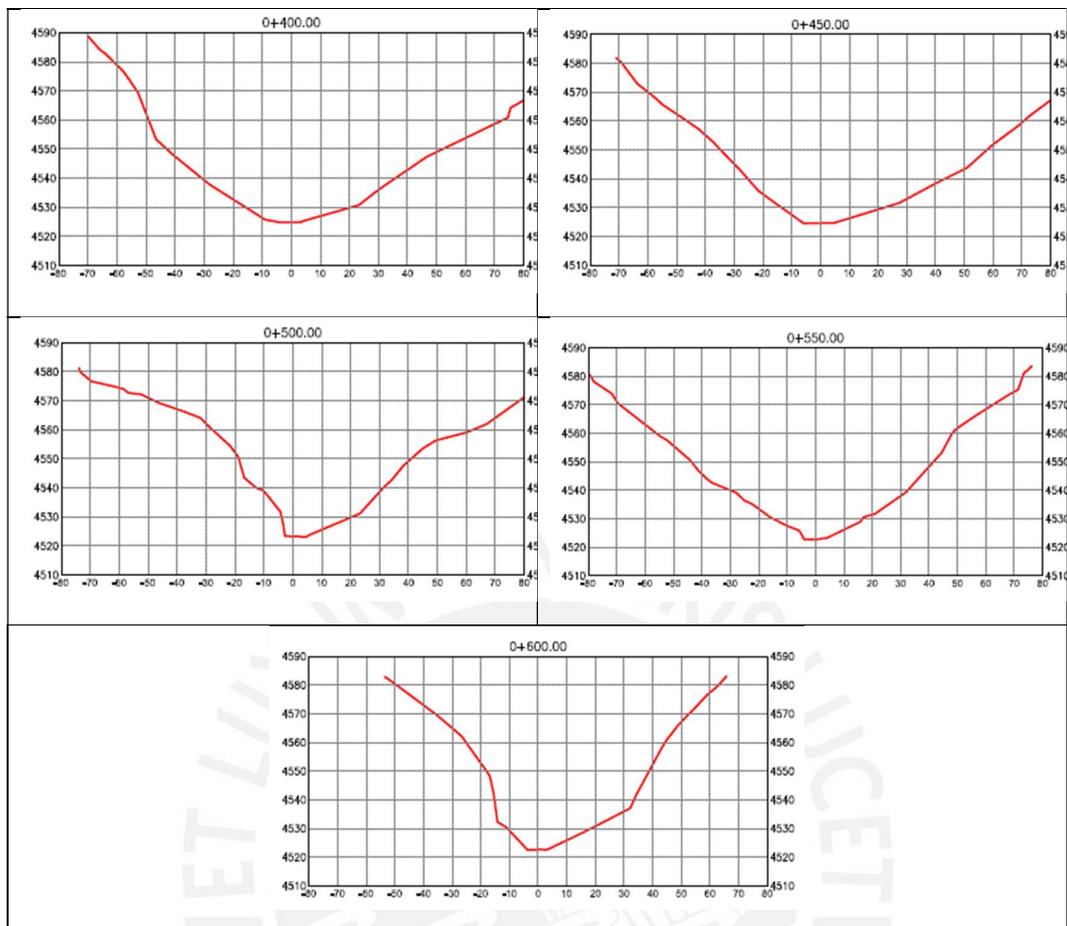


Fig. 3.13. Secciones transversales del río de 0+400 m a 0+600 m

Fuente: Estudio topográfico de E.G.E. San Gabán

3.3.4.3 Características Geológicas

Las características geológicas serán valoradas de dos maneras importantes. En primer lugar, se observará si existen diferencias importantes entre los suelos de las secciones analizadas. En segundo lugar, se observará si existen diferencias y características especiales en las secciones consideradas que puedan afectar el mismo como fallas, tabiques, intrusiones, etc.

En la **Figura 3.14**, se presenta el mapa geológico tomado de las secciones analizadas.

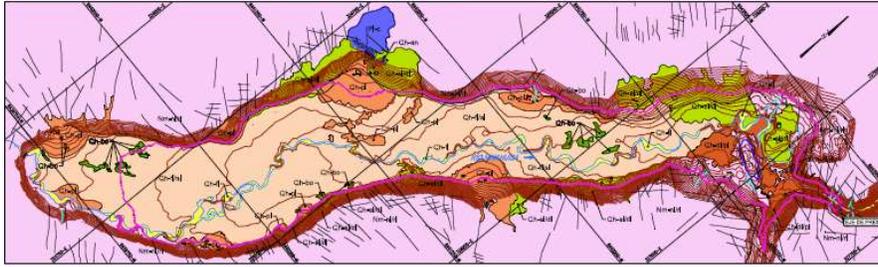


Fig. 3.14. Plano geológico

Fuente: Estudio geológico y geotécnico de E.G.E. San Gabán

3.4 Modelamiento geométrico de las estructuras hidráulicas mediante el uso del software ANSYS

Para comenzar con el análisis dinámico del fluido se realizará el modelo geométrico tridimensional basada en los planos anexos del diseño hidráulico. Las estructuras serán esquematizadas en el software AutoCad 3D para luego ser importadas en formato parasolido y modeladas en el software Ansys.

En la **Figura 3.15.** se plasmó el diseño geométrico tridimensional de las estructuras conexas de la presa en AutoCad 3D con sentido de flujo de izquierda a derecha.

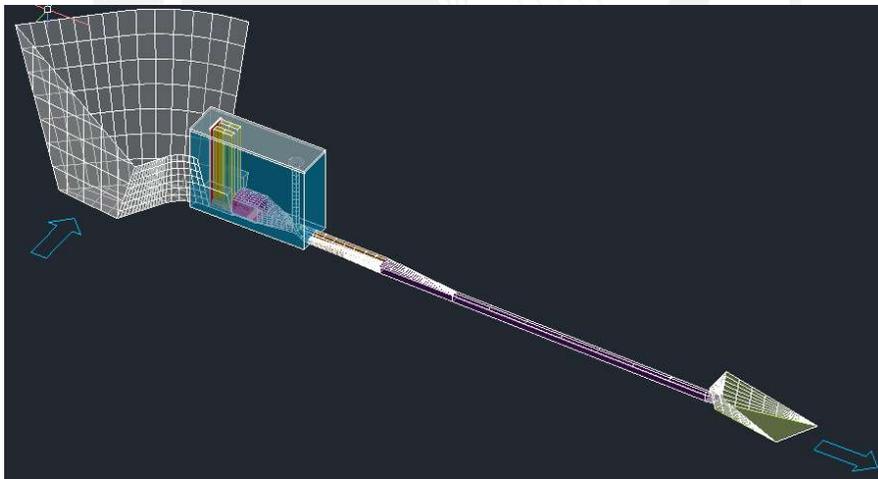


Fig. 3.15. Modelo geométrico tridimensional en AutoCad 3D

En la **Figura 3.15.**, se presentan los siguientes elementos de izquierda a derecha:

En primer lugar, se encuentra el canal de derivación el cual está diseñado como un corte del terreno con pendiente 1:3 que es lo suficientemente estable para su propio sostenimiento. Este canal servirá en 2 etapas, primero en la construcción servirá como canal de desvío de las aguas retenidas por la ataguía aguas arriba de la presa, y en la

etapa de operación como canal de derivación para captar el agua retenida por la presa y dirigirla hacia las pozas de control y su posterior captación mediante las compuertas y el túnel de desvío.

A continuación, se encuentran la casa de mando, la casa de sistemas hidráulicos y las pozas de control en las cuales se encuentran las ataguías y compuertas operadas para la gestión del agua captada.

Tras el ingreso del agua hacia las estructuras de toma, estas atravesarán el conducto formado por 2 túneles paralelos que convergerán en un túnel de mayores dimensiones que retendrá y canalizará el agua hacia un túnel aguas abajo. Este túnel se desarrollará y alcanzará una sección que compartirá con la estructura de aliviadero.

Paralelamente al anterior punto se observa también el modelo del aliviadero el cual se desarrollará hasta alcanzar la sección que compartirá con el túnel de desvío.

En el siguiente tramo se desarrollará la sección que comparten las estructuras de desvío y alivio, el cual tiene una geometría similar al inicio del primer tramo.

Finalmente se plasma un salto de ski que provoca que el chorro de agua proveniente de la captación tanto del NAMO como del NAME reduzca su energía cinética pues esta carga consigo una elevada energía potencial provocada por el nivel de la columna de agua. La decisión del tipo de dissipador de energía se da de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas de la descarga. En el caso actual se elige el dissipador tipo salto de ski debido a la ubicación de la obra y el espacio necesario a fin de evitar que el chorro de agua socave parte de las cimentaciones del túnel de conducción.

Una vez finalizado el archivo geométrico generado en AutoCad 3D se exportará el archivo en extensión de para solido con el fin de que pueda ser leído en el software de diseño geométrico propio de Ansys inc.

En el módulo geométrico de Ansys llamado Design Modeler se procederá a generar un modelo. El modelo procesado en Ansys hace referencia a la última calibración de la geometría donde se tendrán diferentes consideraciones puesto que esta no debe ser necesariamente exacta al diseño geométrico total. El modelo geométrico tridimensional en DesignModeler procesado del presente proyecto se muestra en la **Figura 3.16**.

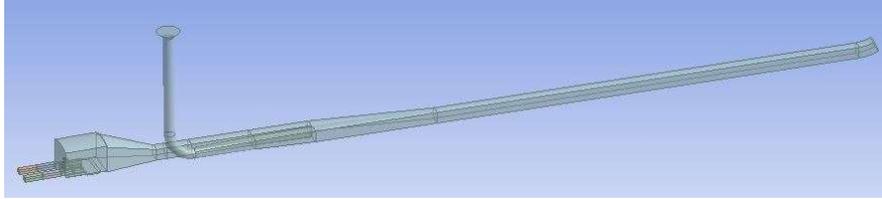


Fig. 3.16. Modelo geométrico tridimensional en DesignModeler (Ansys)

Las consideraciones especiales son referentes a la teoría de elementos finitos, en el sentido de que se buscará la simplicidad del modelo con el objetivo de ajustar la teoría del uso de los métodos FEM a las geometrías complicadas como la presente. Como ejemplo directo se puede observar que las pozas de control son suprimidas como volumen dibujado, los efectos de esta se reflejarán en presiones en sus respectivos volúmenes de control como se aprecia en la **Figura 3.17**.

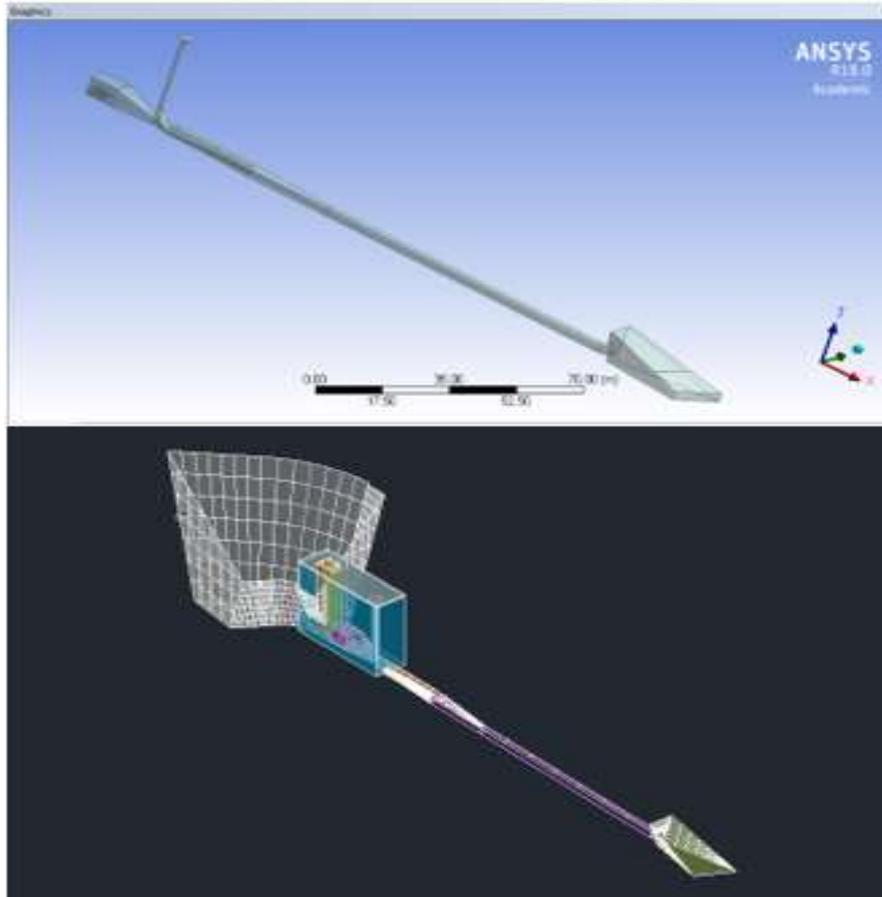


Fig. 3.17. Comparación entre diseño geométrico y representación en Ansys

Similar característica se presenta en las entradas de agua, las cuales serán ingresadas al software mediante cambios de material y velocidades plasmadas en la **Figura 3.18**.

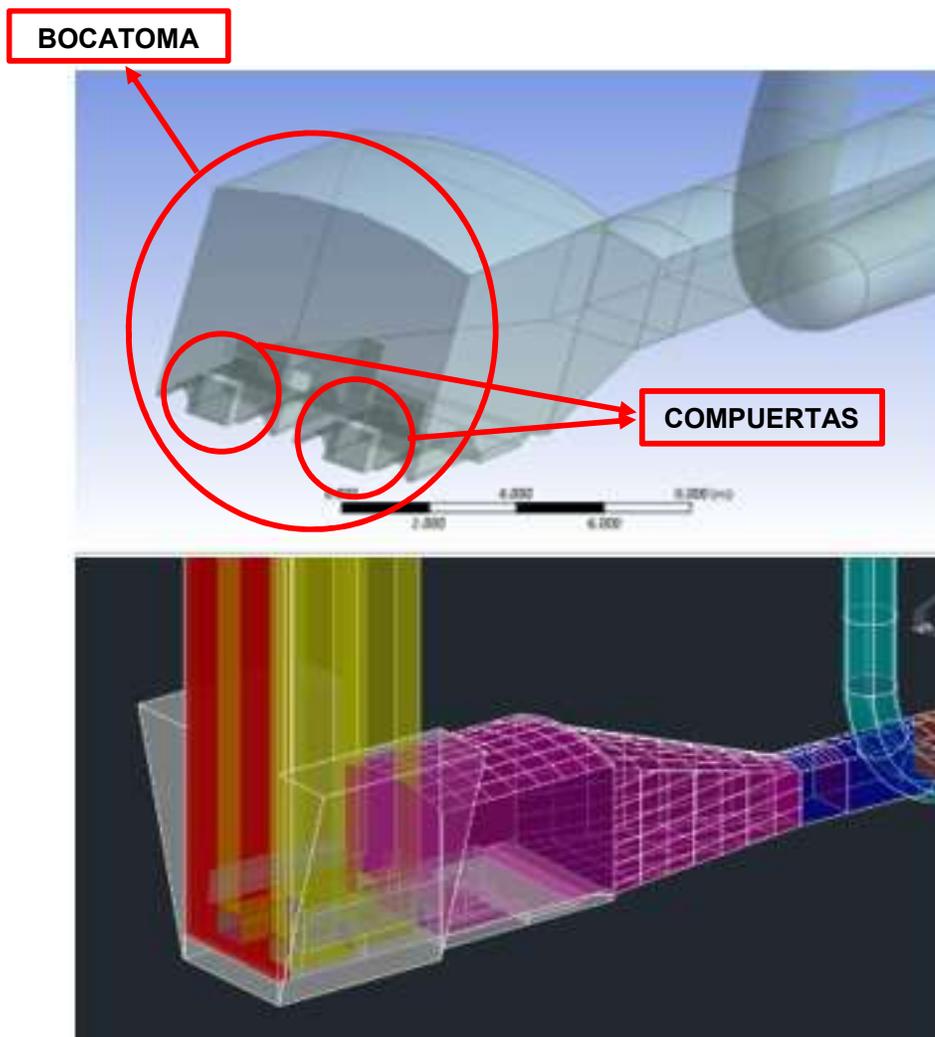


Fig. 3.18. Comparación entre diseño geométrico y representación en Ansys

3.5 Análisis unidimensional de las estructuras hidráulicas SIN ANSYS (con metodología USBR)

Para el análisis unidimensional se considerará la hipótesis de que el sentido del flujo es único y paralelo al eje del recorrido. Los valores de las velocidades serán consideradas uniformes y no variarán de magnitud a lo largo del ancho y alto de la sección. En consecuencia, se desea analizar el comportamiento del fluido en especial en el límite con la estructura o terreno ya que se estima que en esas secciones se presentarán las condiciones más críticas. Cabe recalcar que se espera que los resultados sean similares al análisis bidimensional y tridimensional.

Por otro lado, para los alcances de la presente tesis se analizará únicamente el comportamiento del flujo en sus etapas permanentes y correspondientes a los niveles de avenidas máximas. El análisis en el tiempo entre dos condiciones permanentes no será analizado.

3.5.1 Análisis de la obra de toma

De acuerdo a la descripción de esta obra, se trata de un evento de interacción flujo – terreno en el primer tramo de la estructura, el cual es un canal. Al analizar las cotas de diseño especificadas en la memoria descriptiva, se observa que los niveles al inicio y al final del canal son los mismos, por lo cual al tratarse de un canal abierto a priori se espera que no exista movimiento alguno del flujo a través de este. Sin embargo, el fluido debe avanzar por el túnel de desvío al inducir las descargas abriendo las compuertas; para esos eventos sí existirá un movimiento en el fluido.

Puesto que se analizarán las condiciones de máximas avenidas, la velocidad predominante para este tramo de la obra de toma será la correspondiente al caudal descargado por el túnel del desvío y/o con la operación del aliviadero dependiendo del nivel de avenidas máximas a analizar.

En primer lugar, se observa la geometría con la interacción del fluido.

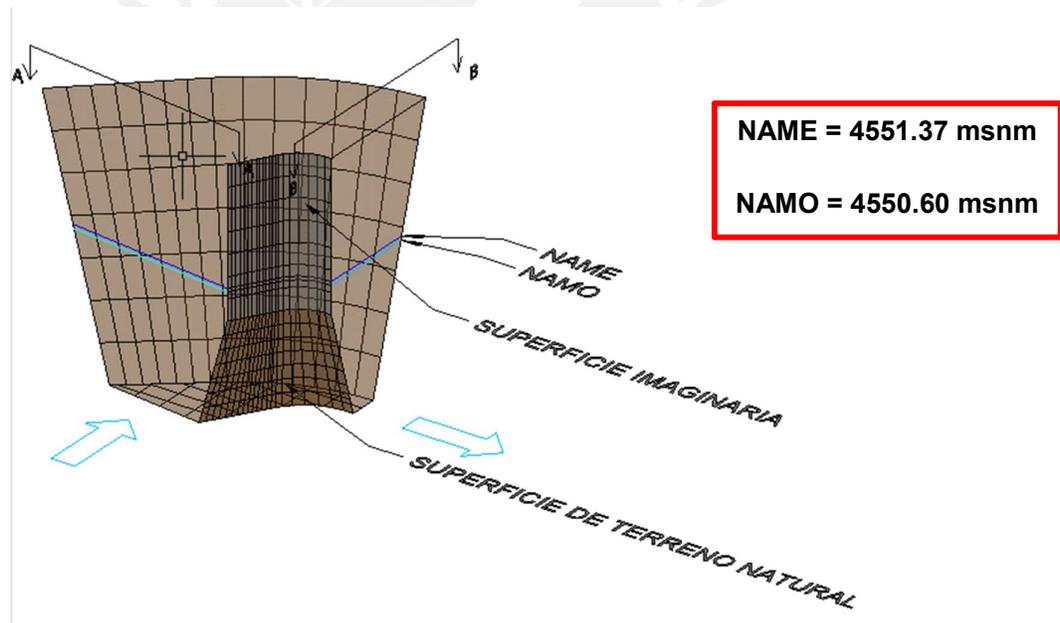


Fig. 3.19. Geometría Canal de Toma

En la **Figura 3.19** se puede observar una vista tridimensional del canal a desvío. En esta se precisan los niveles de agua de del diseño NAME y NAMO. Asimismo, se denotan dos secciones críticas A-A y B-B que serán las secciones a analizar en el método de análisis unidimensional y presentadas en las **Figuras 3.20 y 3.21**.

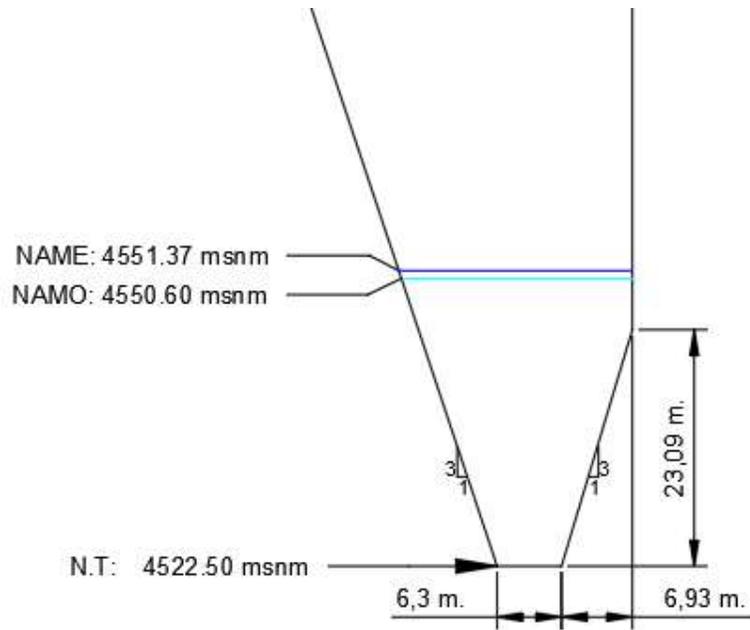


Fig. 3.20. Sección A – A del canal de toma

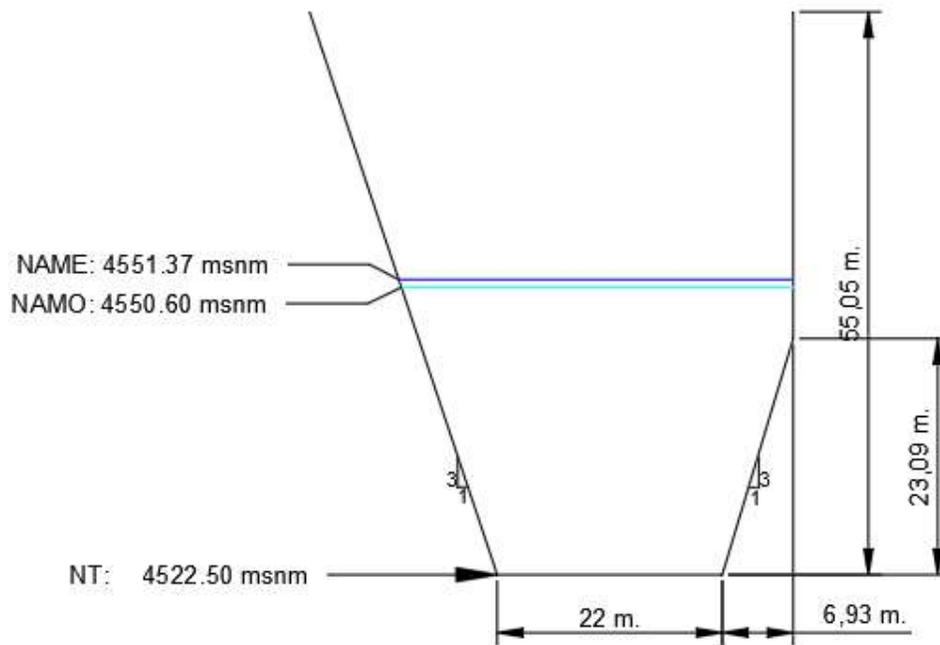


Fig. 3.21. Sección B – B del canal de toma

Cabe mencionar que el canal de desvío como estructura solo abarca la superficie de terreno natural. La superficie nombrada como imaginaria se refiere a una extensión del terreno natural que se utilizará para completar la superficie del canal de manera que el espejo de agua toque todas las aristas del mismo. Se utiliza esta superficie auxiliar

debido a que el área perimetral mojada del mismo es una sección de un tramo del volumen inundado y no delimita en su proximidad con terreno del canal. Este volumen se encuentra flanqueado directamente por las laderas de terreno irregular en un lugar no intervenido.

De acuerdo a la **Figura 3.20**, las secciones especiales y a las hipótesis de flujo permanente indicadas previamente, el análisis para el nivel de aguas máximas ordinarias será presentado a continuación.

Primero, de acuerdo a la memoria de cálculo se sabe que el caudal de descarga correspondiente al Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO) es de 81.9 m³/s. En este nivel, se presenta un tirante de 28.1 m.

En esta sección para un tirante de 28.1 m se obtendrá un área mojada del terreno analizado de 668 m² en la parte trapezoidal inicial hasta 23.09 m. A continuación, se asumirá que la mitad del área mojada de la sección superior será tomada por el terreno analizado y la otra no. En tal sentido, en ese tramo se tendrá un área mojada de 70.32 m². Finalmente se analizará con un área de 738.32 m².

A partir de los datos previos se tiene lo siguiente.

$$81.9 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 738.32 [m^2] * v$$

$$v = 0.111 \frac{m}{s}$$

Entonces, con el diseño se espera un flujo a velocidad de 0.111 m/s a un nivel de aguas máximo ordinario. Como se mencionó previamente, para el análisis se considerará que la velocidad del flujo no variará con la altura. Así, se tomará la velocidad media como uniforme en toda la sección para cada partícula de agua.

Para el segundo tramo de acuerdo al diseño se cuenta con una estructura conformada por 2 naves que estarán parcialmente sumergidas como se puede ver en las **Figuras 3.22 y 3.23**. Estas se comportarán de acuerdo a diferentes condiciones de operación dependiendo del nivel de apertura de las compuertas y lo requerido por la hidroeléctrica.

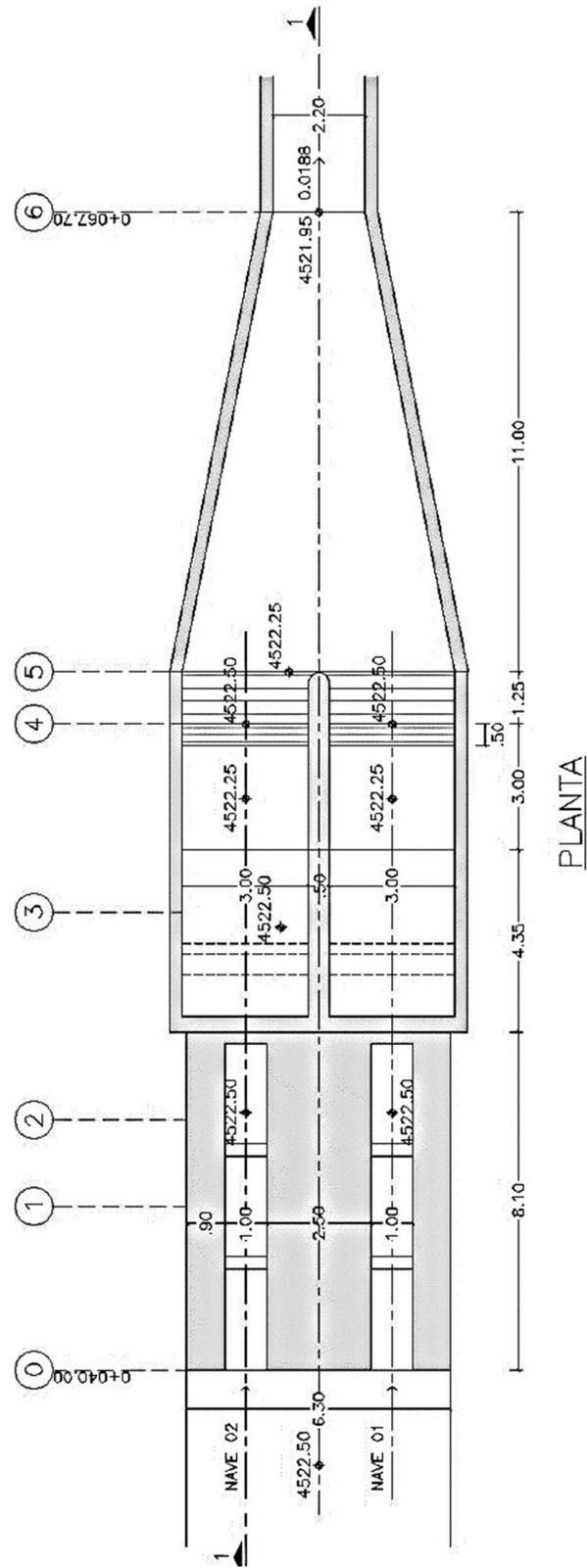


Fig. 3.22. Vista de planta del tunel de toma

Fuente: Memoria de cálculo de obras conexas de la presa Ninahuisa

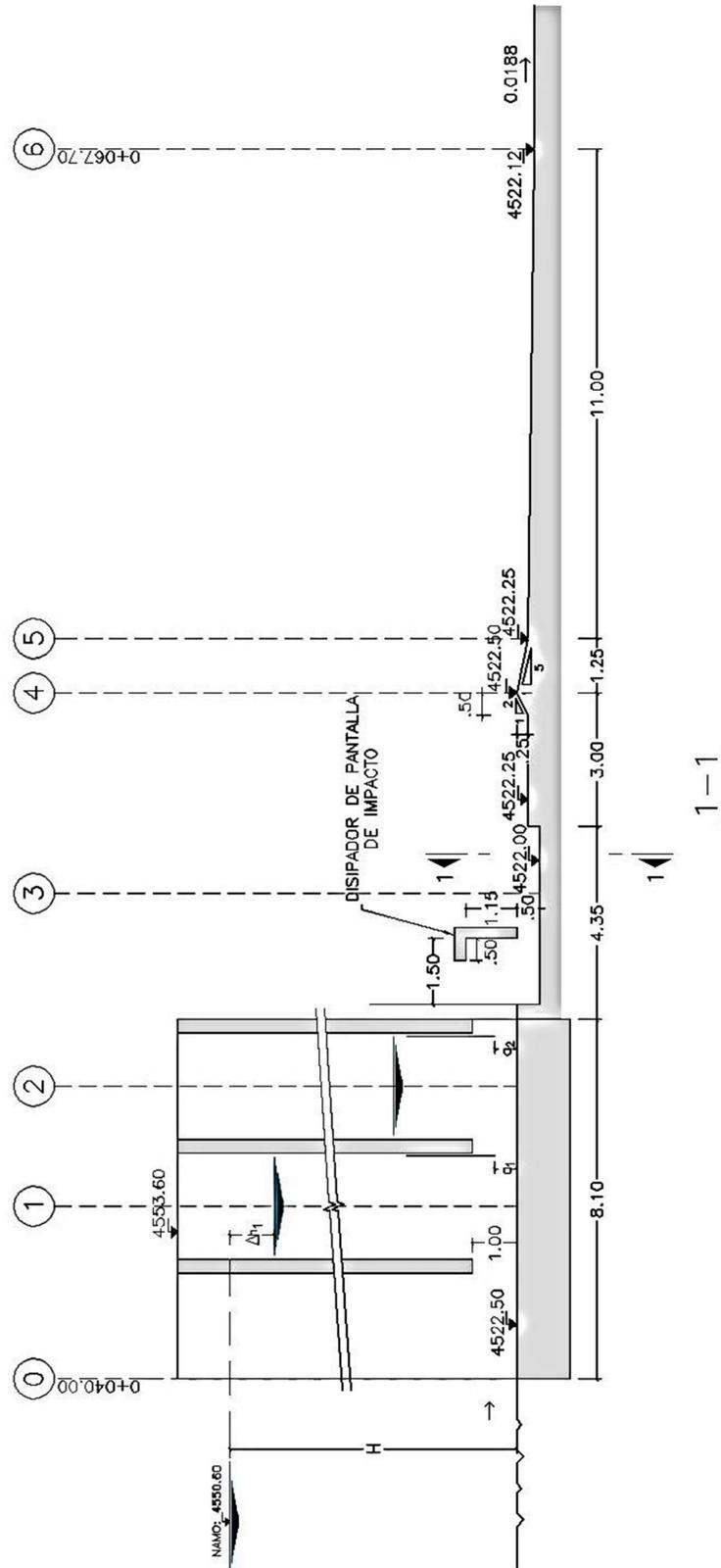


Fig. 3.23. Vista de perfil del túnel de toma

Fuente: Memoria de cálculo de obras conexas de la presa Ninahuisa

Para acotar el alcance del presente proyecto, solo se analizarán algunos escenarios mencionados a continuación:

Época de sequía donde la central requiera todo el potencial de la presa. Este escenario hace referencia a un nivel de abertura de compuerta de tal manera que se proporcioné una descarga correspondiente al valor de diseño de la estructura el cual es $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en total, es decir $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ por nave. Para cumplir dicha condición las compuertas deberán abrirse 0.1 m . de acuerdo al siguiente cálculo.

$$v_{postcompuerta} = 0.64 * (2 * 9.81 * 28.1)^{\frac{1}{2}} = 15.0 \frac{m}{s}$$

$$1.5 \frac{m^3}{s} = 15 * y * 1$$

$$y = 0.1 \text{ m}$$

Se analizará en un ciclo hidrológico máximo regular es decir existirá un nivel de aguas máximo ordinario.

De acuerdo al párrafo anterior se tendrá un caudal $Q=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ dividido en dos naves que por su simetría tomarán la mitad cada uno. Entonces, analizando una nave se tienen dos áreas analizables, el área de la nave y el área de la transición en la compuerta.

$$A_{nave} = 28.1 * 1.0 = 28.1 \text{ m}^2$$

$$a_{compuerta} = 1.0 * 0.1 = 0.1 \text{ m}^2$$

$$V_{nave} = \frac{1.5}{28.1} = 0.0533 \frac{m}{s}$$

$$V_{compuerta} = \frac{1.5}{0.1} = 15 \frac{m}{s}$$

Mantenimiento de emergencia en alguna nave. Al igual que en el anterior punto este escenario hace referencia a las compuertas abiertas a 0.1 m . Sin embargo se considerará solo la operación de una nave para un evento de emergencia en el que el nivel sea máximo ordinario por lo tanto, la apertura de una nave será 0.2 m .

Para este escenario el caudal $Q=3 \text{ m}^3/\text{s}$ será tomado solo por una nave. Entonces, analizando la nave operativa se tienen dos áreas analizables, el área de la nave y el área de la transición en la compuerta.

$$A_{nave} = 28.1 * 1.0 = 28.1 \text{ m}^2$$

$$a_{\text{compuerta}} = 1.0 * 0.1 = 0.1 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{nave}} = \frac{1.5}{28.1} = 0.0533 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_{\text{compuerta}} = \frac{1.5}{0.1} = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Operación parcial de las naves. A diferencia de los anteriores puntos este escenario hace referencia a las compuertas abiertas parcialmente. Debido a que la hidroeléctrica puede requerir una menor cantidad de caudal por un evento de sobrecarga en el río de descarga, se analizarán las compuertas abiertas a 0.05m cada una.

Para este escenario el caudal será de $Q=0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ será tomado solo por dos naves. Al igual que para el primer punto, el caudal será repartido simétricamente. Analizando una de las dos naves se tienen dos áreas analizables, el área de la nave y el área de la transición en la compuerta.

$$A_{\text{nave}} = 28.1 * 1.0 = 28.1 \text{ m}^2$$

$$a_{\text{compuerta}} = 1.0 * 0.05 = 0.05 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{nave}} = \frac{0.75}{28.1} = 0.0267 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_{\text{compuerta}} = \frac{0.75}{0.05} = 15.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para un evento de avenidas máximas extraordinarias durante un periodo de embalse de la presa las obras de toma no variarán su operación. La estructura encargada de eliminar el caudal excedente que proviene de las avenidas extraordinarias es el aliviadero de excedencias.

3.5.2 Análisis de aliviadero de excedencias

Para el caso de esta estructura se realizará el análisis pertinente únicamente para el nivel de aguas máximas extraordinarias, esto se debe a que el objetivo de esta estructura es evacuar los niveles superiores al máximo ordinario.

Por otro lado, al tratarse de una estructura tipo Morning Glory, esta se encuentra diseñada con un nivel de cresta superior coincidente con el Nivel de Aguas Máximo Ordinario como se puede observar en la **Figura 3.24**, de tal manera que no tomará caudal correspondiente a un nivel menor o igual que ese.

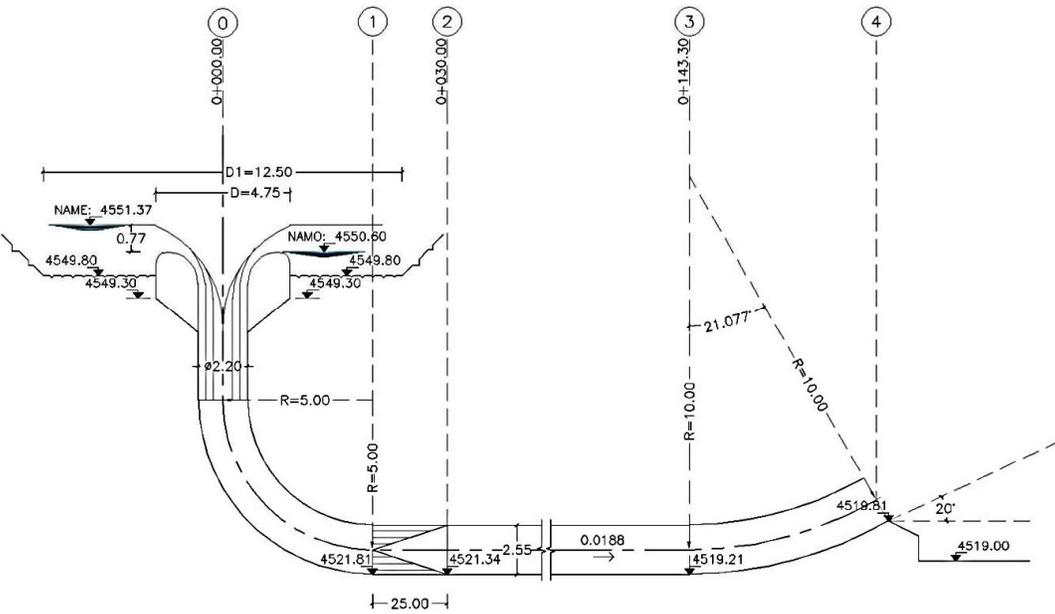


Fig. 3.24. Esquema perfil longitudinal

Memoria de cálculo de obras conexas de la presa Ninahuisa

De acuerdo al estudio hidrológico el caudal máximo de ingreso de las estructuras en general será de 112 m³/s y el caudal que deberá evacuar el aliviadero corresponde a 21.34 m³/s. Asimismo, el tirante correspondiente al aliviadero será de 0.77m.

De acuerdo a la memoria de cálculo de la presente estructura, esta se diseñó basándose en criterios definidos por la United States Bureau of Reclamation, de donde se tomaron criterios de diseño. El principal de estos enuncia que el diseño del aliviadero para el nivel de aguas máximo ordinario deberá asegurar un comportamiento tipo tubo u orificio de control. El esquema de este tipo de comportamiento se presenta en la **Figura 3.25**.

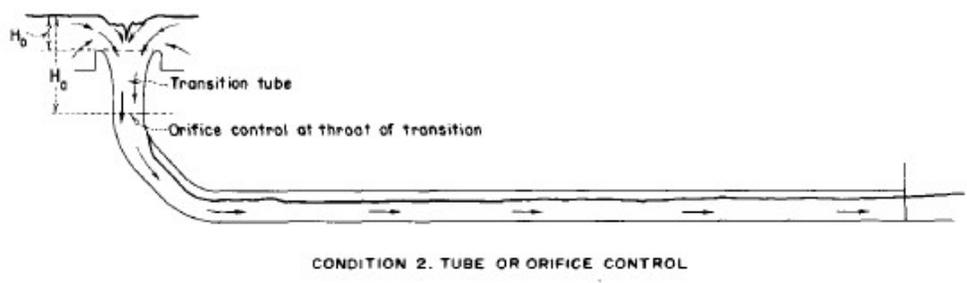


Fig. 3.25. Comportamiento tipo tubo u orificio de control

Memoria de cálculo de obras conexas de la presa Ninahuisa

Consiguiente a lo analizado en el párrafo anterior, existen dos secciones importantes a evaluar. La primera que está ubicada en la primera parte de la estructura la cual se encuentra llena en su totalidad y el fluido se encuentra en caída libre. La segunda que se encuentra en la parte inferior de la estructura y funciona como un canal circular a presión puesto que de acuerdo al diseño para un evento con tiempo de retorno de 10000 años no debería llenarse en su totalidad.

Como se mencionó previamente el tramo vertical tendrá un comportamiento de orificio puesto que se encuentra totalmente lleno.

$$21.34 = 2.2^2 * \frac{\pi}{4} * v$$

$$v = 5.61 \frac{m}{s}$$

Para el caso de la segunda parte de la estructura se tiene un canal circular a presión con un tirante de agua que fue calculado en la memoria de cálculo el cual es 0.63m. El esquema de esta configuración hidráulica se puede observar en la **Figura 3.26** y donde el tirante de agua se encuentra denominado como d1.

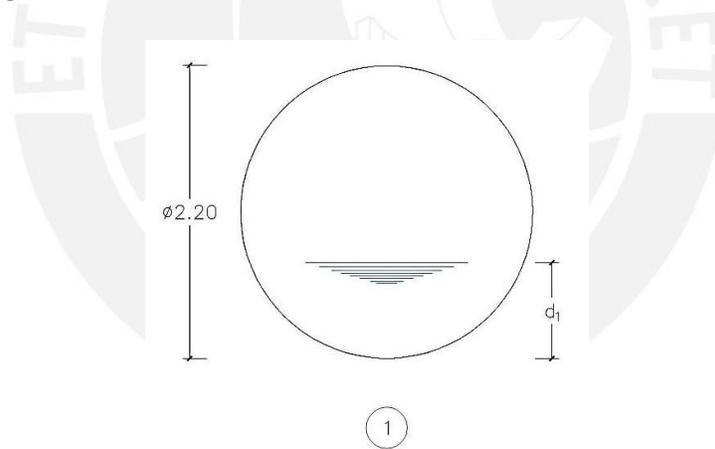


Fig. 3.26. Esquema hidráulico del segundo tramo del aliviadero

Memoria de cálculo de obras conexas de la presa Ninahuisa

De la **Figura 3.26** se tiene que el área mojada es de 3.142m²

$$21.34 = 3.142 * v$$

$$v = 6.79 \frac{m}{s}$$

3.5.3 Análisis de tramos críticos del túnel de desvío - aliviadero.

Por último, se analizarán tramos críticos del túnel de desvío – aliviadero. Para el caso de esta estructura se realizará el análisis pertinente únicamente para el nivel de aguas máximas extraordinarias, esto se debe a que ese es el escenario más crítico.

En las **Figuras 3.27 y 3.28** se pueden observar las secciones a analizar donde se desea a priori un análisis del comportamiento del fluido. La geometría de dichas secciones proviene de la concepción geométrica del proyecto y la variación radica en que el primero de ellos abarca la unión de dos túneles que convergen a uno solo el cual está al final y varía suavemente hasta ese resultado.

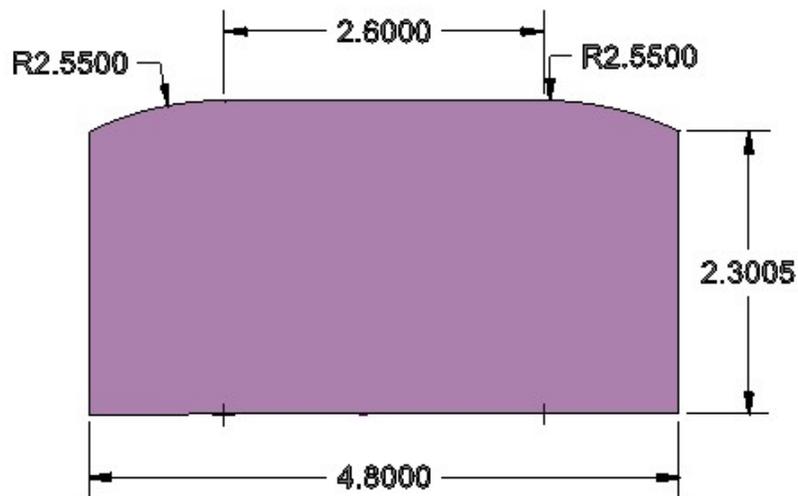


Fig. 3.27. Primera sección importante para el análisis (unidades en metros)

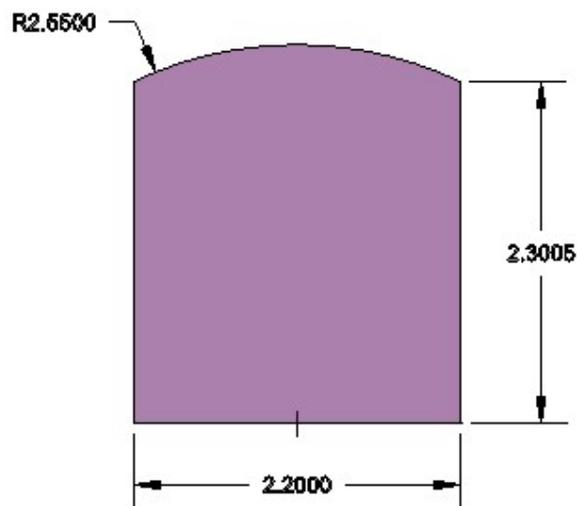


Fig. 3.28. Segunda sección importante para el análisis (unidades en metros)

Ya que el presente análisis se hará para un nivel de avenidas máximas extraordinarias es lógico inferir que las secciones del túnel estarán totalmente llenas. En ese sentido se analizarán las secciones con la ecuación de continuidad. El caudal con el que se analizarán será el tomado por las estructuras de toma ($3.0 \text{ m}^3/\text{s}$) más el tomado por el aliviadero de excedencias ($21.34 \text{ m}^3/\text{s}$).

Como datos geométricos se obtienen las áreas para la primera sección de 12.08 m^2 y la segunda sección de 5.43 m^2 por lo que se tiene lo siguiente:

$$\textit{Para la 1ra sección: } 24.34 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 12.08 * v$$

$$v = 2.015 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\textit{Para la 2da sección: } 24.34 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 5.43 * v$$

$$v = 4.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.6 Análisis tridimensional de las estructuras hidráulicas con ANSYS-CFD

En esta sección se analizarán las estructuras ya presentadas mediante métodos tridimensionales y previamente analizadas con hipótesis unidimensionales. Los métodos tridimensionales o modelos de elementos finitos se desarrollan mediante un flujo de tres etapas.

En primer lugar, se desarrolla el pre procesamiento, el cual engloba las acciones de modelación geométrica, generación de grilla e introducción de condiciones iniciales. Esta primera etapa es de interacción entre el usuario y el software por lo que será una etapa de modelamiento y aplicación de las herramientas del software para interpretar de la mejor manera posible el escenario real.

En segundo lugar, se desarrolla el procesamiento, esta etapa es de carácter transitorio para el usuario puesto que es un proceso de computo de las ecuaciones definidas en el módulo utilizado de acuerdo al grado de convergencia y a la fineza de las condiciones iniciales. Esta etapa terminará cuando se alcance la convergencia deseada.

En tercer y último lugar, se desarrolla el post procesamiento, en esta etapa se presentarán los resultados obtenidos en el paso previo de acuerdo a las conveniencias requeridas.

Las hipótesis tridimensionales enuncian que las propiedades de las partículas de agua que fluyen sobre el domino en cuestión se modifican a través de todos sus ejes. Es decir, se tratan de flujos reales calificados como no permanentes y no uniformes. Para el desarrollo matemático de estos fenómenos que siempre son muy complejos se subdividen los dominios en pequeños volúmenes de control y las computadoras desarrollan los procesos matemáticos hasta llegar a una convergencia.

Para el objetivo descrito previamente se deberá exportar la geometría tridimensional diseñada inicialmente en el entorno CAD conocido como AutoCad hacia un formato admisible por los sub softwares de diseño CAD del software ANSYS. La extensión de preferencia es la conocida como archivos parasolidos o “.x_b”

Posteriormente se calibrará la geometría de tal manera que se pueda analizar con las herramientas del software ANSYS, es decir se verificarán los trazos. Se evitarán duplicidades y se revisará con el diseño bidimensional proporcionado por la empresa E.G.E. San Gabán S.A. En la **Figura 3.29** se resumirá en una comparación el diseño inicial y el final.

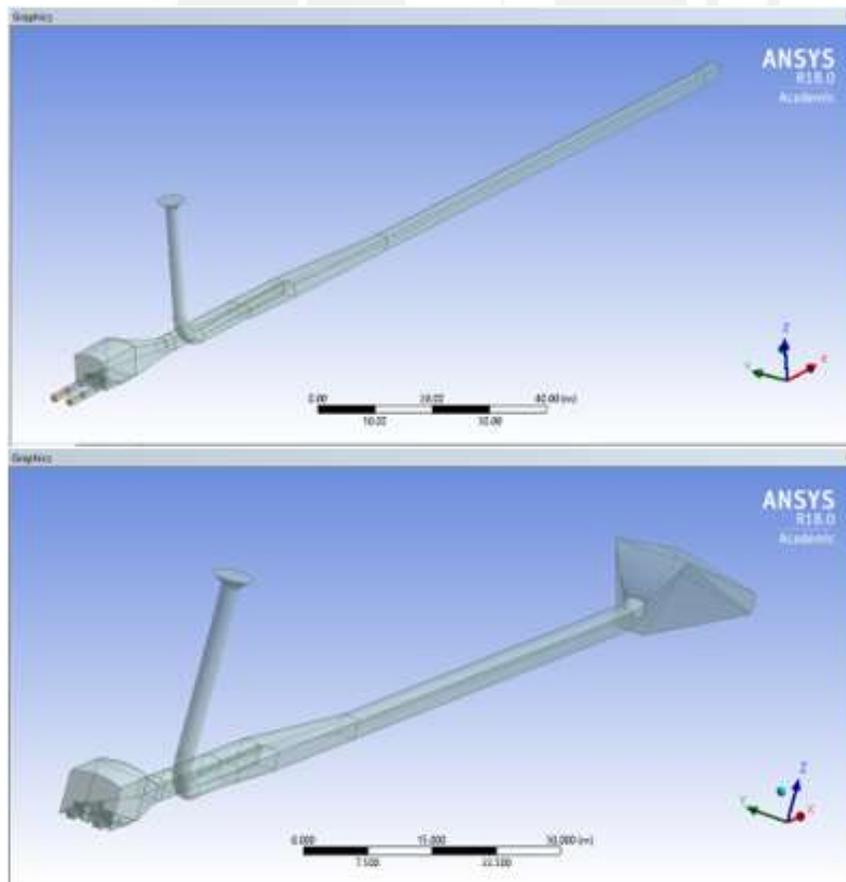


Fig. 3.29. Comparación entre el diseño geométrico inicial (parte superior) y el definitivo (parte inferior)

Una vez sincerado el esquema geométrico tridimensional, se procederá con el grillado. El proceso de grillado o mallado se da en una componente del software ANSYS llamado “Mesh” el cual se encontrará en el módulo del mismo nombre.

La generación de malla o grillado es el proceso de división de un gran dominio en pequeños sub dominios o volúmenes de control de menor tamaño para poder realizar los cálculos sobre estos.

En primer lugar, se tomó la geometría final y se utilizó la herramienta predeterminada de “Generate Mesh” esta herramienta ayuda a realizar un primer mallado muy “grosso” e inexacto pero que servirá de guía para poder afinar dicha grilla.

En la **Figura 3.30** se observa la estructura mallada automáticamente con la herramienta anterior.

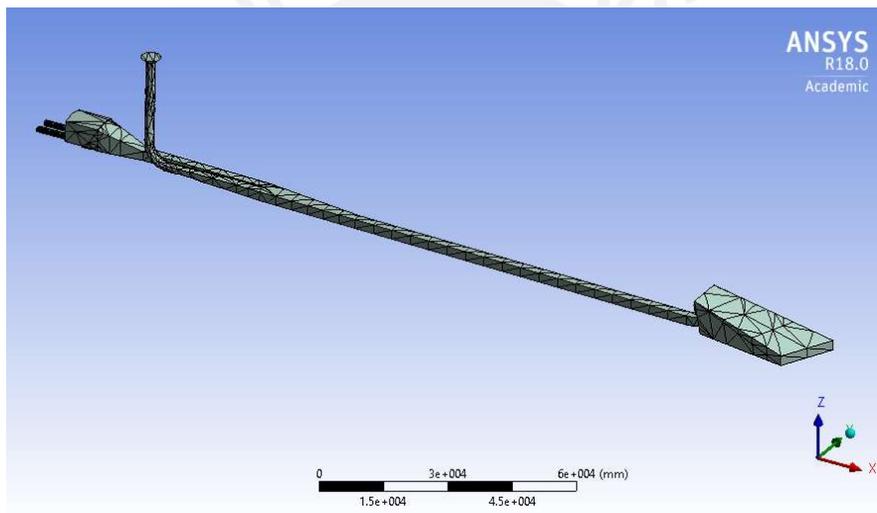


Fig. 3.30. Mallado inicial de las estructuras hidráulicas

A continuación, se prosigue con el refinado de la malla, elemento a elemento. En este sentido se utilizarán las herramientas “element sizing”, “inflation”, “sphere influence”, “refinement” y se definieron secciones en las que se dividieron en un número definido de divisiones para lograr una malla más fina y exacta con la cual se pueda asegurar una excelente precisión de datos.

Para lograr cuantificar la calidad de una malla, el software ANSYS desarrolló parámetros cuantificables que ayudan a determinar cuándo una grilla puede ser calificada como buena. Estos parámetros de calidad son la ortogonalidad, la relación largo/ancho, la angularidad, cantidad de elementos en los procesos de atenuación, diferencia entre

longitud de elementos adyacentes, etc. Asimismo, existen herramientas como “Relevance” y “Relevance Center” que optimizan el proceso del grillado.

En las **Figuras 3.31, 3.32, 3.33** se podrán encontrar el mallado en cada estructura analizada en el presente proyecto. Adicionalmente en las **Figuras 3.34, 3.35, 3.36** se muestran los parámetros de calidad del mallado realizado. El primer parámetro de calidad representa una evaluación estadística dimensional de los elementos que conforman el mallado. El segundo parámetro de calidad se trata de la oblicuidad o “skewness” que define cuan oblicuo es un elemento comparando el ángulo de un elemento con el resto de los elementos vecinos, sacando así un ratio de oblicuidad. Y el tercer parámetro de calidad representa la ortogonalidad del elemento y verifica lo que su propio nombre indica haciendo un cómputo entre los vectores normales de un elemento y vectores que unen los centroides del elemento con elementos adyacentes. Se analizarán las dimensiones mínimas, máximas y promedios, así como la desviación estándar del conjunto de elementos y se presentará una tabla con estos datos en la **Tabla 3.1**.

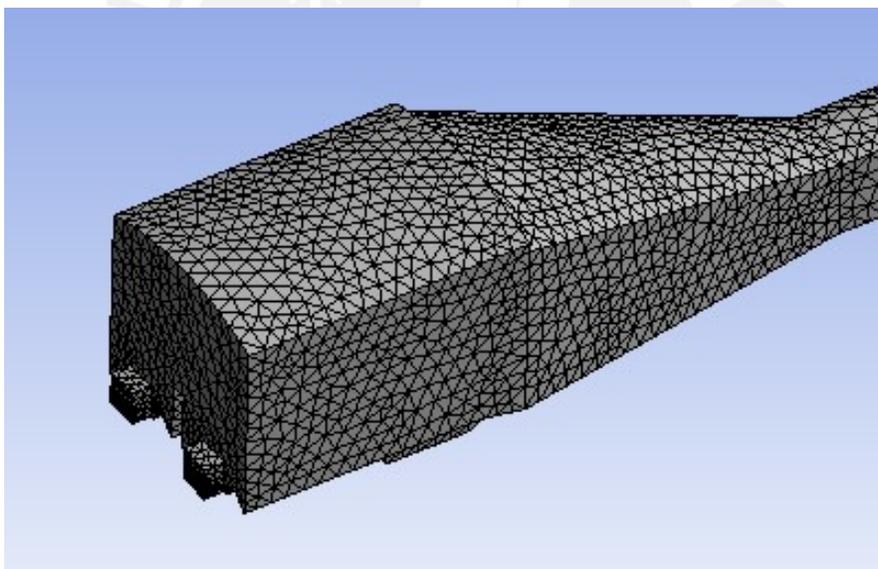


Fig. 3.31. Mallado fino de la obra de toma

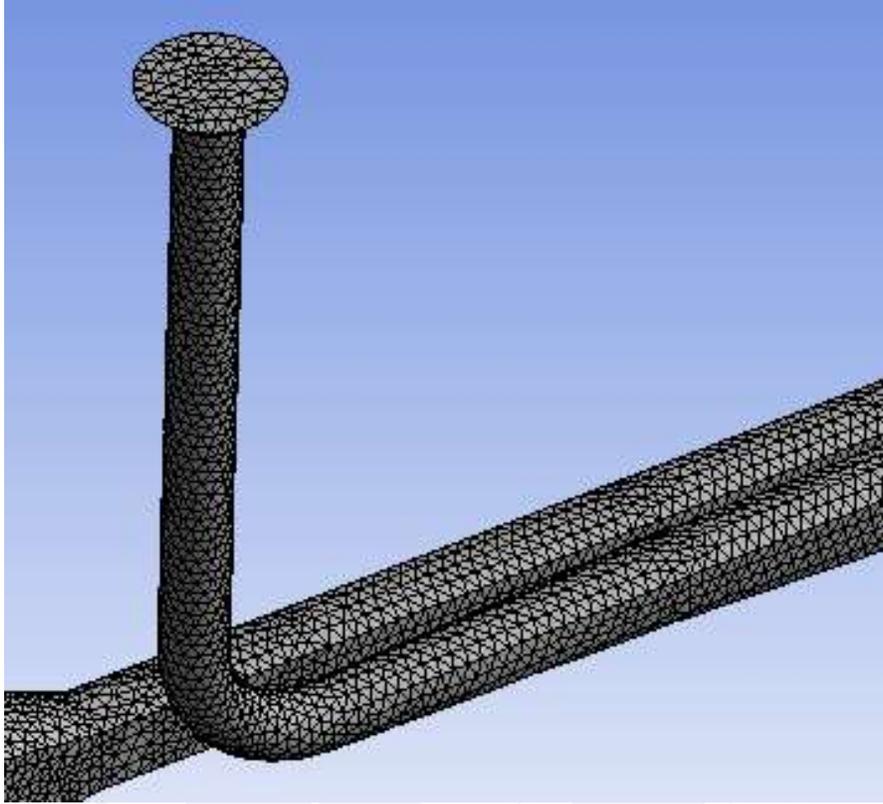


Fig. 3.32. Mallado fino de la estructura de aliviadero Morning Glory

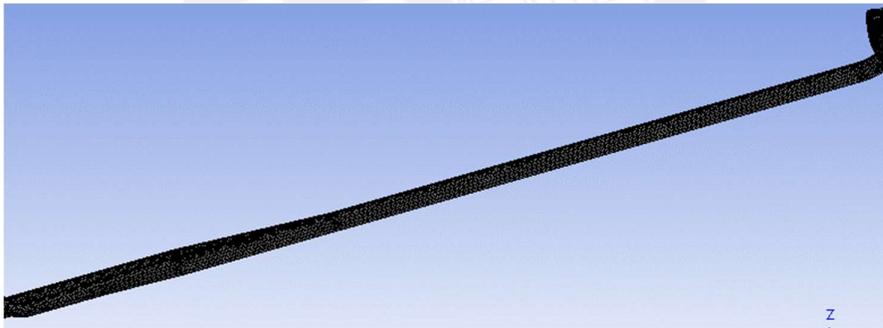


Fig. 3.33. Mallado fino del tramo de túnel a presión analizado

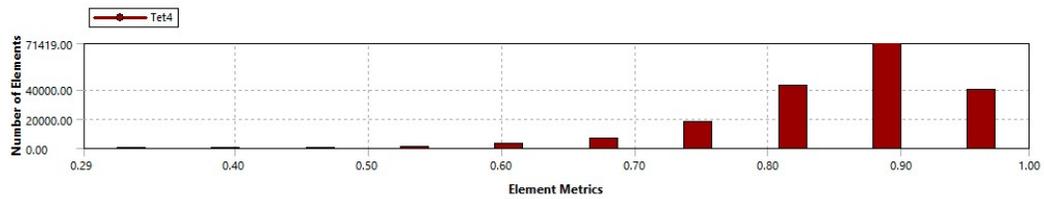


Fig. 3.34. Parámetro de calidad 1, evaluación estadística de las dimensiones del mallado

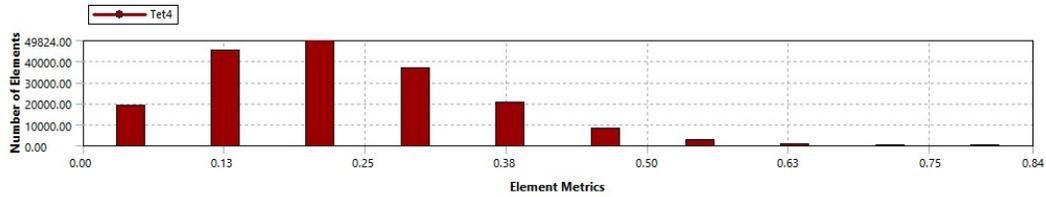


Fig. 3.35. Parámetro de calidad 2, skewness u oblicuidad

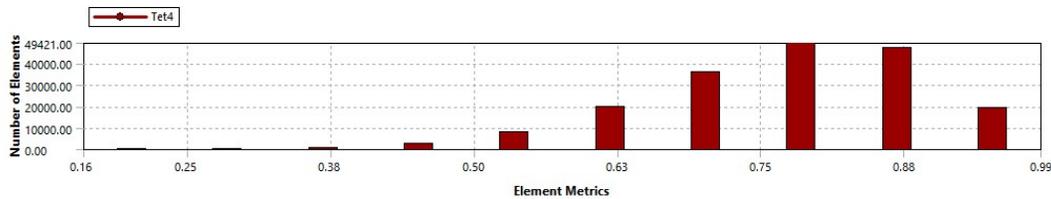


Fig. 3.36. Parámetro de calidad 3, orthogonal quality u ortogonalidad

Tabla 3.1.

	Parámetro de Calidad No.		
	1	2	3
	Element Quality	Skewness	Orthogonal Quality
Valor Mínimo	0.25257	5.96E-04	0.28619
Valor Máximo	0.99965	0.84121	0.99568
Promedio	0.83783	0.22533	0.85926
Desviación Estandar	9.31E-02	0.11599	8.15E-04

De acuerdo a los resultados previamente presentados se puede calificar la malla generada como una malla fina y apta para los propósitos de la presente tesis.

A continuación, se procederá a ingresar los datos de entrada que son obtenidos de los distintos estudios compartidos por la empresa de generación de energía hidroeléctrica San Gabán S.A.

En esta parte del pre procesamiento se procede a ingresar las condiciones iniciales con las que empezará la modelación. En la hoja de trabajo de ANSYS se puede encontrar esta etapa en el módulo CFX como "Setup". En resumen, se refiere sobre todo a las condiciones de entrada, transición y salida que tiene inicialmente el fluido en cuanto a presión, velocidad, etc. Estos parámetros iniciales dependen en gran medida del criterio., del modelo esquematizado y de las hipótesis iniciales que se le den al contexto analizado.

En el presente proyecto las condiciones iniciales en cuanto a la entrada del fluido deben ser el de presión proveniente de la columna de agua hacia las primeras compuertas y pozas. Sin embargo, esta presión no es constante ya que variará significativamente en el metro de altura de la compuerta y se generará un perfil de presiones que incluso variará por las velocidades. Por lo tanto, se optó por ingresar el caudal de diseño optado en la presente estructura, el software ANSYS no da la opción de ingresar un caudal de volumen, pero si un caudal de masa, por lo que este último es fácilmente calculable a partir del caudal volumétrico. En la **Figura 3.37** se aprecia que las secciones señaladas tienen un caudal de masa inicial predeterminado de acuerdo a la condición de avenidas.

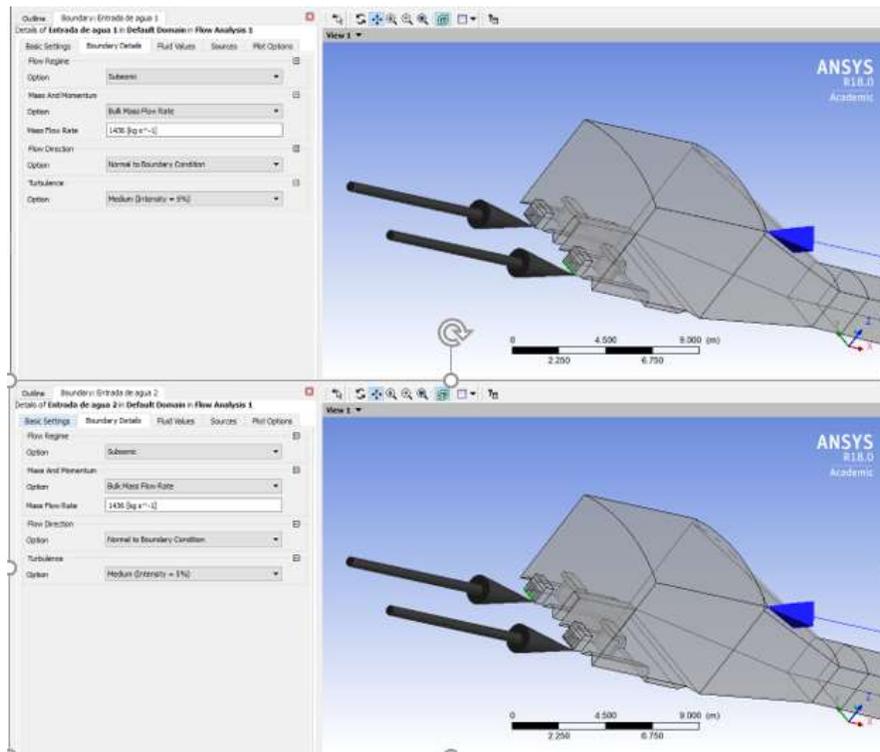


Fig. 3.37. Condiciones iniciales del caudal de masa en la entrada.

En las **Figuras 3.38, 3.39 y 3.40** se presentará el seteador de las diferentes condiciones iniciales para la condición de NAMO en las estructuras. Se entiende que las obras que participarán en este análisis serán la obra de toma y los túneles de desvío, más no el aliviadero.

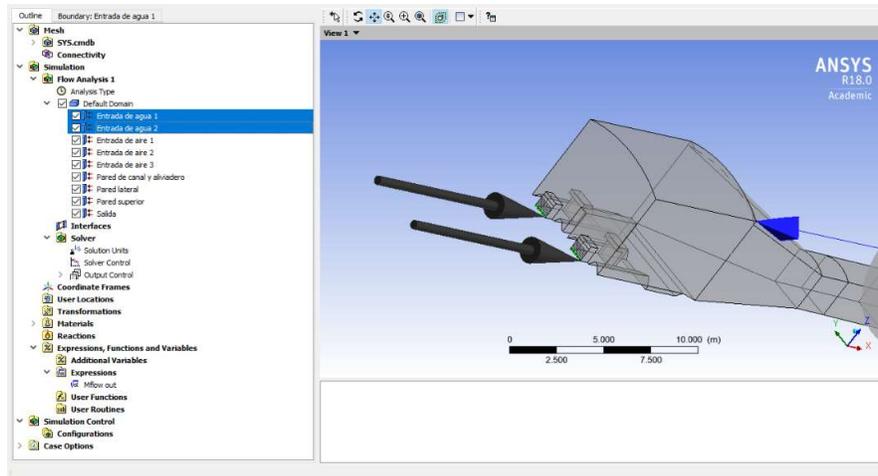


Fig. 3.38. Seteado de condiciones iniciales NAMO para escenario de abertura de 0.1m en compuertas. (escenario 1)

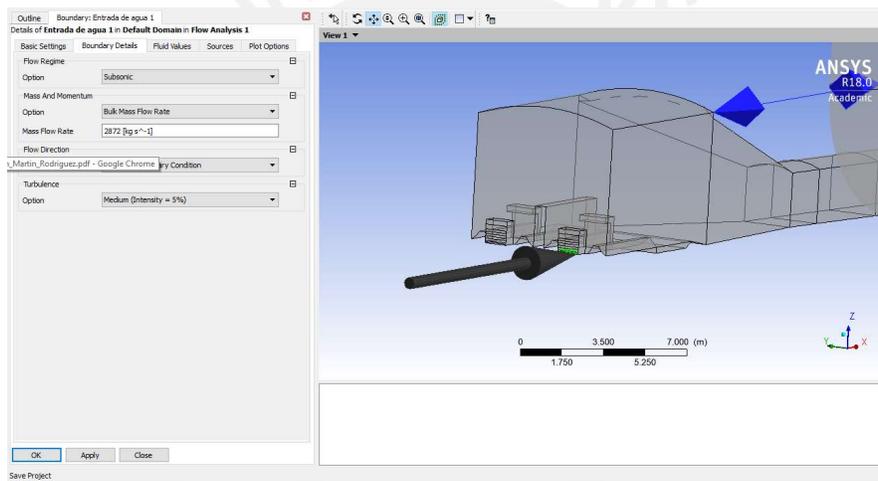


Fig. 3.39. Seteado de condiciones iniciales NAMO para escenario de mantenimiento, solo una nave operativa. (escenario 2)

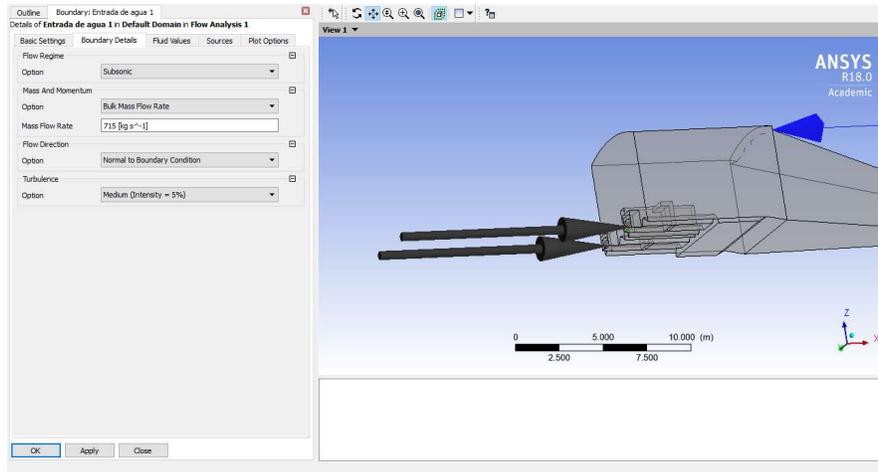


Fig. 3.40. Seteado de condiciones iniciales NAMO para escenario de operatividad parcial, apertura de compuertas a 0.05m (escenario 3)

De manera equivalente, en las **Figuras 3.41 y 3.42**, se presentará el seteado de las diferentes condiciones iniciales para la condición de NAME en las estructuras. Para este evento de avenidas extremas todas las estructuras tendrán flujo.

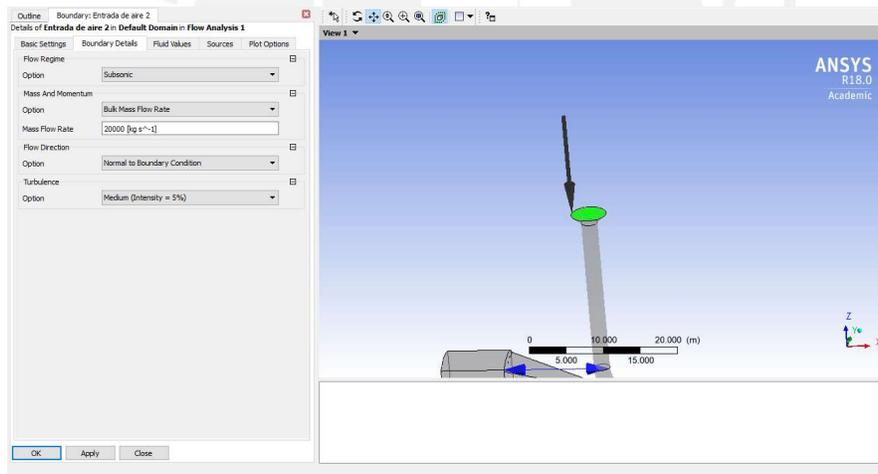


Fig. 3.41. Seteado de condiciones iniciales NAME para escenario de descarga de demasías. (escenario 4)

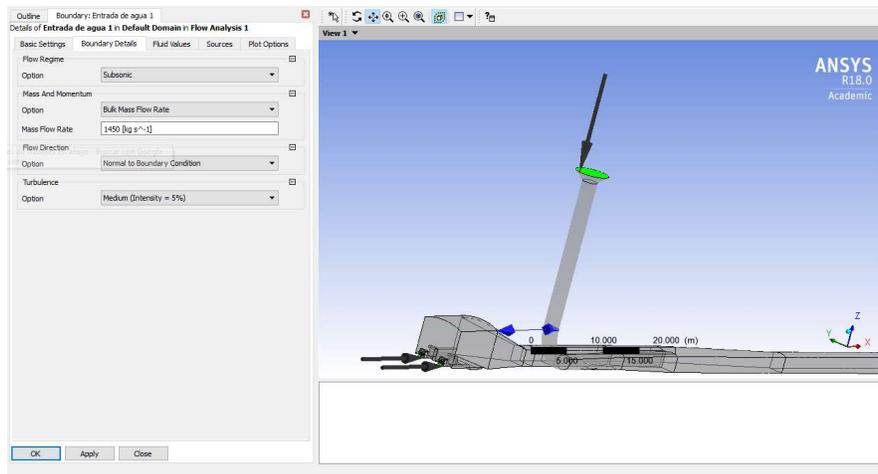


Fig. 3.42. Seteado de condiciones iniciales NAME para escenario de emergencia, descarga total.
(escenario 5)

Con todos los escenarios identificados se procederá a la etapa de procesamiento y por último a la etapa de post procesamiento.

La etapa de procesamiento está identificada en la hoja de trabajo de ANSYS dentro del módulo CFX como "Solution". Esta etapa como se comentó previamente es realizada netamente por el software ya que realiza los cálculos de las ecuaciones diferenciales de elemento en elemento iterando y buscando la convergencia deseada y seteada en el paso anterior.

En la **Figura 3.43** se aprecia el proceso de la etapa de procesamiento, el cual tarda proporcionalmente a la fineza de la malla generada previamente, la convergencia elegida y la capacidad de la computadora. En esta imagen se podrá observar la búsqueda de convergencia de resultados en la plataforma del procesamiento.

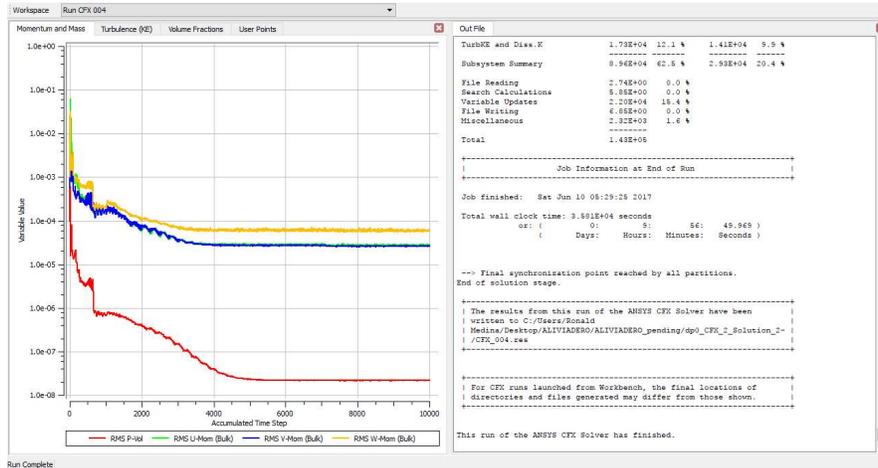


Fig. 3.43. Procesamiento del Software para un escenario

Finalmente, la etapa del post procesamiento o etapa de resultados se tratará en la siguiente sección de resultados del presente documento.

3.7 Análisis bidimensional de las estructuras hidráulicas

El presente proyecto se concibió de tal manera que se realice el análisis bidimensional, repitiendo el proceso del análisis tridimensional, pero trabajando únicamente una dirección de flujo en dos direcciones. Posteriormente se identificó que esta solución no era factible debido a que se tenía una geometría no simétrica.

En el transcurso del aprendizaje del software ANSYS se identificó la solución aquí presentada; que es posible presentar los resultados de manera bidimensional utilizando planos de corte longitudinales a los diferentes elementos analizados que representen los resultados de un análisis bidimensional como se puede observar en la sección 4.3.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS DE ANÁLISIS 1D, 2D Y 3D

4.1 Resultados del análisis tridimensional

En la etapa del post procesamiento o etapa de resultados es el proceso en el que se muestran los resultados de acuerdo al requerimiento. Esta etapa está identificada en la hoja de trabajo de ANSYS dentro del módulo CFX como "Results". En dicha fase se puede elegir entre diferentes opciones de acuerdo a lo que se quiera observar en los resultados. En las **Figuras 4.1 y 4.2** se pueden ver los resultados como vectores o como líneas de corriente. Así, también es posible observarlas de diferentes maneras y es posible obtener un reporte del programa en tablas.

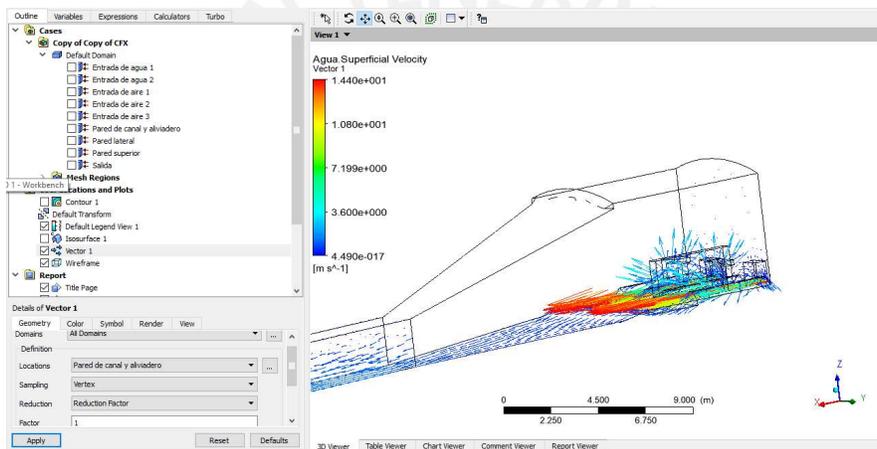


Fig. 4.1. Resultados de la variable velocidad en forma vectorial gráfica para análisis de un escenario (escala y unidades en la imagen)

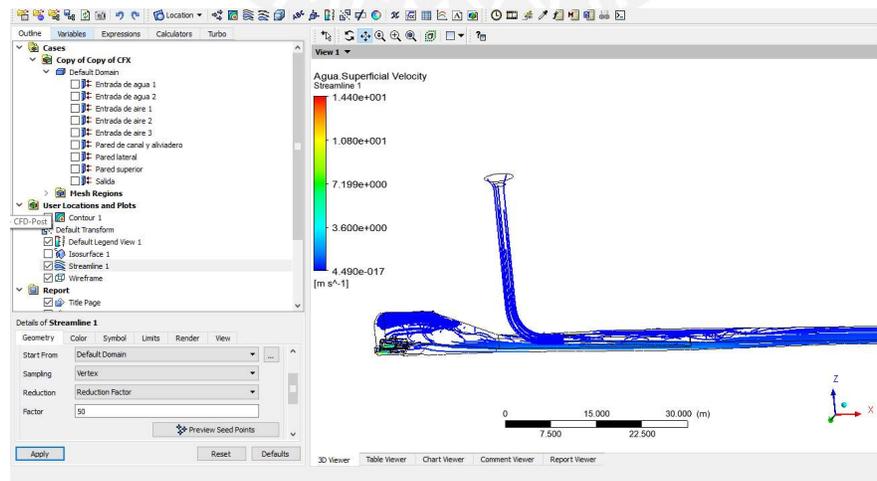


Fig. 4.2. Resultados de la variable velocidad en forma de líneas de corriente para análisis de un escenario (escala y unidades en la imagen)

Para los resultados de un análisis tridimensional, es posible tener resultados del movimiento de las partículas de agua en los 3 ejes cardinales, de este modo se puede tener un análisis del movimiento confiable para los 5 escenarios posibles. En las **Figuras 4.3 y 4.4** se tendrán los resultados del análisis para el escenario 1. En las **Figuras 4.5 y 4.6** se tendrán los resultados del análisis para el escenario 2 y en las **Figuras 4.7 y 4.8** se tendrán los resultados del análisis para el escenario 3, todos estos correspondientes a las 2 estructuras analizadas en distintas condiciones de operación y para el nivel de avenidas máximo ordinario (NAMO).

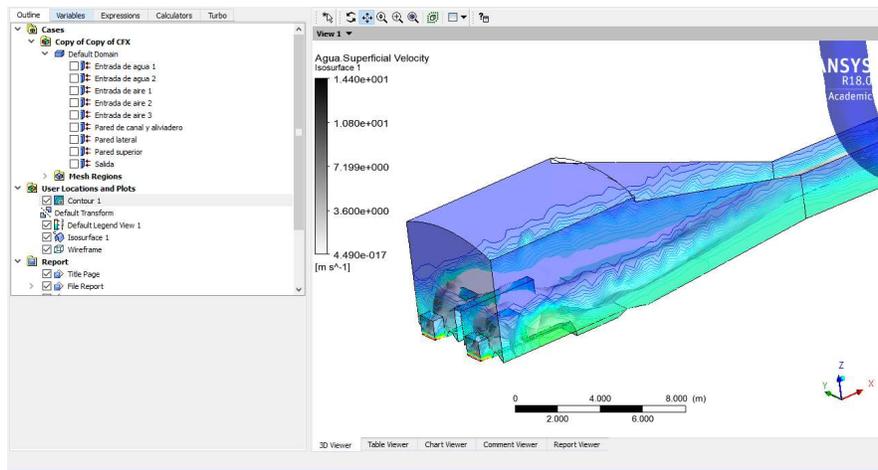


Fig. 4.3. Resultados de la variable velocidad en forma de capas superficiales del análisis 3D para el escenario 1 en las obras de toma (escala y unidades en la imagen)

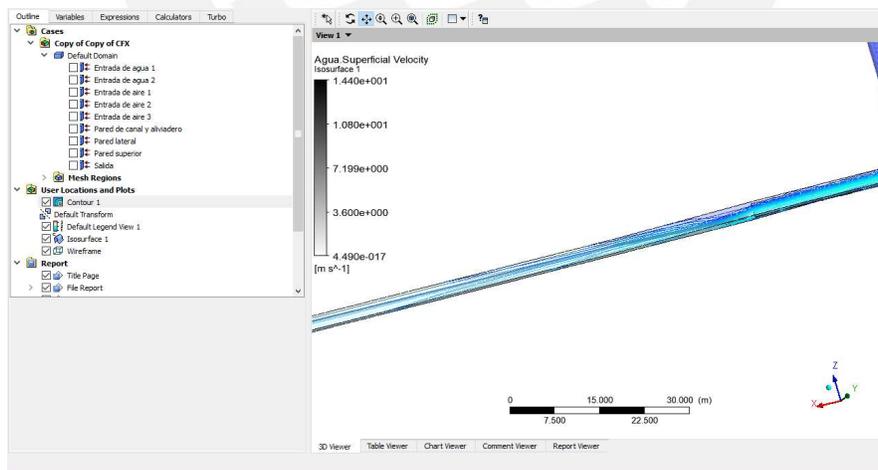


Fig. 4.4. Resultados de la variable velocidad en forma de capas superficiales del análisis 3D para el escenario 1 en un tramo del túnel de desvío (escala y unidades en la imagen)

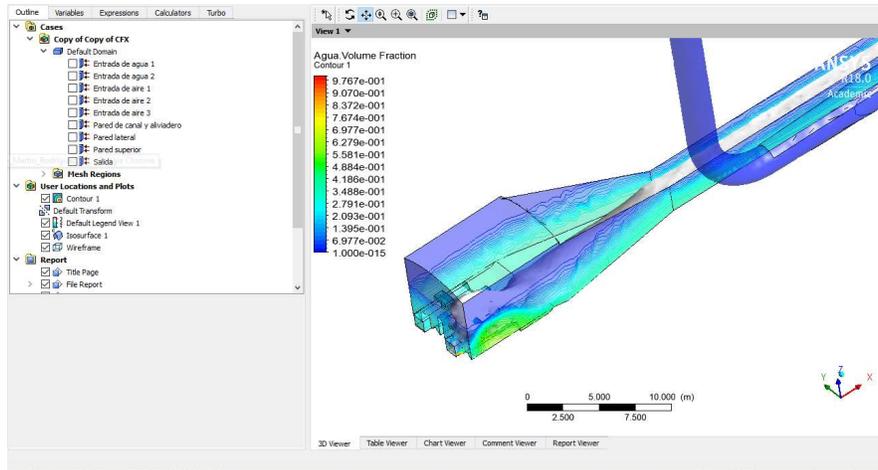


Fig. 4.5. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total en análisis 3D para el escenario 2 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

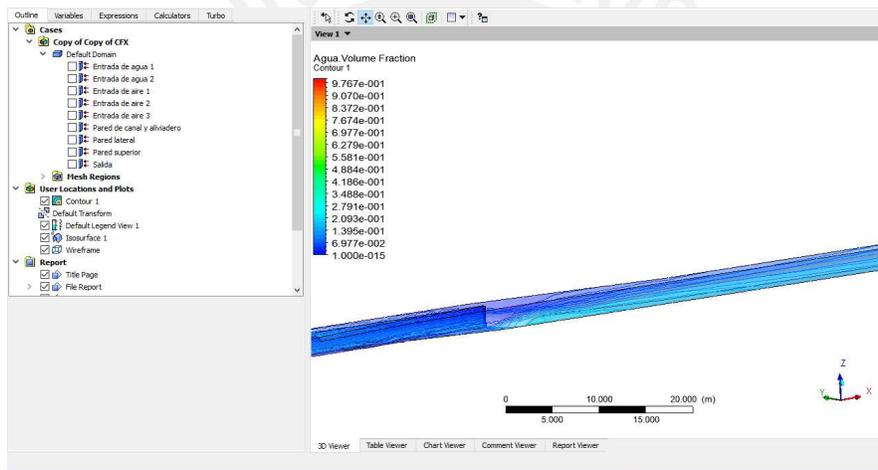


Fig. 4.6. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 3D para el escenario 2 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

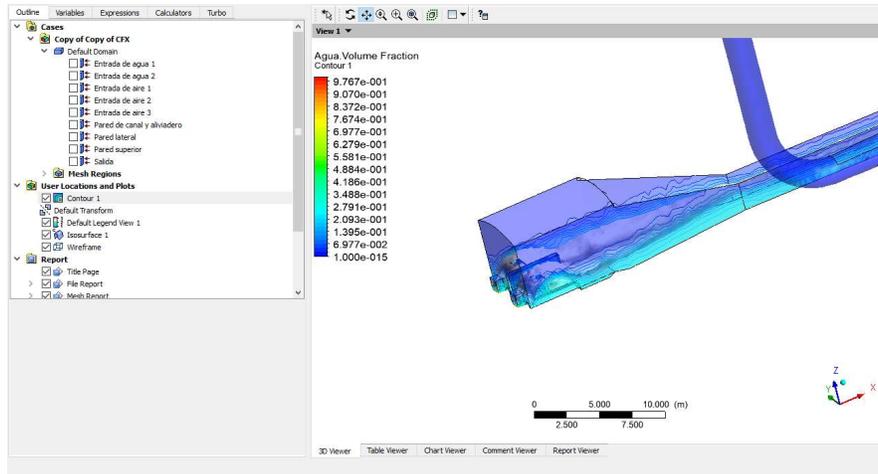


Fig. 4.7. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total en del análisis 3D para el escenario 3 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

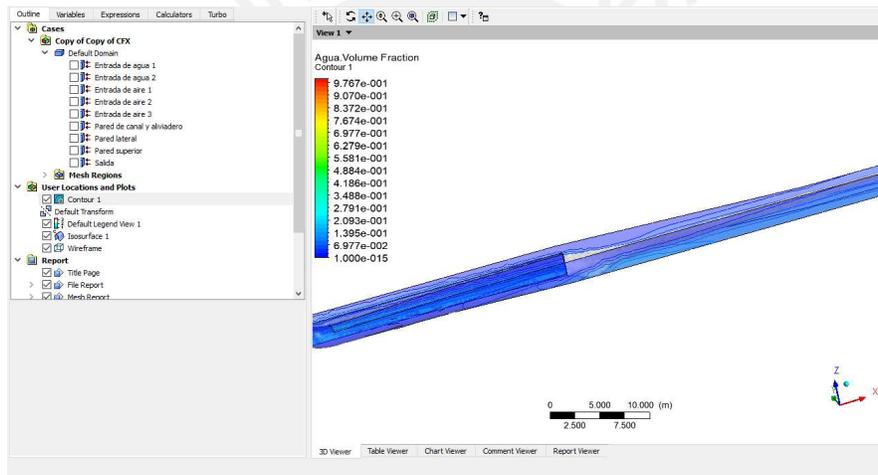


Fig. 4.8. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 3D para el escenario 3 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

De similar manera. En las **Figuras 4.9, 4.10 y 4.11** se tendrán los resultados del análisis para el escenario 4. En las **Figuras 4.12, 4.13 y 4.14** se tendrán los resultados del análisis para el escenario 5. Estos resultados corresponden al análisis de las tres estructuras en cuestión en distintas condiciones de operación y para el nivel de avenidas máximo extraordinario (NAME).

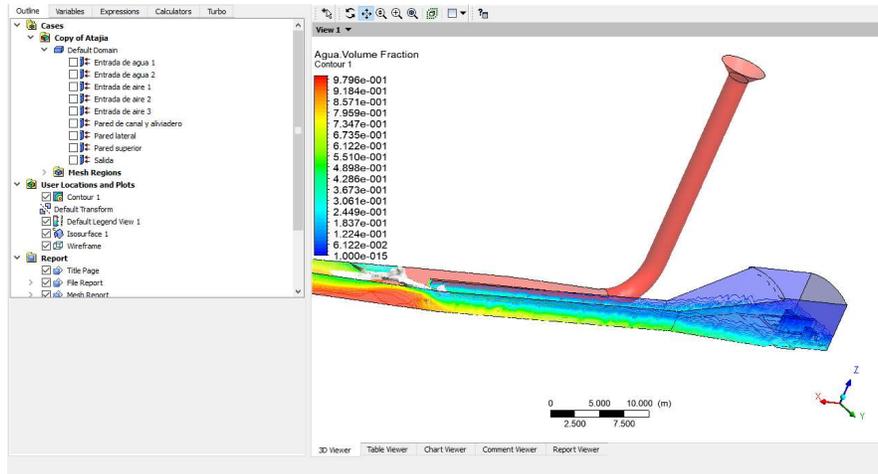


Fig. 4.9. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 3D para el escenario 4 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

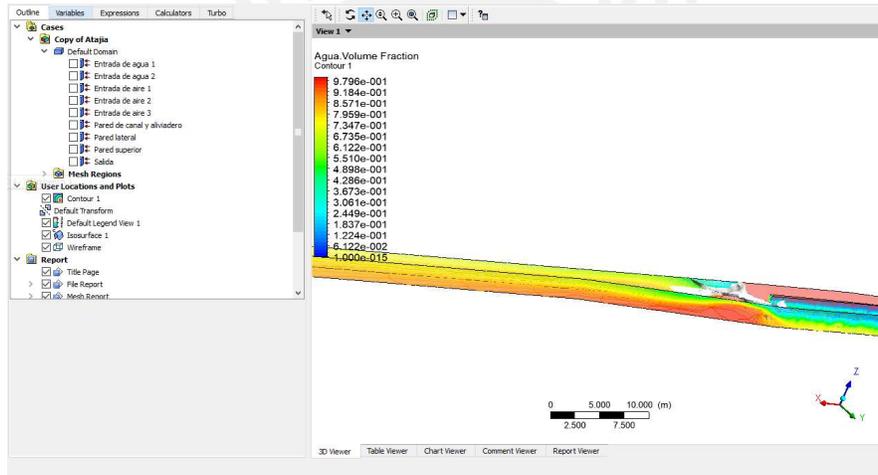


Fig. 4.10. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 3D para el escenario 4 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

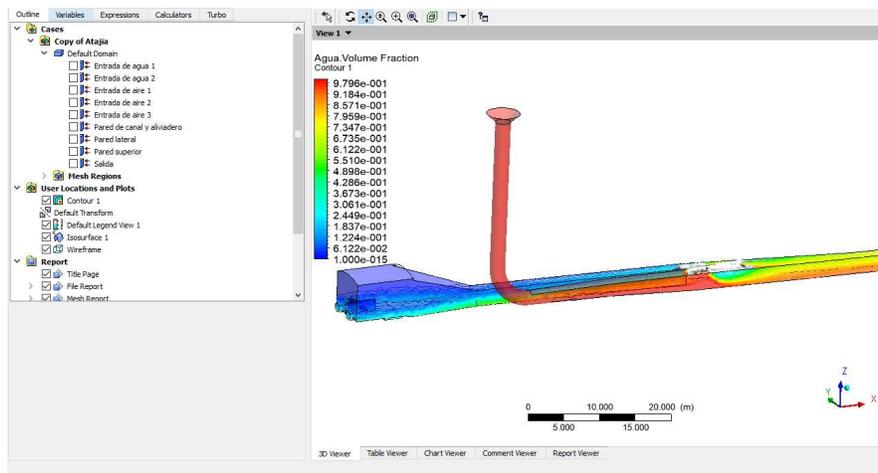


Fig. 4.11. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 3D para el escenario 4 en el aliviadero de demasías (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

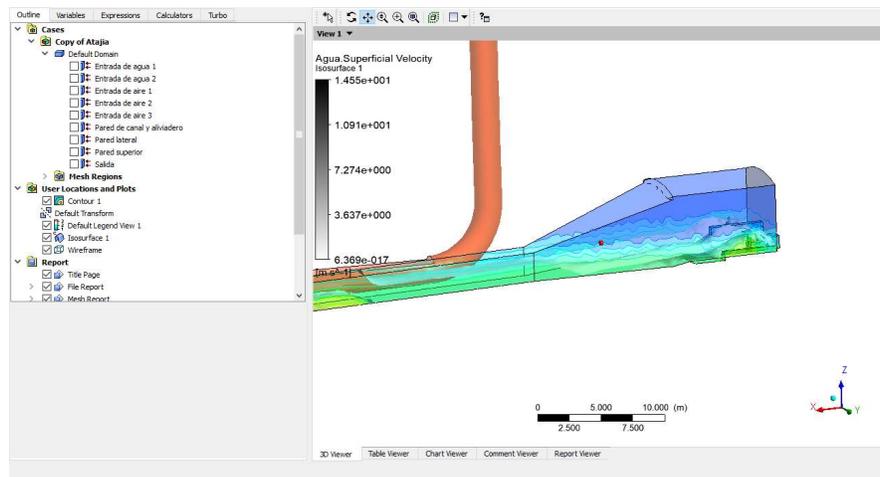


Fig. 4.12. Resultados de la variable velocidad en forma de capas superficiales del análisis 3D para el escenario 5 en un tramo del túnel de desvío (escala y unidades en la imagen)

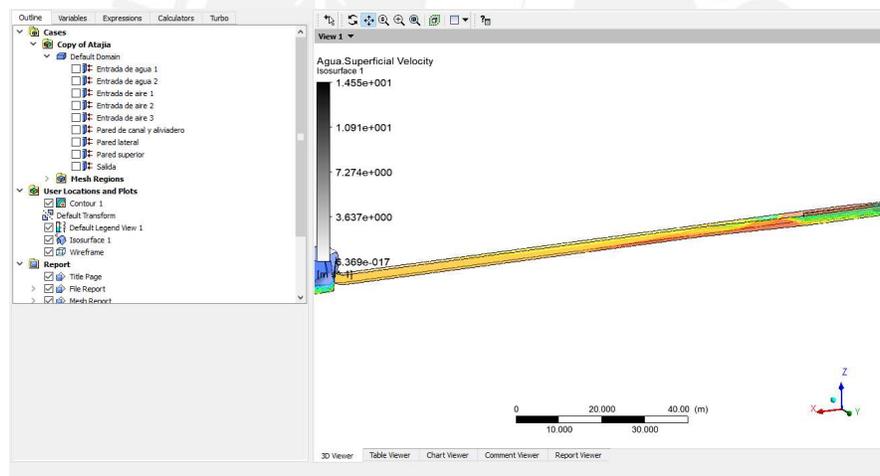


Fig. 4.13. Resultados de la variable velocidad en forma de capas superficiales del análisis 3D para el escenario 5 en las obras de toma (escala y unidades en la imagen)

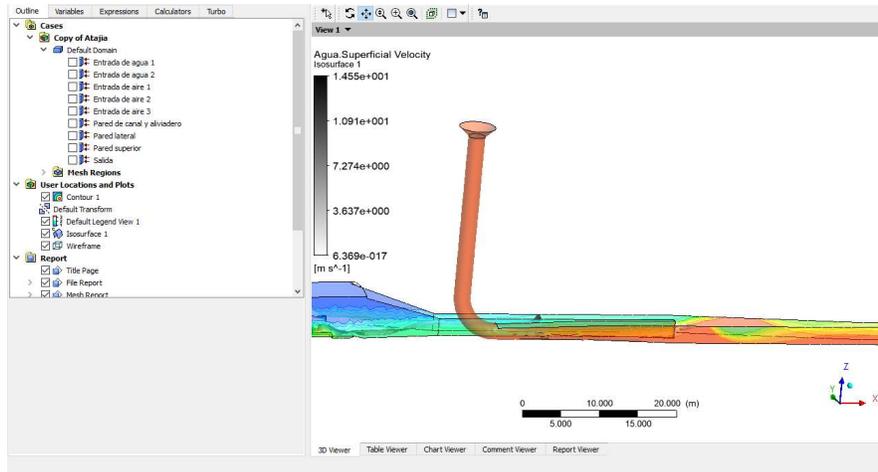


Fig. 4.14. Resultados de la variable velocidad en forma de capas superficiales del análisis 3D para el escenario 5 en el aliviadero de demasías (escala y unidades en la imagen)

4.2 Resultados del análisis bidimensional

En ese sentido y para el análisis bidimensional se presentan las **Figuras del 4.15 al 4.26** los resultados obtenidos en el plano de simetría de cada estructura analizada para los diferentes eventos.

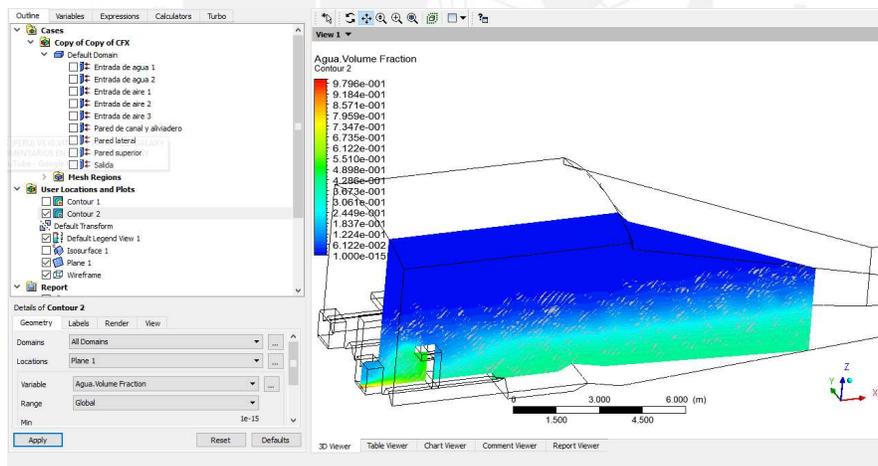


Fig. 4.15. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 1 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

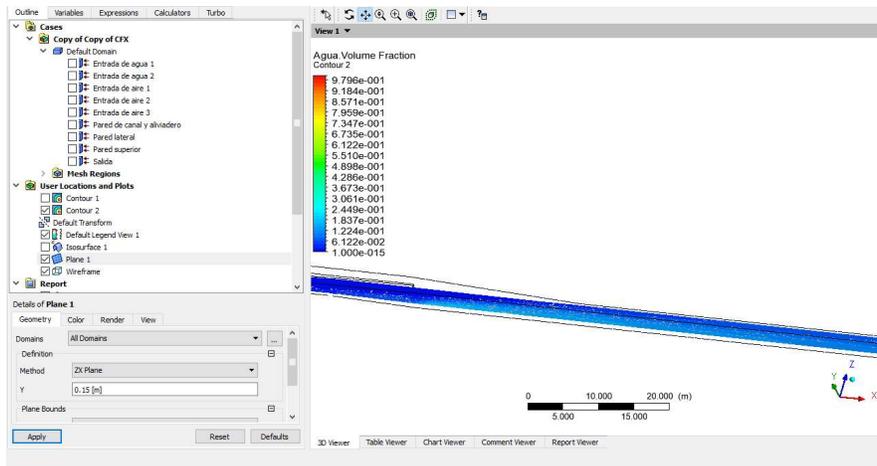


Fig. 4.16. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 1 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

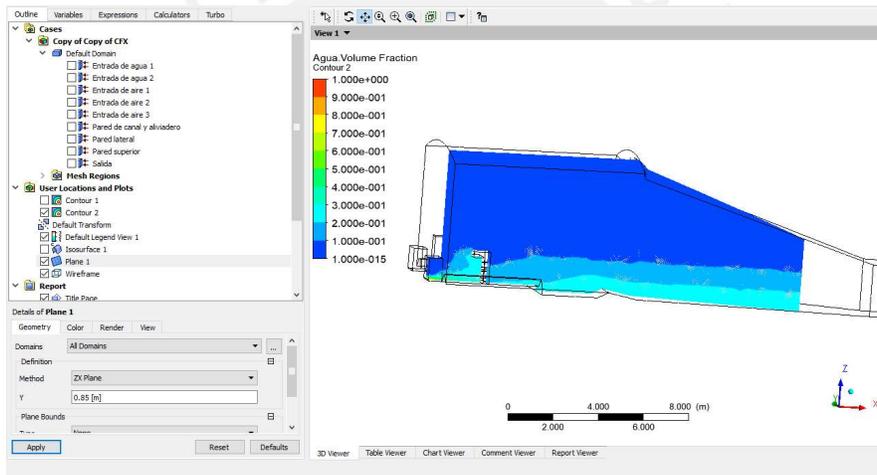


Fig. 4.17. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 2 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

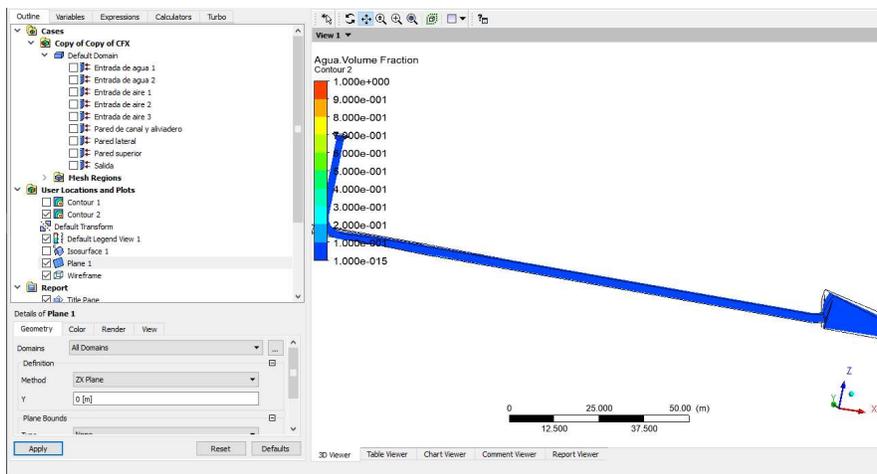


Fig. 4.18. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 2 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

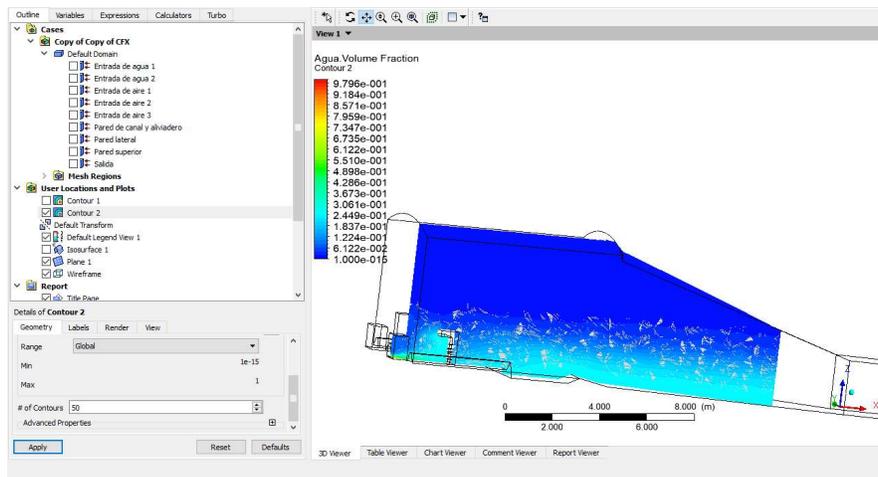


Fig. 4.19. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 3 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

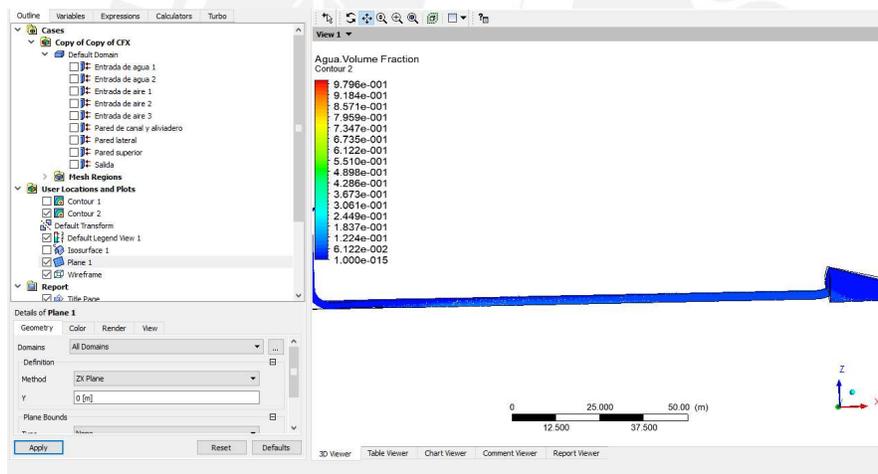


Fig. 4.20. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 3 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

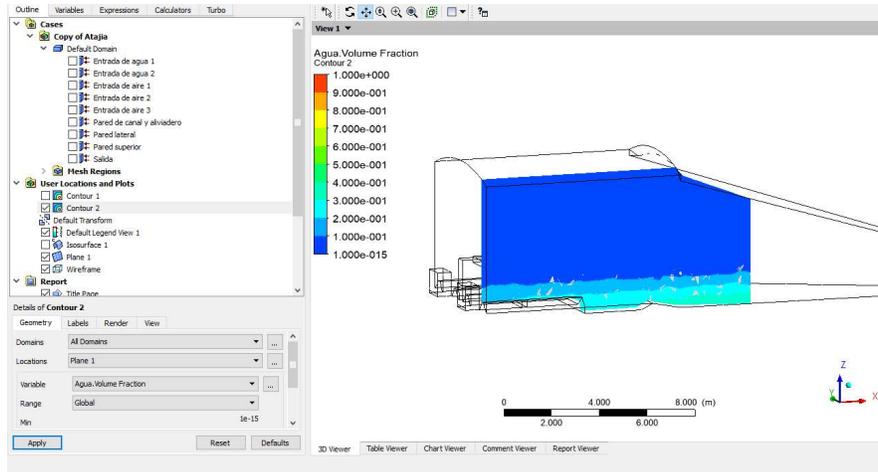


Fig. 4.21. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 4 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

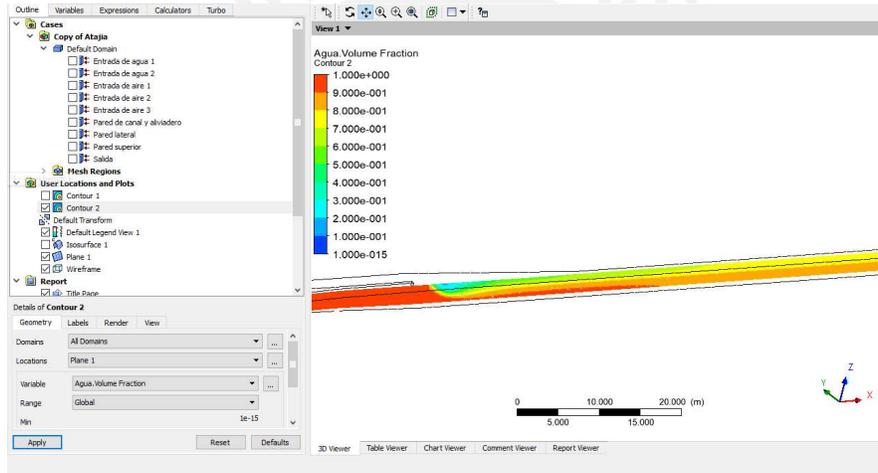


Fig. 4.22. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 4 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

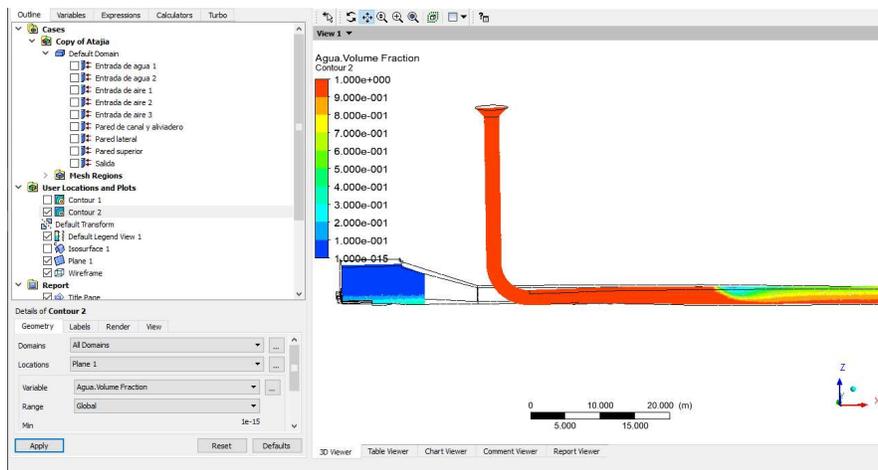


Fig. 4.23. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 4 en el aliviadero de demasías (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

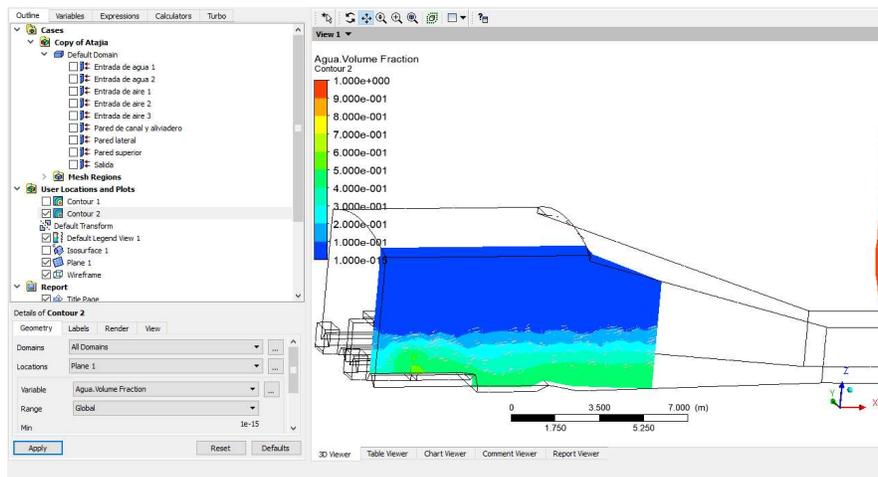


Fig. 4.24. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 5 en un tramo del túnel de desvío (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

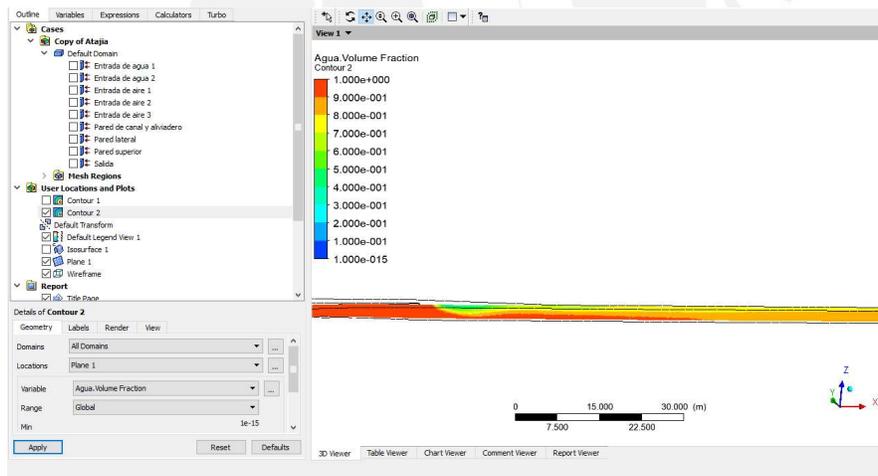


Fig. 4.25. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 5 en las obras de toma (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

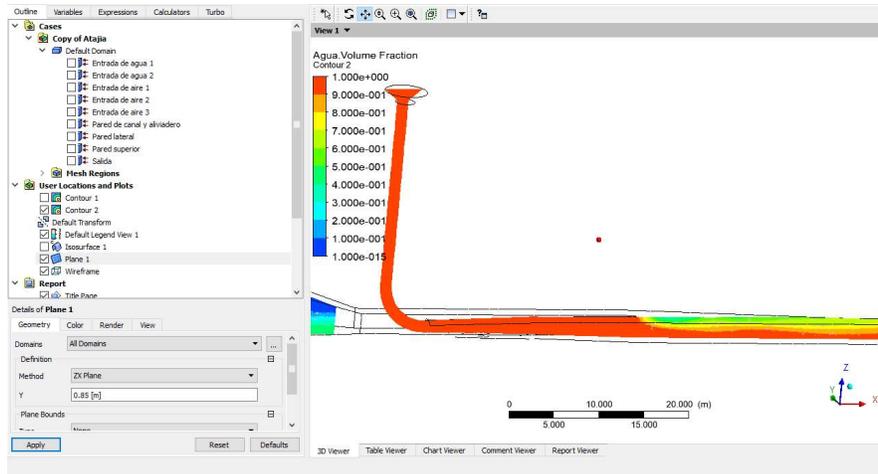


Fig. 4.26. Resultados de la proporción de llenado de volumen de agua respecto al total del análisis 2D para el escenario 5 en el aliviadero de demasías (escala en la imagen, proporción es adimensional -de 0 a 1-)

4.3 Resultados del análisis unidimensional

Del análisis elaborado en la sección 3.5 se obtiene la siguiente tabla de resultados para las secciones definidas en dicha sección.

Tabla 4.1. Tabla de resultados mediante análisis unidimensional

Ubicación	Velocidad (m/s)	Escenarios evaluados
Canal de desvío (Figuras 3.26 y 3.27)	0.111	Ninguno
Compuertas (Figuras 3.28 y 3.29)	15.0	1, 2 y 3
Nave (Figuras 3.28 y 3.29)	0.053	1, 2 y 3
Primera sección del aliviadero de excedencias (Figura 3.30)	5.61	4 y 5
Segunda sección del aliviadero de demasías (Figura 3.32)	6.79	4 y 5
Primera sección del túnel de desvío – aliviadero (Figura 3.33)	2.015	1, 2, 3, 4 y 5
Segunda sección del túnel de desvío – Aliviadero (Figura 3.34)	4.48	1, 2, 3, 4 y 5

4.4 Discusión y comparación de resultados

Los resultados obtenidos en el análisis unidimensional se obtuvieron a partir de la utilización de ecuaciones de la ingeniería hidráulica. El diseño fue obtenido del proyecto fuente y mediante metodología USBR.

Todos los resultados obtenidos en el presente análisis computacional se obtuvieron a partir de la utilización del software de elementos finitos ANSYS cuyo módulo de análisis fluo-dinámico se llama CFD-CFX. Este componente trabaja bajo un orden de convergencia de 10^{-5} lo cual para la jerarquía de las presentes estructuras funciona muy bien.

De acuerdo al análisis unidimensional presentado en la sección 2.3. los valores calculados de la velocidad difieren de la simulación computacional para todos los escenarios en menos de 5%. Esto indica que las hipótesis unidimensionales representan un importante método de diseño. La se puede comparar estos valores revisando la **Tabla 4.1** vs los valores que se encuentran en las **Figuras 4.3 a 4.26**.

Para la obra de toma, el caudal y la velocidad de una compuerta sumergida se calculó de acuerdo a la fórmula sugerida en la literatura y para un coeficiente de contracción sugerido para el tirante aplicado en los escenarios analizados de 0.61 se obtuvieron valores semejantes a los publicados en la memoria de cálculo. A partir de los valores de caudal se pudo calcular el caudal másico que fue un imput para la simulación tridimensional.

El valor de caudal másico ingresado como parámetro de borde para la simulación contempla el ingreso uniforme en toda la superficie colocada puesto que para este volumen de control se definió dicho dominio donde esta aseveración es válida.

La convergencia obtenida para todos los escenarios es menor a 5×10^{-5} en las ecuaciones de velocidad del eje Z y menor a 2×10^{-5} en las ecuaciones de velocidad del eje X e Y. Por el lado de la curva P-Mass, la convergencia es más variable pero todos menor a 3×10^{-6} . Estos valores confirman una convergencia correcta y de calidad.

Se verificó mediante un punto de monitoreo que en los escenarios existe un excedente de hasta 10% en el monitoreo del caudal de salida. Esto se debe a la fineza de la malla. Para efectos del presente proyecto, esta diferencia es aceptable.

Del escenario 1 se desprende que el diseño para la operación de las estructuras es adecuado y que cualitativamente y cuantitativamente se presentan valores deseados.

Existe cierta variación en ciertas secciones contiguas, pero esto se presenta debido a la fineza de la malla y cantidad de subdominios definidos.

En los primeros metros de la estructura de toma se observa que la relación agua/aire es aproximadamente uno ya que es el inicio de una ventana sumergida.

También se observa que el agua ingresa con gran impulso y a velocidades enormes. Estas velocidades se traducen en una gran cantidad de energía cinética; energía que es disipada por las pantallas de disipación.

Asimismo, en esta estructura se observa un comportamiento caótico del agua, debido a la propia energía cinética del agua en ese entorno y su abrupta disipación. Este desorden se traduce en números de Reynolds grandes para estas secciones.

Las pantallas de disipación que se encuentran en el primer tramo de la estructura sufren efectos de flexión bastante grandes en el borde inferior del mismo. Queda como trabajo futuro verificar estructuralmente la eficacia de dichas pantallas.

Para el caso del túnel de desvío se observa que en el primer tramo del mismo se estabiliza la superficie de agua y reduce su tirante a medida que avanza hasta el tramo en el que se une con el túnel del aliviadero. Al llegar a esta parte el nivel del agua tiene una caída ligeramente abrupta que empieza a elevarse a medida que el túnel se desarrolla y termina desembocando como un vertedero libre. El efecto del salto de ski hace que reduzca su velocidad y pierda energía para un vertido suave.

Como se mencionó previamente, el segundo escenario es para una condición crítica en la que una entrada de agua se cerrara por mantenimiento. Por lo tanto, en la entrada hábil ingresará una mayor cantidad de caudal, exactamente el doble que en el escenario 1. De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación, cualitativamente el movimiento del fluido es similar al del escenario 1.

La diferencia radica en el orden del flujo en la entrada de la estructura de toma, puesto que para este escenario el desorden generado por el impacto del chorro de agua con la pantalla de disipación tiene una mayor área de desarrollo. Dicho de otro modo, la sección por donde se despliega toda el agua impactada en la pantalla ocupa también la parte de la otra compuerta.

Por el lado del túnel de desvío y aliviadero tiene un comportamiento parecido al del escenario 1 en cuanto a la sección en la que se juntan las dos secciones en una sola, pues existe una pequeña caída del tirante.

La superficie libre del agua se junta con mayor velocidad a la pared superior del túnel que en el escenario 1. Sin embargo, La descarga del flujo en el escenario 2 es similar a la descarga del escenario 1. Esto es porque ambos llevan el mismo caudal. Y el comportamiento del túnel se ha marcado completamente después de todo el recorrido del flujo.

Para el tercer escenario los efectos son bastante parecidos al primero con la diferencia del volumen y las magnitudes de velocidad. Otra gran diferencia en el comportamiento del agua es el desorden del flujo en la sección de las pantallas de dissipación y el resalto que se nota más pronunciado y menos sumergido debido a las proporciones del flujo.

En los 3 escenarios existe un efecto importante el cual es un reflujos que ocurre cuando el fluido termina el tramo del aliviadero y se juntan las secciones de los túneles. De esta manera el fluido que viene de la estructura de toma se introduce a la sección del túnel de aliviadero con velocidades mínimas y en proporciones pequeñas.

Para el comportamiento del fluido en el cuarto escenario se tiene una ocupación del agua absoluta en todo el desarrollo de la estructura de alivio. Se ve que el túnel está completamente lleno y la descarga hacia el otro túnel que combinan ambas estructuras tiene un comportamiento caótico y de rebote en la pared contraria al eje de la estructura de alivio.

Este rebote genera una dissipación de la energía cinética puesto que golpea y reparte el fluido hacia el final del túnel de aliviadero-desvío y hacia la entrada de las estructuras de desvío. El flujo hacia la entrada de las estructuras se da con una velocidad muy pequeña, por lo que se debe tener mucho cuidado con algún eventual problema de sedimentación.

A pesar del gran caudal aliviado por esta estructura, se muestra una descarga suave y uniforme. Esto se debe a que parte de este caudal se va hacia el inicio de las estructuras de desvío.

Para el quinto escenario el comportamiento es similar al del escenario número 4 con la diferencia de que en este escenario el impacto del agua descargada del túnel de aliviadero golpea con menor intensidad a la pared contraria.

En la estructura de toma el comportamiento del agua ya no es tan caótica como el del escenario 1, sin embargo, siguen existiendo valores altos de turbulencia.

En la sección del golpe de la descarga del aliviadero al túnel combinado se presentan presiones negativas que pueden generar efectos cavitativos por lo tanto se observa esta

sección y se debe analizar estructuralmente para que estos efectos no sean determinantes ni perjudiciales para la operación de las estructuras.

En general los valores obtenidos mediante la simulación muestran un comportamiento óptimo que se encuentran dentro de los rangos recomendados por la literatura. Por lo tanto, se concluye que las optimizaciones son mínimas y se requiere un análisis transitorio para mayor detalle.



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Como se indica en el objetivo principal del proyecto de tesis se logró aplicar el software de elementos finitos ANSYS a las estructuras conexas de una presa. Se ha analizado la aplicabilidad de dicho software obteniéndose resultados satisfactorios.

Se logró analizar las estructuras en cuestión mediante los diversos métodos desarrollados por la *Bureau of Reclamation* de Estados Unidos. Se comparó con el diseño presentado en la memoria de cálculo compartida por la empresa de generación hidroeléctrica San Gabán S.A. y se encontró que los resultados son acordes a dicho diseño.

Se logró analizar el diseño de las estructuras involucradas en el presente proyecto mediante métodos tridimensionales a través del software de elementos finitos ANSYS. Se definieron cinco escenarios de funcionamiento indicados en el desarrollo de la tesis y tomados a partir de un análisis de la memoria descriptiva del proyecto en cuestión.

Se logró analizar el diseño de las estructuras en superficies bidimensionales mediante cortes en planos de simetría, esto se realizó puesto que la base matemática y metodología de aplicación del software ANSYS hace posible visualizar los resultados en planos definidos. De esta manera se puede aprovechar el desarrollo aplicado en la metodología tridimensional y plasmarlos en resultados bidimensionales.

Del presente proyecto se desprende que el diseño en base a hipótesis unidimensionales es vigente y apto para estructuras de gran nivel. Incluso es de gran utilidad para predecir ciertos valores útiles en el monitoreo del procesamiento.

Los resultados en base a un criterio unidimensional son sumamente limitados cualitativamente ya que los efectos del agua en las estructuras diseñadas tienen diferentes efectos que no son considerados y se pierden en las simplificaciones.

A mayor magnitud en complejidad y dimensiones de una estructura hidráulica las hipótesis unidimensionales van perdiendo su capacidad. Estas se podrán emplear en diversos elementos focalizados, más no en un análisis completo de la estructura.

La concepción y definición de la geometría a utilizar es importante para obtener resultados acordes a los parámetros del diseño. Es necesario conceptualizar el movimiento del flujo de agua para utilizar modelos geométricos que se adapten a este modelo.

Es de suma importancia el refinamiento correcto de la malla utilizada en el modelo tridimensional para que dicho modelo desarrolle correctamente las expresiones matemáticas y pueda brindar valores acertados en la convergencia del procesamiento.

Para el presente proyecto se refinó la malla utilizada en medida de las posibilidades y limitaciones del software versión estudiantil y se logró una convergencia aceptable con diferencias pequeñas y aceptables para un análisis netamente computacional.

La malla utilizada en la simulación posee valores de calidad aceptables de acuerdo al módulo que se está trabajando (CFD-CFX)

Las condiciones de borde definidas en el presente proyecto se refieren en gran medida a los estudios hidrológicos presentados en el marco teórico de este documento. La certeza de los resultados de la simulación depende en gran medida de la veracidad de estos estudios.

Las condiciones de borde se ajustarán al modelo geométrico planteado de acuerdo a la concepción de este. Es importante recalcar que dicho modelo no es 100% exacto al diseño plasmado en la memoria de cálculo ya que no se tomaron espesores y dimensiones estructurales.

La importancia de definir correctamente las condiciones de interface de fluido interviene directamente en los resultados de la simulación ya que dichas condiciones pueden variar según la concepción del proyecto y de la operatividad de la estructura

El análisis tridimensional posee diversas fortalezas, siendo la más significativa la observación cualitativa del modelo simulado. A partir de la simulación realizada se pueden realizar diversas optimizaciones y tomas de decisiones en cuanto a diseños planteados los cuales pueden ser modificados a partir de los resultados obtenidos.

La simulación desarrollada en el presente proyecto de tesis confirma la gran capacidad de visualización cualitativa del comportamiento de un fluido, en este caso agua, dentro de una estructura bajo diferentes condiciones de borde definidas.

Bajo un criterio cuantitativo se puede afirmar que el diseño de la presa es bastante óptimo ya que no existen valores extremos demasiado grandes que afecten la operación de las estructuras para ninguno de los escenarios analizados.

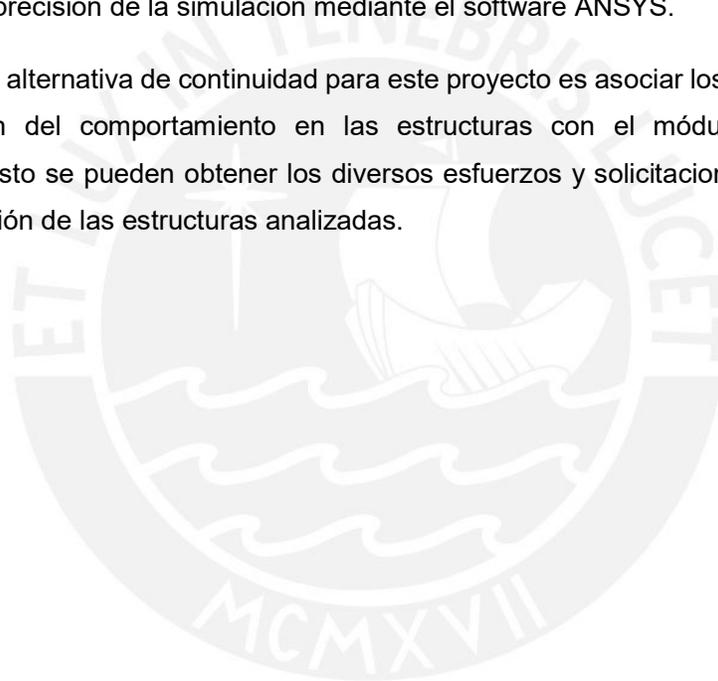
Bajo un criterio cualitativo se puede observar que no existen zonas donde el comportamiento del fluido tenga un comportamiento crítico, extraño u observable a mayor detalle para un eventual rediseño.

El presente proyecto se desarrolló en una computadora personal portátil (Laptop) marca Lenovo Z50-70 con un procesador Intel Core i5 de 2.4 Ghz y 6.0 Gb de memoria RAM. El procesamiento realizado no tuvo mayor inconveniente.

La herramienta del módulo de procesamiento que sirve para aprovechar la cantidad de núcleos del procesador que el usuario desea es de suma utilidad. La convergencia de 180000 elementos se pudo realizar en menos de 12 horas utilizando 8 núcleos de la PC.

La simulación desarrollada en el documento presentado se da en la etapa de diseño del proyecto, esperando el visto bueno por parte del área técnica de San Gabán S.A. Como expectativas de un trabajo futuro es el de realizar un modelo físico y a escala de las estructuras analizadas en el presente proyecto para poder optimizar el diseño realizado y estudiar la precisión de la simulación mediante el software ANSYS.

Una segunda alternativa de continuidad para este proyecto es asociar los resultados de la simulación del comportamiento en las estructuras con el módulo estructural. Realizando esto se pueden obtener los diversos esfuerzos y solicitaciones generadas por la operación de las estructuras analizadas.



CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

1. Bebbington, A., Williams, M. (2008). Water and mining conflicts in Peru. Mountain Research and Development, 28(3), 190-195. IS 6966: Part1 (1989). 'Guidelines for Hydraulic Design of Barrages and Weirs: Part-1 Alluvial Reaches (First revision)', pub. By Bureau of Indian Standards, Manak Bhawan, New Delhi
2. Bravo, A. (2004). Manual Flotación de Minerales. Empresa Minera Los Quenuales, p. 6.
3. Bueno Hernandez, D. (2015). Ingeniería de presas: Presas de Fábrica, ISBN, p. 637 – 721.
4. Chen, S-Y (2006). The History of ANSYS, Taiwan. FEA Optimization.
5. Cooke J.B. (1984). "Progress in Rockfill Dams (18th Terzaghi Lecture)", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.110, No. 10, p. 1383 – 1414.
6. Craig, P (2012). User's Manual For EFDC_Explorer: A Pre/Post Processor for the Environmental Fluid Dynamics Code, Dynamic Solutions--International, LLC, Knoxville, TN, May, 2012.
7. Cruz, P. T., Materon, B., Freitas, F. (2009). Concrete Face Rockfill Dams. Sao Paulo, Brasil: Oficina de Texto
8. Farrokh M., Abdüsselam A. (2017). Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems, Ocean Engineering, Volume 130, Pages 10-24, ISSN 0029-8018
9. Garcia Trisolini, E. (2009). Manual de Proyectos de Agua Potable en Poblaciones Rurales, Fondo Peru-Alemania Deuda por desarrollo.
10. Hervouet, J.-M. (2000). TELEMAC modelling system: an overview. Hydrol. Process., Willey, 14: 2209–2210.
11. Hui-xia Y., Ran LI, Rui-feng L., Juan W., Qin Z. (2016). A parameter analysis of a two-phase flow model for supersaturated total dissolved gas downstream spillways, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Volume 28, Issue 4, Pages 648-657, ISSN 1001-6058
12. Instituto de Hidrología de España, UNESCO (1981). Methods for Water Balance Computation., No 17 de la serie "Studies and Reports in Hydrology", Place de Fontenoy, Paris, Francia, UNESCO.
13. IS 6966: Part-2 (1989). 'Guidelines for Hydraulic Design of Barrages and Weirs: Part Boulderly Reaches', IS guidelines under formulation by Bureau of Indian Standards, Manak Bhawan, New Delhi

14. Jaime, A. P. (2003). Las obras hidráulicas de concreto en el Perú. Obras de captación. Lima, Lima, Perú: ASOCCEM.
15. Jing L., Ming L., Zhilin S., O'Connor B. (2013). Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region, *Marine Geology*, Volume 342, Pages 14-27, ISSN 0025-3227
16. Johannesson, P. and Tohlang S. (2007). Lessons learned from mohale. *International Water Power and Dam Construction* July, p. 16 – 25.
17. Kazemzadeh-Parsi, M. J. (2014). Numerical flow simulation in gated hydraulic structures using smoothed fixed grid finite element method. *Applied Mathematics and Computation*, 246, 447-459.
18. Krochin, S. (1982). *Diseño Hidráulico*. Quito, Ecuador: Editorial de la escuela politécnica nacional.
19. Mella, J. (2014). Conferencia Diseño de Sistemas de Control de Polvo para la Minería con Apoyo en Herramientas CFD: Cámara Lavadora de Baja Energía.
20. Musavi-Jahromi, H., Bina, M., & Salmasi, F. (2008). Physical and numerical modeling of the nappe flow in the stepped spillways. *Journal of Applied Sciences*, 8(9), 1720-1725.
21. Nuno M.C. Martins, Nelson J.G. Carriço, Helena M. Ramos, Dídía I.C. Covas (2017). Velocity-distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis, *Computers & Fluids*, Volume 105, Pages 218-230, ISSN 0045-7930
22. Sabzi, A. E., & Afrous, A. (2015). Examining Pressure Distribution on Crest Spillway Using ANSYS-Fluent Software. *Advances in BioResearch*, 6(3).
23. Shaw C.T. (1992). *Using Computational Fluid Dynamics*, New Zeland, Prentice Hall.
24. Singh, R. M. (2011). Design of barrages with genetic algorithm based embedded simulation optimization approach. *Water resources management*, 25(2), 409-429.
25. U.S. Army Corps (2003). *Outlet Works. Hydraulic Design Criteria*. U.S. p. 210
26. U.S. Bureau of the Census (1985). *Water use in mineral industries, 1982 census of mineral industries: Subject Series MIC 82-S-4*, p. 32.
27. Versteeg H.K. and Malalasekera W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, England, Longman Scientific & Technical.
28. White F. M. (2005). *Viscous Fluid Flow*, Rhode Island, McGraw Hill