



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Aplicación de software
unidimensional y tridimensional
al diseño de una obra de desvío**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Josué Villaney García Bautista

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sadoth Fabián Huerta Loera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado APLICACION DE SOFTWARE UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL AL DISEÑO DE UNA OBRA DE DESVIO que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JOSUE VILLANEY GARCIA BAUTISTA
Número de cuenta: 316035039

AGRADECIMIENTOS.

A la universidad

Agradezco a la UNAM por la educación integral que ofrece, las instalaciones certificadas en laboratorios que permiten poner en práctica la ingeniería, así como las licencias de los programas que me permitieron realizar este trabajo. Agradezco también a mis profesores ya que, con su pasión y entusiasmo, lograron transmitirme el amor por la ingeniería civil. Particularmente agradezco al Dr. Sadoth Fabián Huerta Loera por su paciencia y apoyo durante todo mi proceso de titulación.

A la CFE

Agradezco a la Comisión Federal de Electricidad por permitirme realizar mi servicio social y prácticas profesionales en sus instalaciones, así mismo, agradezco a todos los ingenieros de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos que me apoyaron en el desarrollo de mi tesis resolviendo dudas y enseñándome, con mayor detalle, el funcionamiento de los programas utilizados.

A mis padres y mi abuelito

Estaré eternamente agradecido con mis padres por su acompañamiento a lo largo de todo mi desarrollo académico; sin lugar a dudas su apoyo, cariño, compromiso, esfuerzo y sacrificio, han sido pieza clave para culminar mi desarrollo profesional a nivel licenciatura, ser una mejor persona y ser un buen profesionista. También estoy agradecido con mi abuelito por siempre estar presente, por compartirme sus experiencias y motivarme a ser un excelente ingeniero.

A mis amigos

Agradezco a mis amigos Aaron Carapia, Uriel Tovar, Abraham Hernández, Uriel García y Luis Márquez (Wisi) por brindarme su amistad y apoyo incondicional. Les doy las gracias por haber estado ahí tanto en lo académico como en las cuestiones personales, quiero que sepan que siempre contarán conmigo, que los aprecio demasiado y espero que nuestra amistad siga más allá de las aulas y del trabajo.

A mí novia

Gracias por formar parte del final de este proceso, a pesar de tener el trabajo encima, siempre me ayudaste a no dejar de lado la meta de culminar mi tesis y no darme por vencido, este logro también es de ambos y nos permitirá seguir avanzando.

Índice

Introducción.	1
1.- Estado del arte.	2
2.- Fundamentos técnicos para el diseño de obras de desvío en proyectos hidroeléctricos	4
2.1.- Sistema Hidroeléctrico Grijalva.	7
2.1.1.- Central Hidroeléctrica Dr. Belisario Domínguez “Presa La Angostura”.	8
2.1.2.- Central Hidroeléctrica Ing. Manuel Moreno Torres “Presa Chicoasén”	11
2.1.3.- Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén II.	14
2.1.4.- Central Hidroeléctrica Malpaso “Presa Nezahualcóyotl”	16
2.1.5.- Central Hidroeléctrica Ángel Albino Corzo “Presa Peñitas”	19
2.2.- Criterios de diseño	21
2.2.1.- Hidrología.	21
2.2.2.- Topografía	23
2.2.3.- Geología	23
2.2.4.- Planeación y constructibilidad	24
2.2.5.- Análisis de riesgo	24
2.3.- Software de modelación hidráulica.	25
2.3.1.- Fundamentos hidráulicos	26
2.3.2.- HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System)	32
2.3.2.1- Metodología de cálculo de HEC-RAS	32
2.3.3.- Inventor y CFD	39
2.3.3.1.- Interfaz y metodología de cálculo de CFD	40
3.- Casos de estudio.	49
3.1.- Ejercicio 1 (Predimensionamiento utilizando Excel).	50
3.1.1.- Introducción y objetivo.	50
3.1.2.- Desarrollo del ejercicio.	51
3.1.3.- Ejecución del método.	52
3.1.4.- Análisis de resultados.	67
3.2.- Ejercicio 2 (Chicoasén II utilizando Hec-Ras).	68
3.2.1 Introducción y objetivo.	68
3.2.2.- Desarrollo del ejercicio.	69

3.2.3.- Análisis de resultados.	89
3.3.- Ejercicio 3 (Utilizando Inventor y CFD)	90
3.3.1.- Introducción y objetivo.	90
3.3.2.- Desarrollo del ejercicio.	91
3.3.3.- Análisis de resultados.	125
4.- Conclusiones	127
Referencias	130

Índice de tablas

Tabla 1.	Hidrología de la “Presa la Angostura”	9
Tabla 2.	Embalse de la “Presa la Angostura”	9
Tabla 3.	Cortina de la “Presa la Angostura”	10
Tabla 4.	Obra de toma y potencia para generación de la “Presa la Angostura”	10
Tabla 5.	Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa la Angostura”	10
Tabla 6.	Hidrología de la “Presa Chicoasén”	12
Tabla 7.	Embalse de la “Presa Chicoasén”	12
Tabla 8.	Cortina de la “Presa Chicoasén”	12
Tabla 9.	Obra de toma y potencia para generación de la “Presa Chicoasén”	13
Tabla 10.	Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Chicoasén”	13
Tabla 11.	Hidrología de la presa “Chicoasén II”	15
Tabla 12.	Cortina de la presa “Chicoasén II”	15
Tabla 13.	Obra de toma de la presa “Chicoasén II”	15
Tabla 14.	Casa de máquinas de la presa “Chicoasén II”	16
Tabla 15.	Hidrología de la “Presa Nezahualcóyotl”	16
Tabla 16.	Cortina de la “Presa Nezahualcóyotl”	17
Tabla 17.	Embalse de la “Presa Nezahualcóyotl”	17
Tabla 18.	Obra de toma y Potencia para generación de la “Presa Nezahualcóyotl”	18
Tabla 19.	Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Nezahualcóyotl”	18
Tabla 20.	Hidrología de la “Presa Peñitas”	19
Tabla 21.	Embalse de la “Presa Peñitas”	20
Tabla 22.	Obra de toma y potencia para generación de la “Presa Peñitas”	20
Tabla 23.	Cortina de la “Presa Peñitas”	21

Tabla 24.	Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Peñitas” _____	21
Tabla 25.	Predimensionamiento. _____	53
Tabla 26.	Especificaciones de la obra de desvío. _____	69
Tabla 27.	Tabla comparativa de las herramientas digitales analizadas. _____	128

Índice de figuras.

Fig. 1.	The Mexican Light and power company (Batopilas Chihuahua)	5
Fig. 2.	Esquema de las partes de una obra de desvío.	6
Fig. 3.	Esquema del sistema de presas del río Grijalva. Fuente: CFE, CONAGUA	8
Fig. 4.	Planta general de la presa “La Angostura” Fuente: CFE, CONAGUA	11
Fig. 5.	Planta general de la presa “Chicoasén”. Fuente: CFE, CONAGUA	13
Fig. 6.	Ubicación de P-H- Chicoasén II en el S.H.G	14
Fig. 7.	Planta general de la presa “Nezahualcóyotl”. Fuente: CFE	18
Fig. 8.	Tabla de periodos de retorno con base a su capacidad de almacenamiento. (Memorandum No. B00.7.-616)	22
Fig. 9.	Flujo uniforme.	27
Fig. 10.	Flujo no permanente.	27
Fig. 11.	Curva de energía específica.	31
Fig. 12.	Representación de los términos de la ecuación de la energía.	33
Fig. 13.	Diagrama Energía vs Elevación de Superficie de Agua.	35
Fig. 14.	Ventana Gráfica	41
Fig. 15.	Apartado Setup.	42
Fig. 16.	Apartado Results.	42
Fig. 17.	Barra de salida.	42
Fig. 18.	Barra de estudio de diseño.	43
Fig. 19.	Representación gráfica de Perfiles subcríticos (M1, M2 y M3)	52
Fig. 20.	Tirante normal y crítico para determinar el tipo de perfil.	53
Fig. 21.	Tabla resumen del análisis del canal con el método del paso estándar	55
Fig. 22.	Secciones del canal.	56

Fig. 23.	Cadenamiento en orden descendiente.	57
Fig. 24.	Código de Visual Basic (Macro).	59
Fig. 25.	Elementos geométricos e hidráulicos de una sección trapezoidal.	60
Fig. 26.	Perfil hidráulico del canal en estudio.	67
Fig. 27.	Perfil por el eje del canal.	70
Fig. 28.	Vista en perspectiva del canal de desvío.	70
Fig. 29.	Primer ensanche del canal en perspectiva.	71
Fig. 30.	Preparación escalonada en perspectiva.	72
Fig. 31.	Segundo ensanche del canal en planta.	72
Fig. 32.	Organización de datos en Excel.	74
Fig. 33.	Gastos utilizados	74
Fig. 34.	Menú de edición de datos geométricos “Edit geometric data”.	75
Fig. 35.	Apartado para guardar los nombres del río y tramo de estudio.	75
Fig. 36.	Creación del río.	76
Fig. 37.	Downstream Reach Lengths.	77
Fig. 38.	Main Channel Bank Stations	77
Fig. 39.	Cont/Exp Coefficient.	78
Fig. 40.	Levees y Obstructions.	79
Fig. 41.	Ingreso de una nueva sección transversal (River station).	80
Fig. 42.	Ingreso de datos para nueva sección transversal (River station).	81
Fig. 43.	Ingreso de datos de flujo.	82
Fig. 44.	Definición de las condiciones de frontera.	83
Fig. 45.	Generación de un plan de simulación de flujo	84
Fig. 46.	Interpolación entre secciones	86
Fig. 47.	Tabla de resultados correspondiente al gasto máximo ($Q=3474 \text{ [m}^3/\text{s].}$)	87
Fig. 48.	Visualización gráfica de distribución de velocidad por secciones.	88

Fig. 49.	Visualización gráfica del perfil de flujo	88
Fig. 50.	Visualización del canal en 3D.	89
Fig. 51.	Ensanches analizados para el ejercicio No.3.	90
Fig. 52.	Trazo del dominio de ejemplo.	92
Fig. 53.	Dominio del tramo del canal por secciones realizado en Inventor.	93
Fig. 54.	Creación de un nuevo archivo en Inventor.	94
Fig. 55.	Modificación de unidades de la pieza/proyecto.	94
Fig. 56.	Pares de planos del caso de estudio.	96
Fig. 57.	Trazo inferior del dominio.	97
Fig. 58.	Trazo superior del dominio	97
Fig. 59.	Herramienta elevación.	98
Fig. 60.	Elevación entre secciones.	98
Fig. 61.	Trazo de la sección superior del fluido en los planos.	99
Fig. 62.	Dominio final obtenido de Inventor.	99
Fig. 63.	Vista inferior del dominio.	100
Fig. 64.	Vista aguas arriba – aguas abajo.	100
Fig. 65.	Vista aguas abajo – aguas arriba.	100
Fig. 66.	Creación del modelo en CFD.	101
Fig. 67.	Asignación del tipo de material al dominio.	102
Fig. 68.	Dominio con el material asignado.	102
Fig. 69.	Barra de estudio de diseño	102
Fig. 70.	Condición de frontera aguas arriba.	104
Fig. 71.	Condición de frontera aguas abajo.	104
Fig. 72.	Condición de frontera de presión (Aguas arriba).	105
Fig. 73.	Condición de frontera de presión (Aguas abajo).	106
Fig. 74.	Simbología de condiciones de frontera.	106

Fig. 75.	Primer malla con herramienta “Autosize”	108
Fig. 76.	Herramienta Region.	109
Fig. 77.	Parámetros de la Región.	109
Fig. 78.	Generación de mallado para verificación de nodos y elementos totales.	110
Fig. 79.	Verificación de nodos y elementos totales (Generate mesh)	110
Fig. 80.	Vista longitudinal de la malla.	111
Fig. 81.	Vista transversal (A. Arriba – A. Abajo) de la malla.	111
Fig. 82.	Parámetros físicos del fluido.	113
Fig. 83.	Habilitación de superficie libre y asignación de la gravedad.	113
Fig. 84.	Selección de resultados para la simulación.	114
Fig. 85.	Parámetros de pasos, iteraciones y guardado de resultados.	115
Fig. 86.	Distribución de la velocidad (Planos transversales)	117
Fig. 87.	Distribución de la velocidad (Plano longitudinal)	118
Fig. 88.	Designación de unidades para resultados	118
Fig. 89.	Resultados de velocidad 1	119
Fig. 90.	Guardar resultados de velocidad	119
Fig. 91.	Criterios de creación del fluido.	120
Fig. 92.	Volumen del fluido.	120
Fig. 93.	Herramienta “Animation”	122
Fig. 94.	Parámetros de la animación.	122
Fig. 95.	Seed Type	123
Fig. 96.	Seed Patern	123
Fig. 97.	Seed Type Y Seed Pattern.	124
Fig. 98.	Distribución de la velocidad con líneas de flujo.	124
Fig. 99.	Representación de la distribución de velocidades en Hec-Ras.	126
Fig. 100.	Representación de la distribución de velocidades en Autodesk CFD.	126

Introducción.

En las últimas décadas el uso de la tecnología en diversas profesiones ha significado dar un gran salto para el desarrollo en la investigación de herramientas que permitan aprovechar al máximo las capacidades de los profesionistas. La ingeniería no es la excepción, ya que al ser una de las principales disciplinas encargadas en resolver problemas técnicos para un desarrollo sustentable, es necesario que se mantenga actualizada y se encuentre a la vanguardia tecnológicamente. Particularmente la disciplina de ingeniería civil enfrenta un sinnúmero de retos constantes al estar involucrada directamente con satisfacer las necesidades y resolver las problemáticas que enfrenta la sociedad, debido a esto, el uso de software especializado para las diversas ramas de la ingeniería civil se debe seguir desarrollando y, asimismo, el ingeniero debe tener la preparación adecuada para adoptar y aprovechar estas herramientas. Por otra parte, la educación profesional se debe mantener en constante actualización y desarrollo, a lo cual para conseguirlo es menester que las instituciones educativas e instituciones privadas y de gobierno amplíen más las ofertas interinstitucionales para poder formar profesionistas mayormente preparados.

Dicho lo anterior, el objetivo del presente documento es analizar, modelar y evaluar el comportamiento hidráulico de una obra de desvío a superficie libre, mediante la aplicación integrada de herramientas digitales especializadas (Microsoft Excel, HEC-RAS, Autodesk Inventor y Autodesk CFD) con el propósito de optimizar el proceso de diseño, validar su funcionamiento en condiciones teóricas, y generar criterios comparativos que permitan seleccionar la herramienta más adecuada según las necesidades del caso de estudio, contribuyendo así al fortalecimiento de las capacidades técnicas en el uso de tecnologías aplicadas a la ingeniería civil. El alcance se enfoca en el análisis de una obra de desvío de canal a superficie libre. En un primer caso, se realizó el dimensionamiento para un ejemplo teórico; para el segundo y tercer caso, se realizó la propuesta de desvío aplicado a un proyecto hidroeléctrico ubicado en el estado de Chiapas. El enfoque del estudio se centra en el análisis hidráulico preliminar y la modelación de la obra, sin abordar aspectos como estudios de impacto ambiental, costos, procesos constructivos, entre otros. La metodología aplicada en este trabajo tiene como base la experiencia obtenida a lo largo de mi realización del servicio social y prácticas profesionales en la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

1.- Estado del arte.

La Ingeniería civil es una disciplina que a lo largo del tiempo se ha encargado de dar solución a problemas que se relacionan con satisfacer las necesidades que requiere la sociedad con el objetivo de tener un progreso y una mejor calidad de vida., Actualmente las herramientas tecnológicas han evolucionado y, sin lugar a duda, seguirán innovándose para crear nuevos avances tecnológicos que ayuden al ingeniero a seguir resolviendo problemas que impulsen el progreso de la sociedad.

Dentro de las áreas de la Ingeniería Civil se encuentra la disciplina de Hidráulica, la cual destaca su importancia al estudiar los recursos hídricos de una región, siendo éstos necesarios para el desarrollo de nuestras actividades diarias y consumo humano, sin embargo, debido al mal empleo de dicho recurso, así como a la escasez del mismo, se requiere dar un manejo correcto y racional de tal forma que beneficie a la sociedad sin generar problemáticas ambientales.

Uno de los usos más eficientes y limpios de los recursos hídricos ha sido a través de proyectos hidroeléctricos, los cuales aprovechan el flujo caudaloso de los ríos para producir energía eléctrica limpia cuidando regulaciones ambientales que permiten proteger la flora y fauna del sitio. Las obras hidráulicas enfocadas a proyectos hidroeléctricos son obras de gran magnitud que deben funcionar en conjunto con diversas obras de orden multidisciplinario para poder obtener un proyecto eficiente, por ende, el diseño de estas requiere la mayor atención al detalle que sea posible. Anteriormente lograr el nivel de detalle necesario para realizar un trabajo de calidad requería de mucho tiempo y dedicación al momento de efectuar cálculos y correcciones necesarias que surgieran en el avance del proyecto, debido a esto, con el paso del tiempo se han implementado distintas metodologías de manera teórica, las cuales fueron y siguen siendo de gran ayuda para sentar las bases necesarias en la implementación de software especializado que agilice los procesos de diseño de obras hidráulicas.

Desde tiempos inmemoriales la curiosidad del ser humano ha llevado a distintas civilizaciones a descubrimientos sorprendentes por la necesidad de comprender el comportamiento de todo lo que lo rodea. Como primera solución se utilizó la experimentación, utilizando la pintura y la escultura para la representación de objetos y

fenómenos. La representación de dichos fenómenos a base de escalas o modelos evolucionaron a lo largo del tiempo y particularmente, en lo que respecta a la ingeniería hidráulica, los modelos físicos han sido una herramienta que hasta la fecha son de vital importancia para la solución de problemas de ingeniería. Dentro de las ventajas de la modelación física se encuentran el permitir detectar procesos o efectos inesperados, además con los instrumentos actuales de medición y control, es posible obtener una gran cantidad de datos relacionados al comportamiento del modelo en distintos escenarios posibles. Por otro lado, la principal desventaja de estos modelos es que tienden a ser costosos y requieren de un periodo largo de tiempo para su construcción. Por otra parte, en la actualidad existen diversos programas computacionales o software enfocados a las diversas ramas de la ingeniería, los cuales en conjunto con el debido y correcto conocimiento teórico, optimizan los tiempos de ejecución de análisis y cálculos, por lo tanto, es necesario invertir tiempo en enseñar a las nuevas generaciones de ingenieros el uso e interpretación de diversos tipos de software con la finalidad de aprender a gestionarlos y utilizarlos, en los casos que aplique, para obtener el mayor provecho de dichas herramientas. Asimismo, es importante mencionar que al existir diferentes programas que resuelven los mismos problemas a los que se puede enfrentar un ingeniero, es necesario aprender a identificar la problemática particular a resolver y, con base en el conocimiento adquirido de los diferentes programas, tenga la capacidad de poder discernir y elegir el software que se adecue mejor a la problemática para obtener los resultados esperados en el menor tiempo posible.

2.- Fundamentos técnicos para el diseño de obras de desvío en proyectos hidroeléctricos

México tiene un gran potencial para la generación de energía hidroeléctrica ya que, debido a las características geográficas y topográficas del país, el recurso renovable más aprovechable es el hídrico. A consecuencia de esto, en México inició su implementación con la primer central hidroeléctrica en el año de 1889 en Batopilas, Chihuahua.; en dicha fecha, comenzaron las obras pertinentes para aprovechar las aguas, con el objetivo de generar energía para las instalaciones mineras. Alejandro R. Shepard, implementó a los molinos de trituración dos generadores de vapor movidos por otras turbinas hidráulicas de 15 [HP], debiendo construir para ello, una presa derivadora junto con un canal de sección rectangular, una bocatoma con rejillas, compuertas de control y dos tuberías a presión, que alimentaban a las pequeñas turbinas para una caída de 16 [m].

A finales del siglo XIX, un doctor francés, Arnold Vaquie apreció el potencial energético de los ríos de la región de Huauchinango, así que tramitó ante el gobierno mexicano la concesión para aprovechar las aguas del río Necaxa como fuerza motriz y construyó una empresa dedicada a la generación de electricidad con el objetivo de producir carburo de calcio para las minas vecinas al proyecto. En 1902 la empresa tuvo que vender sus derechos y propiedades a la *Mexican Light and Power Company* la cual construyó y fundó el Sistema Hidroeléctrico de Necaxa, el cual aprovecha el caudal de los ríos Necaxa, Tenango, Xaltepuxtla y sus afluentes. Para su inauguración, en 1905, el Sistema Hidroeléctrico Necaxa era la planta de producción hidroeléctrica más grande y más moderna del mundo.

Durante los siguientes años la energía hidroeléctrica fue comercializada por empresas privadas extranjeras siendo hasta el año de 1937 cuando se creó la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con la cual la energía eléctrica paso del sector privado a ser del estado. Actualmente CFE cuenta con 60 centrales hidroeléctricas con una capacidad efectiva total de 12,125.363 MW, lo cual representa aproximadamente el 12% de la generación total del país.

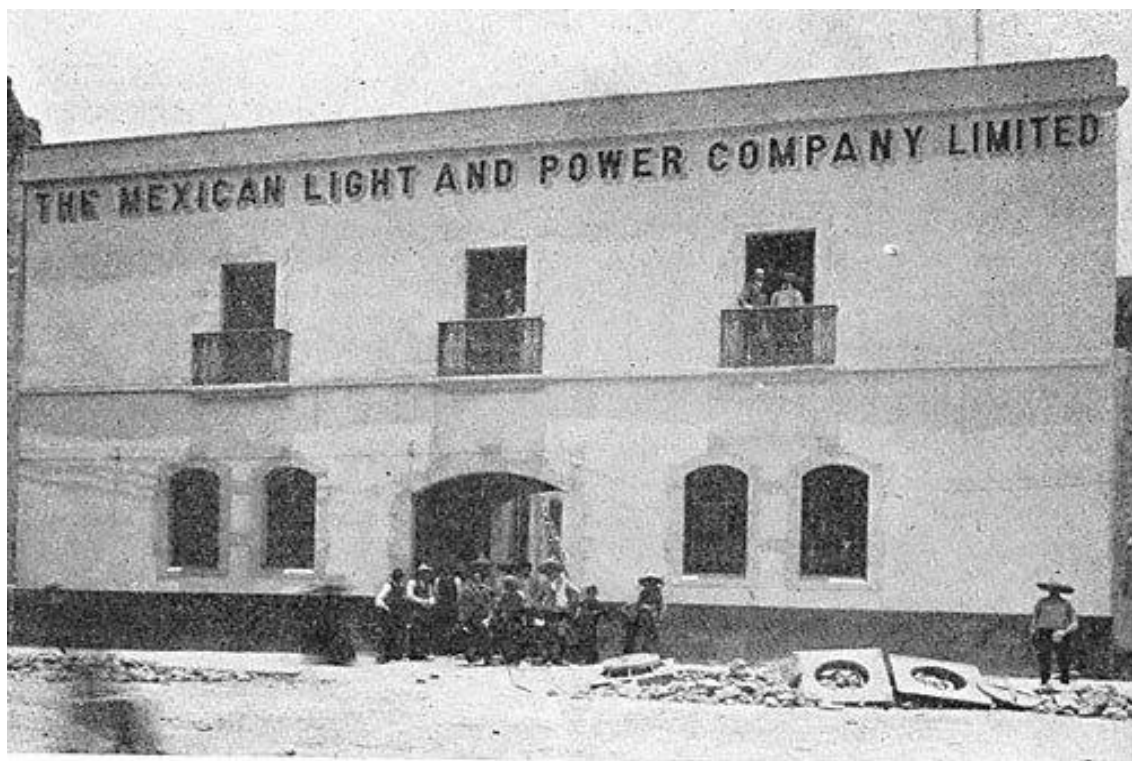


Fig. 1. The Mexican Light and power company (Batopilas Chihuahua)

Un proyecto hidroeléctrico es utilizado para la generación de energía eléctrica a partir de energía potencial y cinética del agua que fluye por un curso natural o artificial, incluye represas, reservorios, canales, conductos, casa de máquinas y líneas de transmisión, las cuales son las encargadas de transportar y suministrar la electricidad a los usuarios. Para considerar la implementación de un proyecto hidroeléctrico, en primera instancia se debe analizar la demanda energética y la demanda de dotación de agua necesaria para satisfacer a la población afectada, una vez definido lo anterior, se puede tener un punto de partida para definir las características del proyecto, tales como capacidad de almacenamiento y capacidad de generación, por mencionar algunas.

Por otra parte, un proyecto hidroeléctrico está conformado por diversas obras de gran magnitud, las cuales se presentan en distintas etapas y para llevarse a cabo requieren una planeación, diseño y construcción exhaustiva y detallada; tomando en cuenta lo anterior, lograr un diseño eficaz representa un reto ya que cada proyecto depende de las condiciones geográficas, topográficas, hidrológicas y situación económica de la región donde se localiza. Dicho proyecto se conforma de distintos componentes como lo son la presa, tuberías a

presión, turbinas, generadores eléctricos, subestación y líneas de transmisión. Como partes constitutivas de una presa se encuentran la cortina, el vertedor, la obra de toma, la obra de desvío (ataguía aguas abajo, ataguía aguas arriba y / o túneles o canal) y el vaso de almacenamiento. El caso de análisis de este documento se profundizará en la obra de desvío de un proyecto hidroeléctrico, la cual generalmente es de carácter temporal (también puede ser utilizada en la obra de toma o en la obra de excedencias con una debida planeación, construcción y operación¹, cuyo objetivo es mantener seco el sitio de construcción de la presa y de las obras auxiliares durante el tiempo de construcción.

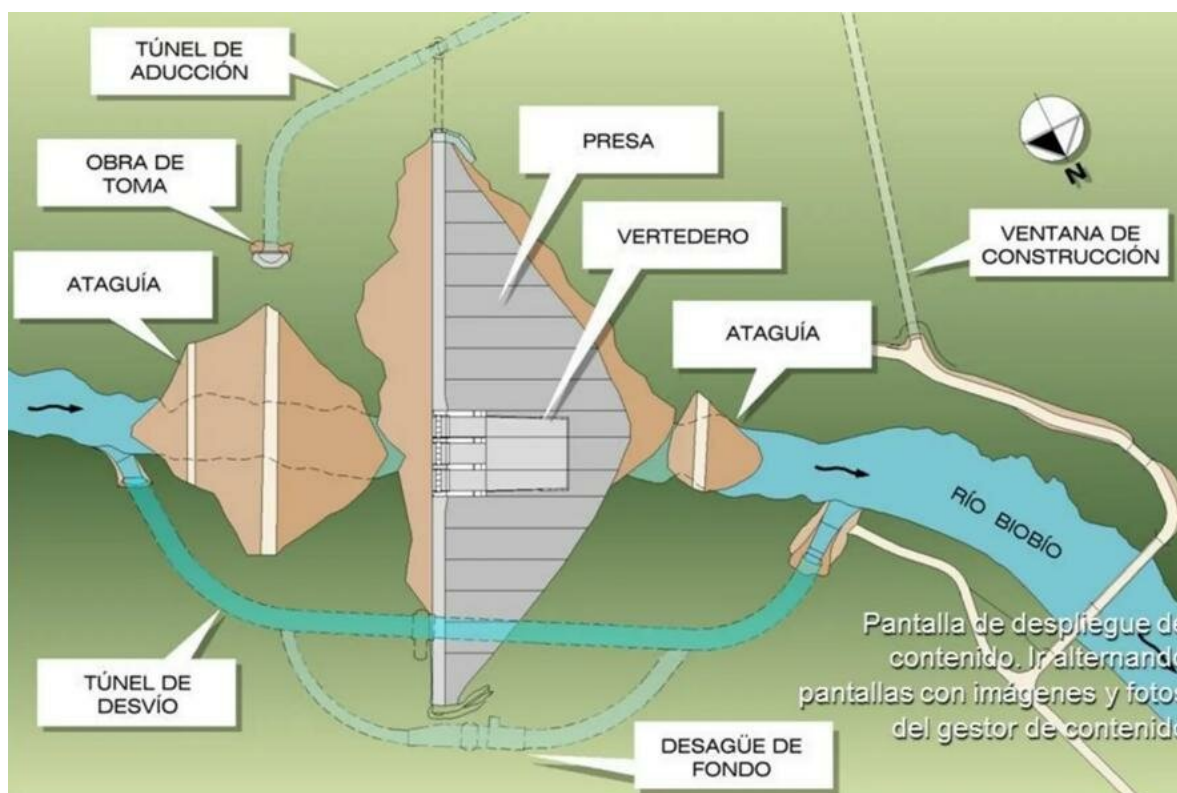


Fig. 2. Esquema de las partes de una obra de desvío.

“Las obras de desvío pueden clasificarse en distintos tipos, siendo los más comunes los canales o tajos a cielo abierto, túneles, conductos aislados metálicos o de concreto abiertos o cerrados, conductos abiertos o cerrados a través de la cortina y conductos de otros materiales como madera plásticos etc.”²

¹ Marengo, 2001

² (Comisión Federal de Electricidad, 1983)

Debido a lo anterior, para hacer una selección correcta del tipo de desvío que debe ser utilizado dependen de ciertas características o factores los cuales se derivan de las condiciones hidrológicas como lo son el régimen de escurrimiento, la magnitud y frecuencia de las avenidas, el periodo de retorno del gasto máximo, el tiempo o número de años en que esta se encontrará en operación. Así mismo intervienen las condiciones topográficas y geológicas del sitio, todo esto considerando los compromisos de generación o de abastecimiento aguas abajo apegándose siempre a una planeación y construcción acorde al método de desvío seleccionado.

2.1.- Sistema Hidroeléctrico Grijalva.

“El río Grijalva es producto de la unión de los ríos Selegua, Grandagalpa (Rincón Tigre) y San Gregorio, que confluyen en el embalse de la Presa La Angostura; a partir de allí se le denomina Río Grijalva - Mezcalapa o Río Grande de Chiapas”³, posteriormente el río cambia su curso de noroeste a norte hasta llegar a Tuxtla Gutiérrez y atraviesa la falla geológica conocida como Cañón del Sumidero, siendo este el lugar donde alcanza su máxima profundidad registrada antes de llegar al embalse de la Presa Chicoasén; el río cambia su curso de nuevo hacia el noroeste hasta entrar en el embalse de la Presa Netzahualcóyotl (Malpaso) donde recibe el Río La Venta, siendo éste uno de sus principales afluentes, a continuación gira hacia el norte para entrar al embalse de la Presa Peñitas pasando finalmente a ser límite estatal entre Chiapas y Tabasco adentrándose a éste último.

El aprovechamiento hidroeléctrico de este cauce ha sido de gran importancia para el país ya que como se mencionó anteriormente, el río Grijalva permite el control de avenidas y el aprovechamiento hidroeléctrico a través de 4 centrales hidroeléctricas: Presa La Angostura, presa Chicoasén, presa Chicoasén II, la cual se encuentra en construcción y es la que se toma como base para la elaboración de este documento, la presa Malpaso y finalmente la presa Peñitas, siendo ésta la más pequeña del Sistema Hidroeléctrico Grijalva.

³ (Wikipedia la enciclopedia libre, 2024)

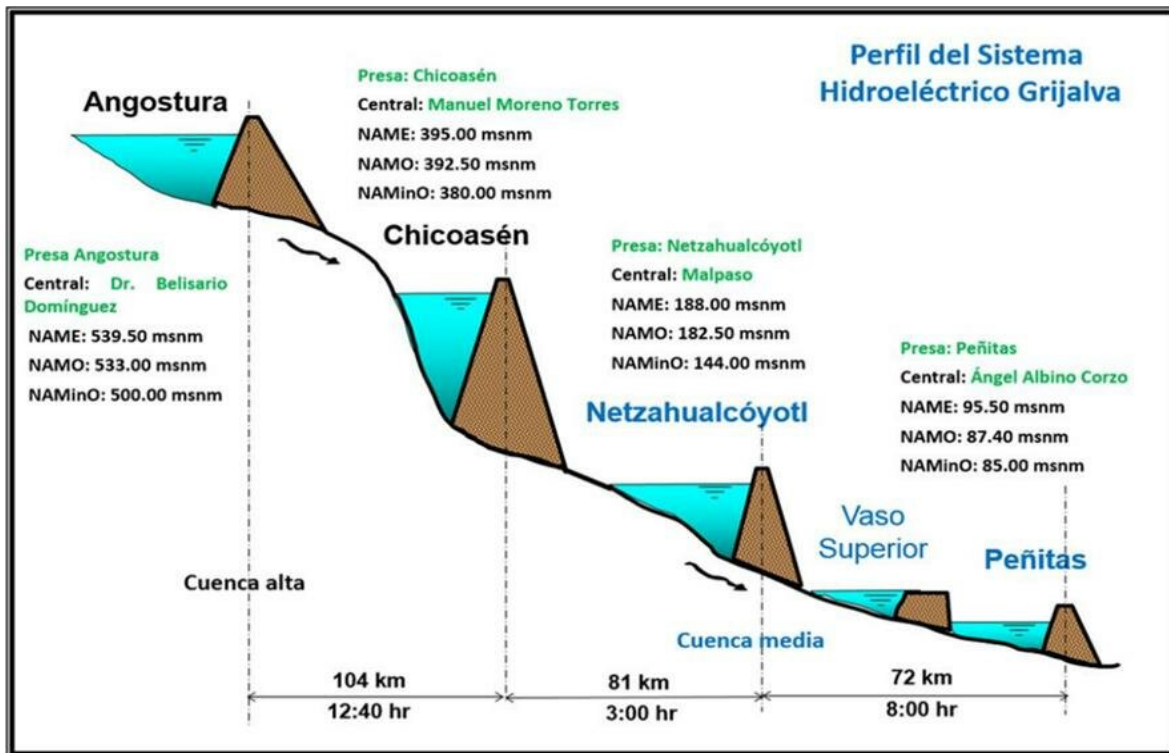


Fig. 3. Esquema del sistema de presas del río Grijalva. Fuente: CFE, CONAGUA⁴

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las Centrales Hidroeléctricas que confirman el Sistema Hidroeléctrico Grijalva.

2.1.1.- Central Hidroeléctrica Dr. Belisario Domínguez “Presa La Angostura”.

Fue construida en el periodo de 1969 a 1974 y comenzó su operación el 14 de Julio de 1976 siendo la segunda obra de aprovechamiento dentro del “Sistema Hidroeléctrico Grijalva” en el estado de Chiapas. Se localiza en el municipio Venustiano Carranza a 104 km aguas arriba de la presa Chicoasén. Dicha central es capaz de almacenar 13,170 hm³ siendo éste el embalse con mayor capacidad de almacenamiento del país; por otra parte, cuenta con 5 turbinas tipo Francis con una potencia de 180 MW por unidad teniendo una capacidad total instalada de 900 MW. A continuación, se presentan las características de cada una de las obras que conforman la CH La Angostura.

⁴ (Comisión Federal de Electricidad, Comisión Nacional Del Agua, 2023)

Tabla 1. Hidrología de la “Presa la Angostura”

Hidrología	
Área total de la cuenca.	19,580 km ²
Escorrentamiento medio anual (1952-2022)	10,012.94 hm ³
Gasto medio anual (1952-2022)	317.51 m ³ /s
Volumen de la avenida revisada	14,084 hm ³
Gasto máximo de descarga por el vertedor (Partiendo del NAMO)	5,000 m ³ /s
Elevación máxima del embalse al transitar la avenida revisada.	539.48 msnm

Tabla 2. Embalse de la “Presa la Angostura”

Embalse	
NAME	
Área inundada	635.59 km ²
Elevación	539.50 msnm
Capacidad total	19,736.40 hm ³
Capacidad útil	17,356.90 hm ³
NAMO	
Área inundada	556.01 km ²
Elevación	533.00 msnm
Capacidad total	15,549.13 hm ³
Capacidad útil	13,169.63 hm ³
NAMinO	
Área inundada	178.29 km ²
Elevación	500.00 msnm
Capacidad útil entre NAMinO y NAMO	13,169.63 hm ³
Capacidad de control de avenidas entre el NAMO y NAME	4,187.27 hm ³
Nivel mínimo histórico (1-Jun-1980)	497.45 msnm
Nivel máximo histórico (26-Oct-1999)	538.20 msnm

Tabla 3. Cortina de la “Presla la Angostura”

Cortina	
Tipo	Enrocamiento con núcleo de arcilla
Elevación de la corona	543.00 msnm
Altura máxima	146.70 m
Longitud de la corona	323.50 m
Elevación del desplante	396.00 msnm
Volumen total (materiales)	4.03 hm ³
Ancho máximo en la base	550.00 m
Ancho de corona	10.00 m
Bordo Libre	3.50 m

Tabla 4. Obra de toma y potencia para generación de la “Presla la Angostura”

Obra de Toma para Generación	
Tipo	Ducto de concreto armado.
Número de tomas	5
Umbral de la obra de toma	469.50 msnm
Gasto máximo por toma	218.00 m ³ /s
Número de compuertas rodantes	10 (4.30 x 8.90 m)
Diámetro de los túneles	8.70 m
Espesor de la tubería de concreto	0.60 m
Gasto máximo total	1,090.00 m ³ /s
Potencia y Generación.	
Capacidad instalada (5 unidades)	900.00 MW
Factor de planta medio anual (2008-2022)	31.51%
Generación media anual (2008-2022)	4,486.28 GWh
Agua turbinada anual (2008-2022)	9,754.00 hm ³

Tabla 5. Conducción y Casa de Máquinas de la “Presla la Angostura”

Conducción (Tubería a Presión)	
Tipo	Tubería de acero
Capacidad instalada (5 unidades)	5
Diámetro (Variable)	de 6.50 a 5.70 m
Longitud total	125 m
Inclinación	45°
Gasto máximo	1,090 m ³ /s
Casa de Máquinas	
Tipo	Subterránea
Altura del eje del distribuidor	417.00 msnm
Grúas viajeras	4, de 225/30 t.

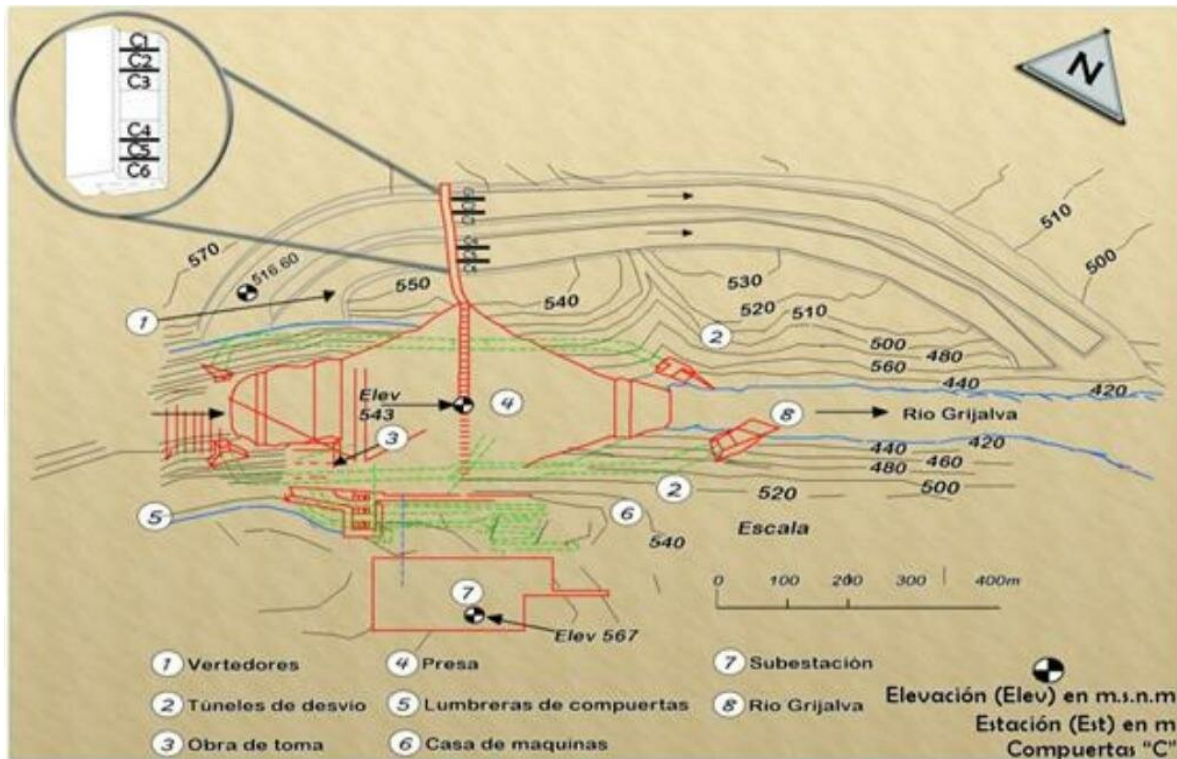


Fig. 4. Planta general de la presa “La Angostura” Fuente: CFE, CONAGUA

2.1.2.- Central Hidroeléctrica Ing. Manuel Moreno Torres “Presa Chicoasén”

Fue construida en el periodo de 1974 a 1980 siendo el 1° de mayo de 1980 el cierre del desvío, posteriormente a los pocos meses las unidades generadoras 1,2,3 y 4 entraron en operación, la 5ta unidad entró en operación en el año de 1981 y finalmente las unidades 6,7 y 8 entraron en operación hasta el año 2004; dicha central hidroeléctrica es la tercera obra de aprovechamiento dentro del “Sistema Hidroeléctrico Grijalva” en el estado de Chiapas. Se localiza en el municipio Chicoasén a 104 km aguas abajo de la presa La Angostura. Dicha central es capaz de almacenar 205.98 hm^3 , por otra parte, cuenta con 8 turbinas tipo Francis con una potencia de 300 MW por unidad teniendo una capacidad total instalada de 2,400 MW siendo la central más productiva del Sistema Grijalva y la de mayor generación del país. A continuación, se presentan datos más específicos acerca de la presa Chicoasén, en cuanto a su hidrología, características del embalse, niveles de operación, características de la cortina, obra de toma, etc.

Tabla 6. Hidrología de la “Presa Chicoasén”

Hidrología	
Área total de la cuenca.	7,140.68 km ²
Escorrentamiento medio anual	2,259.38 hm ³
Gasto medio anual (1952-2019)	71.64 m ³ /s
Avenida máxima registrada (Gasto adorado en Chiapa de Corzo 1963)	6,000 m ³ /s
Gasto medio diario máximo registrado (2005)	3,727 m ³ /s
Avenida de diseño original (cuenca propia)	17,400 m ³ /s

Tabla 7. Embalse de la “Presa Chicoasén”

Embalse	
NAME	
Área inundada	26.01 km ²
Elevación	395.00 msnm
Capacidad total	1,318.59 hm ³
Capacidad útil	259.55 hm ³
NAMO	
Área inundada	22.61 km ²
Elevación	392.50 msnm
Capacidad total	1,265.02 hm ³
Capacidad útil	205.98 hm ³
NAMinO	
Área inundada	9.69 km ²
Elevación	380.00 msnm
Capacidad muerta (hasta el NAMinO)	1,059.04 hm ³
Capacidad para azolves (hasta el umbral de la obra de toma)	744.98 hm ³
Capacidad entre el NAMinO y NAME	273.90 hm ³
Área máxima del embalse	31.50 km ²

Tabla 8. Cortina de la “Presa Chicoasén”

Cortina	
Tipo	Enrocamiento
Elevación de la corona	402.00 msnm
Longitud de la corona	584.00 m
Volumen total (materiales)	15.374 hm ³
Ancho de corona	25.00 m
Bordo Libre	7.00 m
Altura máxima de la cortina	262.00 m
Nivel del desplante	140.00 msnm

Tabla 9. Obra de toma y potencia para generación de la “Presa Chicoasén”

Obra de Toma para Generación	
Tipo	Ducto de concreto armado de 6.70 a 6.20 m
Número de tomas	8
Umbral de la obra de toma	355.60 msnm
Gasto de diseño por toma	186.70 m ³ /s
Número de compuertas rodantes	8 de 7.45 x 6.80 m
Potencia y Generación.	
Capacidad total instalada (8 Tipo Francis de eje vertical)	2,400.00 MW
Capacidad por unidad	300.00 MW
Gasto total de extracción por las 8 unidades	1,493.60 m ³ /s
Factor de planta medio anual (2015-2019)	20.18%
Generación media anual (2015-2019)	4,245.25 GWh
Agua turbinada anual (2015-2019)	1,493.60 hm ³

Tabla 10. Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Chicoasén”

Conducción (Tubería a Presión)	
Tipo	Tubería de acero
Número de conductos	8
Diámetro (Variable)	de 6.20a 5.50 m
Longitud por túnel	190.00 m
Longitud total de túneles	1,326.67 m
Inclinación	52°
Gasto máximo por conducto	186 m ³ /s
Casa de Máquinas	
Tipo	Subterránea
Elevación del eje del distribuidor	199.00 msnm

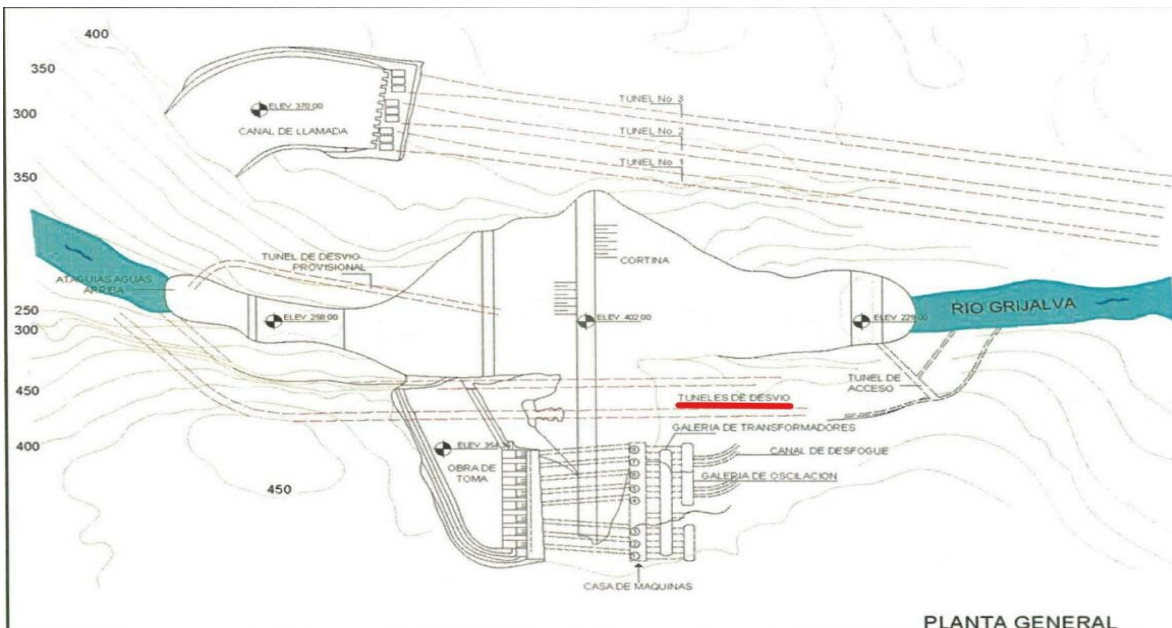


Fig. 5. Planta general de la presa “Chicoasén”. Fuente: CFE, CONAGUA⁵

⁵ (Comisión Federal de Electricidad, Comisión Nacional del Agua, 2021)

2.1.3.- Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén II.

Los estudios preliminares fueron realizados por la CFE en el periodo de 1963 a 1970, con la finalidad de definir la factibilidad geológica, en las alternativas Sumidero, Chicoasén y La Cueva. Entre los años 1978 y 1990, se realizaron los estudios de la etapa prefactibilidad de la alternativa Copainalá, ubicada aguas abajo de la confluencia del arroyo Copainalá con el río Grijalva, sin embargo, el sitio se descartó ya que los acarreo del arroyo Copainalá afectarían las obras civiles. En 2001, iniciaron los estudios de anteproyecto y apoyo a diseño, los cuales se retomaron en 2012 y en 2013 y se ubicó la alternativa “La Pila”, localizada a unos 480,0 m aguas arriba del eje, hasta entonces denominado Chicoasén II. Respecto a los estudios hidrológicos, se utilizaron de 31 años de registros, provenientes de las extracciones de la Central Hidroeléctrica Manuel Moreno Torres (Presa Chicoasén), así como de los escurrimientos obtenidos por cuenca propia al Sitio del Proyecto, a los cuales, aplicando a éstos técnicas estadísticas, se obtuvo una avenida máxima de diseño para Chicoasén II de 15 667,00 m³/s.

La Comisión Federal de Electricidad debe suministrar la demanda de energía eléctrica a través de la diversificación de las fuentes de generación y la elección de las alternativas que ofrezcan mejor economía. Las características técnicas y económicas del Proyecto Hidroeléctrico “Chicoasén II”, fueron decisivas para tomarlo en cuenta en los planes de construcción de la CFE, proponiendo reactivar la construcción del proyecto en el año 2022.

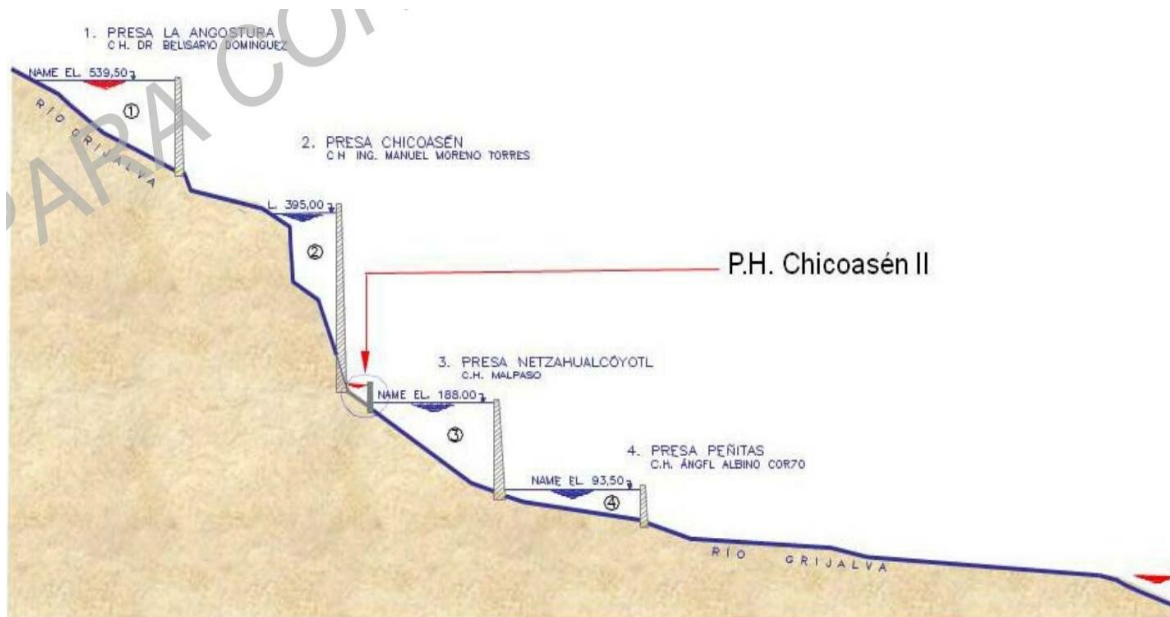


Fig. 6. Ubicación de P-H- Chicoasén II en el S.H.G

A continuación, se presentan las características de la obras que conforman al PH Chicoasén II.

Tabla 11. Hidrología de la presa “Chicoasén II”

Hidrología	
Área total de la cuenca. (Considerada desde la Angostura)	26,600 km ²
Area de la cuenca propia	960 km ²
Escorrentamiento medio anual al sitio del proyecto	11,522.89 hm ³
Escorrentamiento medio anual aprovechable	11,324.08 hm ³
Gasto medio anual (1952-2019)	365.14 m ³ /s
Avenida máxima registrada	5341 m ³ /s
Gasto medio aprovechable	358.84 m ³ /s
Periodo de registro	31 años

Tabla 12. Cortina de la presa “Chicoasén II”

Cortina	
Tipo	Muros de cierre de Hardfill y cara de concreto
Elevación de la corona	211.00 m
Longitud de la corona	275.25 m
Elevación estimada de desplante máxima	168 m
Ancho de corona (muro izquierdo, estructuras centrales, muro derecho)	17 m, 10m -17m y 95 m
Elevación Bordo Libre	211.5 m
Elevación del parapeto	212.00 m

Tabla 13. Obra de toma de la presa “Chicoasén II”

Obra de Toma	
Número de conductos	3
Longitud de conducto	39.639 m
Elevación de la plataforma de operación de compuertas	211 m
Gasto de diseño (por toma)	497.87 m ³ /s
Número de obturadores por cada conducto	8
Elementos de cierre	Obturador tipo deslizante
Mecanismo de izaje para elementos de cierre	Grúa pórtico
Capacidad estimada de grúa pórtico	45 t

Tabla 14. Casa de máquinas de la presa “Chicoasén II”

Casa de Máquinas	
Tipo	Exterior en el cauce integrada a la obra de
Elevación del eje del distribuidor	175.17 m
Elevación piso principal	188.5 m
Potencia total instalable a la salida del generador	240.00 MW
Grúa viajera (cantidad / capacidad)	1/ (250/50) pieza/t

2.1.4.- Central Hidroeléctrica Malpaso “Presa Nezahualcóyotl”

Fue construida en el periodo de 1960 a 1965 y comenzó su operación el 26 de enero de 1969 siendo la primera obra de aprovechamiento dentro del “Sistema Hidroeléctrico Grijalva” en el estado de Chiapas. Se localiza en el municipio de Mezcalapa (antes llamado Tecpatán), a 81 km aguas abajo de la presa Chicoasén. Dicha central es capaz de almacenar 9,317.39 hm³, la cuenca propia comprende la superficie entre Chicoasén y Malpaso siendo de 9,952 km² aproximadamente; por otra parte, la central hidroeléctrica se construyó en caverna y se localiza a la margen derecha del río, la casa de máquinas cuenta con 6 turbinas tipo Francis de eje vertical con una potencia de 180 MW por unidad teniendo una capacidad total instalada de 1,080 MW. A continuación, se presentan datos más específicos acerca de la presa Chicoasén, en cuanto a su hidrología, características del embalse, niveles de operación, características de la cortina, obra de toma, etc.

Tabla 15. Hidrología de la “Presa Nezahualcóyotl”

Hidrología	
Área total de la cuenca.	9,952.19 km ²
Área de la cuenca del río Grijalva hasta Malpaso	32,540 km ²
Escurrimiento medio anual (cuenca propia)	5,500.05 hm ³
Gasto medio anual (1952-2022)	174.41 m ³ /s
Gasto medio diario máximo registrado (25 de Septiembre de 1980)	7,815 m ³ /s
Avenida máxima registrada (24-sep-80)	14,261 m ³ /s
Avenida de diseño original	20,000 m ³ /s

Tabla 16. Cortina de la “Presa Nezahualcóyotl”

Cortina	
Tipo	Enrocamiento con corazón impermeable de arcilla
Elevación de la corona	192.00 msnm
Longitud de la corona	478.00 m
Ancho de corona	10.00 m
Ancho de la base	485.00 m
Volumen toal de la cortina	5,077.280 m ³
Bordo Libre	4.00 m
Altura máxima	137.50 m
del desplante	54.50 msnm

Tabla 17. Embalse de la “Presa Nezahualcóyotl”

Embalse	
NAME	
Área inundada	317.67 km ²
Elevación	188.00 msnm
Capacidad total (incluye capacidad Muerta)	14,056.32 hm ³
Capacidad útil	11,000.59 hm ³
NAMO	
Área inundada	299.24 km ²
Elevación	182.50 msnm
Capacidad total	12,373.12 hm ³
Capacidad útil	9,317.39 hm ³
NAMinO	
Área inundada	178.37 km ²
Elevación	144.00 msnm
Capacidad muerta (hasta el NAMinO)	3,055.73 hm ³
Capacidad para azolves (hasta el umbral de la obra de toma)	1,000 hm ³
Capacidad útil del NAMinO al NAMO	9,317.39 hm ³
Capacidad para control de avenidas	1,683.20 km ²
Área total inundada al NAME	317.67 km ²
Nivel Mínimo Histórico (10 de Julio de 1975)	144.43 msnm
Nivel Máximo Histórico (13 de marzo de 2008)	184.88 msnm

Tabla 18. Obra de toma y Potencia para generación de la “Presa Nezahualcóyotl”

Obra de Toma para Generación	
Tipo	-
Número de tomas	6
Umbral de la obra de toma	127.70 msnm
Gasto máximo por cada una de las tomas	240 m ³ /s
Número de compuertas rodantes	6
Potencia y Generación.	
Capacidad total instalada (6 Tipo Francis de eje vertical)	1,080.00 MW
Capacidad por unidad	180.00 MW
Factor de planta (2015-2019)	28.29%
Generación media anual (2015-2019)	2,677.66 GWh
Agua turbinada anual (2015-2019)	13.503.53 hm ³
Eficiencia combinada de la central	85.30%

Tabla 19. Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Nezahualcóyotl”

Conducción (Tubería a Presión)	
Tipo	Tubería a presión telescópica
Número de conductos	6
Diámetro (Variable)	de 7.00 a 6.00 m
Longitud total de túneles	677.52 m
Inclinación	36°
Casa de Máquinas	
Tipo	Subterránea
Grúas viajeras	2 Grúas viajeras con 2 ganchos (140/30 t)

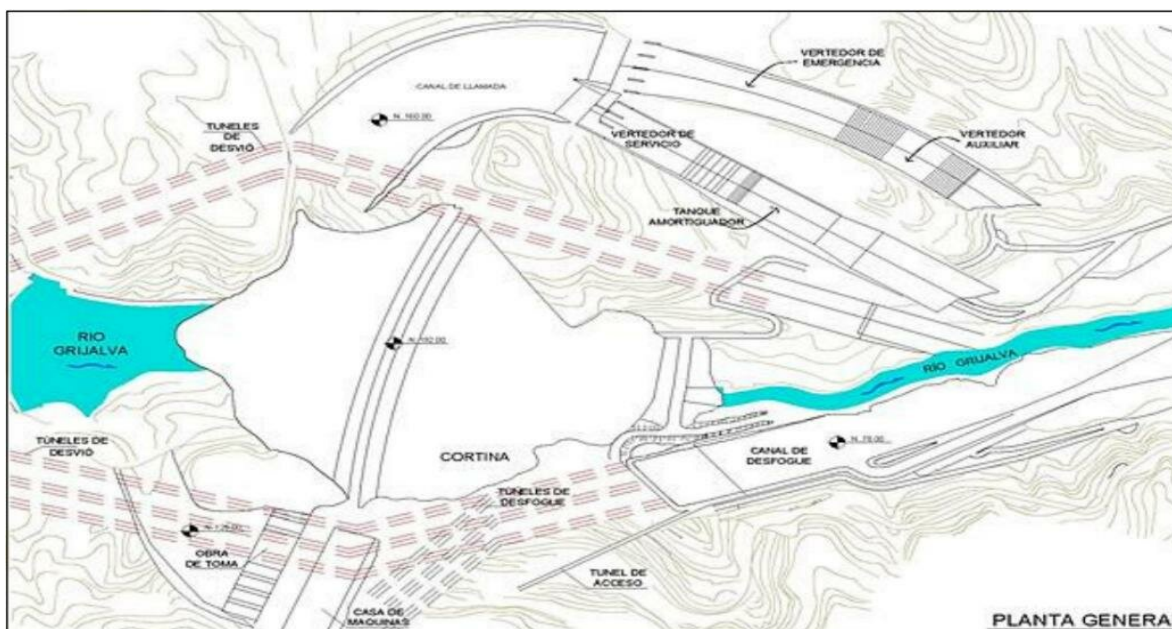


Fig. 7. Planta general de la presa “Nezahualcóyotl”. Fuente: CFE

2.1.5.- Central Hidroeléctrica Ángel Albino Corzo “Presa Peñitas”

Fue construida en el periodo de 1960 a 1965 y comenzó su operación el 15 de septiembre de 1987 siendo la cuarta obra de aprovechamiento dentro del “Sistema Hidroeléctrico Grijalva” en el estado de Chiapas. Se localiza en el municipio de Ostucán, a 73 km aguas abajo de la presa Malpaso. Dicha central es capaz de almacenar 396.55 hm³; por otra parte, cuenta con 4 turbinas tipo Kaplan -V teniendo una capacidad total instalada de 420 MW. A continuación, se presentan datos más específicos acerca de la presa Chicoasén, en cuanto a su hidrología, características del embalse, niveles de operación, características de la cortina, obra de toma, etc.

Tabla 20. Hidrología de la “Presa Peñitas”

Hidrología	
Área total de la cuenca río Grijalva hasta Peñitas	35,701 km ²
Área de la cuenca entre Malpaso y Peñitas	1,264 km ²
Área de la cuenca del vaso superior	734 km ²
Área de la cuenca del vaso inferior	530 km ²
Avenida máxima registrada (2 de octubre de 1999)	8,103 m ³ /s
Gasto de la avenida de diseño original	22,877 m ³ /s
Volumen de la avenida de diseño original	6,850 hm ³
Duración avenida de diseño original	8 días
Escurrimiento medio anual cuenca propia (1952-2019)	3,626.82 hm ³
Gasto medio anual cuenca propia (1952-2019)	115.00 m ³ /s
Volumen de la avenida más desfavorable	30,217 hm ³
Duración avenida más desfavorable revisada	60 días

Tabla 21. Embalse de la “Presa Peñitas”

Embalse	
NAME	
Área inundada	35.85 km ²
Elevación	100 msnm
Capacidad total	784.51 hm ³
NAMO	
Área inundada	24.15 km ²
Elevación	87.40 msnm
Capacidad total	292.88 hm ³
Capacidad útil	72.91 hm ³
NAMinO	
Área inundada	20.92 km ²
Elevación	85.00 msnm
Capacidad total al NAMinO (Capacidad muerta)	219.97 hm ³
Capacidad útil del NAMinO al NAMO	146.10 hm ³
Capacidad para control de avenidas (del NAMO al NAME)	140.04 km ²
Nivel Mínimo Histórico (26 de octubre de 2009)	86.36 msnm
Nivel Máximo Histórico (01 de febrero de 2008)	100.61 msnm

Tabla 22. Obra de toma y potencia para generación de la “Presa Peñitas”

Obra de Toma para Generación	
Tipo	-
Número de tomas	4
Umbral de la obra de toma	63.00 msnm
Gasto máximo por cada una de las tomas	360 m ³ /s
Número de compuertas rodantes de servicio	8 de 10.10 x 12.60 m
Número de compuertas rodantes auxiliares	2 de 10.10 x 12.60 m
Potencia y Generación.	
Capacidad instalada (4 unidades tipo Kaplan - V)	420 MW
Capacidad por unidad	105.00 MW
Gasto de real por unidad	334 m ³ /s
Gasto total por las 4 unidades	1,336 m ³ /s
Factor de planta medio anual (2015-2019)	37.81%
Generación media anual (2015-2019)	1,391.83 GWh
Agua turbinada	16,454.32 hm ³

Tabla 23. Cortina de la “Presa Peñitas”

Cortina	
Tipo	Materiales graduados y enrocamiento
Elevación de la corona	98.00 msnm
Longitud de la corona	750.00 m
Volumen total (incluyendo ataguías)	3.24 hm ³
Altura total desde el desplante	53.00 m

Tabla 24. Conducción y Casa de Máquinas de la “Presa Peñitas”

Conducción (Tubería a Presión)	
Tipo	Tubería de acero
Número de conductos	8 (2 por túnel)
Dimensiones de los conductos	9.25 x 12.60 m
Longitud por túnel	40.00 m
Longitud total de túneles	320.00 m
Inclinación	45°
Casa de Máquinas	
Tipo	Exterior
Grúas viajeras	2 Gruas viajeras (180/30 t)

2.2.- Criterios de diseño

Los criterios que influyen en el diseño de las obras de desvío dependen de algunos estudios básicos que deben realizarse para valorar y comenzar a definir una planeación de la obra; dichos estudios se encuentran divididos en temas de hidrología, topografía, geología, planeación, constructibilidad y finalmente un análisis de riesgo. Lo anteriormente mencionado se basa en los manuales de diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad los cuales han sido, hasta la fecha, materiales de consulta para el diseño de diversas obras de desvío en territorio nacional e incluso para proyectos hidroeléctricos internacionales.

2.2.1.- Hidrología.

La hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre sus propiedades físicas y químicas, y su relación con el medioambiente, incluyendo a los seres vivos (Mijares, 1989). La hidrología aplicada permite al ingeniero realizar análisis para proyectar, construir o supervisar el funcionamiento de instalaciones hidráulicas tales como puentes, estructuras para control de avenidas, presas,

vertedores y canales, entre otras; es importante resaltar que los resultados obtenidos son normalmente estimaciones con aproximación limitada.

Tomando en cuenta lo anterior, los estudios hidrológicos son requeridos para obtener información de escurrimientos, periodos de estiaje y de creciente, gastos mínimos y máximos instantáneos, gasto máximo registrado, año de escurrimiento máximo, entre otros factores; dichos factores son de utilidad para poder obtener la avenida máxima la cual será proyectada utilizando métodos estadísticos para un periodo de retorno que, de acuerdo con el Memorandum No. B00.7.-616⁶ (Fig. 8), depende del tamaño y almacenamiento de la presa, con esto se podrá obtener la avenida de diseño y el gasto de diseño a utilizar, los cuales dependerán del tiempo de operación de la obra de desvío. Es importante mencionar que este análisis no garantiza 100% la seguridad y éxito del proyecto a lo largo del tiempo debido a que los análisis se hacen con base en probabilidades y aproximaciones lo cual siempre conlleva a tener un margen de error e incertidumbre.

CATEGORÍA	ALMACENAMIENTO (millones de m ³)	ALTURA (m)	PÉRDIDA DE VIDAS EN CASO DE FALLA	Tr (Años)
BORDO	Menor a 0.25	Menor a 15	0-10	100-500
			11-100	250-1,000
			Más de 100	500-10 000
PRESA PEQUEÑA	Entre 0.25 y 3	Menor a 15	0-10	1 000
			11-100	1 000-10,000
			Más de 100	10 000 o AMP
PRESA GRANDE	Mayor a 3	Mayor a 15	Evaluación conforme a NMX-AA-175-SCFI-2015	10 000 o AMP

AMP = Avenida máxima probable

Fig. 8. Tabla de periodos de retorno con base a su capacidad de almacenamiento. (Memorandum No. B00.7.-616)

La avenida de diseño, determina si es que el embalse debe o no regularse cuando se transita la avenida; en este aspecto la regulación depende de que el gasto máximo de la avenida sea igual o casi igual al gasto máximo de desvío desprendiéndose en dos casos; si es igual se tiene que la presa trabaja como canal o en su defecto, si el desvío es por medio de un túnel, el comportamiento del túnel será a superficie libre y por ende no habrá regulación, de

⁶ (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2017)

ser lo contrario, será necesaria la regulación. En cualquiera de los dos casos, se determinará con el análisis la alternativa que sea técnica y económicamente factible.

Como se mencionó anteriormente, los estudios y análisis hidrológicos dependen de la disposición de datos históricos los cuales no siempre están disponibles o están desactualizados, debido a esto la mayoría de los países cuentan con agencias gubernamentales que recolectan y difunden datos hidrológicos. En el caso de México, los organismos encargados de esta recolección y publicación son la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en conjunto con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Internacional de Límites y Aguas México-Estados Unidos de América, además de otros organismos de carácter local.

Dicho lo anterior, el análisis hidrológico exhaustivo es, el primer paso en la planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos. Para ello necesitaremos la disposición de datos hidrológicos que al analizarlos e interpretarlos permitirán al ingeniero tomar las decisiones adecuadas para lograr la mayor seguridad y probabilidad de éxito de los proyectos u obras hidráulicas para los cuales se realicen dichos estudios.

2.2.2.- Topografía

La topografía influye en la elección del tipo desvío y la altura de la ataguía a definir, ya que si el terreno presenta boquillas cerradas prácticamente se obliga a utilizar un desvío por medio de túneles y de lo contrario si se tienen boquillas abiertas, éstas son más adecuadas para utilizar un desvío por medio de tajo o canal. Independientemente del tipo de desvío se deben comparar los resultados obtenidos entre ambos tipos, algunos de estos rubros son el gasto máximo y las velocidades a través del desvío y de igual forma las elevaciones máximas del agua que se tengan para cada caso.

2.2.3.- Geología

La geología en una obra de desvío es de vital importancia para garantizar la permanencia y seguridad de la obra mínimo durante su vida útil; independientemente del tipo de desvío utilizado, los factores que deben revisarse para el correcto funcionamiento son la impermeabilidad, la estabilidad y la erosión, siendo esta última controlada bajo parámetros aceptables que garanticen que el efecto erosivo del agua deteriore lo menos posible la superficie del desvío utilizado. En cuanto a la impermeabilidad, ésta va ligada a la filtración

la cual debe reducirse al mínimo para evitar daños que repercutan en la estabilidad siendo ejemplo de esto el deslizamiento de taludes en el caso de canales o derrumbes en el caso de túneles; por último, además de lo antes mencionado se debe considerar el efecto del intemperismo para conseguir la permanencia a la obra de desvío.

Finalmente haciendo un análisis de los resultados obtenidos a través de los estudios geológicos, si no se satisfacen las demandas mínimas de seguridad y permanencia de la obra, siempre existe la posibilidad de proporcionar algún tratamiento a la estructura la cual garantice el funcionamiento adecuado, seguro y duradero de la obra de desvío.

2.2.4.- Planeación y constructibilidad

La planeación integral y constructibilidad efectiva abarcan parámetros como el tiempo, costos y fechas de la programación del proyecto; en este apartado es importante mencionar que la programación y planeación deben contemplar si es que la ejecución coincide con el tiempo de estiaje o de avenidas, ya que esto repercute en la magnitud del desvío. Además, se debe considerar la simultaneidad de ejecución de otras estructuras que conforman la presa por lo que en este punto el uso de maquinaria implica realizar un análisis que contemple el rendimiento, costos y disponibilidad de esta.

2.2.5.- Análisis de riesgo

Para este rubro es importante señalar que las obras de desvío deben diseñarse para que la avenida de diseño correspondiente pueda fluir a través de las estructuras sin sufrir daños graves y que de esta forma la población aledaña a las obras quede protegida, debido a esto es que los diseños se hacen considerando periodos de retorno que dependen tipo de presa para el que es construido el desvío, así como del tiempo de vida útil del mismo.

Para evaluar el riesgo deben considerarse los siguientes factores: (Marengo,2005)

- I. Duración de la construcción de la obra
- II. Costo de los daños por la inundación, limpieza del recinto y retraso en el programa
- III. Costo por la pérdida de generación de energía eléctrica
- IV. Costo de afectaciones aguas abajo
- V. Pérdida de vidas humanas.

En caso contrario, también es importante conocer los factores o causas que influyen a que la ejecución de la presa no se lleve a cabo con el énfasis necesario en la seguridad, siendo algunas causas las siguientes:

- I. El problema se ha analizado tradicionalmente con los daños que se pueden ocasionar aguas abajo de la presa en construcción. Sin embargo, debería considerarse, además de los daños ocasionados a las propias estructuras, la pérdida económica por generación de energía cuando sea éste el propósito de la presa, ya que en ocasiones el costo de esta puede ser muy significativo.
- II. En muchas ocasiones, los daños causados se consideran responsabilidad del constructor, sin importar las consecuencias.
- III. Hay una noción irracional de que una avenida máxima de diseño no puede presentarse debido al corto periodo de tiempo que dura la construcción.

El riesgo siempre estará latente en cualquier tipo de obra civil y en cualquier etapa, es por ello por lo que este punto debe analizarse a lo largo de todo el proyecto con el fin de poder prevenir situaciones que lo retrasen o lo detengan, consiguiendo de esta forma que todo el equipo de trabajo pueda tomar decisiones adecuadas o planes de acción que puedan llevar el proyecto al éxito.

2.3.- Software de modelación hidráulica.

La modelación hidráulica aplica métodos numéricos y algoritmos que ayudan a analizar y simular el comportamiento del flujo bajo ciertas condiciones, lo cual permite plantear distintos escenarios que son de ayuda para la solución de la problemática planteada. La modelación permite diseñar, optimizar y evaluar obras hidráulicas como presas, vertedores, puentes, canales, entre otras obras, dando como resultado una mayor confiabilidad, precisión y economía a comparación de los cálculos teóricos los cuales han sido la herramienta predilecta de forma tradicional. Aunado a lo anterior, el uso de modelación hidráulica a partir de un software facilita el estudio y análisis de fenómenos complejos que afectan la seguridad y funcionamiento de las obras hidráulicas.

Actualmente la tecnología ofrece gran variedad de programas informáticos enfocados a la modelación hidráulica, los cuales, dependiendo el programa a utilizar, podrán brindar soluciones más detalladas a problemas con diferente nivel de complejidad.

Por otra parte, el software puede ser de carácter libre o con licencia, entre algunos programas podemos encontrar HEC-RAS, HEC-HMS, ANSYS Fluent, Inventor, CFD, IBER, iRIC, entre otros.

2.3.1.- Fundamentos hidráulicos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en diferentes tipos y a su vez puede describirse de distintas maneras; para este caso, la clasificación que se presentará a continuación se hará con base en el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

- I. Flujo permanente:
 - a. Se considera un flujo permanente en un canal abierto cuando la profundidad de flujo no cambia o se supone constante durante un intervalo de tiempo considerado.
- II. Flujo no permanente
 - a. El flujo es no permanente si la profundidad cambia respecto al tiempo. Para este caso es importante mencionar que la Ley de continuidad para flujo no permanente considera el tiempo, por lo tanto, la ecuación de continuidad para este caso deberá presentar el tiempo dentro de sus variables.
- III. Flujo uniforme
 - a. En canales abiertos el flujo es uniforme si la profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal. El flujo uniforme puede ser permanente o no permanente dependiendo si cambia o no la profundidad respecto al tiempo.
- IV. Flujo variado
 - a. Se considerará flujo variado si la profundidad del flujo cambia a lo largo del canal, de igual manera, el flujo variado puede ser permanente o no permanente. Este tipo de flujo puede clasificarse a su vez en flujo rápidamente variado y gradualmente variado.
 - i. Flujo rápidamente y gradualmente variado

1. Sucede cuando la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias relativamente cortas. Algunos ejemplos de esto son el salto y la caída hidráulicos; de otro modo es gradualmente variado

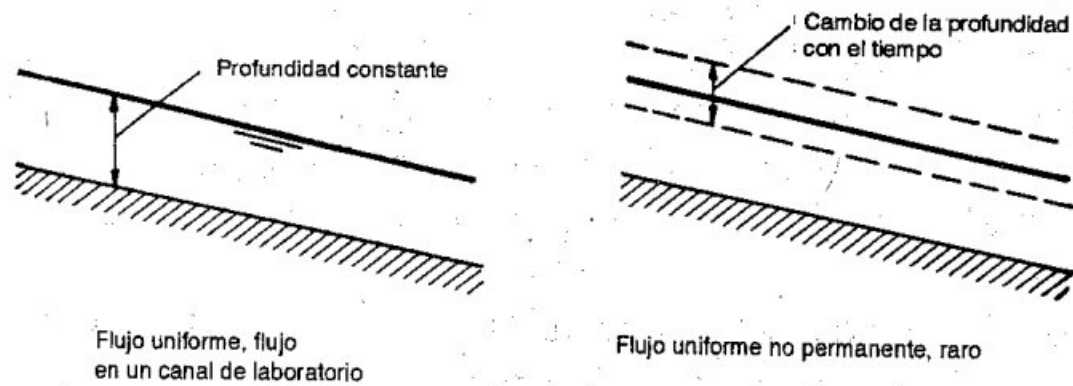


Fig. 9. Flujo uniforme.

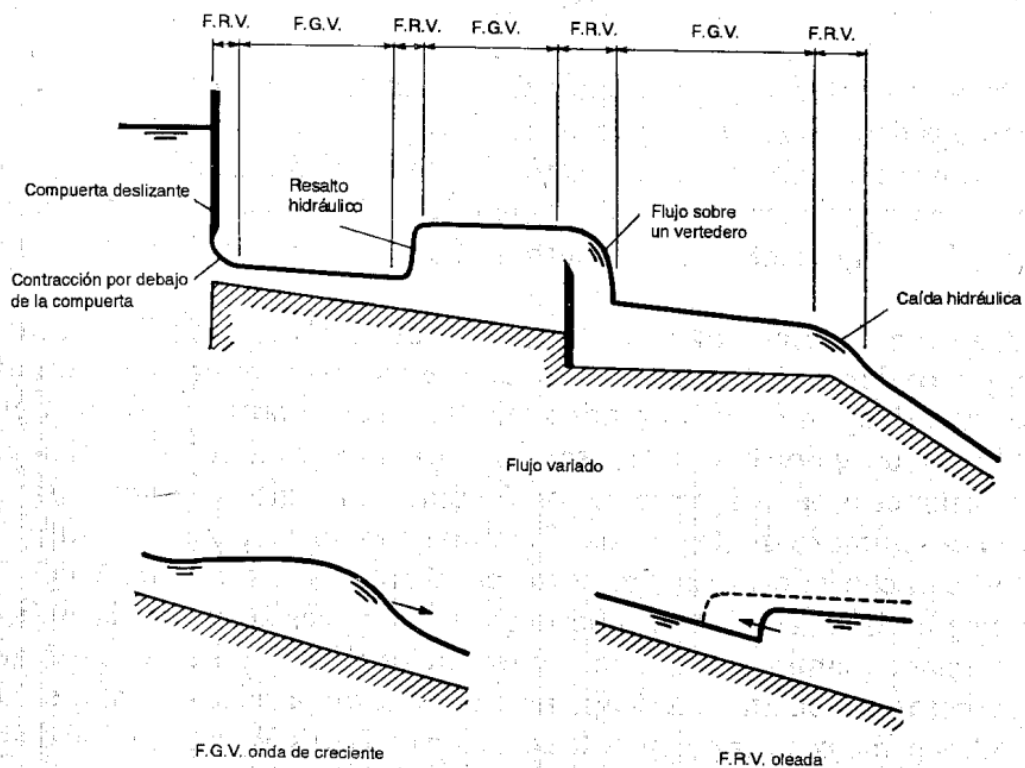


Fig. 10. Flujo no permanente.

Comportamiento del flujo.

En canales abiertos el comportamiento del flujo se rige por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo, tomando en cuenta lo anterior, el flujo puede ser laminar, turbulento o de transición.

Efecto de la viscosidad.

- I. Flujo laminar
 - a. Las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas de inercia, por ende, las partículas se mueven en trayectorias suaves definidas o líneas de corriente.
- II. Flujo turbulento
 - a. Las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales, debido a esto, las partículas del agua se mueven en trayectorias irregulares las cuales no son suaves ni fijas.
- III. Flujo de transición
 - a. Es un estado mixto entre flujo laminar y turbulento.

Efecto de la gravedad

Este efecto se representa por la relación de las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, dicha relación está definida por el número de Froude en el cual interviene la velocidad media del flujo, la aceleración de la gravedad y una longitud específica que depende del caso de estudio.

Propiedades de los canales abiertos

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, estos pueden variar de tamaño desde pequeños arroyos hasta ríos grandes. Las propiedades hidráulicas de este tipo de canales son muy irregulares, debido a esto en ocasiones se pueden hacer suposiciones empíricas para volver manejables las condiciones de flujo. Por otro lado, se encuentran los canales artificiales, los cuales son construidos por intervención humana, ya sea en laboratorio con propósitos experimentales o en obras de infraestructura para aprovechamiento humano. Las teorías hidráulicas aplicadas a canales artificiales proporcionan resultados muy similares a las condiciones reales, debido a esto se consideran razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño.

Geometría del canal

Los canales artificiales generalmente se diseñan utilizando figuras geométricas regulares. El trapecio es la forma más común para canales con taludes de tierra sin recubrimiento, debido a que proveen las pendientes necesarias para su estabilidad. De esta misma figura geométrica se pueden desprender dos casos particulares los cuales son el rectángulo y el triángulo, siendo en el caso del rectangular construidos generalmente de materiales más estables como mampostería, roca, metal o madera y para el caso del triangular, generalmente se utilizan en laboratorio o cunetas en carreteras.

Los elementos geométricos de una sección de un canal son propiedades que se definen por la geometría de la sección y la profundidad del flujo, dichos elementos se utilizan con amplitud en el cálculo del flujo. A continuación, se describen algunos elementos de importancia básica referenciados a la geometría de un canal trapecial.

- Profundidad de flujo (y)
 - Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.
 - Nivel
 - Es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia hasta la superficie libre.
 - Ancho superficial (T)
 - Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre
- $$T = b + 2ky \quad \dots (1)$$
- Donde b = Plantilla
 - k = Distancia horizontal recorrida.
 - y = Tirante
- Área mojada
 - Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.

$$A = (b + (ky)) * y \quad \dots (2)$$

➤ **Perímetro mojado**

- Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

$$P = b + 2y(\sqrt{1 + k^2}) \quad \dots (3)$$

➤ **Radio hidráulico**

- Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad \dots (4)$$

- Donde

- $A = \text{Área mojada}$

➤ **Profundidad hidráulica**

- Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T} \quad \dots (5)$$

- Donde

- $T = \text{Ancho de la superficie libre}$

Distribución y medición de la velocidad.

Las velocidades en un canal no se distribuyen uniformemente debido la presencia de la superficie libre y a la fricción con las paredes a lo largo del canal; además intervienen otros factores como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas.

La altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado con la expresión de carga de velocidad.

$$\frac{V^2}{2g} \quad \dots (6)$$

- donde V es la velocidad media

Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la carga de velocidad real se puede expresar como:

$$\frac{\alpha V^2}{2g} \quad \dots (7)$$

donde α representa el coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis el cual varía desde 1.03 hasta 1.36 para canales prismáticos aproximadamente rectos. Generalmente el valor es alto para canales pequeños y bajo para corrientes grandes con profundidad considerable.

Energía del flujo

La energía total del agua de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

Energía específica.

Se define como la energía de agua en cualquier sección de un canal medida con respecto al fondo de éste. Cuando la profundidad de flujo se grafica contra la energía específica para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una curva de energía específica donde en cualquier punto P, la ordenada representa la profundidad y la abscisa representa la energía específica, que es igual a la suma de la altura de presión y la carga de velocidad.

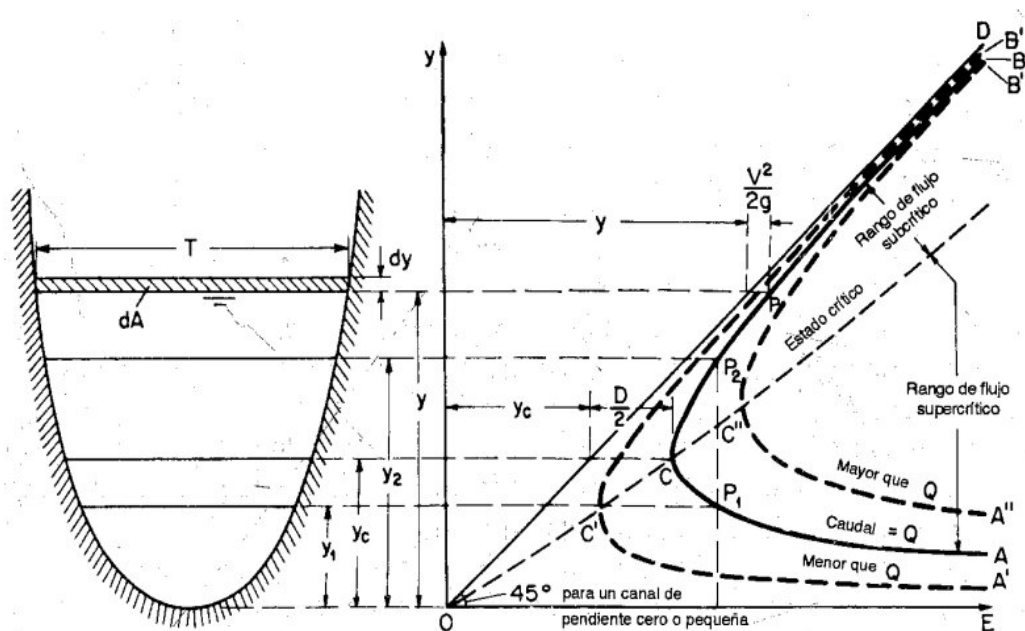


Fig. 11. Curva de energía específica.

Coefficiente de Rugosidad de Manning.

La ecuación de Manning es la más conocida expresando el factor de Chezy en términos del radio hidráulico y un factor de rugosidad $[n]$ llamado coeficiente de rugosidad

de Manning. Este factor se debe seleccionar con el mayor cuidado y precisión posible, ya que, aunque en general se considera que depende solamente de la rugosidad de las paredes y del fondo del canal, al ser $[n]$ un factor de fricción también depende de la geometría de la sección y características hidráulicas del flujo.

2.3.2.- HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System)

Es un software gratuito de modelación hidráulica, fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos de América. Permite simular flujos en cauces naturales y artificiales para definir el nivel del agua, por lo cual es ideal para realizar estudios de inundabilidad y determinar zonas inundables.

HEC-RAS es capaz de modelar cuatro tipos de río:

- I. Flujo en régimen permanente
- II. Flujo en régimen no permanente
- III. Modelización del transporte de sedimentos
- IV. Análisis de calidad de aguas

2.3.2.1- Metodología de cálculo de HEC-RAS

1.- Determinación de la Superficie del agua.

Para determinar la elevación de la superficie de agua en una sección transversal, se procede a calcular en forma iterativa las siguientes ecuaciones.

Ecuación de la energía.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \dots (8)$$

Donde:

- Y_1, Y_2 = Profundidad del agua en la sección transversal.
- Z_1, Z_2 = Elevación del lecho del tramo
- V_1, V_2 = Velocidades promedio ($Q_{\text{total}}/$
- α_1, α_2 = Coeficientes de velocidad
- g = Aceleración de la gravedad

La pérdida principal de energía (h_e) entre dos secciones transversales está relacionada con pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión. La ecuación para la pérdida principal de energía se aprecia en la siguiente ecuación.

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad \dots (9)$$

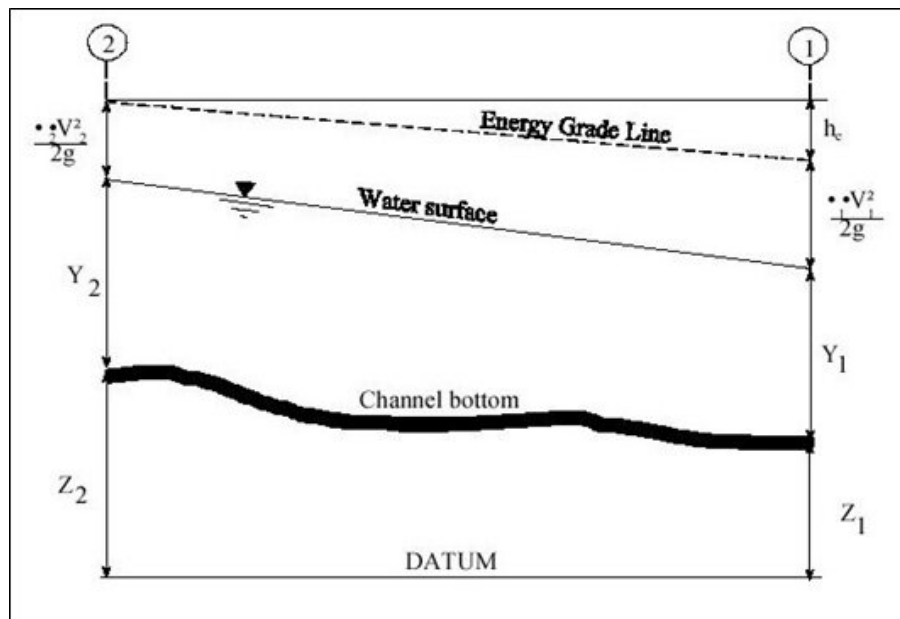


Fig. 12. Representación de los términos de la ecuación de la energía.

1.1.- Procedimiento computacional

Con base en lo anterior el criterio que toma el programa es asumir elevaciones de la superficie del agua e ir variando mediante un proceso iterativo el cual primeramente proyectar la profundidad del agua de una sección transversal sobre la siguiente, para la segunda iteración vuelve a asumir la elevación pero añade un error del 70% del obtenido de la primera iteración, para las siguientes iteraciones utiliza el método “Secante” el cual está restringido a 20 iteraciones para balancear el perfil hidráulico, si al concluir las iteraciones no se consigue el balance, el programa calcula la profundidad crítica en caso que no haya sido ingresada; finalmente si se logra el balance, el programa verifica que la superficie de agua con error mínimo se encuentre entre el rango de tolerancia permitida el cual el programa

toma como 0.1[m]. Si dicho error es menor a la tolerancia permitida y se encuentra del lado correcto de la altura crítica el programa utiliza esa superficie de agua como resultado final.

Para el caso de un perfil subcrítico, es necesario un análisis del número de Froude en el cual el programa realiza un análisis a las superficies de agua balanceadas para el canal principal y para la sección transversal completa. En dado caso que el número de Froude sea mayor a 0.94 el programa utilizará el método de la mínima energía específica para verificar el régimen. Se utiliza como límite un número de Froude de 0.94 de manera conservadora debido a que el cálculo de este en canales irregulares no es muy preciso.

Por otro lado, para un perfil supercrítico, la altura crítica es calculada automáticamente para todas las secciones transversales, las cuales permiten una comparación directa entre las elevaciones tanto balanceada como crítica.

2.- Determinación de la altura Crítica

La altura crítica para una sección transversal se puede determinar con base en el principio de que alguna de las condiciones siguientes sea satisfecha:

- I. El flujo supercrítico ha sido especificado.
- II. El cálculo de la altura crítica ha sido requerido por el usuario.
- III. La sección transversal con fronteras externas y la profundidad crítica deben ser determinados para asegurar que las condiciones de frontera ingresadas estén en el régimen de flujo correcto.
- IV. El número de Froude verificado para un perfil subcrítico indica que la altura crítica necesita ser determinada para verificar el régimen de flujo asociado con la elevación balanceada.
- V. El programa no pudo balancear la ecuación de la energía dentro de la tolerancia especificada antes de alcanzar el máximo número de iteraciones.

De acuerdo con lo anterior, se tiene el fundamento teórico con la siguiente ecuación, la cual permite determinar la energía total para una sección transversal dada.

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad \dots (10)$$

Donde: H Energía total
 WS Elevación de la superficie de agua.
 $\frac{\alpha V^2}{2g}$ Velocidad principal.

La elevación de la superficie crítica es la elevación en la que la energía total principal es mínima; dicha elevación se determina iterando los valores WS asumidos, y los valores correspondientes de H se calculan con la ecuación mostrada anteriormente hasta obtener un valor de H mínimo.

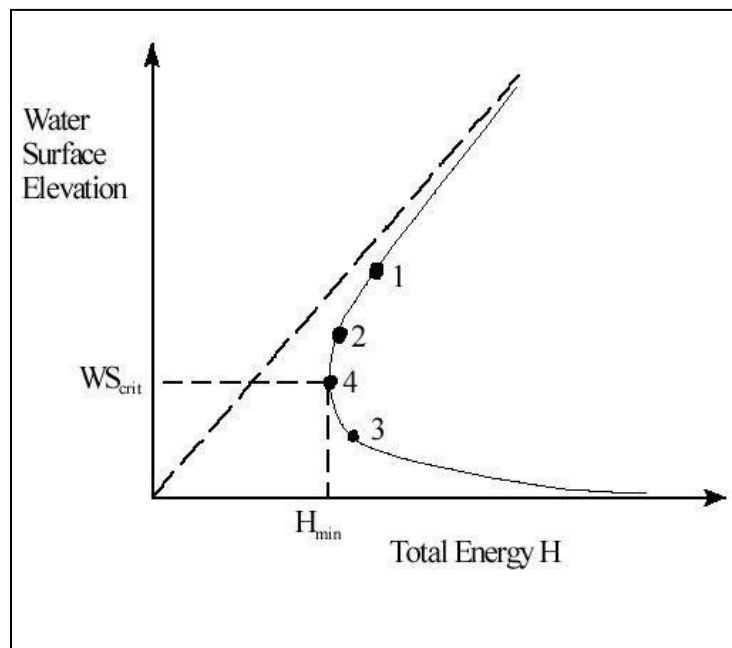


Fig. 13. Diagrama Energía vs Elevación de Superficie de Agua.

2.1.- Procedimiento computacional

Hec-Ras utiliza dos métodos para el cálculo de la altura crítica:

- I. Método Parabólico: Se asume que la elevación crítica ha sido obtenida cuando el cambio en la profundidad del agua desde una iteración a la siguiente es menor a 0.003 m, y el nivel de energía provisto no presente disminución o incrementos mayores a 0.003 m.
- II. Método de la secante: El programa realizará iteraciones para el mínimo local hasta treinta veces, o hasta que la altura crítica haya sido forzada por la tolerancia crítica de error. Luego de que el mínimo local haya sido

determinado con mayor precisión, el programa continuará buscando en la tabla, verificando si existe algún otro mínimo local. El programa podrá localizar hasta tres mínimos locales en la curva de energía. Si más de un mínimo local es encontrado, el programa definirá la altura mínima como aquella correspondiente a la energía mínima.

3.- Aplicación de la Ecuación de Momento.

La ecuación de momento tiene como fundamento la segunda ley del movimiento de Newton siendo:

$$\sum F_x = ma \quad \dots (11)$$

Fuerza = Masa x Aceleración (cambio en momento)

Para el caso de la ecuación de momento, Hec-Ras puede aplicarla sólo para problemas específicos tales como:

- I. Presencia de saltos hidráulicos
- II. Flujos hidráulicos bajos en puentes
- III. Cruces de ríos.

Debido a que los ejemplos analizados en el caso de estudio de la tesis no presentan las condiciones necesarias para aplicar la ecuación de momento, no se hará mayor énfasis ni se dará una explicación más a detalle de este apartado. Sin embargo se puede consultar (Engineers., s.f.) para obtener más información sobre la aplicación de la ecuación de momento en Hec-Ras.

4.- Limitaciones para Flujo Permanente.

Para que el Hec-Ras funcione adecuadamente, da por sentado algunas consideraciones en las expresiones analíticas, tales como:

- I. El flujo es permanente ya que los términos que dependen del tiempo no se incluyen en la ecuación de la energía.

- II. El flujo varía en forma gradual, ya que, de acuerdo con la ecuación de la energía, existe una distribución de la presión hidrostática en cada sección transversal.
- III. El flujo es unidireccional debido a que la elevación de la línea de energía total se basa en que se mantiene constante en cada punto de la sección transversal.
- IV. Las pendientes de los canales de ríos son pequeñas (menores a 1:10) debido a que el programa requiere que las pérdidas de energía estén comprendidas en términos de la ecuación de la pérdida principal de energía.

5.- Coeficiente de Pérdida de energía.

Hec-Ras utiliza diferentes tipos de coeficientes de pérdida de energía, entre ellos encontramos los siguientes:

- I. Numero $[n]$ de Manning: De acuerdo con el autor Ven Te Chow, el número de Manning comprende factores como la rugosidad superficial, vegetación, irregularidad del canal, alineamiento del canal, sedimentación y socavación, obstrucción, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material en suspensión y carga de lecho. Dichos factores se deben calibrar en cada sitio donde se pueda obtener información de perfiles hidráulicos. Por otro lado, cuando no sea posible obtener esta información se deben tomar valores de tablas existentes en las cuales se presentan valores obtenidos de forma experimental de ríos son condiciones similares o canales artificiales existentes; algunas de las tablas más utilizadas son las de Horton la cual muestra valores de n y otros elementos basadas en 269 observaciones y también se encuentran las tablas hechas por Ven te Chow las cuales se basan en las de Horton y fueron enriquecidas con algunas otras fuentes, éstas últimas son las más utilizadas hasta el momento para el diseño de obras hidráulicas.
- II. Rugosidad equivalente “ k ”: Mide la dimensión lineal de los elementos rugosos y es conocida como “altura de rugosidad” aunque no necesariamente es igual a la altura actual o promedio de los elementos en cuestión. Para la orientación horizontal, se pueden especificar más de veinte valores para cada sección transversal.

- III. Coeficientes de contracción y expansión: Estos coeficientes surgen debido a los cambios entre una sección transversal y otra en un tramo del canal; dichos coeficientes son multiplicados por la diferencia absoluta de velocidades entre una sección transversal y la siguiente sección aguas abajo, las cuales dan las pérdidas de energía debido a la transición antes mencionada.
- IV. Cruces de ríos: Los cruces de ríos son definidos como puntos en donde dos o más ríos se juntan o se separan entre sí. Las longitudes de tramos a lo largo del cruce son ingresadas en el editor de Datos de Cruces y éste permite que las longitudes a lo largo de confluencias muy complicadas sean acomodadas. Debido a que esta opción de cálculo sólo se realiza si se selecciona la ecuación de momentos, no se hablará más acerca de las pérdidas en cruces de ríos ya que este documento no contiene situaciones que requieran de esta función. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se puede consultar (Engineers., s.f.) para obtener más información sobre la aplicación de la ecuación de momento en Hec-Ras.

6.- Condiciones de frontera.

La condición de frontera define el punto que se tomará como aguas arriba o aguas abajo, el cual necesita el programa para iniciar los cálculos correspondientes al tipo de régimen que se solicite. Para el régimen de flujo subcrítico se utiliza la condición de frontera aguas abajo y por el lado contrario para un régimen de flujo supercrítico se utilizará una condición de frontera aguas arriba. Para el caso de régimen de flujo mixto se necesitan ambas condiciones de frontera (aguas arriba y aguas abajo). Existen cuatro formas de ingresar o definir las condiciones de frontera en Hec-Ras:

- I. Elevación conocida de la superficie del agua: El usuario ingresará una elevación conocida para cada uno de los perfiles a calcular.
- II. Tirante o profundidad crítica: Para este caso Hec-Ras calcula el tirante crítico para cada perfil y utilizará los valores obtenidos como condiciones de frontera.
- III. Tirante o profundidad normal: Para esta condición el usuario deberá ingresar la pendiente de la línea de energía y el programa calculará el tirante normal

para el punto en cuestión utilizando la ecuación de Manning y la pendiente ingresada.

- IV. Curva de gasto: En este caso el usuario deberá ingresar una curva de elevación vs gasto con la cual el programa interpolará linealmente para obtener los resultados.

7.- Información de descarga

Los datos de descarga deben ser ingresados de aguas arriba hacia aguas abajo para cada tramo, de esta forma el programa reconoce el sentido de flujo del cauce; para lo anterior es necesario que se ingrese al menos un valor para cada tramo del sistema del río. Una vez ingresado el valor del gasto, éste se supondrá constante hasta que dentro del mismo tramo se encuentre otro caudal registrado.

2.3.3.- Inventor y CFD

Como se menciona en la introducción de este documento, la humanidad siempre se ha planteado como reto el comprender los elementos que lo rodean y aprovecharlos para su beneficio. De esta forma es como nace la inquietud e interés de desarrollar la ciencia de la Dinámica de Fluidos y sus ecuaciones, las cuales son de gran complejidad para resolverse motivo por el cual se han revolucionado los softwares que permiten analizar y predecir el comportamiento de los fluidos a través de los productos diseñados. A este proceso se le conoce como CFD “Computational Fluid Dynamics” (Dinámica de Fluidos Computacional en español), el cual es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza el análisis numérico y estructuras de datos con la premisa de analizar y resolver problemas que implican flujos de fluidos. CFD puede ser aplicado en diversas áreas, tales como la investigación, estudios e industrias, aerodinámica y análisis aeroespacial, ingeniería medioambiental, análisis de motores y combustión y el flujo de fluidos y transferencia de calor.

Para este trabajo se utilizó el software CFD desarrollado por Autodesk enfocado a la simulación de dinámica de fluidos computacional ya que el software permite crear prototipos digitales con simulaciones ayudando a reducir costosos modelos físicos, prevención de riesgos y permite innovar e incursionar en diversos proyectos de ingeniería.

El software Autodesk CFD va dirigido principalmente para ingenieros mecánicos, sin embargo, la necesidad de innovar y avanzar en el campo de la ingeniería civil

específicamente en el área que se enfoca a los fluidos, principalmente la hidráulica, ha incentivado la exploración, investigación y utilización de estos programas computacionales para el uso en los diferentes retos de la ingeniería hidráulica. El software CFD aporta soluciones utilizando la simulación numérica a través de estudios de diferentes infraestructuras hidráulicas desde el punto de vista de diseño, explotación y resolución de problemas.

Por otra parte, Autodesk Inventor es un software de diseño asistido por computadora (CAD) para el modelado mecánico en 3D, la simulación, la visualización y la documentación; Inventor facilita y permite integrar archivos en 2D y 3D en una misma interfaz creando una representación virtual del producto final que permite a los usuarios modificar o ajustar el modelo antes de su fabricación. En este caso este producto de Autodesk permite construir la estructura hidráulica de forma tridimensional por donde transitará el fluido y posteriormente se exportará a la interfaz de CFD para realizar la simulación de este.

2.3.3.1.- Interfaz y metodología de cálculo de CFD

1.- Interfaz de CFD

La interfaz de este software es muy amigable con el usuario, sin embargo, al tener una gran variedad de aplicaciones para distintos campos de la ingeniería las opciones de configuración del software son demasiadas; debido a lo anterior a continuación solo se define lo necesario para tener un manejo adecuado que permita la resolución del problema planteado.

Siguiendo la premisa anteriormente mencionada, la interfaz puede dividirse en 4 campos principales siendo:

I. Ventana gráfica.

Esta ventana es la pantalla principal sobre la cual se mostrará el modelo construido y en la cual se verán reflejados todos los cambios que se hagan al modelo tridimensional. Para acceder a distintas funciones se utiliza el clic izquierdo del mouse para acceder a la barra de herramientas que permite aplicar y eliminar configuraciones y el clic derecho para acceder al menú de la tarea que se esté ejecutando en ese momento. Además, la ventana gráfica muestra los materiales con los que se estén trabajando en el modelo, una escala que puede

modificarse a las unidades de la preferencia del usuario, una barra de herramientas para la manipulación visual del modelo y los ejes coordenados ya que al ser un software que trabaja en tres dimensiones, siempre es de vital importancia saber en qué plano o planos se realiza cada modificación y de esta forma tener una interpretación de resultados acertada.

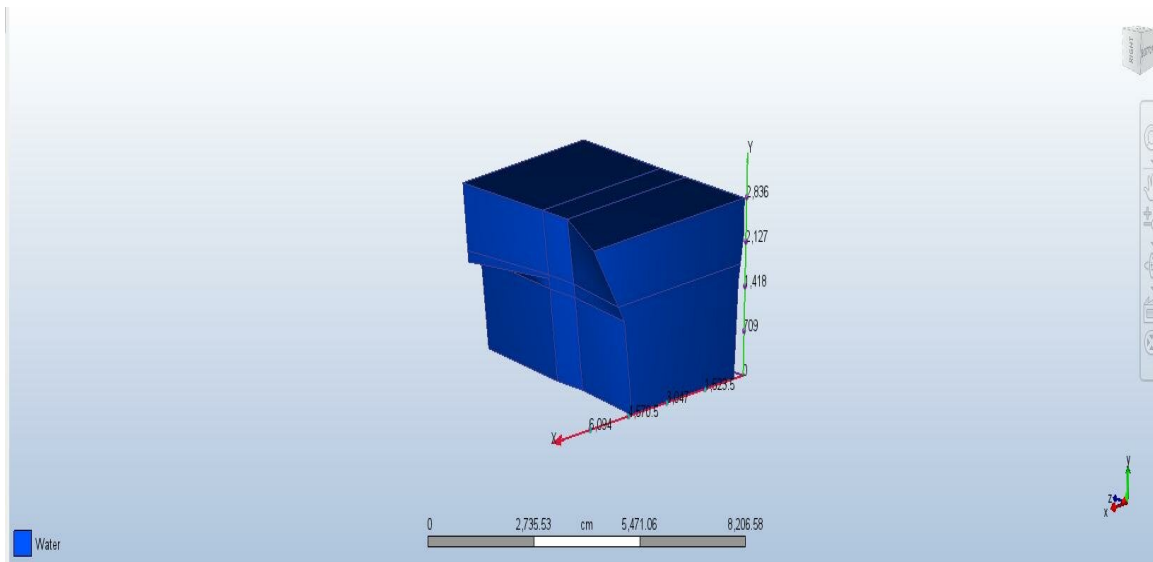


Fig. 14. Ventana Gráfica

II. Barra de tareas.

Al igual que muchos otros programas de uso cotidiano, se cuenta con una barra de tareas que permite acceder a distintas funciones para modificar el modelo; también podemos acceder a estas funciones por medio de comandos, pero para iniciar las ilustraciones que tiene la barra de tareas permiten que el usuario de manera intuitiva pueda manejar de una forma más fácil el software. Es importante recalcar que para los efectos de este caso de estudio solamente utilizaremos el apartado “Setup” (Configuración) el cual permite atribuir las características necesarias del modelo y el apartado “Result” (Resultados) el cual, como su nombre lo indica, permite acceder a los resultados de la simulación.

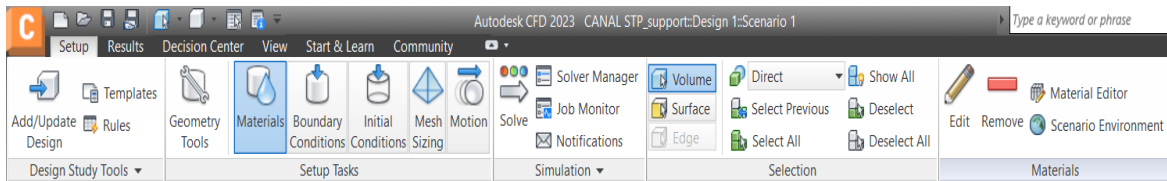


Fig. 15. Apartado Setup.

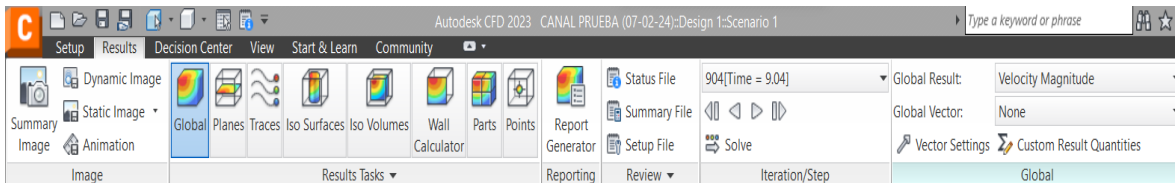


Fig. 16. Apartado Results.

III. Barra de salida

La barra de salida se localiza en la parte inferior de la ventana gráfica y tiene diferentes funciones. Principalmente esta barra permite visualizar el progreso de la simulación a través de un gráfico de convergencia en el cual indica que la simulación ha sido exitosa cuando las líneas convergen; sin embargo, la barra de salida también muestra mensajes de estado del proyecto, algunos de estos mensajes van desde indicar al usuario que el modelo se ha cargado correctamente, al inicio de la simulación y la finalización de la misma, existen otro tipo de mensajes que dan información al usuario sobre ciertos parámetros que hay que contemplar para la simulación, pero estos mensajes y criterios se mencionarán en la explicación del caso de estudio en el punto 4.3 “Ejercicio 3 (Utilizando Inventor y CFD)”.

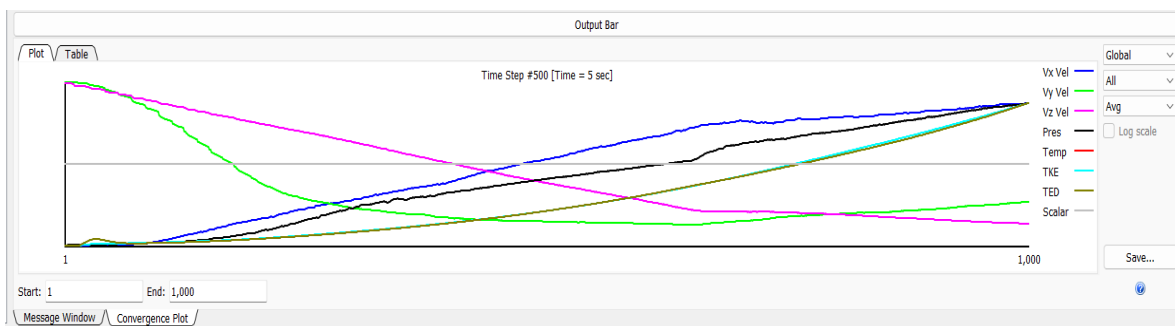


Fig. 17. Barra de salida.

IV. Barra de estudio de diseño.

Este apartado es un espacio que se actualizará constantemente dependiendo las propiedades que se vayan asignando al modelo, es decir, si al modelo en desarrollo se le asignan parámetros de velocidad o temperatura, la barra mostrará los parámetros ingresados y desde este mismo espacio podrán irse modificando o removiendo a conveniencia del usuario. De igual forma se muestran las geometrías o planos creados en el proyecto y también permite ocultar o visualizar las distintas capas, planos o geometrías con el fin de tener un espacio de trabajo en el cual sea más sencillo trabajar. Además, también permite tener una actualización constante de los resultados ya que se mostrarán que parámetros de resultados están activos y, como se mencionó anteriormente, también se pueden ir “apagando” o removiendo las visualizaciones de resultados a conveniencia del usuario. Como resumen, funciona como una barra de diseño general en la cual podemos visualizar, configurar o remover cualquier característica que tenga nuestro modelo.

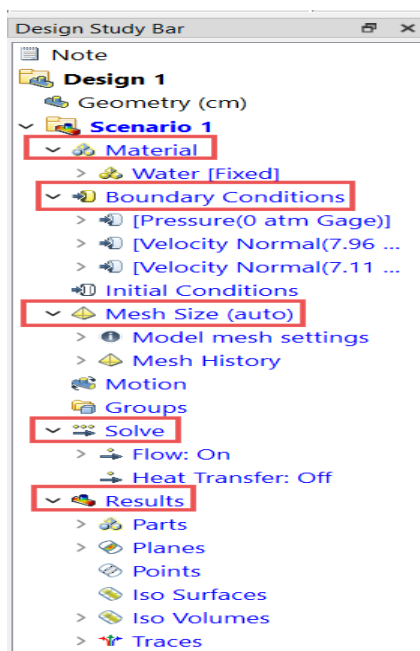


Fig. 18. Barra de estudio de diseño.

2.- Metodología de cálculo de Autodesk CFD

Las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo de fluidos y la transferencia de calor incluyen la ecuación de continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de energía. En mecánica de fluidos, la ecuación de continuidad es una ecuación de conservación de la masa. Su forma diferencial es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{u}) = 0 \quad \dots (12)$$

donde ρ es la densidad, t el tiempo y $\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k}$ la velocidad del fluido.

Las ecuaciones de Navier-Stokes gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles, además expresan matemáticamente la conservación del momento y, en general, la conservación de la masa para los fluidos newtonianos. A continuación, se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes aplicadas a 3 dimensiones.

Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \dots (13)$$

Momento en X.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial x} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad \dots (14)$$

Momento en Y.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial y} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad \dots (15)$$

Momento en Z.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial z} + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad \dots (16)$$

Ecuación de la energía.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = & -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_f * Pr_f} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \\ & + \frac{1}{Re_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \dots (17) \end{aligned}$$

- Donde: t = Tiempo
- p = Presión
- τ = Tensión
- ρ = Densidad
- q = Flujo de calor
- Re = Número de Reynolds
- E_T = Energía total
- (x,y,z) = Coordenadas

(u,v,w) = Componentes de velocidad. En hidráulica, la energía se expresa en unidad de longitud, es decir en metros. La ecuación de Bernoulli explica la ley de conservación de la energía trasladada al flujo de fluidos en una tubería: si no hay rozamiento, las partículas se desplazan a lo largo de la tubería sin pérdida de energía, indefinidamente.

La energía total en un punto cualquiera del fluido tiene tres componentes y es igual a la suma de tres energías:

- I. La energía potencial debida a la altura sobre el plano de referencia
- II. La energía debida a la presión del líquido
- III. La energía cinética debido a la velocidad del fluido

La ecuación de Bernoulli nos indica que a lo largo de un flujo los tres términos pueden experimentar modificaciones por intercambio de unos valores con otros, pero siempre debe mantenerse la suma total. Tras lo expuesto, la ecuación de Bernoulli debe quedar por consiguiente así:

Ecuación de la energía / Bernoulli

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad \dots (18)$$

Estas ecuaciones están íntimamente acopladas y son no lineales, lo que hace imposible una solución analítica general, excepto para un número limitado de problemas especiales, donde las ecuaciones pueden reducirse para producir soluciones analíticas. Debido a que la mayoría de los problemas prácticos de interés no entran en esta categoría limitada, se utilizan métodos aproximados para determinar la solución de estas ecuaciones.

Particularmente Autodesk utiliza el método de discretización o de elementos finitos el cual se describe a continuación.

I. Método de discretización o de elementos finitos.

El método de elementos finitos (MEF) permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí denominados “elementos finitos”. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada “discretización”. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodos”. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama “malla”.

En Autodesk CFD, el método de elementos finitos se utiliza para reducir las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes a un conjunto de ecuaciones algebraicas. En este método, las variables dependientes están representadas por funciones de forma polinómica sobre un área o volumen pequeño (elemento). Estas representaciones se sustituyen en las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes y luego se toma la integral ponderada de estas ecuaciones sobre el elemento donde se elige que la función de peso sea la misma que la función de forma. El resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas para la variable dependiente en puntos o nodos discretos de cada elemento.

El método de elementos finitos descrito anteriormente se utiliza directamente en los términos de difusión y fuente. Sin embargo, para la estabilidad numérica, los términos de advección se tratan con métodos de barlovento junto con el método integral ponderado. A continuación, se mencionan cuatro de los métodos utilizados en Autodesk CFD.

- I. Aerodinámico monótono en ceñida
- II. Petrov-Galerkin
- III. Esquema basado en flujo

IV. Esquema Min-Mod

3.- Ecuaciones gobernantes

A continuación, se mencionan las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo, la transferencia de calor y los términos constitutivos asociados. Particularmente para este caso de aplicación se hará énfasis en las ecuaciones que pueden ser aplicadas a la hidráulica en canales a superficie libre.

- I. Ecuaciones generales de flujo de fluidos y transferencia de calor
- II. Flujo turbulento
- III. Cálculos de humedad o gas húmedo
- IV. Calefacción en julios
- V. rápido forzado
- VI. Convección
- VII. Modelo térmico compacto
- VIII. Ecuación general de transporte escalar
- IX. Cavitación
- X. Dispositivos giratorios
- XI. Mover sólidos
- XII. Rastros de partículas
- XIII. Propiedades
- XIV. Propiedad de PCB
- XV. Calculadora
- XVI. Dispositivo de material del intercambiador de calor que rige las ecuaciones
- XVII. Disipadores de calor
- XVIII. Erosión
- XIX. Superficie libre

Es importante mencionar que para este caso de estudio principalmente se hace alusión a las ecuaciones diferenciales referentes al tema de superficie libre ya que el segmento del canal que se analizó trabaja en este régimen. Sin embargo, con base en las ecuaciones que gobiernan el software podemos ver que maneja ciertos temas como lo son la erosión o la

cavitación que pueden ser de gran utilidad para la modelación tridimensional aplicada a la ingeniería hidráulica.

4.- Método de solución

Cada una de las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes anteriores se discretiza utilizando el método de elementos finitos descrito anteriormente. El conjunto resultante de ecuaciones algebraicas debe resolverse para determinar los valores de las variables dependientes en los nodos de los elementos finitos. El algoritmo utilizado por Autodesk CFD para resolver estas ecuaciones se describe a continuación.

5.- Solucionador segregado

El primer problema al resolver las ecuaciones discretizadas es el de la presión faltante. Si se usan las ecuaciones de momento para calcular los componentes de la velocidad, entonces se debe usar la ecuación de continuidad para determinar la presión. Sin embargo, la presión nunca aparece explícitamente en la ecuación de continuidad. Hay una gran cantidad de vías disponibles para sortear las dificultades numéricas con el acoplamiento de presión implícito. Muchos de estos métodos de solución requieren que la ecuación de continuidad y momento se resuelva simultáneamente en cada nodo de la malla de elementos finitos. Para problemas pequeños, esta solución es bastante adecuada. Sin embargo, para la mayoría de los problemas de la vida real, esta solución impone una penalización severa a los recursos de la computadora y, de hecho, puede impedir la solución de un problema. Para aliviar esta restricción, se debe encontrar una ecuación explícita en presión.

Con una ecuación de presión explícita, cada una de las ecuaciones gobernantes se puede resolver por separado. Es decir, la ecuación del momento “x” se puede resolver para U en todos los nodos, la ecuación del momento “y” se puede resolver para V en todos los nodos, la ecuación del momento “z” se puede resolver para W en todos los nodos, la ecuación de presión se puede resolver para P en todos los nodos, etc. Esto permite un requisito de memoria mucho menor ya que solo se resuelve un grado de libertad a la vez. Este enfoque se denomina solucionador segregado porque cada una de las variables dependientes se resuelve por separado. Además, dado que cada una de estas ecuaciones se puede resolver utilizando

técnicas matriciales iterativas, sólo es necesario almacenar los términos distintos de cero en la matriz de coeficientes.

Tomando en cuenta lo anterior, el algoritmo puede ser resumido a una secuencia de operaciones que realiza el solucionador segregado CFD de Autodesk para resolver las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes y llegar a una solución, dicha secuencia es la siguiente:

- I. Leer geometría, condiciones de contorno y datos de análisis.
- II. Crear estructuras de datos
- III. Resolver la ecuación del momento x
- IV. Resolver la ecuación del momento y
- V. Resolver la ecuación del momento z
- VI. Resolver ecuaciones de presión y velocidades correctas.
- VII. Resolver ecuación de energía.
- VIII. Resolver la ecuación de energía cinética turbulenta.
- IX. Resolver la ecuación de disipación de energía turbulenta.
- X. Verifique la convergencia (vaya al paso III)
- XI. Realizar cálculos de salida
- XII. Escribir datos
- XIII. Salida

3.- Casos de estudio.

Con base en los criterios de diseño, fundamentos hidráulicos, comportamientos de flujo, propiedades de los canales y las distintas metodologías que emplean los softwares presentados en el presente documento, es necesario ejemplificar y poner en práctica la información antes mencionada. Por ende, a continuación, se proponen 3 ejercicios teóricos en los cuales se aplican las 3 metodologías o herramientas indicadas. En primera instancia se presentará un ejemplo teórico de predimensionamiento utilizando los métodos numéricos convencionales, se decidió abordar de esta forma la metodología convencional, debido a que los ejercicios realizados en Excel con métodos numéricos, son los primeros métodos a los que un ingeniero tiene acercamiento en su etapa formativa.

Posteriormente, para retomar el Sistema Hidroeléctrico Grijalva, en el segundo ejercicio, se decidió analizar una propuesta del canal de desvío del Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén II en el estado de Chiapas, para este caso, se utilizaron las dos herramientas mencionadas en el capítulo 2.3.2.- HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System) y 2.3.3.- Inventor y CFD, Hec-Ras e Inventor y CFD respectivamente, con finalidad de comparar las diferencias entre utilizar métodos numéricos convencionales y herramientas de software aplicadas a la hidráulica, así como la interfaz y la representación de los resultados para cada caso. Con base en lo anterior, a continuación, se presentan los 3 ejercicios correspondientes. Es importante mencionar que los ejercicios presentados, fueron realizados con los conocimientos adquiridos en la Facultad de Ingeniería, servicio social y prácticas profesionales en la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos / Subgerencia de Diseños de la CFE.

3.1.- Ejercicio 1 (Predimensionamiento utilizando Excel).

3.1.1.- Introducción y objetivo.

Para este caso de estudio se decidió realizar un predimensionamiento utilizando Excel como herramienta, para ello fue necesario recurrir a los métodos numéricos tradicionales que permiten obtener resultados generales tales como tirantes, velocidades, área hidráulica entre otros parámetros. Sin embargo, uno de los principales objetivos de este ejercicio es identificar la dificultad, el tiempo de realización, visualización de resultados y el alcance que se puede tener para analizar un caso de estudio lo más acercado a la realidad posible utilizando esta herramienta unidimensional. Debido a que el gasto y los criterios considerados para el dimensionamiento de este caso son similares a los del “Ejercicio 2”, siendo este último un caso práctico aplicado, servirá para comparar la aproximación de resultados y el proceso de análisis entre ambos softwares.

El objetivo del ejercicio consiste en encontrar una sección hidráulica, probando diferentes recubrimientos, para un canal a superficie libre que permita conducir un gasto $Q = 2\,000 \text{ [m}^3/\text{s]}$ en un régimen subcrítico considerando las siguientes limitantes.

- Pendiente $[S_0]$: 0.005
- Longitud $[L]$: 400[m]
- Gasto $[Q]$: 2 000 $[\text{m}^3/\text{s}]$

3.1.2.- Desarrollo del ejercicio.

De acuerdo con el objetivo, y en ese orden, se explicarán a continuación las consideraciones y decisiones tomadas para poder llegar a la solución de este ejercicio. En primer lugar, el objetivo menciona que se requiere encontrar una sección hidráulica, para esto, tomando en cuenta lo mencionado en la sección de introducción de este documento, se procedió a proponer dos secciones transversales de las más comunes con el fin de facilitar el cálculo, siendo para este caso, sección trapecial y sección rectangular. Para la sección trapecial se requiere proponer un talud, el cual depende en mayor parte del tipo de suelo que se presente en el sitio ya que éste proporcionará estabilidad a la estructura hidráulica la cual se encargará de soportar los empujes del suelo y los empujes proporcionados por el flujo de agua.

Siguiendo con el objetivo, se requiere considerar diferentes recubrimientos los cuales actúan en conjunto e interfieren en el cálculo de la geometría, ya que, como se mencionó anteriormente, la estabilidad depende mucho del tipo de suelo en el que se trabaje y aunque hay ocasiones que se encuentran materiales que pueden proporcionar una estabilidad adecuada, por lo general los canales de desvío suelen tener recubrimientos de concreto. Los recubrimientos, el tipo de acabado y el tipo de material empleado proporcionan una rugosidad determinada a la obra; dicha rugosidad se maneja en términos de rugosidad relativa o rugosidad absoluta pero generalmente para los cálculos se utiliza el *coeficiente de rugosidad de Manning* [n], el cual cuenta con gran cantidad de valores obtenidos experimentalmente para diferentes condiciones de superficies o recubrimientos.

Por otra parte, el objetivo solicita que se conduzca el gasto $Q = 2\,000 \text{ [m}^3/\text{s]}$ en un régimen subcrítico el cual es posible conseguir mediante la interacción e integración de los parámetros antes mencionados debido a que la geometría, la rugosidad y la pendiente afectan directamente el comportamiento del flujo y por ende el tipo de perfil que se genera a lo largo del canal. Para este requerimiento, con base en el *Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE, tema 2 “Hidráulica”, capítulo 12.5.2 “Cálculo del perfil hidráulico en el canal de desvío.”*, generalmente se suelen presentar en mayor medida los perfiles M1 y M2, y ya que no se especifica en el objetivo un perfil específico, se buscó obtener un perfil M2 el cual se asocia con un régimen subcrítico. Para comprender mejor de lo que se habla, se debe tener

en cuenta que el perfil M1 ocurre cuando el tirante del río aguas abajo del canal de desvío es mayor que el tirante normal de éste, mientras que el perfil M2 se presenta cuando aguas abajo del canal de desvío el tirante del río es menor que el tirante normal aguas arriba tal como se muestra en la Fig. 19.

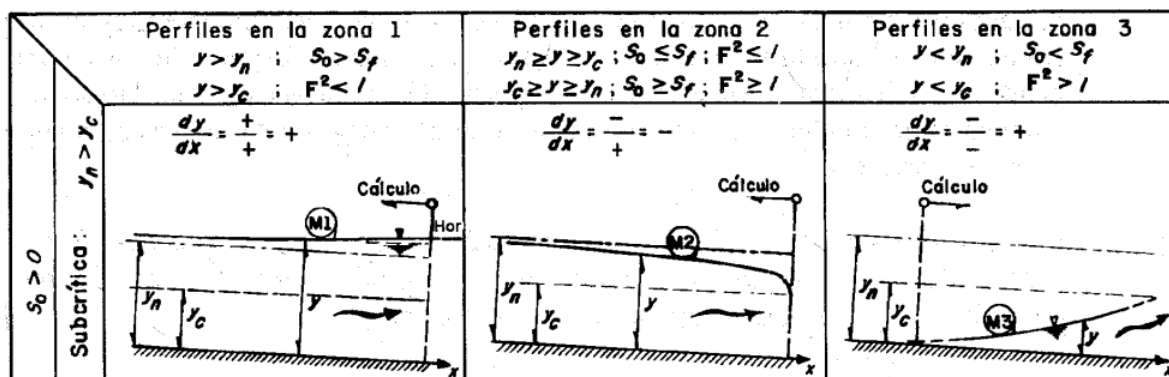


Fig. 19. Representación gráfica de Perfiles subcríticos (M1, M2 y M3)

3.1.3.- Ejecución del método.

El cálculo se hizo tomando en cuenta los datos de entrada proporcionados y a su vez considerando que lo que se busca primordialmente es que el canal tenga un comportamiento en flujo subcrítico. Para la solución de este problema se decidió programar el método del paso estándar en Excel con el fin de comparar el tiempo, obtención de resultados, facilidad de manejo y representación de resultados entre Excel, Hec-Ras y CFD. El cálculo del método del paso estándar se realiza mediante pasos entre estación y estación donde la distancia entre ellas es conocida y el procedimiento es determinar la profundidad de flujo en cada estación; es importante mencionar que este procedimiento se lleva a cabo con un principio de ensayo y error, por lo que las iteraciones son necesarias para dicho cálculo y es debido a esto que se utilizó la programación de una *macro*, permitiendo realizar las iteraciones necesarias de forma rápida agilizando el proceso de comparación entre las dos secciones propuestas.

Se inicia el proceso del cálculo del perfil obteniendo los tirantes crítico y normal para el caudal proporcionado y así identificar las condiciones de flujo subcrítico o supercrítico; con esto se puede determinar el tipo de perfil, sección de control, el tirante a lo largo del canal y dirección para realizar el cálculo. Para obtener los tirantes normal y crítico, se debe realizar el predimensionamiento del canal considerando el punto 2.2.- Criterios de diseño.

Para este ejercicio se realizaron distintas pruebas donde se fue cambiando el coeficiente de rugosidad, para ello se tomaron de referencia las tablas 2.6b y 2.6c de coeficientes de rugosidad n de Manning para canales recubiertos o revestidos y canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo según Vente Chow⁷, respectivamente. Después de probar distintas combinaciones de ancho de plantilla, relación de los taludes y coeficientes de rugosidad dependiendo del tipo de revestimiento, se obtuvo el siguiente predimensionamiento.

Tabla 25. Predimensionamiento.

Características del canal		Resultados	
Sección del canal	Trapezoidal	Perfil	M2
Pendiente (S)	0.005	Régimen	Subcrítico
Taludes	0.25:1	Tirante crítico (Y_c)	11.41 [m]
n de Manning	0.025	Tirante normal (Y_n)	12.46 [m]
Revestimiento	Concreto lanzado	Tirante Aguas Abajo	12.40 [m]
Longitud del canal	400 [m]	Velocidad Aguas Arriba	9.82
Ancho de plantilla	15 [m]	Velocidad Aguas Abajo	8.91

Una vez realizado el predimensionamiento, se procede a obtener los tirantes crítico y normal (Y_c , Y_n), el tipo de régimen y las condiciones de frontera, para calcular el perfil de flujo.

NORMAL		Calcular Y_n	CRÍTICO		Calcular Y_c
$Y_n = 12.457$ m			$Y_c = 11.406$ m		
$Q = 2000.000$ m ³ /s			$Q = 2000.000$ m ³ /s		
$b = 15.000$ m			$b = 15.000$ m		
$k = 0.250$			$k = 0.250$		
$n = 0.025$ s/m ^{1/3}			$A = 203.614$ m ²		
$S = 0.0050$			$T = 20.703$ m		
$A = 225.658$ m ²			CERO = 0.000		
$P = 40.682$ m					
$RH = 5.547$ m					
CERO = 0.000					

Fig. 20. Tirante normal y crítico para determinar el tipo de perfil.

⁷ (CHOW, 2004)

1.- Cálculo de tirante crítico.

Los cálculos se realizaron con la ecuación que corresponde al tirante crítico.

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad \dots (19)$$

Donde

Q= Caudal, m^3/s

A= Área hidráulica, m^2

g= Aceleración de la gravedad

T= Ancho de la superficie libre del agua, m

2.- Cálculo de tirante normal.

Con la siguiente ecuación se calcularon los tirantes normales.

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = AR^{2/3} \quad \dots (20)$$

Donde

Q= Caudal, m^3/s

n= Coeficiente de rugosidad de Manning, *adimensional*

S= Pendiente de la plantilla, *adimensional*

A= Área hidráulica, m^2

R= Radio hidráulico, m

3.- Elaboración del método del paso estándar.

Datos																							
Q [m³/s] = 2000		Archo 15	Perim 412																				
S ₀ [0.005]		Archo planilla 15	Y _v [m] 11.411																				
n Pared [s/m³] ^{1/3} 0.025		α 1	Y _s [m] 12.46																				
n Pavim [s/m³] ^{1/3} 0.025		k [m] 0.25	x [m] 11.406																				
Dif. nivel [m] 0		L [m] 400	Y _i [m] 12.40																				
Cof. fricci [m] 400		g [m/s³] 9.81	Δy [cm] 6																				
Dist secciones 11.43		Régimen SUBCRÍTICO																					
Cálculo del perfil																							
NORMAL.																							
Calcular Y _n																							
Y _s = 12.457 m			Q = 2000.000 m³/s b = 15.000 m k = 0.250 n = 0.025																				
A = 225.658 m² P = 40.682 m RH = 5.547 m CERO = 0.000			A = 203.614 m² T = 20.703 m CERO = 0.000																				
CRÍTICO																							
Calcular Y _c																							
Y _c = 11.406 m			Q = 2000.000 m³/s b = 15.000 m k = 0.250																				
A = 203.614 m² T = 20.703 m CERO = 0.000																							
RESULTADOS																							
Unidad	[m]	[m]	[m]	[m]	[m²]	[m]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
SECCION	Elevacion o A _{secc} hasta A _{base}	Elevacion de la planilla	Tirante	Ancho de planilla	Área	Perímetro mojado	Velocidad	Carga de velocidad equivalente	R _{guis}	Energía específica	Diferencia de energía	Pendiente de fricción	Pendiente de fricción media	Diferencia de pendientes	Distancia entre secciones	Cadeamiento o A _{secc} hasta A _{base}	Pérdida de fricción.	Pérdida por s/perdidas	Elevacion s/perdidas	Elevacion c/perdidas	Tirante normal	Tirante critico	Número Froude
1	400.00	0.000	11.41	15	203.61	38.51	9.82	αV²/2g	0.03	16.32	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	0.00	0.00	0.00	4.62	4.70	12.46	11.41	1.00
2	388.57	0.57	11.73	15	210.44	39.19	9.50	4.60	0.03	16.34	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	11.43	0.07	0.00	4.66	4.73	12.46	11.41	0.96
3	377.14	1.14	11.84	15	212.65	39.41	9.41	4.51	0.03	16.35	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	22.86	0.07	0.00	4.62	4.69	12.46	11.41	0.94
4	366.71	0.71	11.91	15	214.19	39.56	9.34	4.44	0.03	16.36	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	34.79	0.07	0.00	4.62	4.68	12.46	11.41	0.93
5	354.29	0.29	11.97	15	215.40	39.68	9.29	4.39	0.03	16.37	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	45.71	0.07	0.00	4.62	4.69	12.46	11.41	0.93
6	342.86	0.86	12.02	15	216.39	39.78	9.24	4.35	0.03	16.37	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	57.14	0.06	0.00	4.64	4.70	12.46	11.41	0.92
7	331.43	0.43	12.06	15	217.22	39.86	9.21	4.32	0.03	16.38	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	68.57	0.06	0.00	4.66	4.73	12.46	11.41	0.91
8	320.00	0.00	12.09	15	217.94	39.93	9.18	4.29	0.03	16.38	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	80.00	0.06	0.00	4.69	4.76	12.46	11.41	0.91
9	308.57	0.57	12.12	15	218.57	39.99	9.15	4.27	0.03	16.39	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	91.43	0.06	0.00	4.72	4.79	12.46	11.41	0.91
10	297.14	0.514	12.15	15	219.13	40.05	9.13	4.25	0.03	16.39	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	102.86	0.06	0.00	4.79	4.82	12.46	11.41	0.90
11	285.71	0.271	12.17	15	219.62	40.09	9.11	4.23	0.03	16.40	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	114.29	0.06	0.00	4.80	4.86	12.46	11.41	0.90
12	274.29	0.29	12.19	15	220.07	40.14	9.09	4.21	0.03	16.40	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	125.71	0.06	0.00	4.84	4.90	12.46	11.41	0.90
13	262.86	0.86	12.21	15	220.48	40.18	9.07	4.19	0.03	16.41	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	137.14	0.06	0.00	4.88	4.94	12.46	11.41	0.90
14	251.43	0.743	12.23	15	220.84	40.21	9.06	4.18	0.03	16.41	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	148.57	0.06	0.00	4.92	4.98	12.46	11.41	0.89
15	240.00	0.000	12.25	15	221.18	40.25	9.04	4.17	0.03	16.41	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	160.00	0.06	0.00	4.97	5.03	12.46	11.41	0.89
16	228.57	0.857	12.26	15	221.48	40.28	9.03	4.16	0.03	16.42	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	171.43	0.06	0.00	5.01	5.07	12.46	11.41	0.89
17	217.14	0.914	12.27	15	221.76	40.30	9.02	4.15	0.03	16.42	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	182.86	0.06	0.00	5.06	5.12	12.46	11.41	0.89
18	205.71	0.971	12.29	15	222.02	40.33	9.01	4.14	0.03	16.42	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	194.29	0.06	0.00	5.11	5.17	12.46	11.41	0.89
19	194.29	1.029	12.30	15	222.26	40.35	9.00	4.13	0.03	16.42	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	205.71	0.06	0.00	5.18	5.22	12.46	11.41	0.89
20	182.86	1.086	12.31	15	222.48	40.37	8.99	4.12	0.03	16.43	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	217.14	0.06	0.00	5.20	5.26	12.46	11.41	0.89
21	171.43	1.143	12.32	15	222.68	40.39	8.98	4.11	0.03	16.43	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	228.57	0.06	0.00	5.25	5.31	12.46	11.41	0.88
22	160.00	1.200	12.33	15	222.87	40.41	8.97	4.10	0.03	16.43	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	240.00	0.06	0.00	5.30	5.36	12.46	11.41	0.88
23	148.57	1.257	12.33	15	223.04	40.43	8.97	4.10	0.03	16.43	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	251.43	0.06	0.00	5.36	5.41	12.46	11.41	0.88
24	137.14	1.314	12.34	15	223.21	40.44	8.96	4.09	0.03	16.43	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	262.86	0.06	0.00	5.41	5.47	12.46	11.41	0.88
25	125.71	1.371	12.35	15	223.36	40.46	8.95	4.09	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	274.29	0.06	0.00	5.46	5.52	12.46	11.41	0.88
26	114.29	1.429	12.36	15	223.50	40.47	8.95	4.08	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	285.71	0.06	0.00	5.51	5.57	12.46	11.41	0.88
27	102.86	1.486	12.37	15	223.63	40.48	8.94	4.08	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	297.14	0.06	0.00	5.56	5.62	12.46	11.41	0.88
28	91.43	1.545	12.37	15	223.75	40.50	8.94	4.07	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	308.57	0.06	0.00	5.62	5.67	12.46	11.41	0.88
29	80.00	1.600	12.37	15	223.87	40.51	8.93	4.07	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	320.00	0.06	0.00	5.67	5.73	12.46	11.41	0.88
30	68.57	1.657	12.38	15	223.97	40.52	8.93	4.06	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	331.43	0.06	0.00	5.72	5.78	12.46	11.41	0.88
31	57.14	1.714	12.38	15	224.07	40.53	8.93	4.06	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	342.86	0.06	0.00	5.77	5.83	12.46	11.41	0.88
32	45.71	1.771	12.39	15	224.17	40.54	8.92	4.05	0.03	16.44	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	354.29	0.06	0.00	5.83	5.89	12.46	11.41	0.88
33	34.29	1.829	12.39	15	224.26	40.55	8.92	4.05	0.03	16.45	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	365.71	0.06	0.00	5.88	5.94	12.46	11.41	0.88
34	22.86	1.886	12.40	15	224.34	40.55	8.92	4.05	0.03	16.45	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	377.14	0.06	0.00	5.94	5.99	12.46	11.41	0.87
35	11.43	1.943	12.40	15	224.42	40.56	8.91	4.05	0.03	16.45	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	388.57	0.06	0.00	5.99	6.05	12.46	11.41	0.87
36	0.00	2.000	12.40	15	224.49	40.57	8.91	4.05	0.03	16.45	-0.01	0.01	0.01	0.00	11.43	400.00	0.06	0.00	6.05	6.10	12.46	11.41	0.87
SUBCRÍTICO																							

Fig. 21. Tabla resumen del análisis del canal con el método del paso estándar

Columna 1 (Sección o estación)

Para la primera columna, es necesario establecer los límites o número de secciones en las que se va a dividir la longitud del canal y el cauce, el cual para este caso fue de 36 secciones. Es importante mencionar que, si la longitud del canal se divide en más secciones, el cálculo será más específico, sin embargo, debido a la longitud del canal en estudio (400 [m]) este número de secciones es adecuado para que el método se realice correctamente. Tomando en cuenta lo anterior se llega a la conclusión que para el caso de estudio la *Columna 1* queda con la numeración del 1 al 36.

Longitud del canal: 400 m
 Secciones en las que se divide el canal: 35 secciones

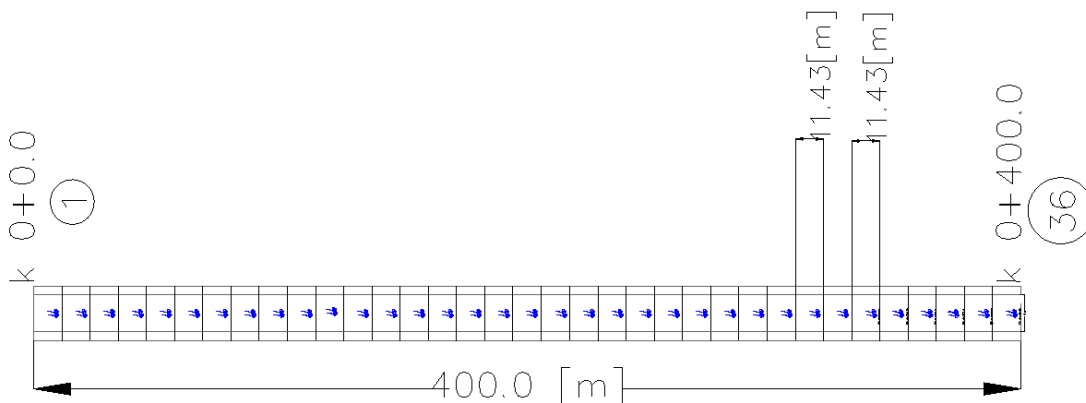
$$\therefore \frac{400 \text{ m}}{35} = 11.4286 \text{ m}$$


Fig. 22. Secciones del canal.

Columna 2 (Cadenamiento de aguas abajo hacia aguas arriba)

En esta columna se refleja el cadenamiento de cada sección en un sentido de aguas abajo hacia aguas arriba, para esto es necesario dividir la longitud del canal entre las secciones establecidas e ir restando esa diferencia al cadenamiento final hasta llegar al cadenamiento inicial. Para demostrar mejor lo antes explicado se ejemplificará con los datos de este caso:

$$400 \text{ m} - 11.429 \text{ m} = 388.571 \text{ m} ; \quad 388.571 \text{ m} - 11.429 \text{ m} = 377.142 \text{ m}$$

$$377.142 \text{ m} - 11.429 \text{ m} = 365.713 \text{ m} ; \quad 365.713 \text{ m} - 11.429 \text{ m} = 354.284 \text{ m}$$

$$\dots \quad 11.429 \text{ m} - 11.429 \text{ m} = 0 \text{ m}$$

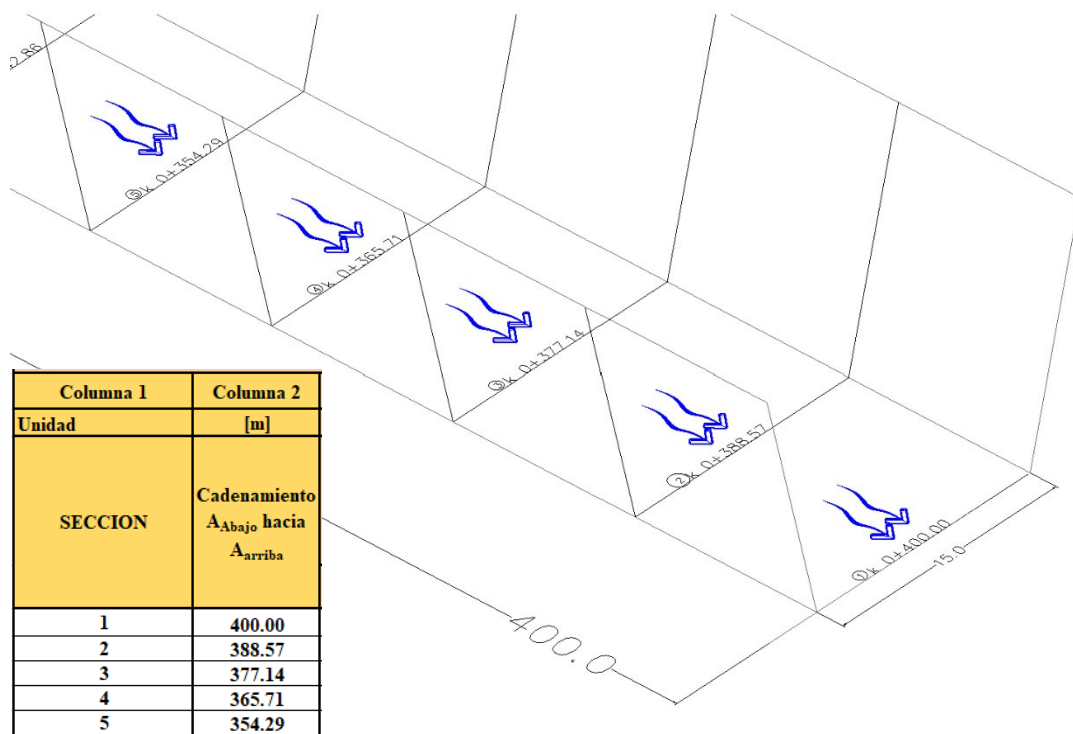


Fig. 23. Cadenamiento en orden descendiente.

Columna 3 (Plantilla)

En esta columna se establece la elevación de la plantilla la cual se determina con la siguiente ecuación:

$$E_{psecc1} = (C_{s2} - C_{s1}) * S_0 \quad \dots (21)$$

$$Elevación_{plantilla_secc1} = (Cadenamiento_{secc2} - Cadenamiento_{secc1}) \cdot Pendiente_{canal}$$

El procedimiento consiste en sumar a la última elevación conocida, la multiplicación entre la pendiente del canal por la longitud entre dos secciones, dando como resultado la elevación de la plantilla de la sección analizada. Con base en lo anterior, a continuación, se muestra parte del cálculo realizado.

$$Elevación_{plantilla_secc1} - (Cadenamiento_{secc2} - Cadenamiento_{secc1}) \cdot Pendiente_{canal}$$

$$E_{psecc1} - (C_{s2} - C_{s1}) \cdot S_0$$

$$0 \text{ m} - (388.57 \text{ m} - 400 \text{ m}) \cdot 0.005 = 0.0572 \text{ m}$$

$$Elevación_{plantilla_secc2} - (Cadenamiento_{secc3} - Cadenamiento_{secc2}) \cdot Pendiente_{canal}$$

$$E_{psecc2} - (C_{s3} - C_{s2}) \cdot S_0$$

$$0.057 \text{ m} - (377.14 \text{ m} - 388.57 \text{ m}) \cdot 0.005 = 0.1142 \text{ m}$$

....

$$Elevación_{plantilla_secc35} - (Cadenamiento_{secc36} - Cadenamiento_{secc35}) \cdot Pendiente_{canal}$$

$$E_{psecc35} - (C_{s36} - C_{s35}) \cdot S_0$$

$$1.943 \text{ m} - (0 \text{ m} - 11.429 \text{ m}) \cdot 0.005 = 2.0001 \text{ m}$$

Para corroborar que las elevaciones obtenidas son correctas, se multiplica la pendiente del canal por la longitud del mismo y el resultado debe ser el mismo al calculado con el procedimiento mostrado anteriormente.

$$S_0 := 0.005$$

$$S_0 \cdot 400 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

Como puede observarse se obtuvo 2 [m] en ambos casos, indicando que el cálculo de las elevaciones es correcto.

Columna 4 (Tirante)

Esta columna muestra el tirante en cada estación o sección, para ello se empleó una macro para automatizar el proceso, el principio para obtener esta columna es ir dividiendo la diferencia de energía entre la diferencia entre pendientes, cambiando el tirante hasta que el resultado sea igual o muy aproximado al valor obtenido por dividir la distancia del canal entre el número de secciones, es decir, 11.43 [m].

$$\frac{\Delta E}{S_0 - S_{f_{media}}} \dots (22)$$

A continuación, se muestra el código utilizado para resolver esta columna:

```
Range("q18").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E18")
Range("q19").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E19")
Range("q20").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E20")
Range("q21").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E21")
Range("q22").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E22")
Range("q23").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E23")
Range("q24").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E24")
Range("q25").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E25")
Range("q26").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E26")
Range("q27").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E27")
Range("q28").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E28")
Range("q29").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E29")
Range("q30").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E30")
Range("q31").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E31")
Range("q32").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E32")
Range("q33").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E33")
Range("q34").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E34")
Range("q35").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E35")
Range("q36").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E36")
Range("q37").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E37")
Range("q38").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E38")
Range("q39").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E39")
Range("q40").GoalSeek Goal:=Range("c8"), ChangingCell:=Range("E40")
```

Fig. 24. Código de Visual Basic (Macro).

Columna 5 (Ancho de plantilla)

Para esta columna se utiliza una ecuación para casos particulares la cual permite interpolar en caso de que las secciones aguas arriba y aguas abajo sean de diferente dimensión. Para el caso de estudio la dimensión de las secciones aguas arriba y aguas abajo es la misma (15 [m]), por lo tanto, no influye en los cálculos, sin embargo, a continuación, se presenta la ecuación empleada.

$$B = \left(\frac{(Cad_{secc1} - Cad_{secc2}) * (B_{AAbajo} - B_{AAriba})}{Longitud_{canal}} \right) + B_{AAriba} \quad \dots (23)$$

Columna 6 (Área Hidráulica).

Se obtiene el área hidráulica con la ecuación No.2:

$$A = (b + (ky)) * y \quad \dots (24)$$

Donde

➤ $b = B =$ Plantilla

- k = Distancia horizontal recorrida.
- y = Tirante

$$\text{Seccion_1} \quad B:=15 \text{ m} \quad k:=0.25 \quad y_1:=11.406 \text{ m}$$

$$\text{Seccion_2} \quad B:=15 \text{ m} \quad k:=0.25 \quad y_2:=11.7345 \text{ m}$$

$$A_1:=\left(B+\left(k \cdot y_1\right)\right) \cdot y_1 \quad A_1=203.61 \text{ m}^2$$

$$A_2:=\left(B+\left(k \cdot y_2\right)\right) \cdot y_2 \quad A_2=210.44 \text{ m}^2$$

Columna 7 (Perímetro mojado).

$$\text{Seccion_1} \quad B:=15 \text{ m} \quad k:=0.25 \quad y_1:=11.406 \text{ m}$$

$$\text{Seccion_2} \quad B:=15 \text{ m} \quad k:=0.25 \quad y_2:=11.7345 \text{ m}$$

$$P_1:=B+2 \cdot y_1 \cdot\left(\sqrt{1+k^2}\right) \quad P_1=38.51 \text{ m}$$

$$P_2:=B+2 \cdot y_2 \cdot\left(\sqrt{1+k^2}\right) \quad P_2=39.19 \text{ m}$$

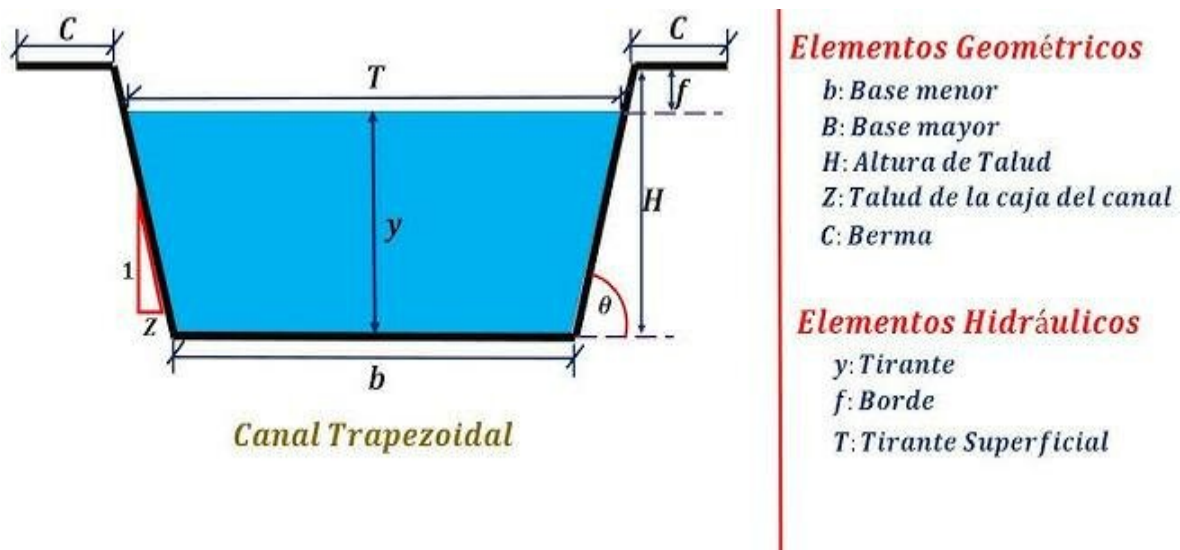


Fig. 25. Elementos geométricos e hidráulicos de una sección trapezoidal.

Columna 8 (Velocidad)

Para esta columna se utiliza la ecuación general de la velocidad la cual es la siguiente:

$$V = \frac{Q}{A} \quad \dots (25)$$

$$Q := 2000 \frac{m^3}{s} \quad A_1 = 203.6142 \text{ } m^2 \quad A_2 = 210.4421 \text{ } m^2$$

$$V_1 := \frac{Q}{A_1} \quad V_1 = 9.8225 \frac{m}{s}$$

$$V_2 := \frac{Q}{A_2} \quad V_2 = 9.5038 \frac{m}{s}$$

Columna 9 (Carga de velocidad).

Con esta columna se obtiene la carga de velocidad la cual se obtiene con la ecuación No.7:

$$\frac{\alpha V^2}{2g}$$

A continuación, se presentan los resultados para las dos primeras secciones:

$$\begin{array}{l} \text{Datos} \quad \alpha := 1 \quad g := 9.81 \frac{m}{s^2} \\ \text{Seccion}_1 \quad \frac{\alpha \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = 4.9175 \text{ } m \quad \text{Seccion}_2 \quad \frac{\alpha \cdot V_2^2}{2 \cdot g} = 4.6036 \text{ } m \end{array}$$

Columna 10 (Rugosidad equivalente).

Para esta columna se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_{equiv} = \left(\frac{(n_{plantilla}^2 + B) + (n_{plantilla}^2 * 2y * \sqrt{k^2 + 1^2})}{P} \right)^2 \quad \dots (26)$$

A continuación, se presentan sol resultados para las secciones 1 y 2:

<i>Datos</i>	$n_{plantilla} := 0.025$	$k = 0.25$	$P_1 = 38.5141 \text{ m}$
$n_{equiv1} :=$	$\left(\frac{(n_{plantilla}^2 \cdot B) + (n_{plantilla}^2 \cdot 2 y_1 \cdot \sqrt{k^2 + 1^2})}{P_1} \right)^{0.5}$		$n_{equiv1} = 0.025$
$n_{equiv2} :=$	$\left(\frac{(n_{plantilla}^2 \cdot B) + (n_{plantilla}^2 \cdot 2 y_2 \cdot \sqrt{k^2 + 1^2})}{P_2} \right)^{0.5}$		$n_{equiv2} = 0.025$

Columna 11.- (Energía específica).

La energía específica se obtiene sumando la carga de velocidad más el tirante de cada sección.

$$E_{esp} = y_i + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad \dots (27)$$

<i>Datos</i>				
$y_1 := 11.41 \text{ m}$	$y_2 := 11.73 \text{ m}$	$V_1 := 9.8225 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$V_2 := 9.5038 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\alpha := 1$
<i>Sección₁</i>	$E_{esp1} := y_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = 16.328 \text{ m}$	<i>Sección₂</i>	$E_{esp2} := y_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 16.334 \text{ m}$	

Columna 12.- (Diferencia de energía).

Esta columna se obtiene restando la energía entre secciones como se muestra a continuación.

$$\Delta E := E_{esp2} - E_{esp1} = 0.01 \text{ m}$$

Columna 13.- (Pendiente de fricción).

$$S_f = \frac{n_{equiv}^2 \cdot V_i^2}{\left(\frac{A_i}{P_i}\right)} \quad \dots (28)$$

Datos

$$Rh_1 := \frac{A_1}{P_1} = 5.2867 \text{ m} \quad Rh_2 := \frac{A_2}{P_2} = 5.3696 \text{ m} \quad V_1 = 9.8225 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$n_{equiv1} := n_{equiv1} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^{\frac{1}{3}}} \quad n_{equiv2} := n_{equiv2} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^{\frac{1}{3}}} \quad V_2 = 9.5038 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$S_{f1} := \frac{n_{equiv1}^2 \cdot V_1^2}{\left(Rh_1\right)^{\frac{4}{3}}} = 0.0065 \quad S_{f2} := \frac{n_{equiv2}^2 \cdot V_2^2}{\left(\frac{A_2}{P_2}\right)^{\frac{4}{3}}} = 0.006$$

Columna 14.- (Pendiente de fricción media.)

$$S_{f2'} = \frac{(S_{f1} + S_{f2})}{2} \quad \dots (29)$$

$$\text{Datos} \quad S_{f1} = 0.0065 \quad S_{f2} = 0.006$$

$$S_{f2'} := \frac{(S_{f1} + S_{f2})}{2} = 0.0063$$

Columna 15.- Diferencia de pendientes.

<i>Datos</i>	<i>Resultado</i>
$S_0 := 0.005 \quad S_{f2} := 0.0063$	$S_0 - S_{f2} = -0.0013$

Columna 16.- (Distancia entre las secciones.)

Para esta columna la distancia es constante ya que la longitud del canal se dividió en 35 secciones para realizar el cálculo.

$$\Delta x := \frac{400 \text{ m}}{35} = 11.4286 \text{ m}$$

Columna 17.- (Cadenamiento)

Esta columna obtiene la distancia acumulada de cada sección, para ello se suma la longitud de cada tramo como se muestra a continuación:

<i>Datos</i>	$\Delta x = 11.4286 \text{ m}$
$Cad_{secc1} := 0 \quad Cad_{secc2} := \Delta x = 11.4286 \text{ m} \quad Cad_{secc3} := Cad_{secc2} + \Delta x = 22.8571 \text{ m}$	
$Cad_{secc3} := Cad_{secc3} + \Delta x = 34.2857 \text{ m} \quad \dots \quad Cad_{secc36} := Cad_{secc3} + (32 \cdot \Delta x) = 400 \text{ m}$	

Columna 18.- (Pérdida por fricción en el tramo.)

Esta columna se obtiene multiplicando la pendiente de fricción media por la distancia entre secciones.

<i>Datos</i>	$S_{f2} := 0.006276 \quad S_{f3} := 0.005922 \quad \Delta x = 11.4286 \text{ m}$
$hf_1 := 0 \quad hf_2 := S_{f2} \cdot \Delta x = 0.072 \text{ m} \quad hf_3 := S_{f3} \cdot \Delta x = 0.068 \text{ m}$	

Columna 19.- (Pérdida por remolino)

En este caso no se presenta remolino por lo que el valor a lo largo del tramo será 0.

$$h_r := 0$$

Columna 20.- (Elevación sin pérdidas de energía)

$$H_n = El_{seccn} + \left(\alpha * \frac{V_n^2}{2g} \right) \quad \dots (30)$$

$$\text{Datos} \quad El_{secc1} := 0 \quad El_{secc2} := 0.057 \text{ m} \quad El_{secc3} := 0.114 \text{ m} \quad \alpha = 1$$

$$H_1 := El_{secc1} + \left(\alpha * \frac{V_1^2}{2 * g} \right) = 4.918 \text{ m}$$

$$H_2 := El_{secc2} + \left(\alpha * \frac{V_2^2}{2 * g} \right) = 4.661 \text{ m}$$

$$H_3 := El_{secc3} + \left(\alpha * \frac{V_3^2}{2 * g} \right) = 4.623 \text{ m}$$

Columna 21.- (Elevación con pérdidas de energía)

$$\text{Datos} \quad El_{secc1} := 0 \quad El_{secc2} := 0.057 \text{ m} \quad El_{secc3} := 0.114 \text{ m} \quad \alpha = 1$$

$$H_{Final1} := 0 \quad H_{Final2} := hf_2 + h_r + H_2 = 4.732 \text{ m} \quad H_{Final3} := hf_3 + h_r + H_3 = 4.69 \text{ m}$$

Columna 22.- Tirante normal.

En esta columna se plasma el tirante normal del canal para poder graficarlo posteriormente.

$$Y_n := 12.46 \text{ m}$$

Columna 23.- Tirante crítico.

En esta columna se plasma el tirante crítico del canal para poder graficarlo posteriormente.

$$Y_c := 11.41 \text{ m}$$

Columna 24.- Numero de Froude.

$$Fr = \frac{V_i}{\sqrt[2]{Y_i * \frac{A_i}{B + (2 * k * g)}}} \quad \dots (31)$$

	$V_1 = 9.8225 \frac{m}{s}$	$Y_1 := Y_c = 11.41 \text{ m}$	$A_1 = 203.6142 \text{ m}^2$	$B = 15 \text{ m}$
<i>Datos</i>	$V_2 = 9.5038 \frac{m}{s}$	$Y_2 := 11.7345 \text{ m}$	$A_2 = 210.4421 \text{ m}^2$	$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$
	$V_{36} := 8.9091 \frac{m}{s}$	$Y_{36} := 12.4023 \text{ m}$	$A_{36} := 224.4889 \text{ m}^2$	
	$Fr_1 := \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot \left(\frac{A_1}{B + (2 \cdot k \cdot Y_c)} \right)}} = 1$		$Fr_2 := \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot \left(\frac{A_1}{B + (2 \cdot k \cdot Y_2)} \right)}} = 0.97$	
	$Fr_{36} := \frac{V_{36}}{\sqrt{g \cdot \left(\frac{A_1}{B + (2 \cdot k \cdot Y_{36})} \right)}} = 0.92$			

Columna 25.- Régimen

Para establecer el régimen se hace la comparativa entre la pendiente del terreno (S_0) y la pendiente de fricción (S_f); si la pendiente de fricción es mayor a la pendiente del terreno el régimen será subcrítico y por el contrario si es menor, el régimen será supercrítico.

Datos $S_0=0.005$ $S_{f1}=0.0065$ $S_{f2}=0.006$ $S_{f35}=0.005068$

$Régimen_{secc1} := \text{if}(S_{f1} > S_0, \text{"SUBCRÍTICO"}, \text{"SUPERCRÍTICO"}) = \text{"SUBCRÍTICO"}$

$Régimen_{secc2} := \text{if}(S_{f2} > S_0, \text{"SUBCRÍTICO"}, \text{"SUPERCRÍTICO"}) = \text{"SUBCRÍTICO"}$

$Régimen_{secc35} := \text{if}(S_{f35} > S_0, \text{"SUBCRÍTICO"}, \text{"SUPERCRÍTICO"}) = \text{"SUBCRÍTICO"}$

3.1.4.- Análisis de resultados.

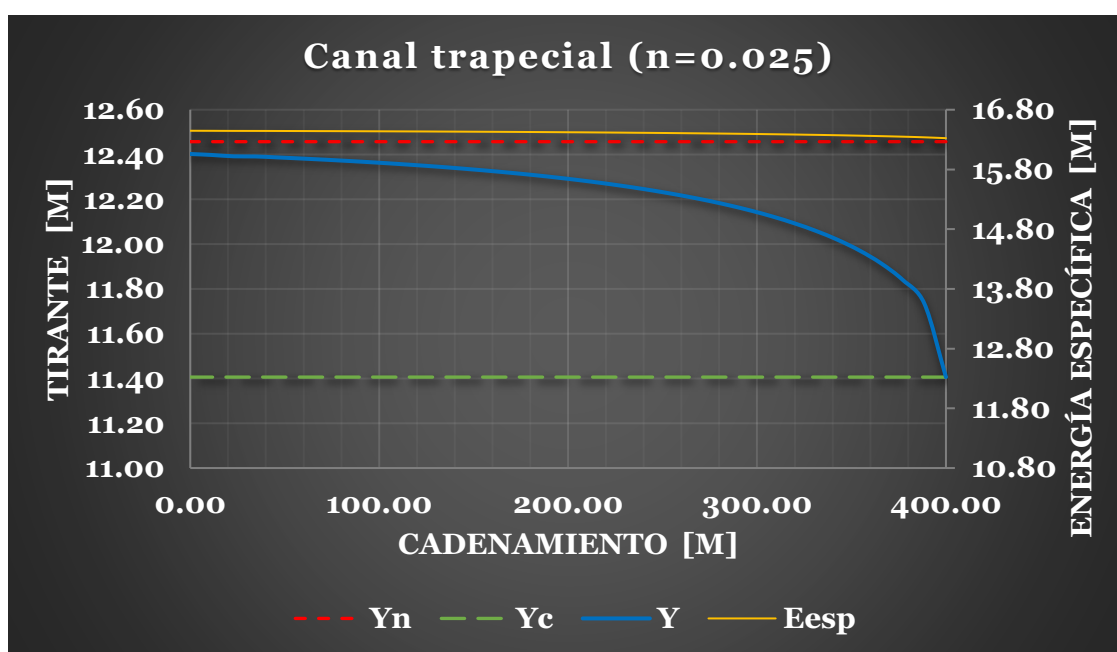


Fig. 26. Perfil hidráulico del canal en estudio.

Con base en la Fig. 21 y la Fig. 26, podemos observar que los tirantes se encuentran muy próximos en cuanto a elevación, habiendo 1.05 [m] de diferencia entre el tirante crítico (aguas abajo) y el tirante normal (aguas arriba); sin embargo, a pesar de que hay una diferencia mínima entre éstos, el cálculo y la representación gráfica, muestran que el flujo alcanza un tirante máximo de (12.40 [m]) a la entrada del canal, lo cual demuestra que, al ser el tirante máximo menor al tirante normal (12.46 [m]), se presenta un perfil de tipo M2 correspondiente a un régimen subcrítico, cumpliendo así el objetivo del ejercicio.

Como conclusión se pueden establecer tres puntos, el primero es que, elaborar la hoja de cálculo, requiere de una gran cantidad de tiempo y organización ya que para cada predimensionamiento se deben probar distintas configuraciones probando diferentes anchos de plantilla, coeficientes de rugosidad, relación de los taludes, etc., posteriormente se debe correr la macro y guardar los resultados obtenidos para compararlos. Con base en lo anterior y tomando en cuenta que este ejemplo se realizó para un canal de 400 [m] y solamente se obtuvieron datos en 36 puntos a lo largo del canal, se puede inferir que, para obtener una mayor cantidad de resultados, el tiempo para organizar y elaborar la hoja de cálculo, estará en función de la longitud del canal y la cantidad de resultados que se deseen obtener, haciendo que el proceso para crear la hoja de cálculo sea más tardado y laborioso; otro punto importante es que para este caso se utilizó una macro que realizara el cálculo de forma iterativa, en caso contrario, si se realizara de forma manual, indudablemente incrementaría el tiempo de ejecución del método, provocando que sea relativamente ineficiente cuando se tiene una gran cantidad de secciones. Finalmente, aunque no menos importante, la representación de los resultados es muy limitada ya que, como se muestra en la Fig. 26, solamente se pueden observar una cantidad limitada de resultados, tales como el perfil, energía específica y los tirantes de las secciones calculadas a través de líneas o puntos, lo cual deja a la imaginación la visualización real del flujo a través del canal, así como huecos de información para representar resultados específicos.

3.2.- Ejercicio 2 (Chicoasén II utilizando Hec-Ras).

3.2.1 Introducción y objetivo.

Este caso de estudio se realizará tomando como base/referencia una propuesta realizada por la Disciplina de Hidráulica de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE. El proyecto se localiza sobre el río Grijalva a un costado del municipio de Chicoasén en el estado de Chiapas. Aguas arriba se encuentra la Central Hidroeléctrica Ing. Manuel Moreno Torres “Presa Chicoasén” la cual fue construida en el año de 1974 al 1980 siendo inaugurada el 1° de mayo de 1980 con el cierre del desvío. El caudal proveniente de esta presa llegará al sitio del proyecto “Chicoasén II” durante el periodo de su construcción, por

ende, dicho caudal será desviado por un canal de sección transversal trapecial del cual se darán las características específicas más adelante.

El objetivo de este ejercicio es modelar unidimensionalmente y tridimensionalmente el canal de desvío del Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén II con la finalidad de aplicar el software Hec-Ras, analizar el comportamiento del flujo a lo largo del canal y observar la representación de los resultados para realizar una comparativa entre HEC-RAS y Autodesk CFD.

3.2.2.- Desarrollo del ejercicio.

Se comenzó analizando la geometría a lo largo del canal ya que, como se menciona en las especificaciones de la Tabla 26, el ancho de la plantilla del canal varía en algunas secciones. La primera variación de la sección se encuentra aguas arriba y ésta es debido a que hubo un caído de talud durante las excavaciones (Fig. 28).

Tabla 26. Especificaciones de la obra de desvío.

OBRA DE DESVÍO	DATO	UNIDAD
Tipo	Canal trapecial	
Longitud	933,618	m
Pendiente de la plantilla “S” (Inicia en el cadenamiento 0+360.955)	0 - 0,005239	
Ancho de Plantilla	25,00- Variable	m
Gasto máximo de la avenida de diseño del desvío	3 474,00	m ³ /s
Volumen de la avenida	5 380,00	hm ³
Periodo de retorno (Tr) para el diseño del desvío	50	Años
Elevación del piso en la entrada del Canal	185,00	m
Elevación del piso en la salida del Canal	182,00	m
Velocidad máxima de descarga	14,77	m/s
Elevación de la corona de la ataguía aguas arriba.	205,00	m

Elevación de la corona de la atagüa aguas abajo.	195,00	m
Recubrimiento de la plantilla (Concreto liso con llana metálica)	0.014	
Recubrimiento de los taludes (Concreto lanzado)	0.026	
Inclinación de los taludes (Relación)	025:1	

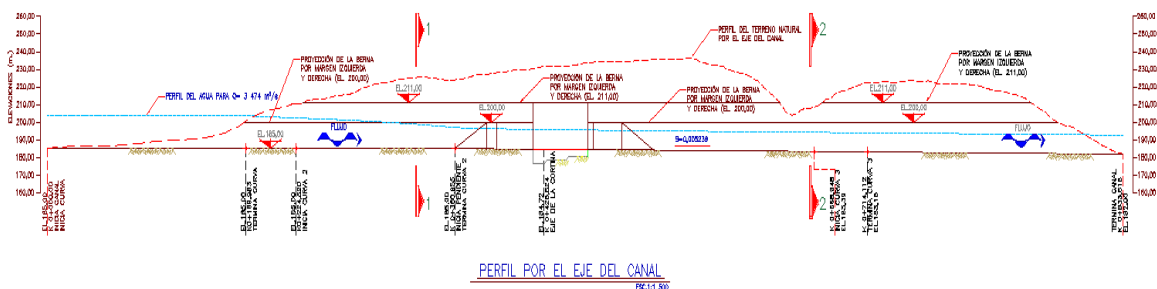


Fig. 27. Perfil por el eje del canal.

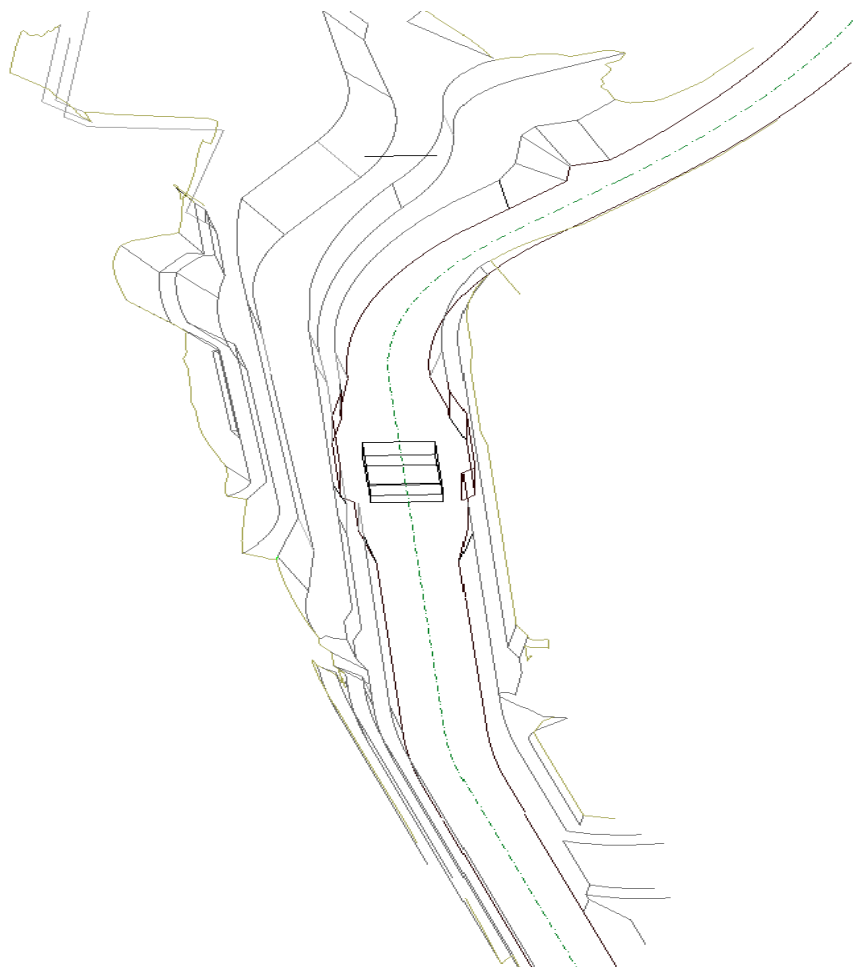


Fig. 28. Vista en perspectiva del canal de desvío.

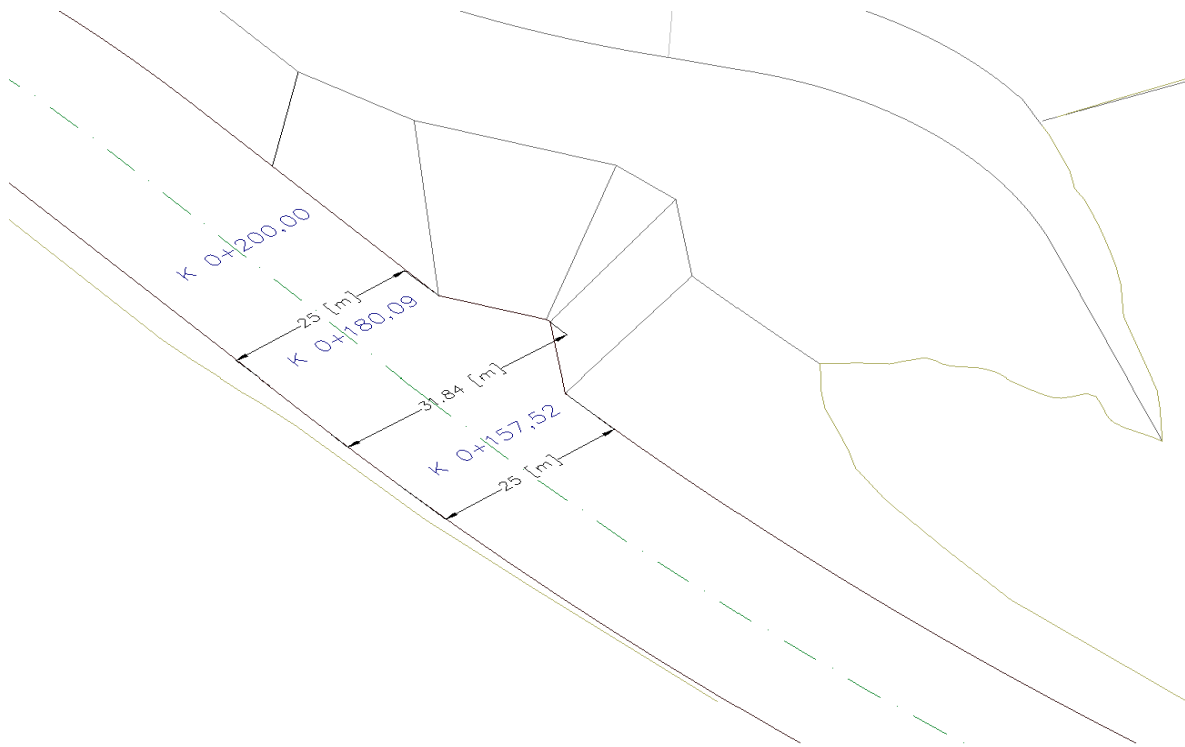


Fig. 29. Primer ensanche del canal en perspectiva.

Posteriormente en el punto donde comienza la pendiente (cadenamiento 0+360.955), el canal sufre un ensanchamiento progresivo hasta llegar a un ancho de plantilla de 40.54 [m]; en este tramo de canal se encuentran excavaciones escalonadas las cuales son una preparación para colocar, en otra etapa del proyecto, compuertas radiales que en conjunto con el canal tendrán una función de vertedor auxiliar de emergencia. El canal vuelve a regresar al ancho de diseño (25 [m]) en el cadenamiento 0+527.63 continuando con la misma geometría hasta llegar al final del canal.

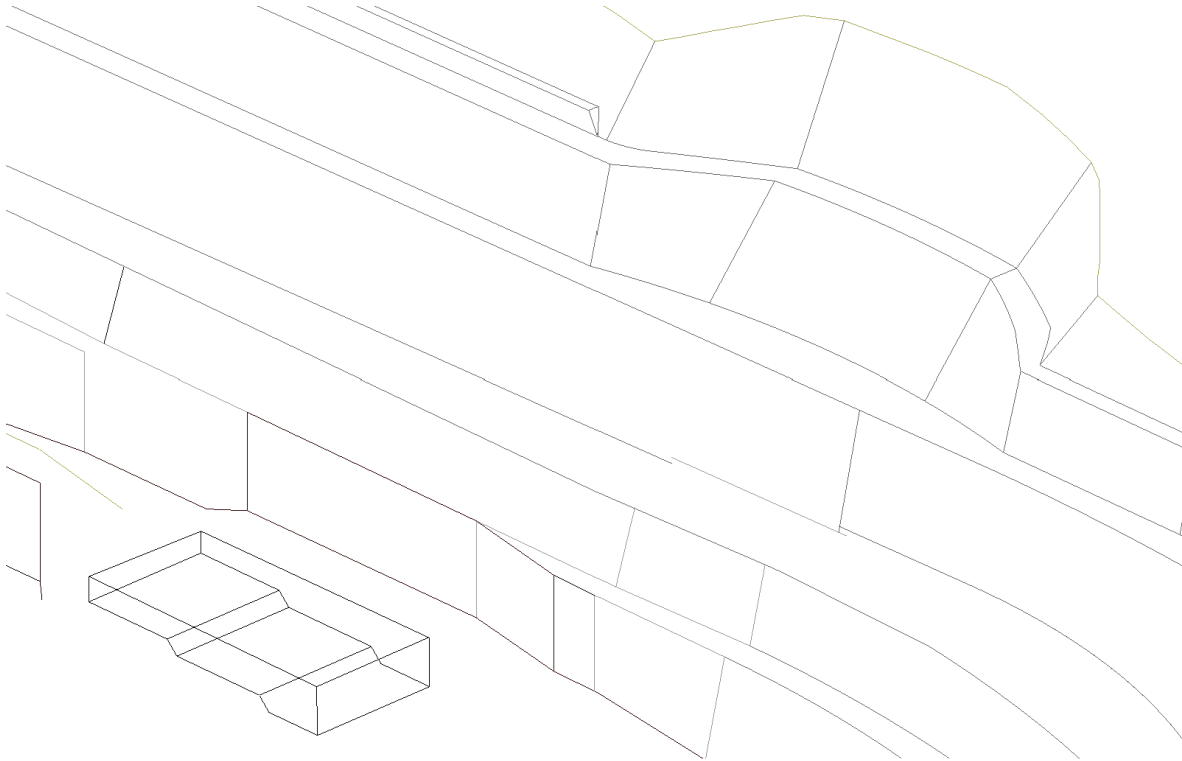


Fig. 30. Preparación escalonada en perspectiva.

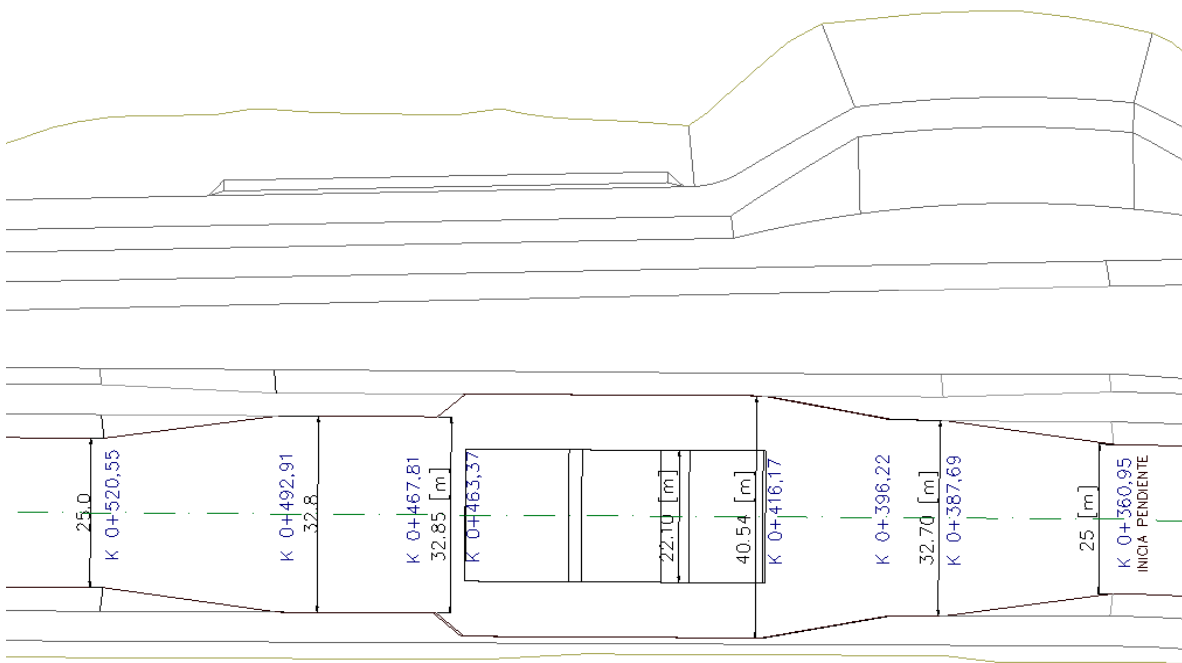


Fig. 31. Segundo ensanche del canal en planta.

La identificación de estos ensanchamientos, contracciones y excavaciones es importante para la construcción del modelo hidráulico, ya que, al variar la geometría en algún tramo, se obtienen fenómenos que afectan el comportamiento del fluido.

Una vez analizada la geometría del canal, se buscan puntos críticos donde fuera conveniente obtener secciones transversales; los cuales son puntos o secciones de interés donde el canal tenga cambios de pendientes, geometría y / o rugosidad. Otro aspecto importante que influye en la modelación es el trazo del cauce original (río) ya que la representación de éste, al tener una sección no prismática y rugosidad mayor a la del canal debido a la presencia de agentes naturales como arbustos o rocas, generará otro comportamiento del fluido, para este caso sólo se consideraron secciones del cauce aguas abajo. A consecuencia de lo anterior, se concluye la importancia de identificar las condiciones naturales del cauce y además verificar si existen las variaciones antes mencionadas para poder simularlas y con ello analizar el impacto que generan en el comportamiento del fluido y así, dentro de lo posible, se pueda realizar un análisis más detallado y apegado a la realidad.

Continuando con el procedimiento, se definieron 39 puntos de interés de los cuales se obtuvieron las secciones transversales utilizando los planos topográficos del diseño del canal, de estas secciones se definieron elevaciones y anchos tomando como referencia el eje del canal para poder exportarlos (manualmente) a Excel y de igual manera a Hec-Ras. En este punto es importante mencionar la organización de los datos obtenidos, ya que Hec-Ras interpreta los datos bajo ciertas condiciones las cuales pueden arrojar resultados difíciles de interpretar si no se ingresó la información de forma adecuada. Para este paso la información se organizó de la siguiente manera:

Las secciones de la 1 a la 39 siguen el sentido del cauce, es decir de aguas arriba hacia aguas abajo, a su vez, cada sección va asociada a un número de estación (River Station) el cual tiene la finalidad de tener una mejor manipulación de los datos en la interfaz de Hec-Ras; Por lo tanto, con base en la Fig. 32, se puede decir que el cadenamiento 360.95, corresponde a la “River Station” 725.85 en Hec-Ras. Por otra parte, se tendrán que obtener las distancias entre cada sección y además se tendrá que elegir un rango de gastos, teniendo como límite el gasto de diseño o gasto máximo (de 0 a 3 474 m³/s) para organizarlos en Excel y posteriormente exportarla a Hec-Ras (Fig. 33).

	940		930		920		910		905	
River station (Identificador Hec-Ras)	725.85		699.11		690.58		670.63		670.58	
SECCIÓN	7		8		9		10		11	
CADENAMIENTO [m]	360.95		387.69		396.22		416.17		416.22	
Datos Generales	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
Qmax=3474 m ³ /s	-24.01	207	-23.07	207	-23.07	207	-23.07	207	-23.07	207
Long. Canal=933.61	-21.25	200	-21.3	200	-21.3	200	-21.3	200	-21.3	200
S=0.005239	-12.5	185	-16.47	184.79	-16.47	184.75	-20.27	184.64	-20.27	184.64
Elevación inicial = 185 m	0	185	0	184.79	0	184.75	0	184.64	-11.051	184.64
Elevación final = 182 m	12.5	185	16.47	184.79	16.47	184.75	20.27	184.64	-11.05	176.71
Elevación Berma 1= 200	16.25	200	20.28	200	20.28	200	24.03	200	0	176.71
	21.25	200	24	213	24	213	36.93	213	11.05	176.71
	24.22	213	38	213	38	213			11.051	184.64
	38.76	213							20.27	184.64
Dist / secciones	26.74		8.53		19.95		0.05		24.03	200
	INICIA PENDIENTE								36.93	213
									10.004	

Fig. 32. Organización de datos en Excel.

Identificador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gasto (m ³ /s)	0	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Identificador	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Gasto (m ³ /s)	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20
Identificador	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Gasto (m ³ /s)	20.5	21	21.5	22	22.5	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Identificador	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Gasto (m ³ /s)	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100
Identificador	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Gasto (m ³ /s)	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3474

Fig. 33. Gastos utilizados

Con los datos organizados se ingresa al software Hec-Ras el cual pedirá 5 parámetros para poder crear una simulación. A continuación, se presentan los pasos a seguir:

1.- Creación de un nuevo proyecto.

Se creó un proyecto llamado “PROYECTO CHICOASEN II” en el cual se guardaron todos los datos necesarios para la simulación.

2.- Creación del río o canal.

Para la creación del canal se selecciona la herramienta “Edit Geometric Data” (Fig. 34) y posteriormente se realiza la esquematización del canal utilizando la función “River Reach” (Fig. 35), al utilizar esta herramienta se crea una esquematización simple del río a través de una línea, la cual deberá ser dibujada de la parte superior izquierda (Aguas arriba) hacia la parte inferior derecha (Aguas abajo) ya que el software considera que esa será la

dirección del flujo, finalmente se guardarán los datos con el nombre del río y el tramo en el que se esté trabajando, siendo en este caso el Río Grijalva y la Obra de desvío respectivamente (Fig. 36).

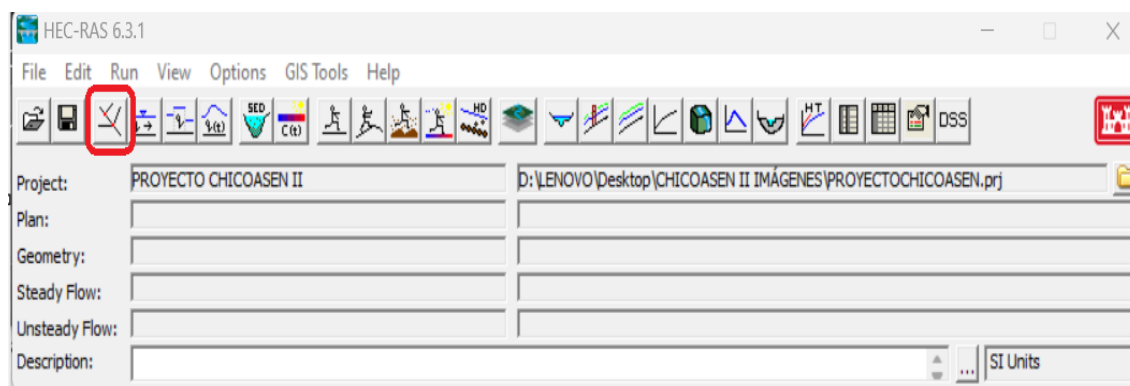


Fig. 34. Menú de edición de datos geométricos “Edit geometric data”.

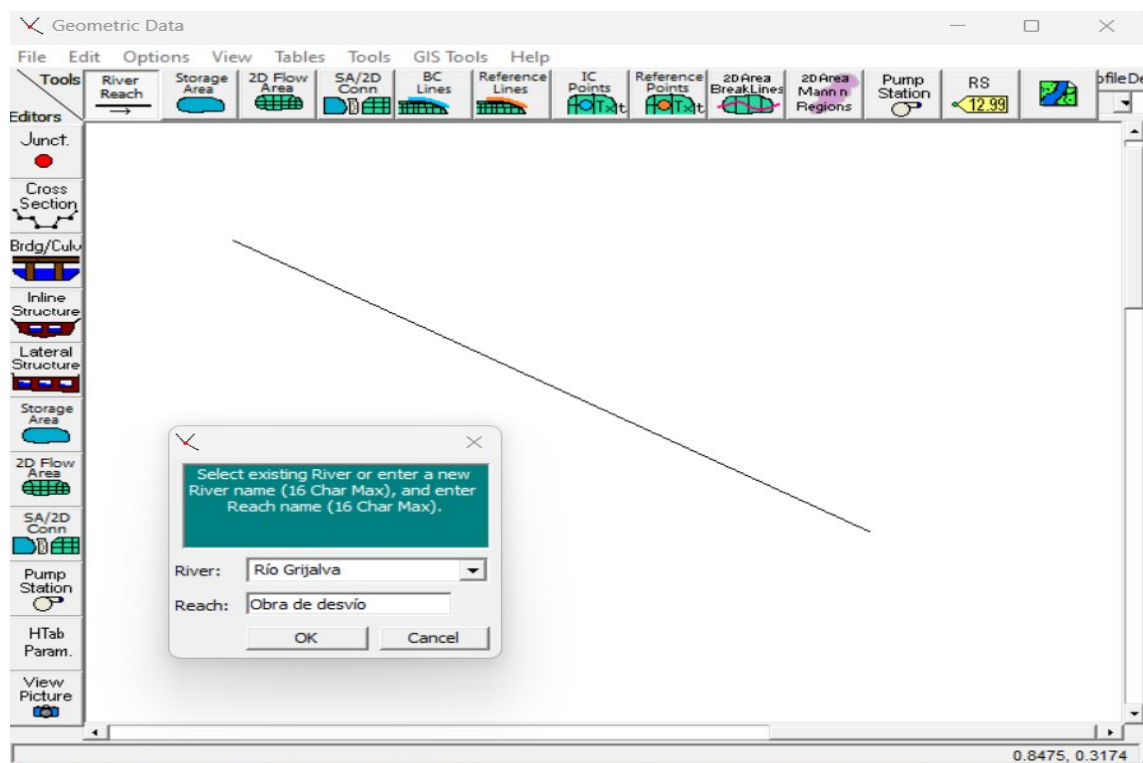


Fig. 35. Apartado para guardar los nombres del río y tramo de estudio.

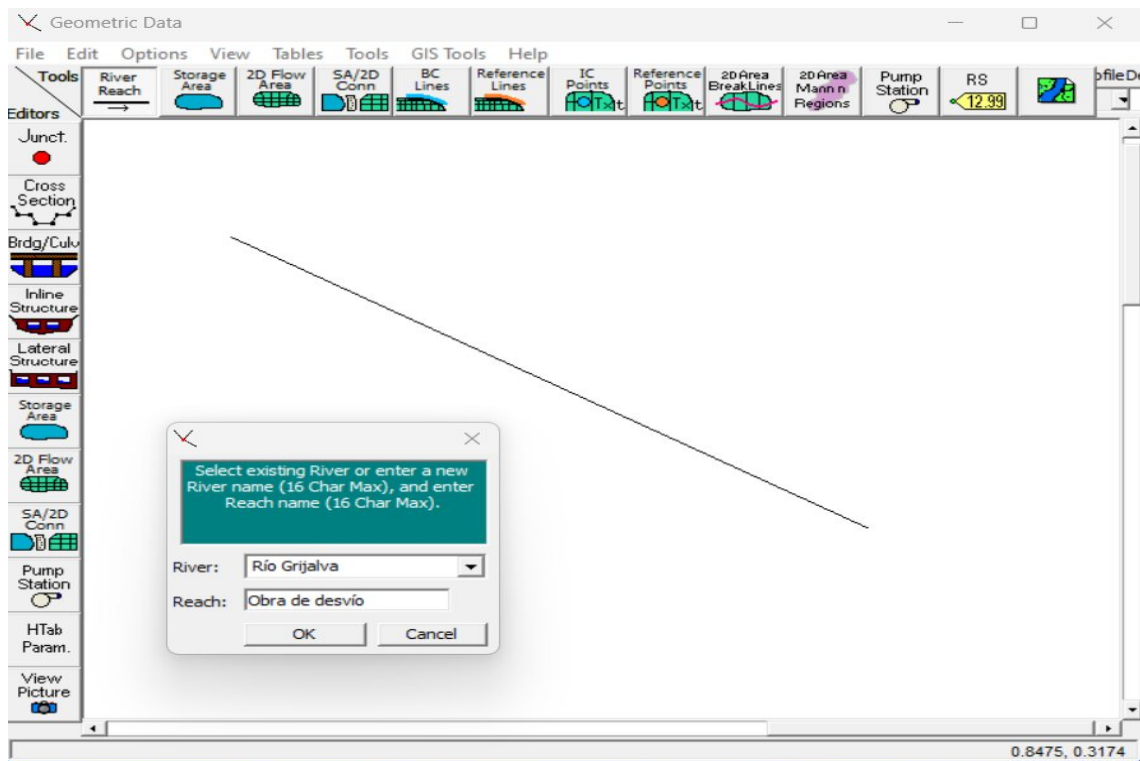


Fig. 36. Creación del río.

3.- Creación de la geometría del canal.

Para ingresar los datos es necesario retomar el punto de las estaciones (*River station*) para cada sección transversal, dichas estaciones deben estar asociadas con la longitud del canal ya que al ingresar las distancias entre secciones el software considerará las longitudes para poder modelarlas a partir de la longitud máxima introducida. Para asignar el número de estación a las secciones se tiene que considerar que el software interpreta el número de estación más grande como aguas arriba (número de mayor valor ingresado), y por ende el número de menor valor ingresado como aguas abajo, por lo tanto, es importante tener precaución al nombrar e identificar las secciones transversales con el fin de tener un margen de error en el caso de que se agreguen más secciones que no estén contempladas o si se llegara a interpolar entre secciones.

En el apartado *Downstream Reach Lengths* (Fig. 37), se colocará la distancia que hay entre la sección transversal actual a la sección transversal inmediata aguas abajo.

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
157.53	157.53	157.53

Fig. 37. *Downstream Reach Lengths.*

Otro punto importante de aclarar es el apartado *Main Channel Bank Stations* (*Left Bank* y *Right Bank*) (Fig. 38), el cual hace referencia a los puntos o estaciones desde las cuales el software considerará que son la margen derecha y margen izquierda. Para este caso de estudio, se recomienda tomar el eje del canal como referencia para las estaciones siendo el eje la estación 0 (cero), ya que al ser un canal prismático (trapezoidal) que conserva su geometría en la mayoría de su longitud, las estaciones no tendrán gran variación y por otra parte se podrá identificar de una mejor manera la margen izquierda con signos negativos y la margen derecha con signos positivos.

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-12.5	12.5

Fig. 38. *Main Channel Bank Stations*

En el apartado del coeficiente de contracciones o expansiones (*Cont/exp coefficient*) (Fig. 39) se utilizará un coeficiente de 0 para la mayoría de la longitud del canal, la razón de utilizar este coeficiente de acuerdo con el manual de Hec-Ras, es que, si un canal es prismático y conserva su geometría a lo largo de todo el canal, no existen contracciones o expansiones, por lo tanto, se podrá considerar un factor de 0. Siendo estrictos, realmente existen expansiones y contracciones en algunas secciones del canal, pero al ser este caso de estudio con fines prácticos no se abundará en la obtención específica de dicho coeficiente y por ende se considerarán, para las secciones donde se presente una expansión o contracción, los coeficientes que arroja el software por default. Para este caso se ocuparon coeficientes de 0.1 en el apartado de contracción y 0.3 en el apartado de expansión para las secciones donde el canal sufre un ensanche, para las secciones donde el canal sufre una contracción para volver a la plantilla de diseño se invirtieron los coeficientes aumentando a 0.3 para contracción y disminuyendo a 0.1 para expansión.

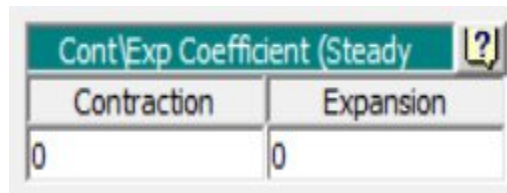


Fig. 39. Cont/Exp Coefficient.

Finalmente se utilizaron dos herramientas especiales para que el modelo se ejecute de forma correcta, dichas herramientas son “*Leave*” y “*Obstruction*” (Fig. 40); la primera herramienta se utiliza debido a que, en las secciones transversales al final del canal, se comienza a considerar el cauce, ya que el río en algunas secciones tiene elevaciones menores a la elevación de la plantilla del canal, el software toma la elevación más baja como punto inicial para comenzar a llenar el canal.

Debido a que esta suposición es incorrecta, la herramienta “*Leave*” funge como limitante para indicar a partir de que coordenada el software debe comenzar a considerar el río para continuar conduciendo el flujo.

Por otra parte, la herramienta “*Obstruction*” se utiliza para simular, como su nombre lo indica, una obstrucción en el canal. El canal cuenta con excavaciones que servirán de preparación para instalar compuertas en otra etapa del desvío, sin embargo, aunque las excavaciones afectan el comportamiento del canal, con un gasto mayor a 1 500 [m³/s] el flujo presenta velocidades cercanas a 10 [m/s] lo cual genera que el volumen ubicado en las excavaciones prácticamente permanezca sin movimiento generando que el comportamiento del fluido sea como si no existiera dicha excavación. Aclaradas las especificaciones de las herramientas utilizadas en el modelo y las recomendaciones proporcionadas, se continuará con la explicación de la introducción de datos de la geometría del canal a Hec-Ras.

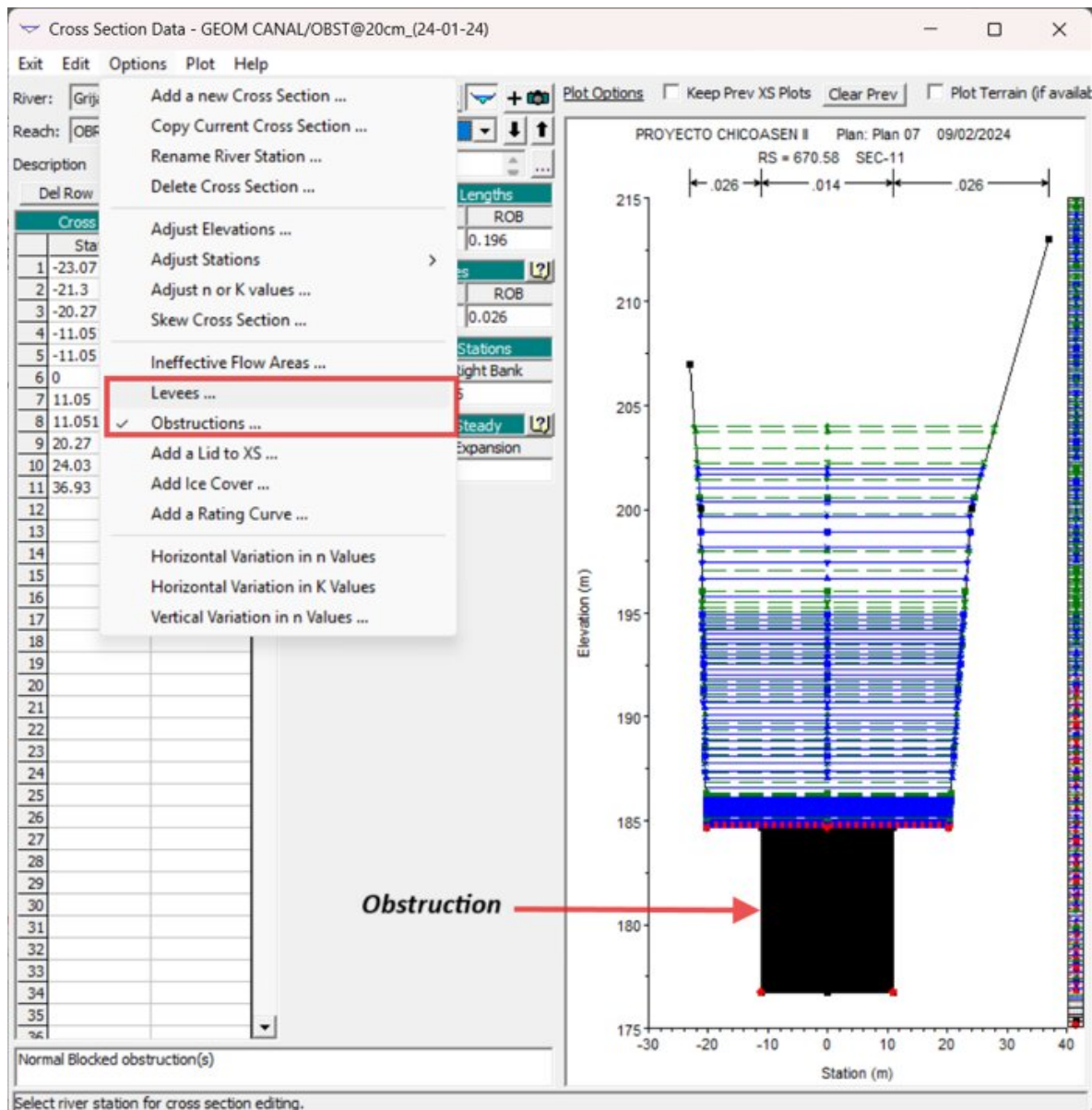


Fig. 40. Levees y Obstructions.

Para crear la geometría del canal se ingresarán los datos previamente organizados y guardados en Excel en el apartado “Cross Section” (Fig. 32 y Fig. 33); en el cual se requerirá ingresar los siguientes datos para crear cada sección transversal:

- ✓ Coordenadas de la sección transversal “*Cross Section Coordinates*”
- ✓ Distancia entre secciones “*Downstream Reach Lengths*”

- ✓ Coeficientes de rugosidad (n de Manning) de la plantilla y taludes del canal. así como del río para las secciones que lo requieran. “*Manning’s Values*”
- ✓ Bancos para definir las márgenes del canal “*Main Channel Bank Stations*”
- ✓ Coeficientes de contracción o expansión “*Cont/exp coefficient*”

Para ingresar la primer sección transversal se tendrá que abrir el apartado que se muestra en la Fig. 41, una vez realizado esto se desplegará un recuadro donde se tendrá que colocar el número de estación o “*River Station*” siguiendo las recomendaciones mencionadas anteriormente. Una vez nombrada la primer sección transversal se podrán ingresar los datos que requiere el software como se muestra en la Fig. 42. Es importante señalar que, al finalizar el ingreso de datos o modificación posterior de alguna sección transversal, siempre tendrán que salvarse los datos dando clic en “*Apply Data*”, de lo contrario las modificaciones no tendrán efecto en el modelo.

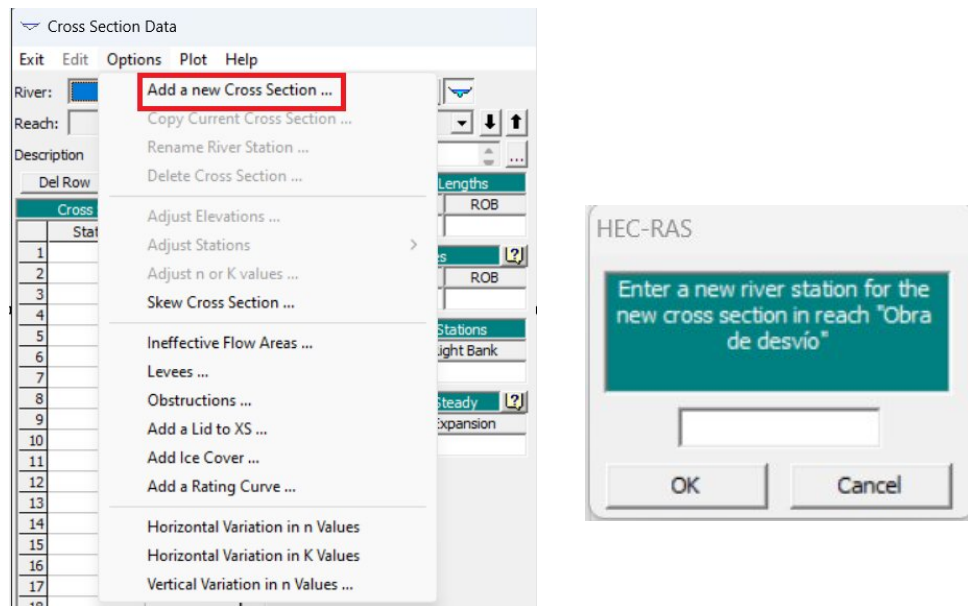


Fig. 41. Ingreso de una nueva sección transversal (River station).

Cross Section Data - GEOMETRÍA DEL CANAL/OBSTRUCTIONS

Exit Edit Options Plot Help

River: Grijalva Apply Data    

Reach: OBRA DE DESVÍO River Sta.: 1000  

Description SECC-1 (0+00) UNICIA EL CANAL 

Del Row Ins Row

Cross Section Coordinates		
	Station	Elevation
1	-17.84	200
2	-12.5	185
3	0	185
4	12.5	185
5	30.04	200
6	64.61	200
7	67.91	213
8	102.39	213
9		
10		
11		
12		

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
157.53	157.53	157.53

Manning's n Values 		
LOB	Channel	ROB
0.026	0.014	0.026

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-12.5	12.5

Cont\Exp Coefficient (Steady )	
Contraction	Expansion
0	0

Fig. 42. Ingreso de datos para nueva sección transversal (River station).

El procedimiento para ingresar las demás secciones transversales será el mismo, con la única diferencia de que en el apartado de “*opciones*” ahora se seleccionará la opción “*Copy Current Cross Section*”; al utilizar esta opción se crea una nueva sección la cual conservará todos los parámetros de la sección anterior y los datos que no cambian entre secciones como los coeficientes de rugosidad de Manning o los coeficientes de contracción y expansión, se pueden guardar para las siguientes secciones agilizando el proceso de ingreso de datos.

En el caso de las secciones que requieren el uso de las herramientas “Obstruction” o “Leaves”, se tendrá que dar clic en el apartado de “*opciones*” e ingresar las coordenadas de la estación donde se vaya a utilizar de acuerdo con el funcionamiento de cada herramienta tal cual se explicó anteriormente en este apartado.

4.- Ingreso de los datos de flujo y condiciones de frontera.

En este caso se consideró una gama de 100 gastos que varían de 0 a 3 474 [m³/s] con el fin de simular los distintos escenarios que puedan presentarse. Para ingresar los datos se selecciona la herramienta “*Steady Flow Data*” y se captura el número de perfiles o gastos a simular, siendo en este caso 100 gastos, una vez indicada la cantidad de gastos se ingresarán los valores en el apartado “*Profile Names and Flow Rates*” como se muestra en la Fig. 43. Finalmente se aplicarán los cambios dando clic en “*Apply Data*”, y se guardara el archivo dando clic en “*File*” y posteriormente en “*Save Flow Data*”.

River	Reach	RS
1 Río Grijalva	Obra de desvío	1000

PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5	PF 6
0	1	1.5	2	2.5	3

Fig. 43. Ingreso de datos de flujo.

Para ingresar las condiciones de frontera es necesario tener una idea del comportamiento que podría tener el flujo ya que en caso de no ingresar las condiciones de frontera correspondientes al tipo de comportamiento que se espera tener, el software proporcionará resultados que no serán congruentes al comportamiento del flujo. Para este caso de estudio, debido a la ausencia de pendiente al inicio del canal, se espera un régimen subcrítico hasta el cadenamiento 0+360,955, a partir de este punto se esperaría un régimen supercrítico ya que en este punto el canal adquiere una pendiente de 0.005239 la cual se mantiene hasta finalizar el canal. En ese mismo cadenamiento, la sección del canal sufre un ensanchamiento progresivo pasando primero de un ancho de plantilla de 25 [m] a 32.7 [m],

posteriormente se vuelve a ensanchar hasta los 40.54 [m] (siendo éste el máximo) y finalmente el canal sufre una reducción gradual hasta regresar al ancho de plantilla de diseño (25 [m]) en el cadenamiento 0+520.55. Debido a esto, aunque este tramo del canal ya cuenta con una pendiente y se esperaba un régimen subcrítico, al sufrir un ensanchamiento en la sección, el análisis indica que el flujo será subcrítico hasta el punto donde la geometría vuelve a adoptar las dimensiones de diseño.

Continuando con el procedimiento y teniendo claro lo explicado anteriormente, se ingresa como condición de frontera aguas arriba la elevación del tirante en el inicio del canal; obtenido del perfil del proyecto. Por otra parte, se consideró la pendiente del canal ($S=0.005239$) como condición de frontera para aguas abajo ya que, al pasar de un régimen subcrítico a un supercrítico, se espera que el flujo tenga el comportamiento de un S2 el cual busca ir del tirante crítico (Tirante conocido) al tirante normal.

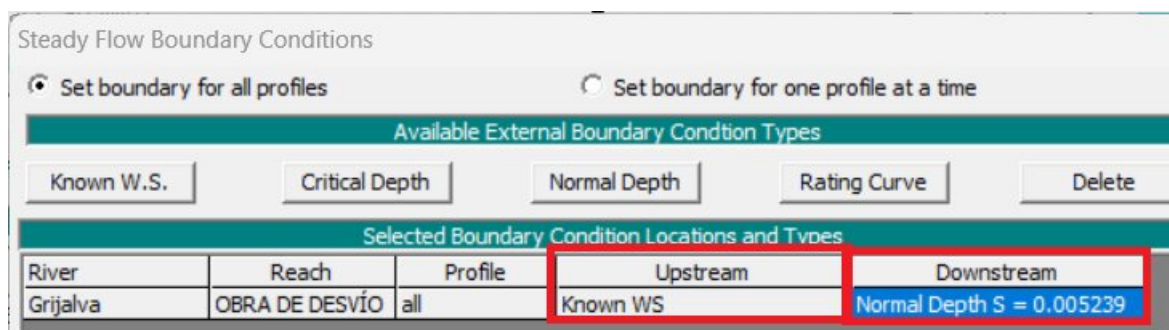


Fig. 44. Definición de las condiciones de frontera.

5.- Generación del plan simulación de flujo.

Finalmente se debe generar un plan de simulación de flujo al cual se le asigna la geometría creada y los datos de flujo que se desean simular. De lo anterior, se tendrá que seleccionar bajo qué tipo de régimen se desea analizar la simulación; para ello se muestran tres opciones:

- ✓ Régimen Subcrítico
- ✓ Régimen Supercrítico
- ✓ Régimen Mixto.
 - Generalmente se utiliza cuando se espera que se presenten tipos de régimen a lo largo del canal o también cuando no se tiene certeza de qué régimen adoptará el flujo.

Para este caso se decidió utilizar el régimen mixto ya que de acuerdo con el análisis preliminar que se realizó considerando únicamente las características del canal, se esperaba que se tuviera un régimen subcrítico al inicio del canal y posteriormente un régimen supercrítico hasta finalizar la longitud del canal. Finalmente, para poder correr la simulación, se tendrá que crear un ID (Identificador) para guardar el plan y posteriormente dar clic en “Compute”. Si los datos ingresados son congruentes y no hay errores en los archivos guardados, el software comenzará a analizar cada una de las secciones utilizando los métodos numéricos mencionados en el apartado “2.3.2.1- Metodología de cálculo de HEC-RAS” hasta converger en una solución.

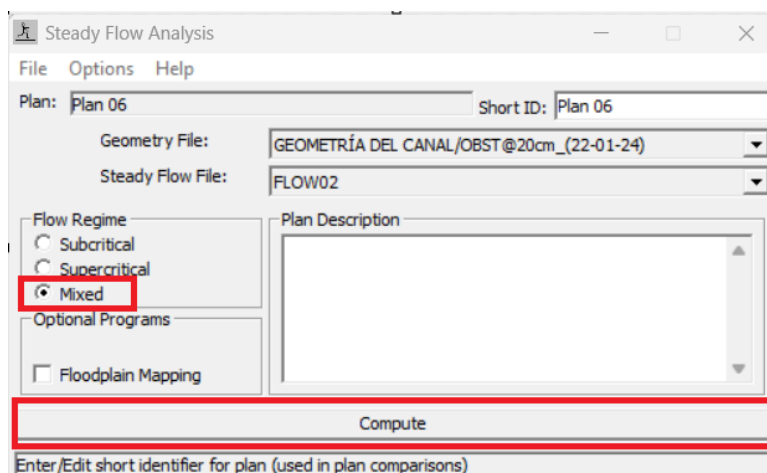


Fig. 45. Generación de un plan de simulación de flujo

6.- Visualización de resultados

Para observar los resultados tenemos la opción gráfica y la opción analítica o escrita; aunque ambas opciones son de gran ayuda primero se recomienda revisar la lista de alertas que surgieron al correr la simulación, para ello, uno debe ir al apartado mostrado en la Fig. 46 y analizar sección por sección cuales son las alertas que arroja el software para la simulación. Estas alertas pueden presentarse dependiendo de cada caso de estudio y la relevancia que tienen hidráulicamente también es variada ya que hay alertas que no necesariamente están referidas a problemas con el flujo o la simulación, sin embargo, se recomienda tomarlas en cuenta para que los métodos numéricos cuenten con más datos y puedan converger de mejor manera generando que los resultados obtenidos sean de mayor confiabilidad. Por otro parte, hay alertas de mayor relevancia que son problemas importantes

en la simulación y por ende en los resultados del comportamiento del flujo, este tipo de errores por lo general suelen ser aquellos donde menciona que la ecuación de la energía no está balanceada, o casos donde el programa asume valores debido a que los métodos numéricos no encontraron solución para el análisis, entre otros. La interpretación de estas señales de alerta no siempre corresponden a que existan problemas o errores ya que hay ocasiones que el flujo o el comportamiento es correcto pero, debido a que se utiliza una simulación numérica unidimensional, el software puede considerar que no lo es por diversas cuestiones, una de ellas puede ser que no hay suficientes secciones transversales, que el número de iteraciones no son suficientes para llegar a un resultado claro, o simplemente que la tolerancia que le damos al software es demasiado pequeña; debido a esto se pueden presentar señales de alerta y para ello es importante que el diseñador pueda discernir entre cuales errores son más relevantes que otros.

En este caso se presentaron alertas por falta de secciones transversales en puntos específicos, esta alerta era de esperarse ya que sólo se obtuvieron 31 secciones para un canal de casi 1 [km] de longitud que cuenta con ensanches y además al final del canal la sección va desapareciendo gradualmente (se va ensanchando) ya que el canal empieza a formar parte del río, por lo tanto, estas alertas eran de esperarse de acuerdo con el análisis inicial.

Para desaparecer la mayor cantidad de alertas, se optó por crear más secciones por medio de una interpolación, esta interpolación se realizó con una herramienta que se encuentra en el apartado de geometría tal cual se muestra en la Fig. 46. La herramienta permite crear interpolaciones entre dos secciones a la distancia que uno requiera, para esta caso decidió interpolar con distintas distancias hasta llegar a secciones interpoladas a cada 20 [cm], con esa distancia se logró eliminar las alertas en los ensanches del canal y de igual forma se logró crear una imagen gráfica más fluida la cual representa de mejor manera el comportamiento del flujo.

Para el tramo final del canal, se interpoló igualmente a diferentes distancias, sin embargo, en este punto se llega a la conclusión que por más secciones que se pongan no desaparecerán las alertas y esto es debido a que al terminar el canal las secciones consideran todo el ancho del río y debido a este cambio tan grande en las geometrías, el software no va a encontrar una “simulación correcta” porque los métodos numéricos no coinciden debido al

cambio brusco del ancho del canal. Este es un claro ejemplo de que el software no resuelve todos los problemas y de que el diseñador debe tener conocimiento y criterio de la herramienta para saber hasta qué punto la modelación hidráulica es correcta o lo más acertada posible de acuerdo con lo que se tenía esperado.

Continuando con la visualización de resultados (numérica), el siguiente paso es revisar los datos de salida de cada sección transversal por perfiles, en este apartado aparecen los resultados de todas las secciones incluyendo las interpoladas, pero se recomienda observar solamente las secciones originales ya que en algunos casos son demasiadas las secciones interpoladas y el manejo de toda esta información se vuelve demasiado complejo. En este apartado podemos encontrar los resultados por perfil (gasto) dividido en varios rubros tal cual se muestra en la Fig. 47. Para la revisión de este caso particular se considerarán únicamente los siguientes rubros.

- ✓ Estación
- ✓ Gasto
- ✓ Elevación mínima del canal (Min Ch El)
- ✓ Elevación de la superficie del agua (W.S Elev)
- ✓ Elevación del tirante crítico (Crit W.S)
- ✓ Velocidad en el canal (Vel Chnl)
- ✓ Número de Froude (Froude # Chl)

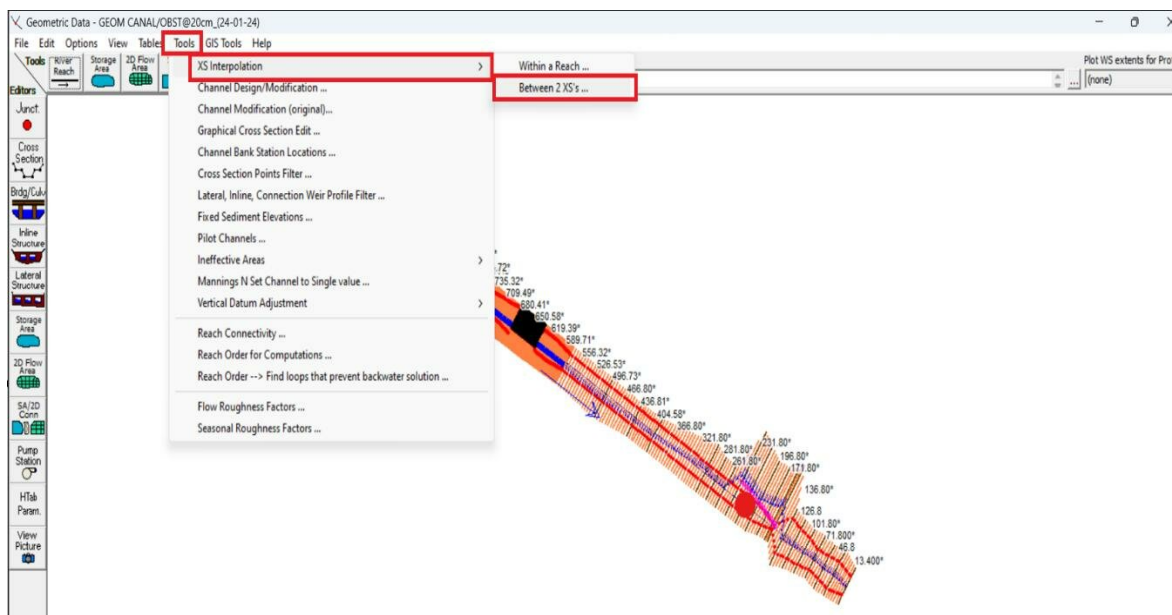


Fig. 46. Interpolación entre secciones

La otra forma de visualización de los resultados es la forma gráfica en la cual tenemos distintas opciones, la primera opción permite revisar cada sección transversal individualmente (Fig. 48), en este apartado hay una herramienta que permite visualizar la distribución de la velocidad en cada sección del canal, esta visualización se hace por medio de una escala de colores; la siguiente opción permite observar el perfil completo del canal (Fig. 49) y la última opción es una visualización en 3D del canal (Fig. 50). En cada una de las opciones anteriores existe la posibilidad de hacer un acercamiento (zoom) para poder visualizar con mayor detalle algún punto en específico y además permite realizar una animación del flujo simulando el comportamiento con cada perfil o gasto. El software también tiene posibilidad de editar algunas propiedades gráficas, entre ellas se encuentran dar a elegir al usuario el color o tipo de relleno para el agua, el grosor y tipo de líneas entre otras propiedades.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan07 River: Grijalva Reach: OBRA DE DESVÍO Profile: PF 100 Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
OBRA DE DESVÍO	1086.8	PF 100	3474.00	185.00	203.31	196.96	205.15	0.000170	6.48	820.81	83.29	0.48
OBRA DE DESVÍO	929.28	PF 100	3474.00	185.00	203.27		205.13	0.000172	6.50	817.80	83.28	0.49
OBRA DE DESVÍO	918.24	PF 100	3474.00	185.00	203.69		204.92	0.000106	5.19	934.47	81.02	0.38
OBRA DE DESVÍO	917.65	PF 100	3474.00	185.00	203.69		204.92	0.000107	5.20	933.28	80.89	0.38
OBRA DE DESVÍO	906.71	PF 100	3474.00	185.00	202.82		204.72	0.000183	6.60	797.97	77.45	0.50
OBRA DE DESVÍO	886.8	PF 100	3474.00	185.00	202.29		204.67	0.000228	7.20	711.48	88.85	0.55
OBRA DE DESVÍO	725.85	PF 100	3474.00	185.00	201.56		204.63	0.000294	7.96	535.71	43.47	0.62
OBRA DE DESVÍO	699.11	PF 100	3474.00	184.79	202.51		204.21	0.000144	5.82	672.91	42.93	0.44
OBRA DE DESVÍO	690.58	PF 100	3474.00	184.75	202.52		204.20	0.000143	5.81	674.69	42.94	0.44
OBRA DE DESVÍO	670.63	PF 100	3474.00	184.64	202.92		204.01	0.000088	4.65	797.16	48.97	0.35
OBRA DE DESVÍO	670.58	PF 100	3474.00	184.64	201.94		204.01	0.000221	7.11	749.97	47.75	0.55
OBRA DE DESVÍO	660.576	PF 100	3474.00	184.59	201.95		204.01	0.000219	7.09	752.60	47.76	0.54
OBRA DE DESVÍO	658.576	PF 100	3474.00	184.58	201.96		204.01	0.000219	7.09	753.13	47.77	0.54
OBRA DE DESVÍO	641.58	PF 100	3474.00	184.49	201.98		204.00	0.000214	7.05	757.86	47.76	0.54
OBRA DE DESVÍO	639.576	PF 100	3474.00	184.48	201.98		204.00	0.000214	7.04	758.26	47.65	0.54
OBRA DE DESVÍO	623.43	PF 100	3474.00	184.39	202.01		204.00	0.000209	6.99	765.09	47.81	0.53
OBRA DE DESVÍO	623.38	PF 100	3474.00	184.39	202.01		204.00	0.000209	6.99	765.09	47.81	0.53
OBRA DE DESVÍO	618.99	PF 100	3474.00	184.37	202.26		203.93	0.000140	5.79	677.42	42.87	0.44
OBRA DE DESVÍO	593.89	PF 100	3474.00	184.24	202.28		203.93	0.000136	5.74	683.37	42.90	0.43
OBRA DE DESVÍO	566.25	PF 100	3474.00	184.09	196.53	196.53	202.59	0.000821	10.99	349.60	31.19	0.99
OBRA DE DESVÍO	486.8	PF 100	3474.00	183.68	194.45	196.08	202.52	0.001323	12.67	298.96	30.41	1.23
OBRA DE DESVÍO	426.81	PF 100	3474.00	183.36	193.59	195.71	202.45	0.001554	13.27	283.87	30.23	1.32
OBRA DE DESVÍO	386.8	PF 100	3474.00	183.15	193.10	195.46	202.40	0.001690	13.58	276.38	30.15	1.38
OBRA DE DESVÍO	286.8	PF 100	3474.00	182.63	192.39	194.87	202.23	0.001833	13.97	268.82	29.90	1.43
OBRA DE DESVÍO	266.8	PF 100	3474.00	182.53	192.20	194.63	202.19	0.001887	14.08	266.37	29.88	1.45
OBRA DE DESVÍO	246.8	PF 100	3474.00	182.42	191.15	194.48	202.15	0.002465	15.03	281.04	51.96	1.62
OBRA DE DESVÍO	226.8	PF 100	3474.00	182.32	192.65	190.04	193.80	0.000349	6.33	968.82	117.38	0.63
OBRA DE DESVÍO	206.8	PF 100	3474.00	182.21	192.58	192.00	193.79	0.000359	6.43	930.33	107.18	0.64
OBRA DE DESVÍO	186.8	PF 100	3474.00	182.11	192.62	190.00	193.79	0.000334	6.26	926.90	95.81	0.62
OBRA DE DESVÍO	166.8	PF 100	3474.00	182.00	191.97	189.05	193.78	0.000668	8.55	924.91	94.93	0.86
OBRA DE DESVÍO	153.19	PF 100	3474.00	182.00	192.42	188.38	193.77	0.000662	8.77	1001.98	104.63	0.87
OBRA DE DESVÍO	146.8	PF 100	3474.00	182.00	192.42	188.76	193.76	0.000826	9.79	978.21	110.06	0.97
OBRA DE DESVÍO	126.8	PF 100	3474.00	180.00	192.48		193.73	0.001843	5.16	738.06	84.03	0.50
OBRA DE DESVÍO	106.8	PF 100	3474.00	179.00	192.18		193.69	0.002141	5.71	678.54	76.12	0.54
OBRA DE DESVÍO	86.8	PF 100	3474.00	180.00	191.51		193.64	0.003367	6.78	569.77	68.83	0.67
OBRA DE DESVÍO	66.8	PF 100	3474.00	179.00	190.16	190.16	193.56	0.005872	8.83	465.89	67.59	0.88
OBRA DE DESVÍO	46.8	PF 100	3474.00	179.00	188.19	189.48	193.38	0.011030	10.53	369.42	62.13	1.16
OBRA DE DESVÍO	26.8	PF 100	3474.00	178.00	185.79	188.13	193.08	0.019817	12.06	298.41	53.19	1.48
OBRA DE DESVÍO	0	PF 100	3474.00	175.00	183.26	186.11	192.48	0.025922	14.19	275.97	50.78	1.68

Froude number for the main channel.

Fig. 47. Tabla de resultados correspondiente al gasto máximo ($Q=3474$ $[m^3/s]$.)

En ambas formas de visualización de resultados es posible filtrar los datos eligiendo el perfil o gasto que quiera analizarse, o en su caso, si se requiere visualizar los resultados de todas las secciones interpoladas, estas opciones son útiles ya que en algunas ocasiones no es necesario observar todos los resultados de las secciones interpoladas, por lo tanto, que el software permita quitarlas, facilita el manejo de la información, la visualización e interpretación de resultados.

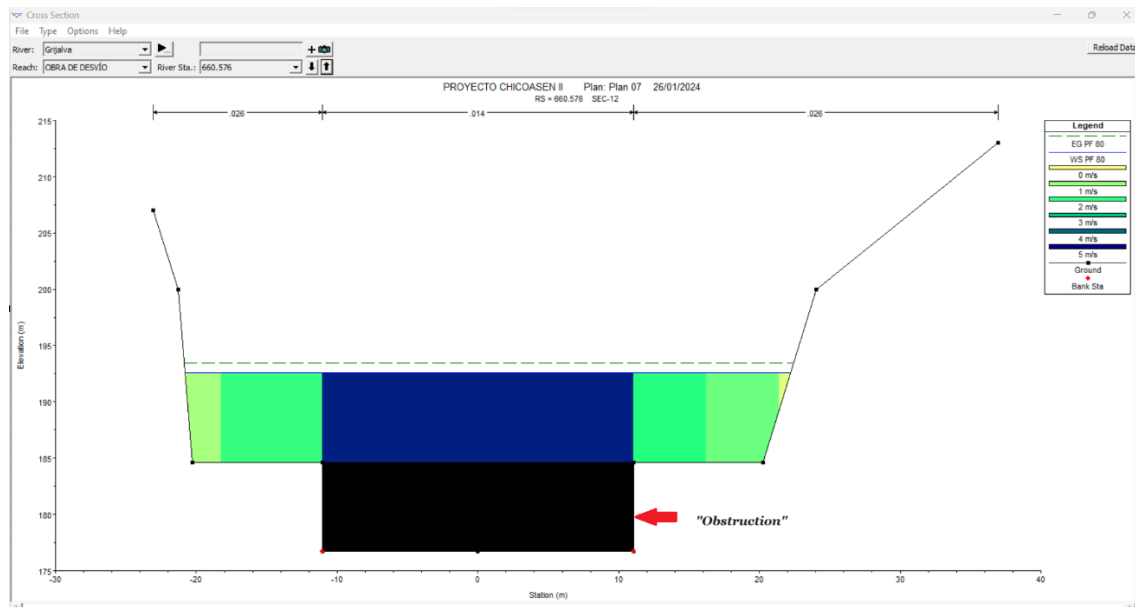


Fig. 48. Visualización gráfica de distribución de velocidad por secciones.

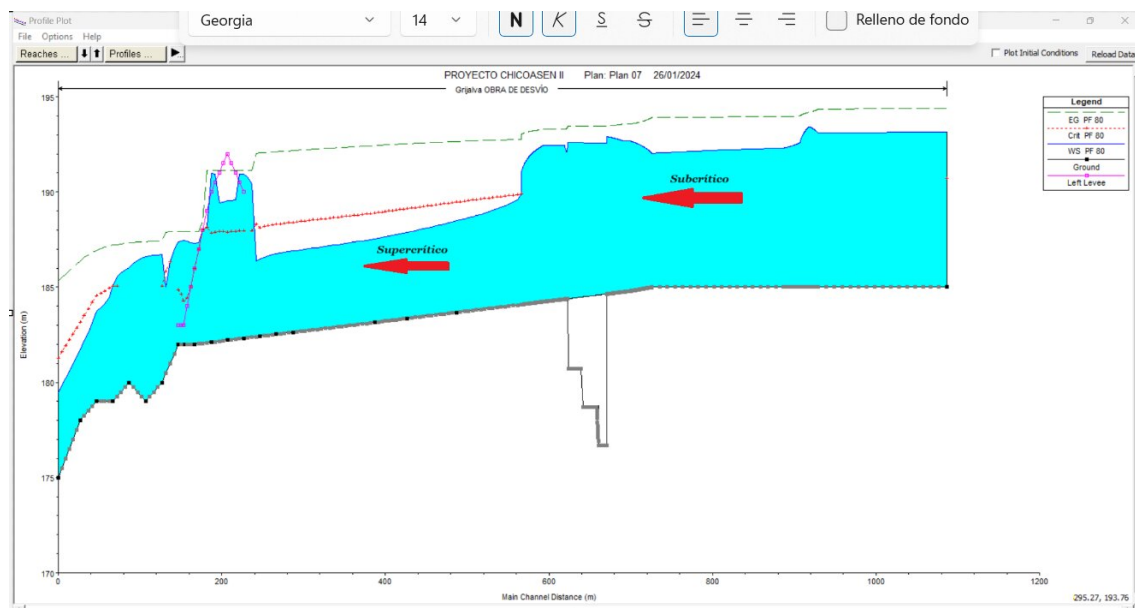


Fig. 49. Visualización gráfica del perfil de flujo

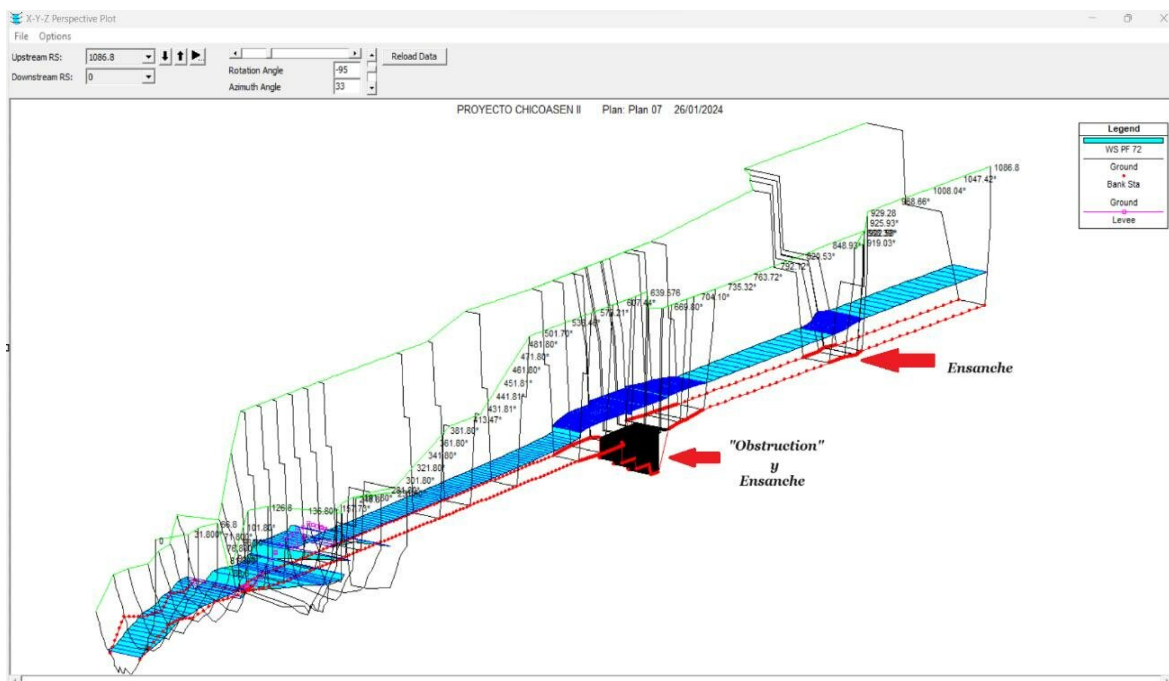


Fig. 50. Visualización del canal en 3D.

3.2.3.- Análisis de resultados.

Como puede observarse a través de los resultados escritos y gráficos obtenidos, el canal adopta en primera instancia un comportamiento subcrítico y posteriormente cambia su régimen a supercrítico cuando la sección ya no sufre ensanchamientos, comprobando que la suposición inicial que se tenía coincide con la simulación. Por otra parte, la simulación registró que la elevación máxima de la superficie del agua (para el gasto máximo) alcanza los 203.31 [m] quedando por debajo de la elevación de la corona de la **ataguía** aguas arriba (205 [m]) siendo esta la elevación oficial del proyecto. Otro punto importante de analizar es la velocidad, para este criterio, la simulación mostró que la velocidad máxima es de 15.03 [m/s] siendo ésta muy cercana a la velocidad máxima de definida de proyecto (14.77 [m/s]). Finalmente se puede verificar que la elevación de la superficie del agua al final del canal alcanza como máximo la elevación 192.42 [m] quedando por debajo de la elevación de la corona de la ataguía aguas abajo (195.00 [m]).

Considerando los parámetros comparados y analizados anteriormente, se puede observar que los resultados obtenidos con esta simulación son cercanos a los resultados del proyecto, con lo anterior se puede concluir que el objetivo de la simulación se cumplió satisfactoriamente.

3.3.- Ejercicio 3 (Utilizando Inventor y CFD)

3.3.1.- Introducción y objetivo.

Para este tercer y último caso de estudio se hará uso de las herramientas de modelación y simulación tridimensional Autodesk Inventor y Autodesk CFD respectivamente. El uso de estas herramientas va dirigido a ingenieros mecánicos o industriales principalmente, sin embargo, con este ejercicio se busca demostrar, a través de la aplicación del programa, los beneficios que ofrecen dichas herramientas al aplicarlas al diseño de obras civiles, particularmente en el área hidráulica.

El objetivo principal de este caso de estudio es aprender las herramientas básicas necesarias para realizar modelos de estructuras hidráulicas y simularlas tridimensionalmente. Particularmente en este caso de estudio se busca realizar el modelo tridimensional en el programa Autodesk Inventor y posteriormente simular el flujo en Autodesk CFD con el fin de analizar con mayor detalle el flujo y el comportamiento de la velocidad en áreas críticas del canal de desvío del P.H Chicoasén II.

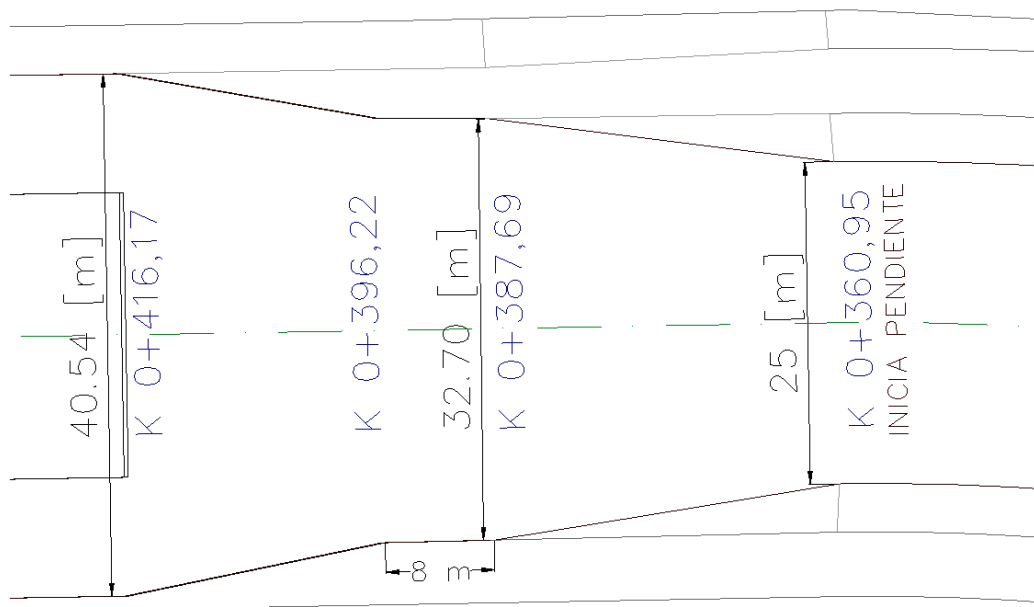


Fig. 51. Ensanches analizados para el ejercicio No.3.

3.3.2.- Desarrollo del ejercicio.

Para este caso se analizarán los ensanchamientos del canal (Fig. 51) iniciando en el cadenamiento 0+360.95 con un ancho de plantilla de 25 [m] el cual va aumentando gradualmente hasta llegar a un ancho de 32.7 [m] en el cadenamiento 0+387.69; este ancho de canal se mantiene por 8.53 [m] hasta el cadenamiento 0+396.22, punto donde comienza el segundo ensanche gradual hasta el cadenamiento 0+416.17 donde el canal toma un ancho de 40.54 [m] continuando con el mismo por 47.15 [m]. Aunque posteriormente, en el cadenamiento 0+463.38, comienzan las reducciones del canal hasta llegar al cadenamiento 0+520.55 donde retoma el ancho general de diseño de 25 [m]; no se realizó el proceso debido a que, cuanto más grande sea el dominio por analizar, requerirá más tiempo para su construcción y simulación. Por otro lado, con el ensanche analizado, es suficiente para observar el comportamiento del flujo y de la velocidad en áreas críticas.

Construcción del dominio en Autodesk Inventor.

Para el análisis de este caso de estudio es necesario tomar en cuenta diferentes parámetros ya que se hace uso de dos softwares los cuales, pese a trabajar ambos en 3D, las prioridades para elaborar el dominio en Inventor son distintas a las prioridades para simularlo en CFD; esta diferencia recae principalmente en la forma en que trabajan en conjunto ambos programas, ya que, el dominio o diseño que se elabore en Inventor debe ser lo más sencillo y unificado posible, es decir, para elaborar el dominio en inventar una prioridad es que el modelo tenga el menor número de piezas ensambladas posibles, buscando que de preferencia el dominio esté conformado por una sola pieza; se busca esta cualidad ya que entre más uniones se tengan pueden presentarse un mayor número de errores al simular el comportamiento del fluido en CFD. Por consiguiente, antes de comenzar a realizar el modelo en Inventor, se debe conceptualizar e idealizar una forma en la cual se pueda realizar el modelo en el menor número de piezas posibles.

Con base en lo anterior, importante mencionar y aclarar algunos aspectos. En primera instancia, se debe tener en claro que no se debe dibujar la forma o contorno del canal sino el contorno del fluido como se muestra en la Fig. 53, es decir, el espacio o volumen que se genera debido a la superficie de las paredes del canal, ya que lo que se busca es crear el dominio para simular el fluido no la estructura del canal en sí mismo.

Por otra parte, cuando se trabaje con diseños con una geometría compleja, se recomienda realizar “pares de planos” para que la solevación no presente errores al generar el sólido. Para ello, se entiende como “pares de planos” a la creación de planos adyacentes en cada sección transversal con la finalidad de dividir (a criterio del diseñador) en un número determinado de geometrías la sección del canal.

Es decir, si se toma como ejemplo un canal rectangular con una berma que mantenga su sección constante, tendrían que crearse dos pares de planos, el primer “par de planos” aguas arriba y el segundo “par de planos” aguas abajo; una vez dibujados, en el plano no.1 (aguas arriba) podría dibujarse la sección del fluido de la primer berma hasta la plantilla del canal y el contorno superior del fluido en el plano no.4 (aguas abajo) tal cual se muestra en la Fig. 52. Posteriormente, se repetiría el procedimiento, de tal forma que la sección dibujada del plano no.3 sea la misma del plano no.1 (contorno inferior del fluido) y que la sección dibujada del plano no.4, corresponda a la del plano no.2 (contorno superior del fluido), de esta forma, al realizar la solevación, se realizará del plano no.1 al plano no.3 y del plano no.2 al plano no.4 para que correspondan las secciones y de esta forma se pueda crear el sólido correctamente.

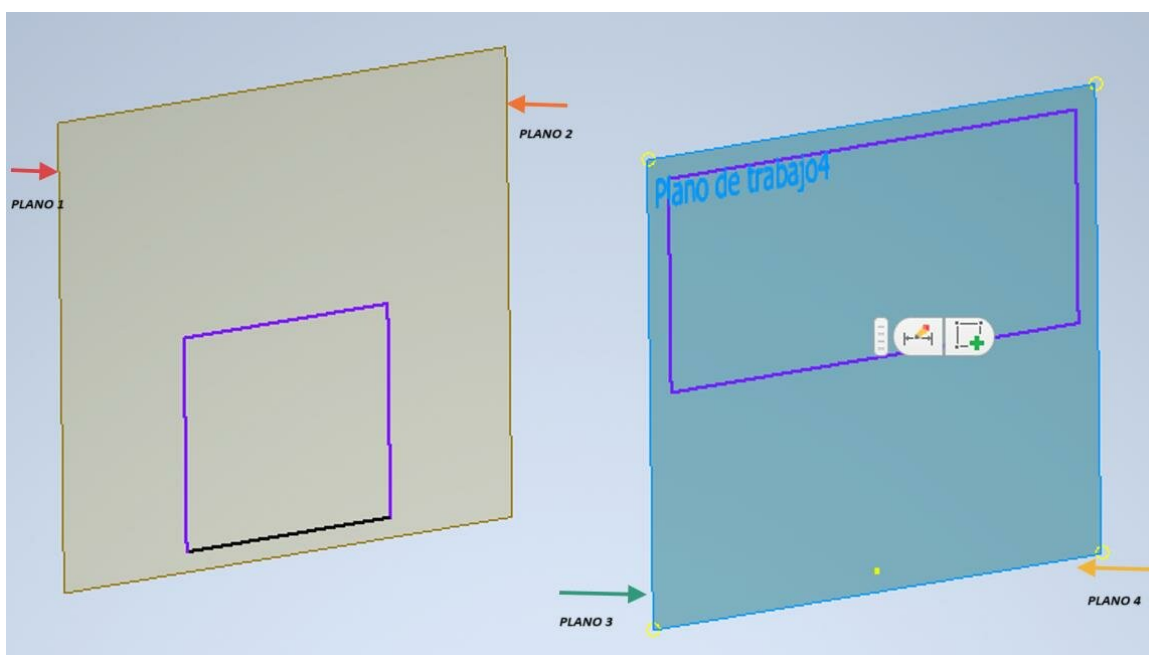


Fig. 52. Trazo del dominio de ejemplo.

Con base en lo anterior, para este caso de estudio, debido a la geometría del canal y a los ensanchamientos que se analizaron, se decidió dividir el tramo en 3 segmentos quedando de la siguiente forma.

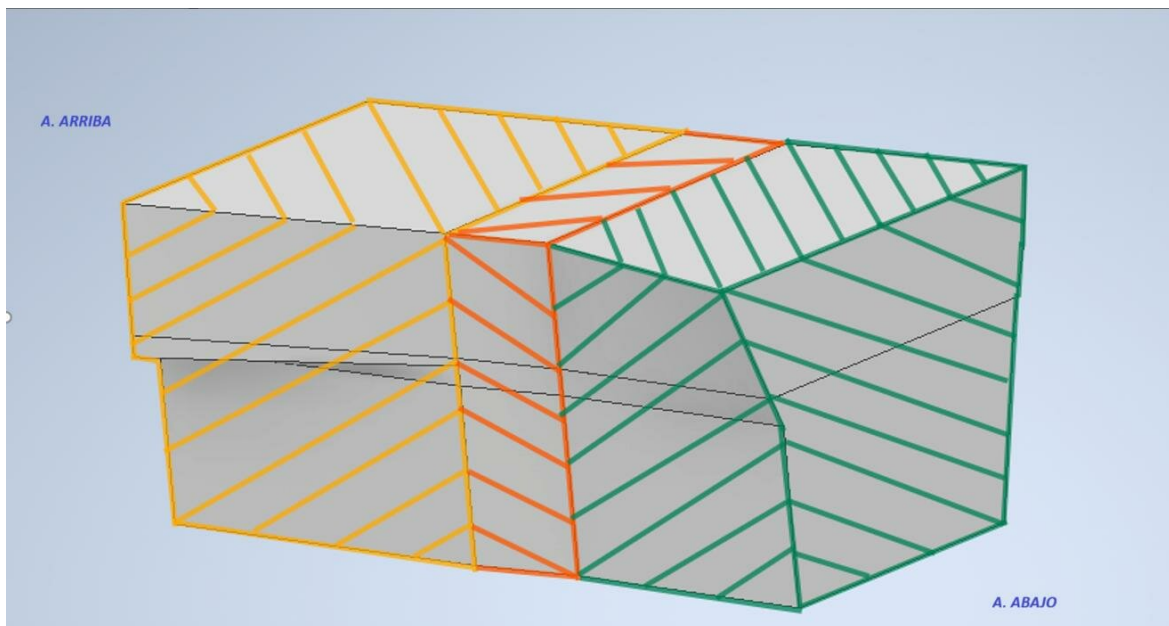


Fig. 53. Dominio del tramo del canal por secciones realizado en Inventor.

Para realizar el modelo, se deben seguir los siguientes pasos:

- I. Abrir Inventor y crear un archivo nuevo, posteriormente se selecciona el tipo de archivo denominado por el mismo programa como “pieza” con extensión “Standard.ipt”. (Fig. 54)
- II. Creado el archivo, se selecciona la pestaña “Herramientas” de la barra de navegación superior y posteriormente se selecciona la pestaña “Parámetros del documento”.
 - a. En este apartado se pueden modificar las unidades del proyecto, entre las cuales se encuentran longitud, tiempo, ángulo y masa. Para este caso se modificó la unidad de longitud de milímetros a metros. (Fig. 55)

Una vez que han sido modificadas las unidades del proyecto, se deben crear planos sobre los cuales se dibujará el contorno del fluido en cada sección transversal del canal modelado. Es decir, si el tramo en estudio fuese de una sección constante, solamente se tendrían que crear dos planos, uno aguas arriba y otro aguas abajo, en los cuales se dibuje la misma sección para posteriormente utilizar la herramienta “Solevación” y con ello generar el sólido que representará el fluido en estudio.

- III. Con base en las aclaraciones anteriores, para este caso, se crearon 12 planos (Fig. 56) en los cuales se fueron plasmando los contornos del fluido para las 4 secciones transversales del canal que se consideraron. Sin embargo, la cantidad de planos creados se derivó de la complejidad del diseño del canal y el cambio de secciones debido a los ensanchamientos de este.
- a. El primer par de planos se ubica aguas arriba y corresponde al inicio del primer ensanche del canal, el cual se encuentra en el cadenamiento 0+360.95. Así mismo, en ese punto inicia la pendiente del canal ($S=0.005239$). Para este punto y debido a la complejidad del canal, se decidió realizar el procedimiento antes mencionado, dibujando en el plano no.1 el contorno de la primer berma hacia la plantilla y en el plano no.2 la parte superior restante.
 - b. Posteriormente, a 26.74 [m], se creó el siguiente par de planos correspondiente al cadenamiento 0+387.69. En este punto comienza una sección constante de 8.53 metros.
 - c. De acuerdo al punto anterior, en el cadenamiento 0+396.22 se creó el siguiente par de planos, siendo éste el punto donde finaliza el tramo constante e inicia el segundo ensanchamiento del canal.

- d. Finalmente, a 19.95 [m], correspondiente al cadenamiento 0+416.17, se creó el último par de planos y se dibujó la parte inferior en el plano no.11 y la superior en el plano no.12 de la misma forma en que se realizó en los cadenamientos anteriores, quedando las secciones inferiores en los planos con número impar (1, 3, 5, 7, 9, 11) y las secciones superiores en los planos con número par (2, 4, 6, 8, 10, 12).

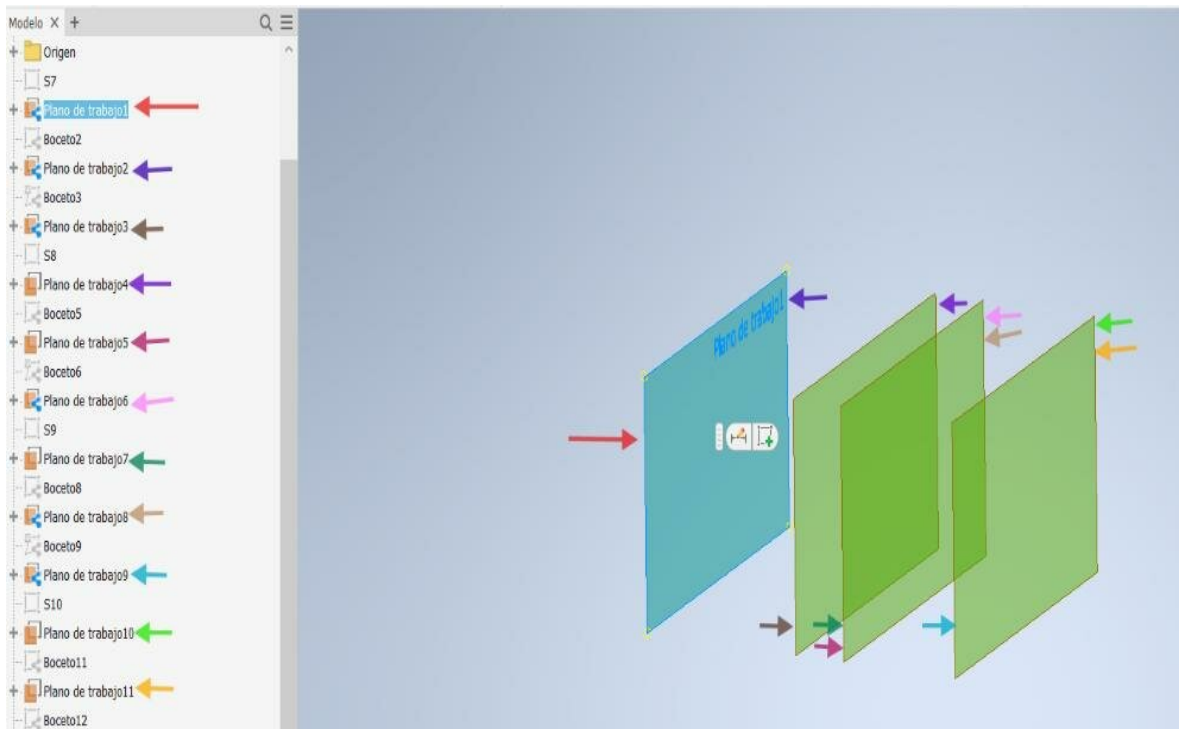


Fig. 56. Pares de planos del caso de estudio.

- IV. Creados los planos, se dibujaron las secciones transversales necesarias en cada “par de planos”. Primero se dibujó la parte inferior comenzando en el plano no.1 y terminando en el plano no.11 (Fig. 57). De la misma forma, se realizó el mismo procedimiento para la parte superior, quedando como se muestra en la (Fig. 58).

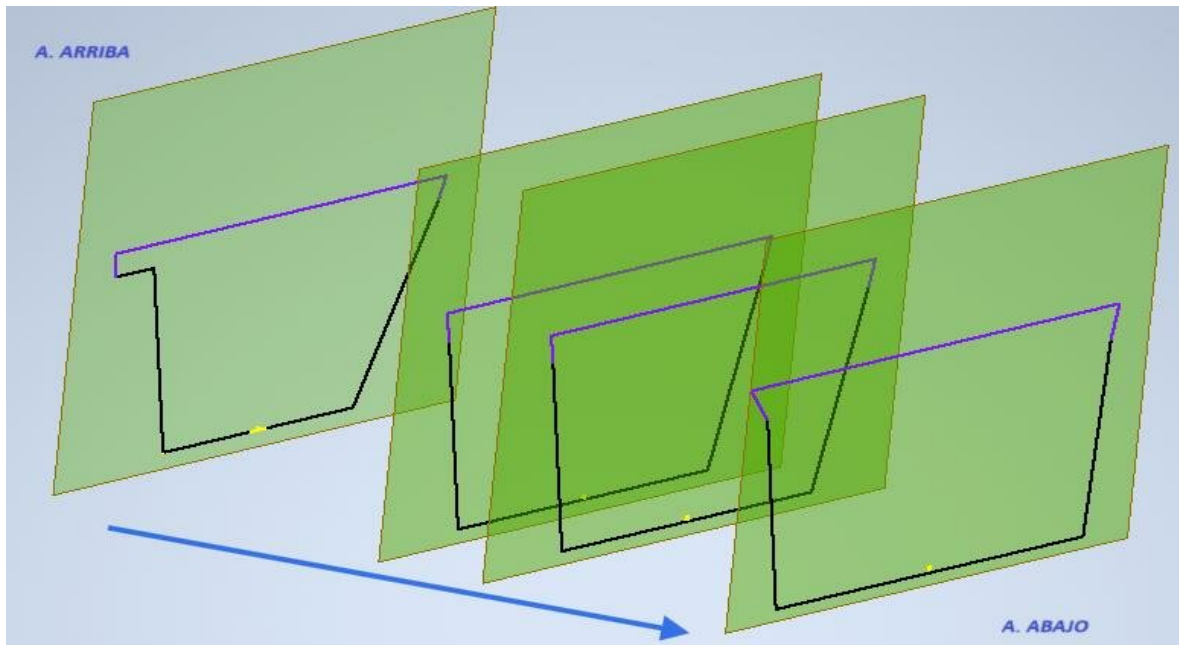


Fig. 57. Trazo inferior del dominio.

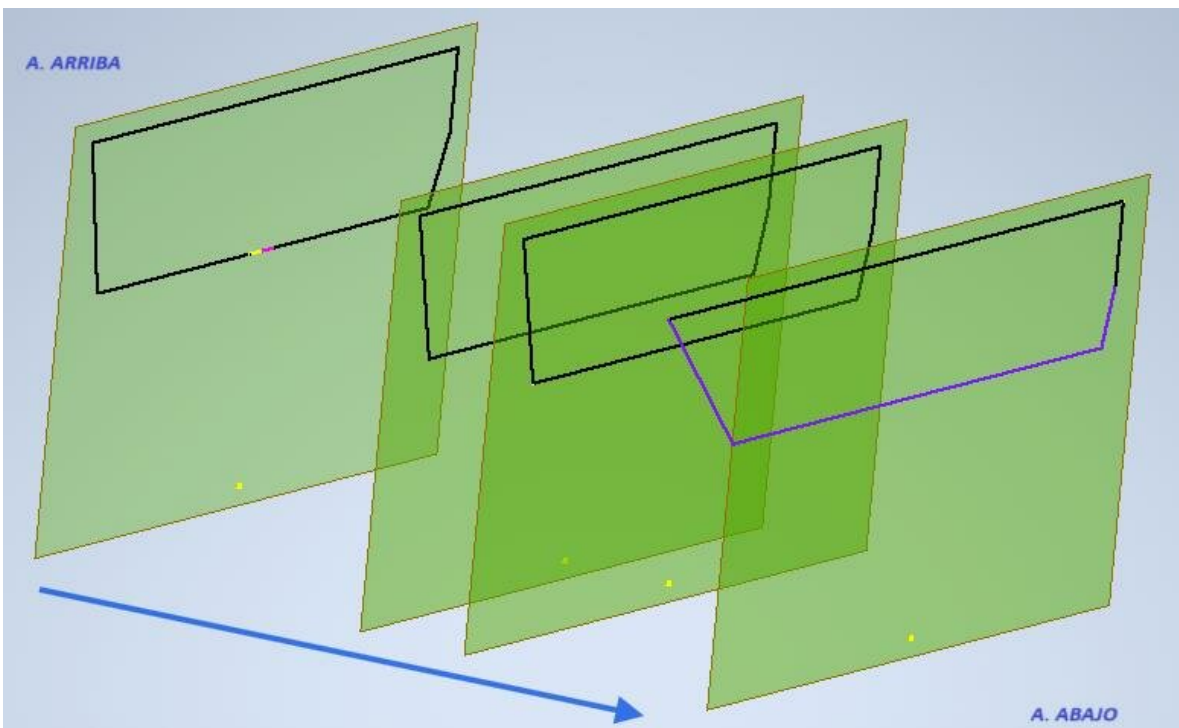


Fig. 58. Trazo superior del dominio

V. Una vez que se dibujaron las secciones correspondientes, se realiza una “solevación” para crear el sólido.

La herramienta “solevación”, se utiliza para generar el sólido entre dos o más secciones dibujadas. Para acceder a la herramienta, se debe ubicar la palabra “Solevación” en el apartado “Modelo 3d” de la cinta de opciones que se encuentra en la parte superior de la interfaz principal. (Fig. 59).

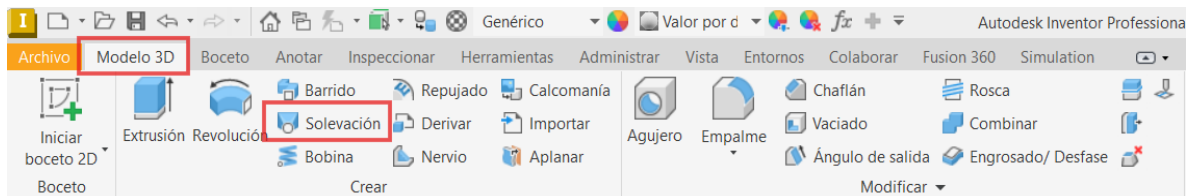


Fig. 59. Herramienta solevación.

Al seleccionar la herramienta “solevación” nos pedirá las secciones que queremos unir para generar un sólido (Fig. 60); es importante tomar en cuenta que, para generar el sólido, se debe crear tomando en cuenta que el sentido de las secciones debe ser de aguas arriba hacia aguas abajo.

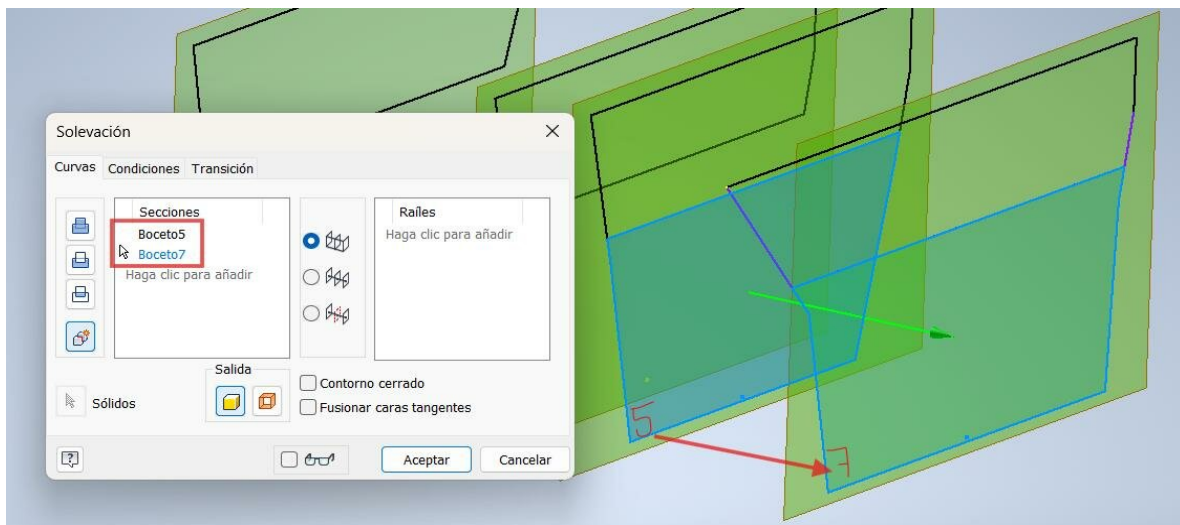


Fig. 60. Solevación entre secciones.

Una vez seleccionadas las secciones, se da clic en aceptar y se creará el sólido; para este caso, se creó primero el sólido de la parte superior (Fig. 61) y posteriormente la parte inferior hasta llegar a la construcción total del dominio como se muestra en la Fig. 62, Fig. 63, Fig. 64 y Fig. 65. Con esto queda concluido el proceso en Autodesk Inventor.

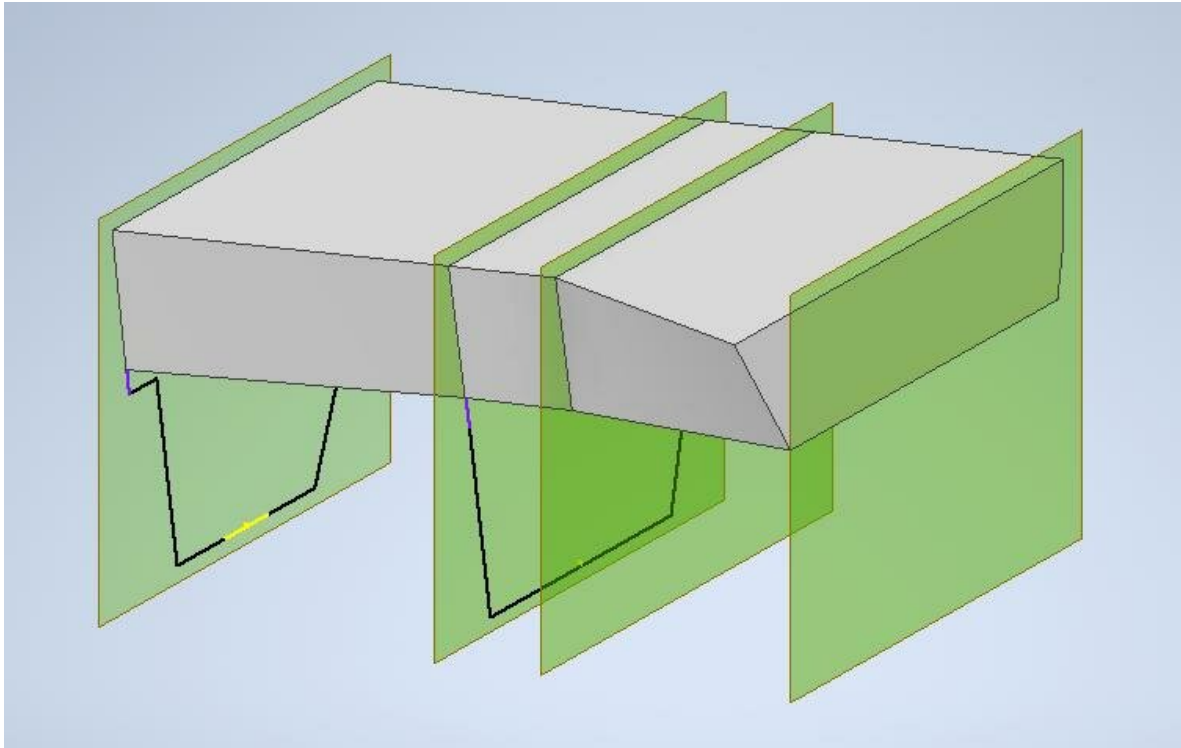


Fig. 61. Trazo de la sección superior del fluido en los planos.

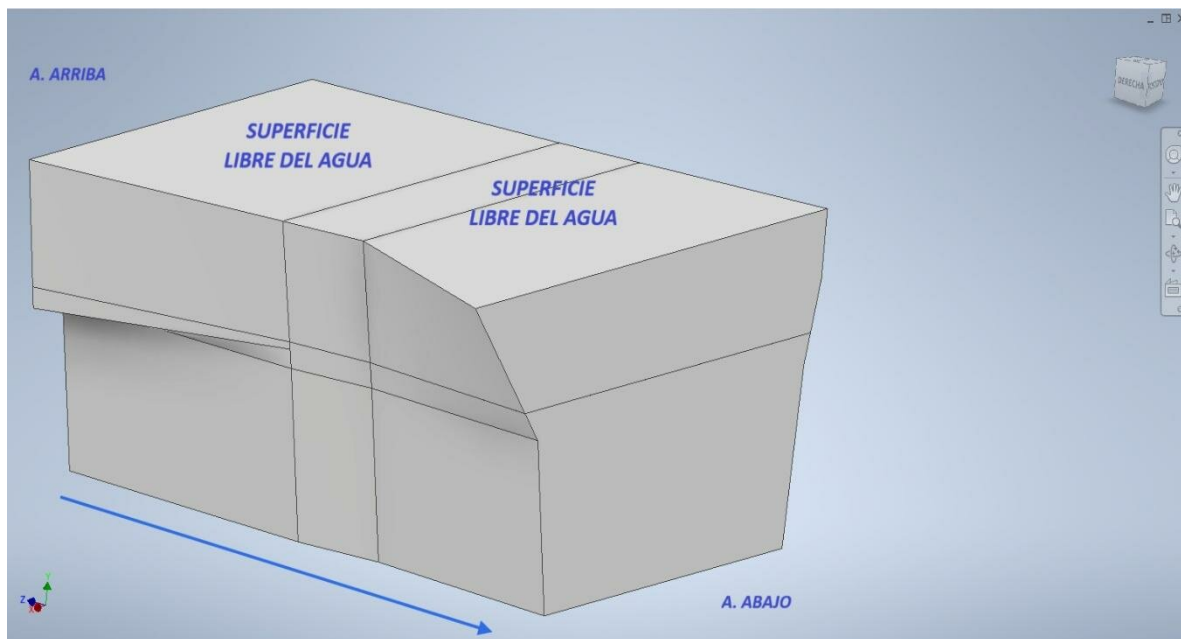


Fig. 62. Dominio final obtenido de Inventor.

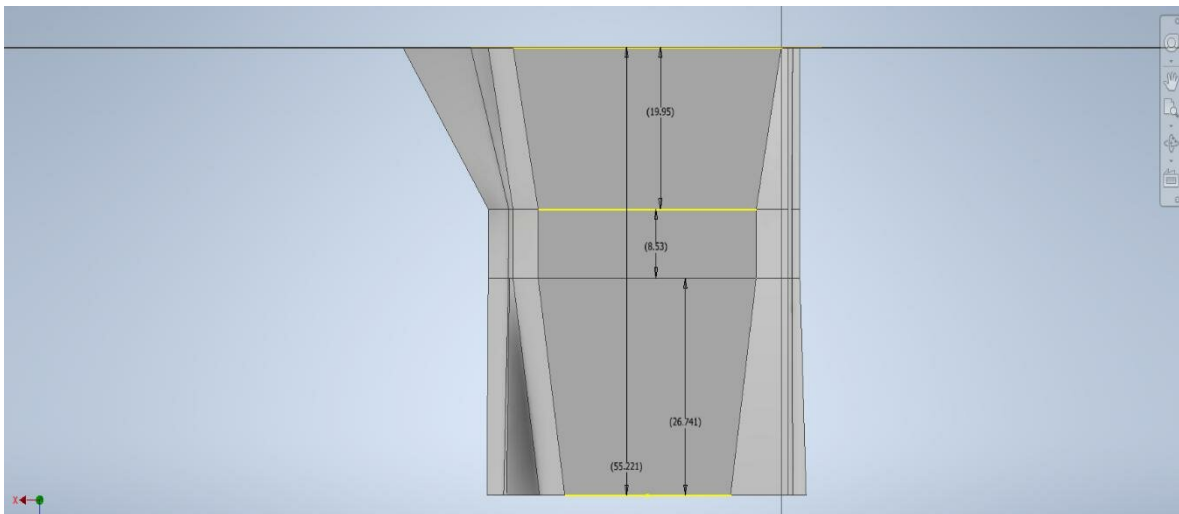


Fig. 63. Vista inferior del dominio.

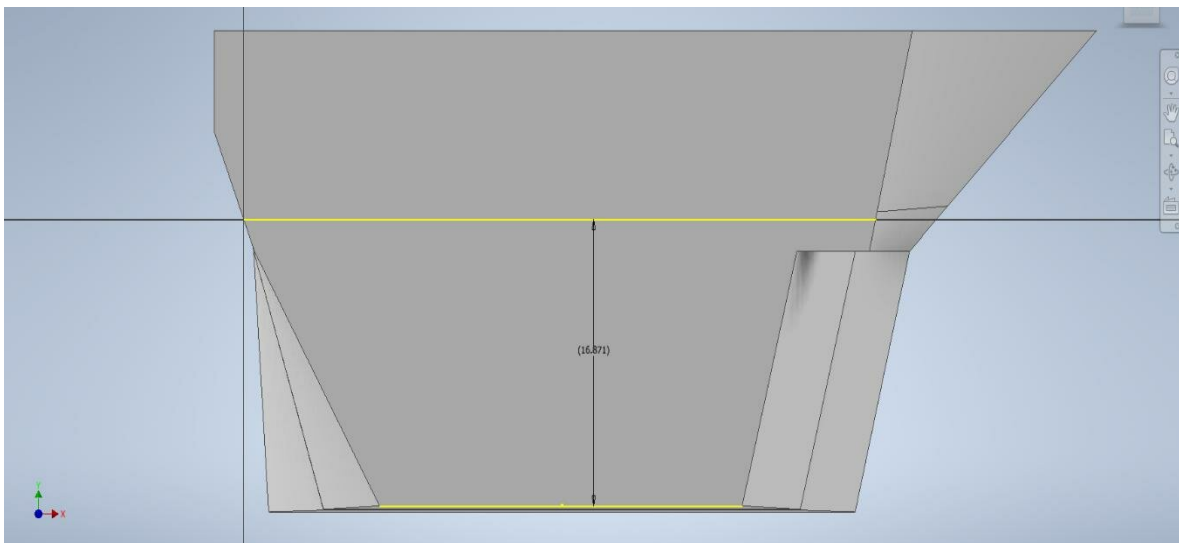


Fig. 64. Vista aguas arriba – aguas abajo.

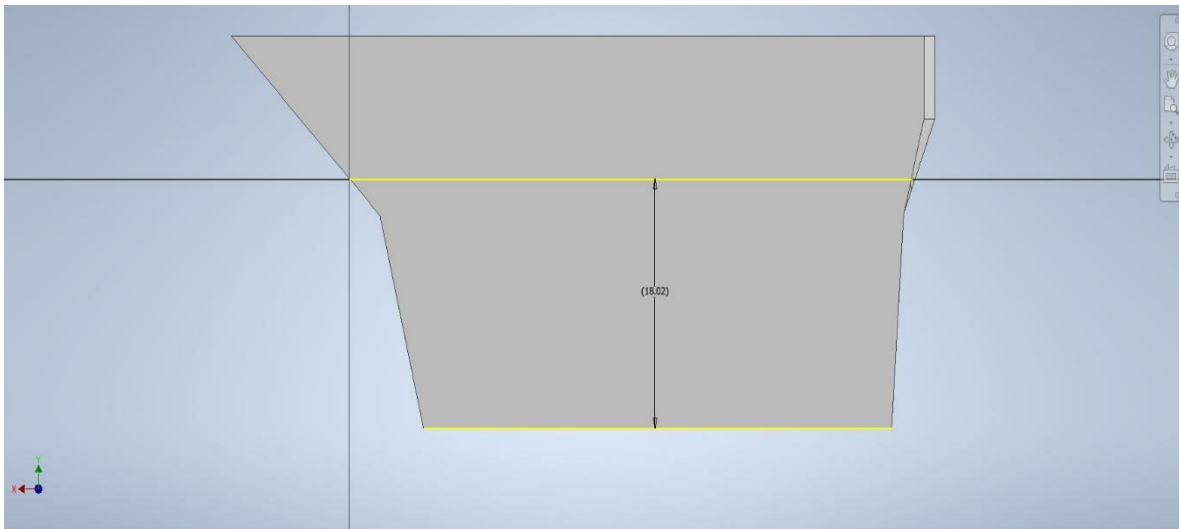


Fig. 65. Vista aguas abajo – aguas arriba.

Simulación del fluido en Autodesk CFD.

Una vez creado el dominio en Autodesk Inventor, se tendrán que seguir 5 pasos para poder obtener los resultados deseados de la simulación del fluido; a continuación, se explicarán los mismos, así como las consideraciones necesarias para realizar la modelación tridimensional del fluido en el canal a superficie libre.

- I. Como primer paso, se necesita cargar el archivo del dominio realizado en Autodesk Inventor como se muestra en la Fig. 66, posteriormente se debe asignar el fluido con el que se va a trabajar, por lo tanto, una vez que se haya cargado el dominio, se tiene que verificar que se encuentre seleccionada la pestaña “Materials” en la barra “Setup” que se muestra en la Fig. 15, posteriormente se seleccionará cada “bloque” del dominio y se hará clic sobre el símbolo “edit” para desplegar el recuadro de edición. En dicho recuadro, se modificarán los apartados “Type” (tipo) y “Name” (nombre), en estos apartados se tiene que seleccionar “Fluid” (fluido) y “Water” (agua) respectivamente, ya que estos son los parámetros que queremos analizar para el caso de estudio (Fig. 67). Para verificar que se han asignado las propiedades al dominio, los “bloques” de todo el dominio cambiarán de color, el cual se muestra mediante una simbología en la parte inferior izquierda (Fig. 68); de igual forma, en la parte izquierda, en la “Barra de estudio de diseño” (Fig. 69), se actualizarán las propiedades que se asignen al dominio, por lo cual se podrá verificar que el material que aparezca en esta sección coincida con el seleccionado.

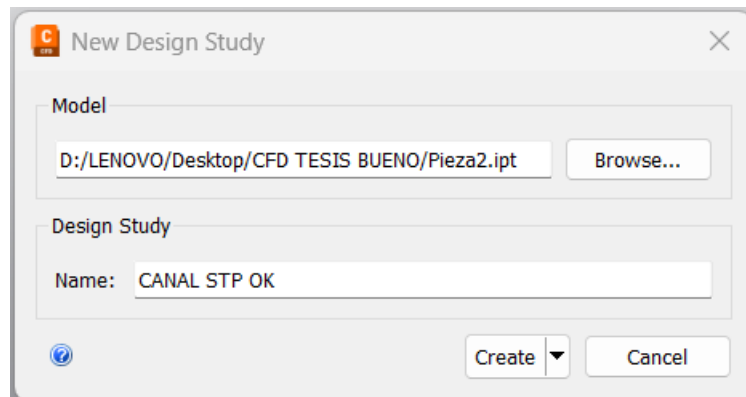


Fig. 66. Creación del modelo en CFD.

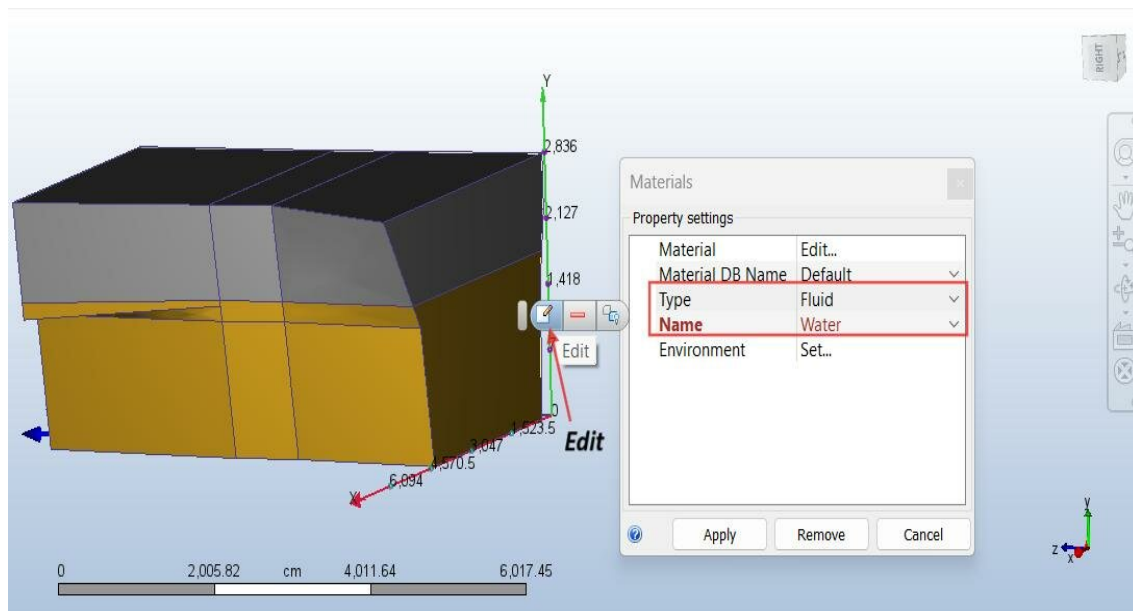


Fig. 67. Asignación del tipo de material al dominio.

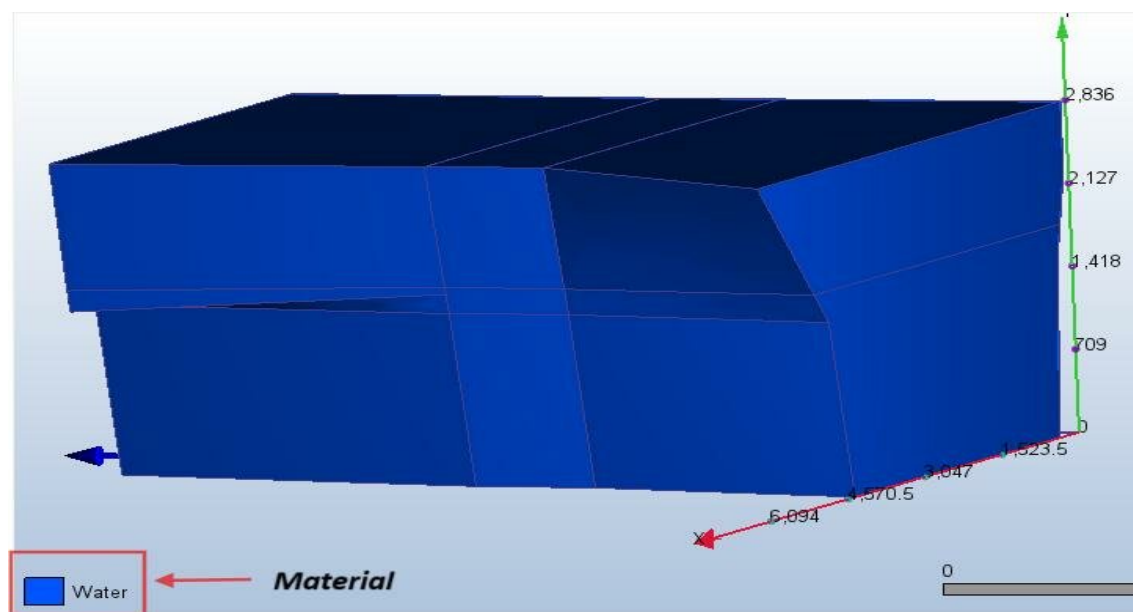


Fig. 68. Dominio con el material asignado.

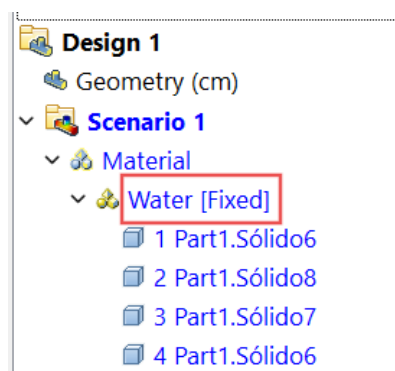


Fig. 69. Barra de estudio de diseño

Para el paso No.2, se deberán asignar las condiciones de frontera. Para ello, es necesario retomar el 3.2.- Ejercicio 2 (Chicoasén II utilizando Hec-Ras)., particularmente la Fig. 32 y la Fig. 47 Tabla de resultados correspondiente al gasto máximo ($Q=3474 \text{ [m}^3/\text{s]}$); la primer figura muestra la relación entre los cadenamientos y la “River Station” utilizada en Hec-Ras, por otra parte la segunda figura, contiene la tabla que refleja los resultados de las velocidades en cada sección del canal correspondientes al gasto máximo de diseño, obtenidos del modelo creado en Hec-Ras. Por lo tanto, con base en la tabla de la Fig. 47, las velocidades correspondientes a los cadenamientos de la sección aguas arriba (0+360.95) y la sección aguas abajo (0+416.17), se encuentran encerradas en un recuadro color rojo y éstas serán las condiciones de frontera que se establecerán para el caso de estudio. Por otra parte, es importante dejar en claro que, debido a que se está trabajando con un canal a superficie libre, el fluido se encuentra sometido a la presión atmosférica y por lo tanto el agua fluye por efecto de la gravedad y la pendiente de diseño. Con base en lo anterior, se continuará con el procedimiento.

II. Una vez asignado el fluido al dominio, el paso siguiente es establecer las condiciones de frontera, siendo para este caso las velocidades en la entrada (aguas arriba), la salida (aguas abajo) y la presión en la superficie libre del fluido del tramo de canal analizado. Como se mencionó anteriormente, las velocidades aguas arriba y aguas abajo, se encuentran encerradas en un recuadro rojo en la Fig. 47, siendo 7.96 [m/s] a la entrada y 7.11 [m/s] a la salida. En cuanto a la presión, se considerará una presión de 0 atm, aplicada a las superficies que no correspondan al agua (parte superior) y que, para este caso, representan el aire.

Para asignar estos parámetros, se debe seleccionar la pestaña “Boundary conditions” localizada en la “Barra de tareas” (Fig. 15), se selecciona la superficie de la sección aguas arriba y se da “clic” sobre el símbolo “edit” para desplegar el recuadro de edición; en dicho recuadro, se modificarán los apartados “Type” (tipo), “Unit” (unidad), “Direction” (Dirección) y “Velocity Magnitud” (Magnitud de la velocidad), tal cual se muestra en la Fig. 70. Es importante mencionar que en el apartado “direction”, aparecerá un vector que indicará gráficamente la dirección del flujo a analizar, para ello, se deberá

tener definido el sentido del flujo para verificar que la dirección sea la correcta. Una vez modificados los parámetros aguas arriba, se realizará el mismo procedimiento para la condición de frontera aguas abajo (Fig. 71).

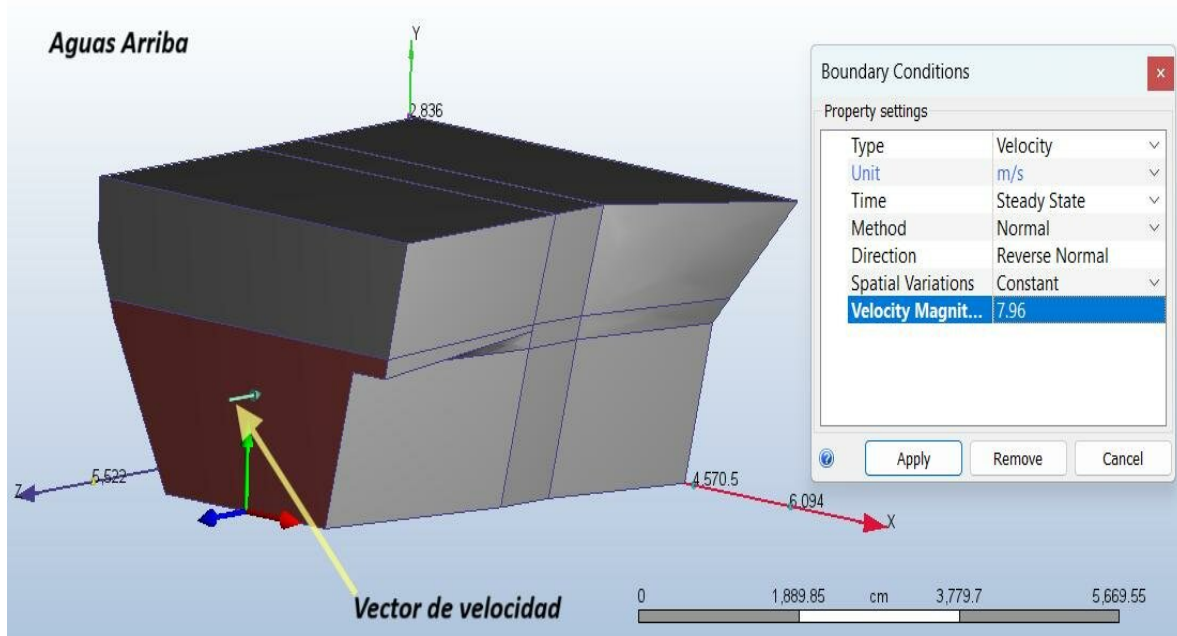


Fig. 70. Condición de frontera aguas arriba.

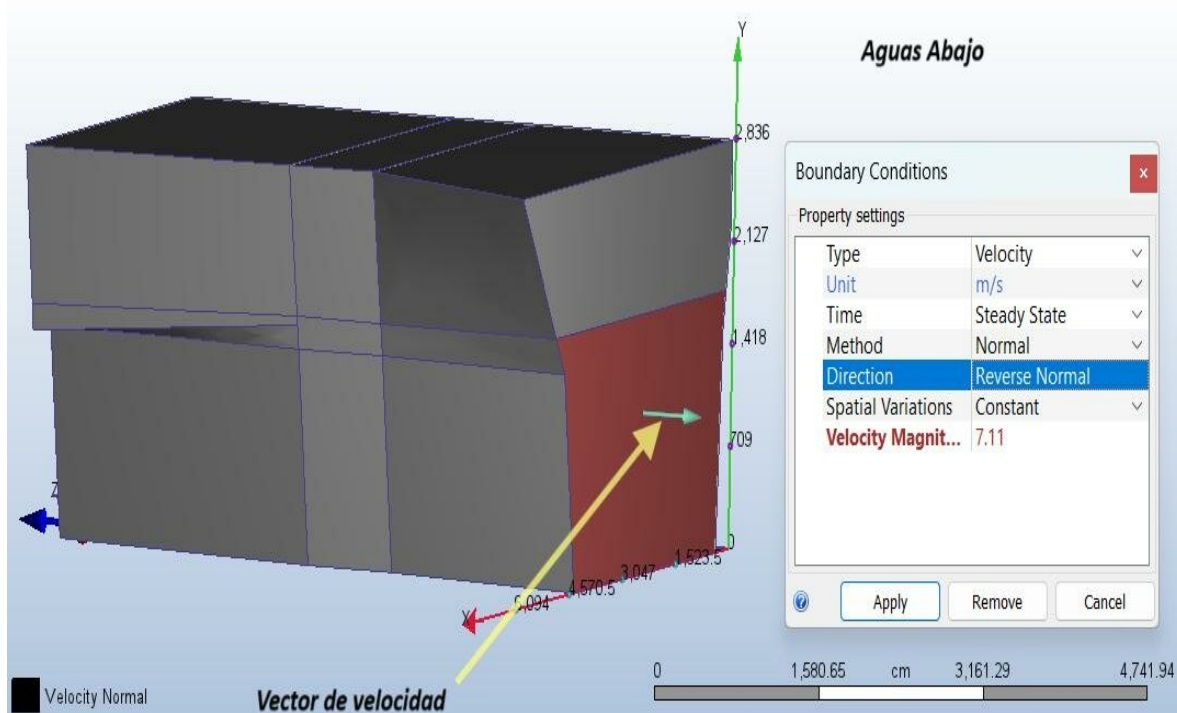


Fig. 71. Condición de frontera aguas abajo.

Ya que se asignó la velocidad aguas arriba y aguas abajo, se debe asignar la presión a las superficies que corresponden al “aire”, es decir el área donde se considera que el fluido de estudio (agua) no llegará. Para ello, se sigue el mismo procedimiento, se seleccionan las superficies correspondientes, se da “clic” en editar y se editan los campos “Type” (Tipo) donde se selecciona “Pressure” (Presión) y posteriormente en el campo “Pressure” se colocará el valor de 0 (cero), como se muestra en la Fig. 72.

Para verificar que se han asignado todas las condiciones de frontera al dominio, las superficies del dominio que fueron modificadas, presentarán una franja de un color determinado, cuya simbología, aparecerá en la parte inferior izquierda (Fig. 74); de igual forma, en la parte izquierda de la pantalla, en la “Barra de estudio de diseño” (Fig. 18), se actualizarán las propiedades que se asignen al dominio, por lo cual se podrá verificar que las velocidades y la presión (Pressure) que aparezcan en esta sección coincida con los datos ingresados. Para este caso, y en cualquier canal a superficie libre, se tendrá que tener asignada una presión de 0 [atm] en la superficie libre del agua.

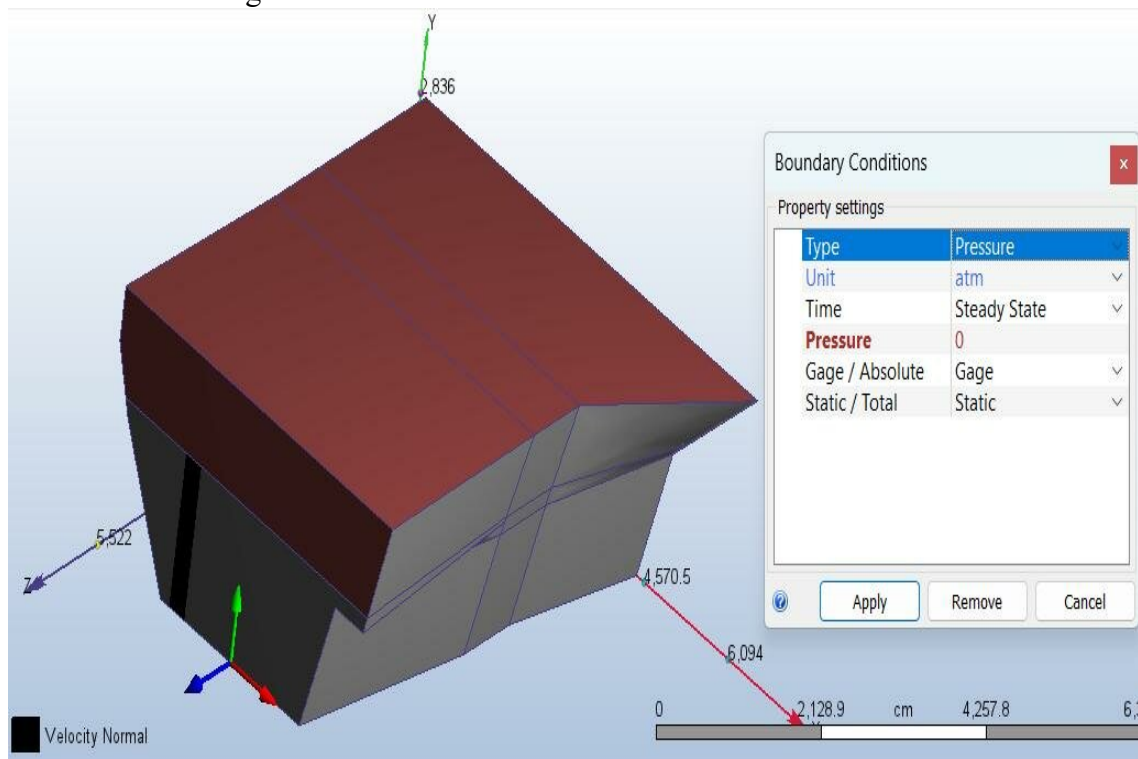


Fig. 72. Condición de frontera de presión (Aguas arriba).

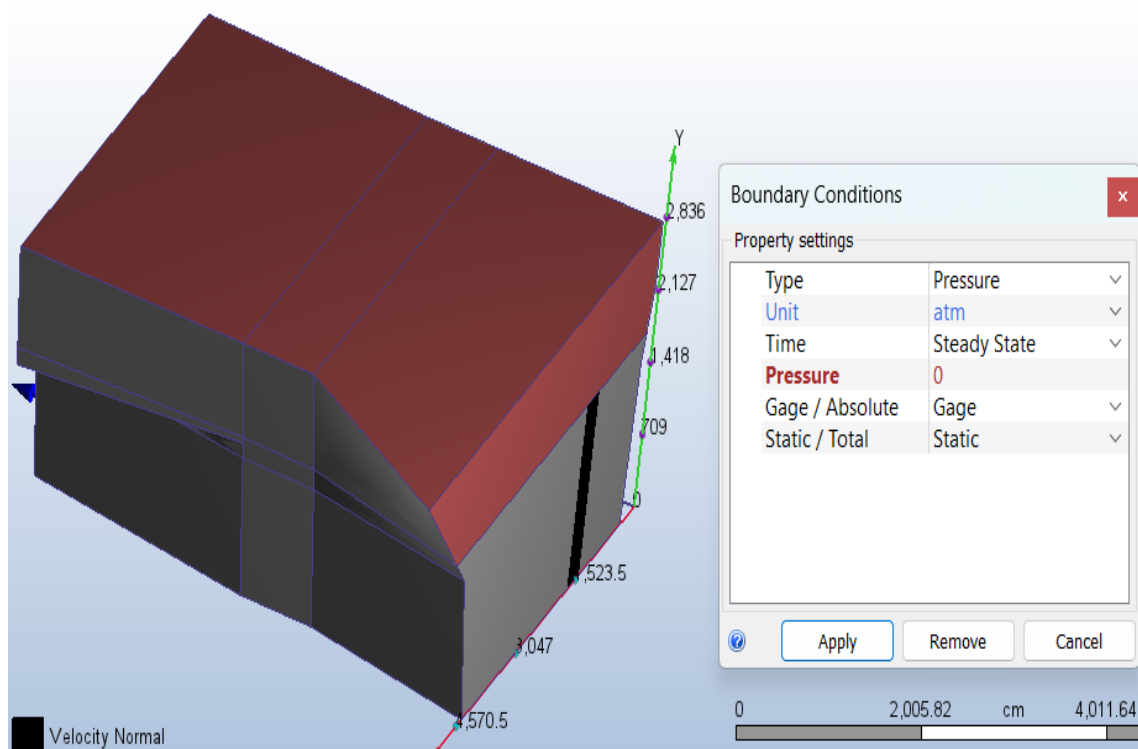


Fig. 73. Condición de frontera de presión (Aguas abajo).

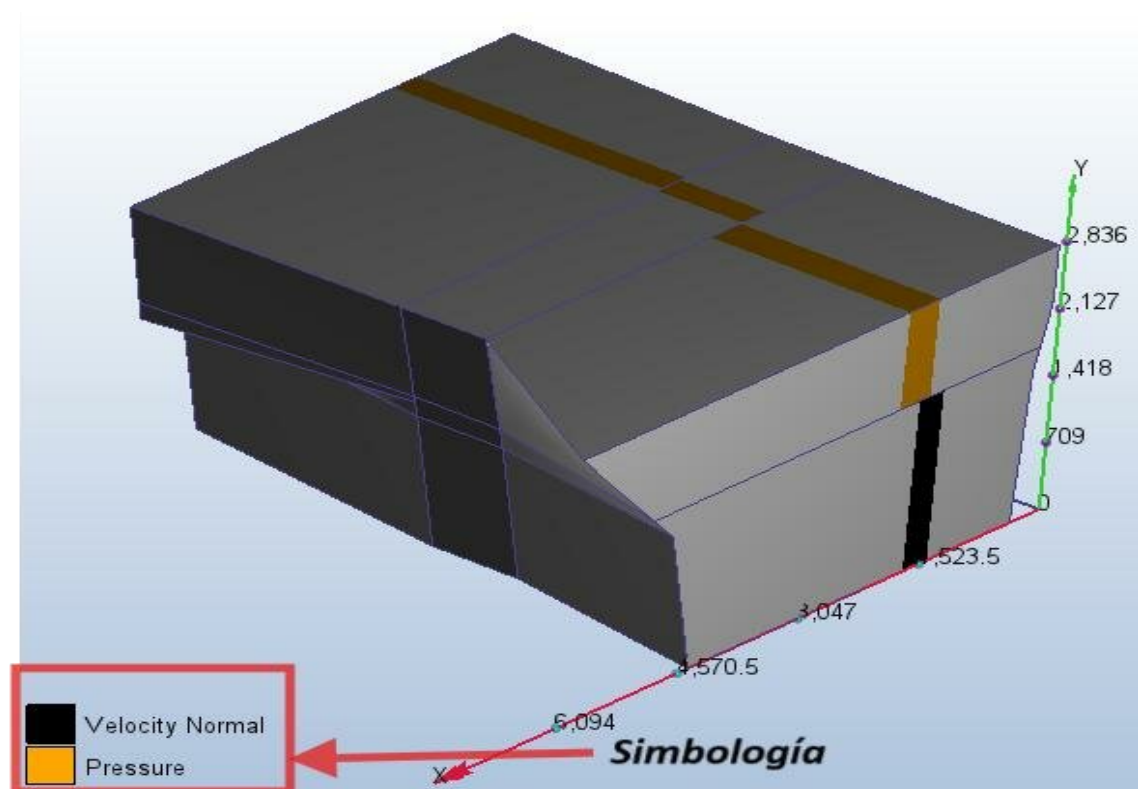


Fig. 74. Simbología de condiciones de frontera.

Posteriormente, en el paso No. 3, se debe establecer el “mallado” adecuado para el dominio. La malla es la representación discretizada del modelo de estudio, está formada por un conjunto de nodos y aristas que unidos forman superficies, los cuales se van colocando sobre nuestro dominio hasta rodearlo por completo; estas superficies podrán ser triángulos, cuadriláteros o una mezcla de ambos, a la unión de todas estas superficies resultante se la denomina malla de superficie. Las propiedades físicas del fluido serán calculadas en cada nodo de la malla, y se interpolará el valor de estas en las aristas que unan a dos nodos. Podemos afirmar entonces que cuanto mayor sea el número de nodos de nuestra malla, y por tanto de elementos, más se aproximará nuestro resultado a la realidad. No obstante, se han de establecer límites, pues si el número de elementos aumenta demasiado, el correcto funcionamiento del programa puede verse afectado. Cabe destacar que, llegado un punto, el grado de mejora de los resultados aumenta tan poco que no merece la pena seguir refinando la malla.

- III. Para crear la malla, primero se debe seleccionar el apartado “Mesh Sizing” (Tamaño de malla) localizado en la barra de tareas, posteriormente, se selecciona todo el dominio y se crea una primer malla con la herramienta automática (Autosize) que proporciona el programa (Fig. 75); debido a que la malla creada es demasiado grande o gruesa, se debe crear una región en el área donde se prevé que esté localizada la superficie libre del agua. Para ello, se vuelve a seleccionar todo el dominio, se da clic en la herramienta “Edit” y posteriormente en el apartado “Region” (Fig. 76), una vez dentro del apartado, se desplegará otro cuadro de edición y se dará clic en “Add” para añadir una nueva región. Ya que se creó la región, con ayuda de unas flechas, se tendrá que delimitar la región donde se prevé que esté localizada la superficie libre del agua; toda vez que se delimite la región a criterio del usuario, se dará clic en “Get local mesh size” y posteriormente en “Spread changes”, inmediatamente la malla se ajustará a los cambios realizados como se muestra en la Fig. 77. El objetivo de la región es que se construya un segundo mallado más fino sobre el área seleccionada y con ello, se pueda obtener una mejor representación del flujo en la superficie del fluido. Con estos ajustes, se logró refinar el mallado hasta obtener una afinidad de 0.75,

siendo éste, un valor aproximado a lo que se recomienda. Para llegar a la afinidad mencionada, se tuvieron que verificar dos parámetros; el primero es que los nodos se encuentren en un rango entre 70,000 y 85,000 y el segundo parámetro es verificar que los elementos se encuentren en un rango de 350,000 a 750,000. Lo anterior, a fin de que la memoria RAM del equipo de cómputo no se sature, evitando así, la aparición de errores y la detención inesperada de la simulación.

Para verificar que el mallado se encuentre dentro de los parámetros mencionados anteriormente, no es necesario ejecutar la simulación completa del fluido, simplemente se tendrá que dar clic derecho en el apartado “Mesh Size” de la “Barra de estudio de diseño” y posteriormente otro clic en la opción “Generate mesh”, con esto, el programa calculara los nodos y elementos totales del mallado y los mostrará en la barra de salida (Fig. 79). Por lo tanto, antes de ejecutar la simulación del fluido, el usuario puede probar distintas configuraciones de mallado para que su modelo, alcance los parámetros recomendados. Es importante mencionar que, para este caso, se realizó una malla más fina, debido a que el equipo de cómputo lo permitía.

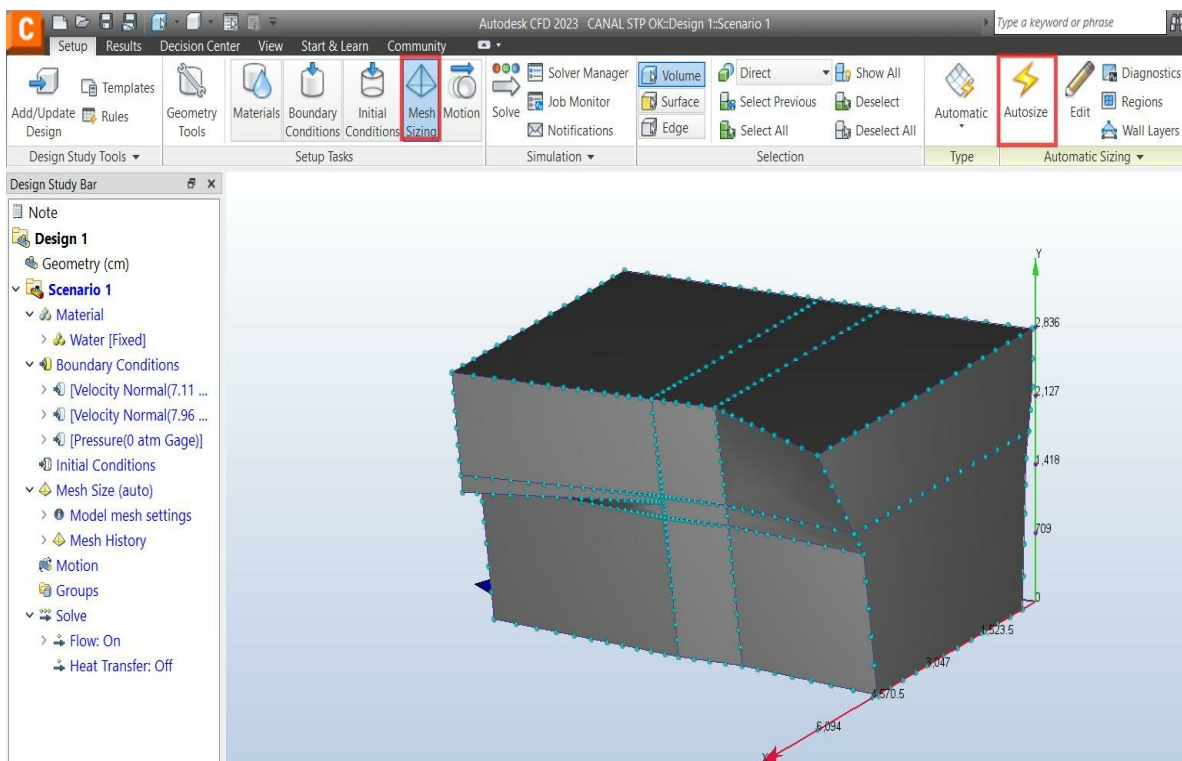


Fig. 75. Primer malla con herramienta “Autosize”

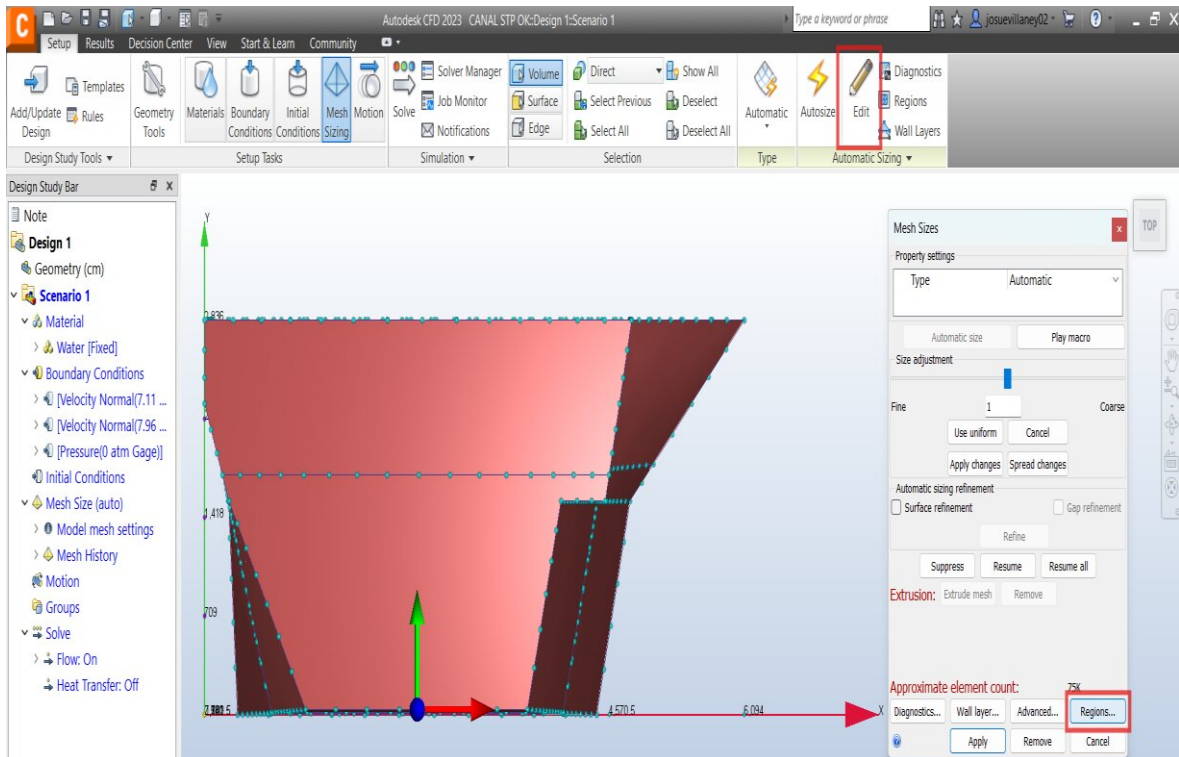


Fig. 76. Herramienta Region.

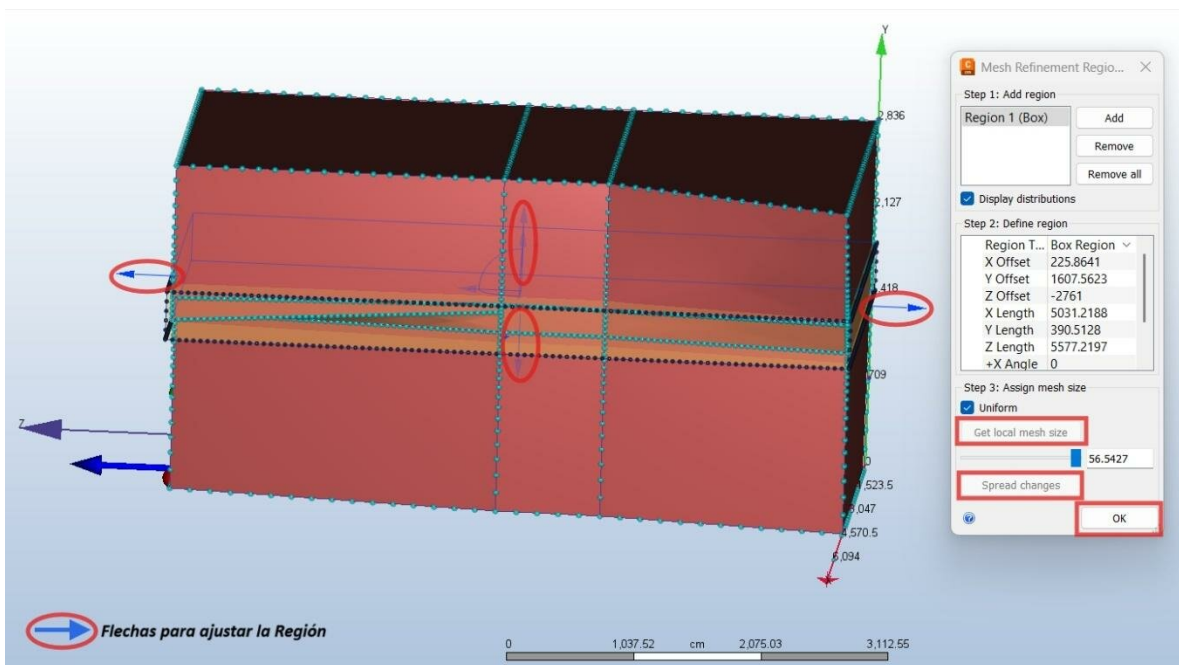


Fig. 77. Parámetros de la Región.

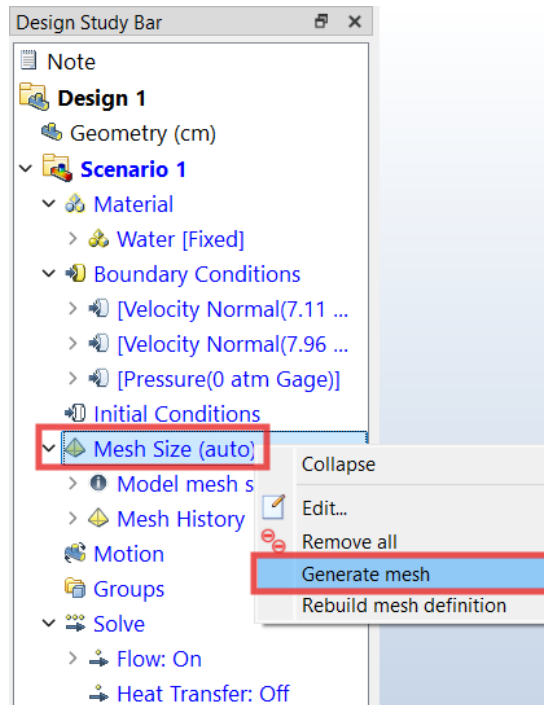


Fig. 78. Generación de mallado para verificación de nodos y elementos totales.

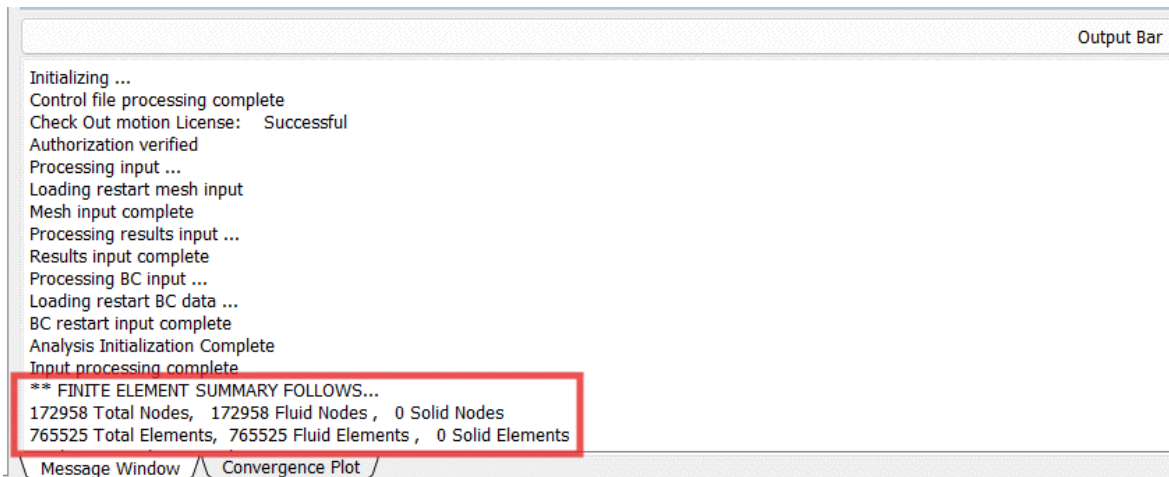


Fig. 79. Verificación de nodos y elementos totales (Generate mesh)

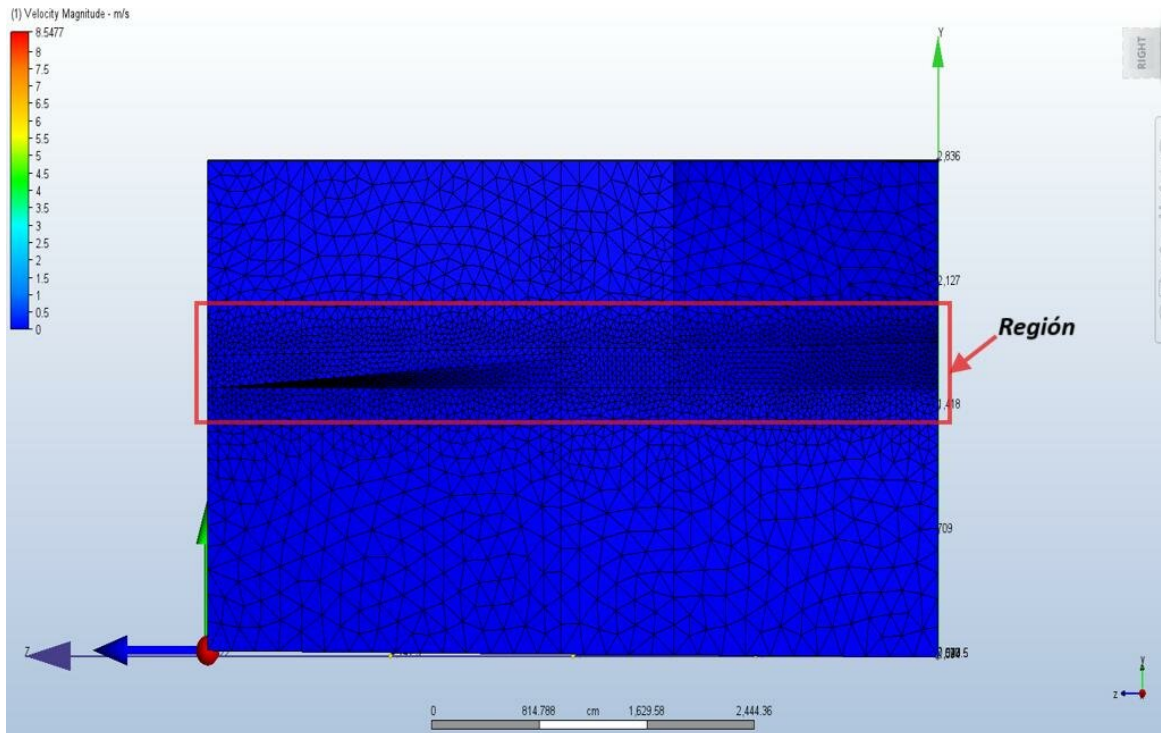


Fig. 80. Vista longitudinal de la malla.

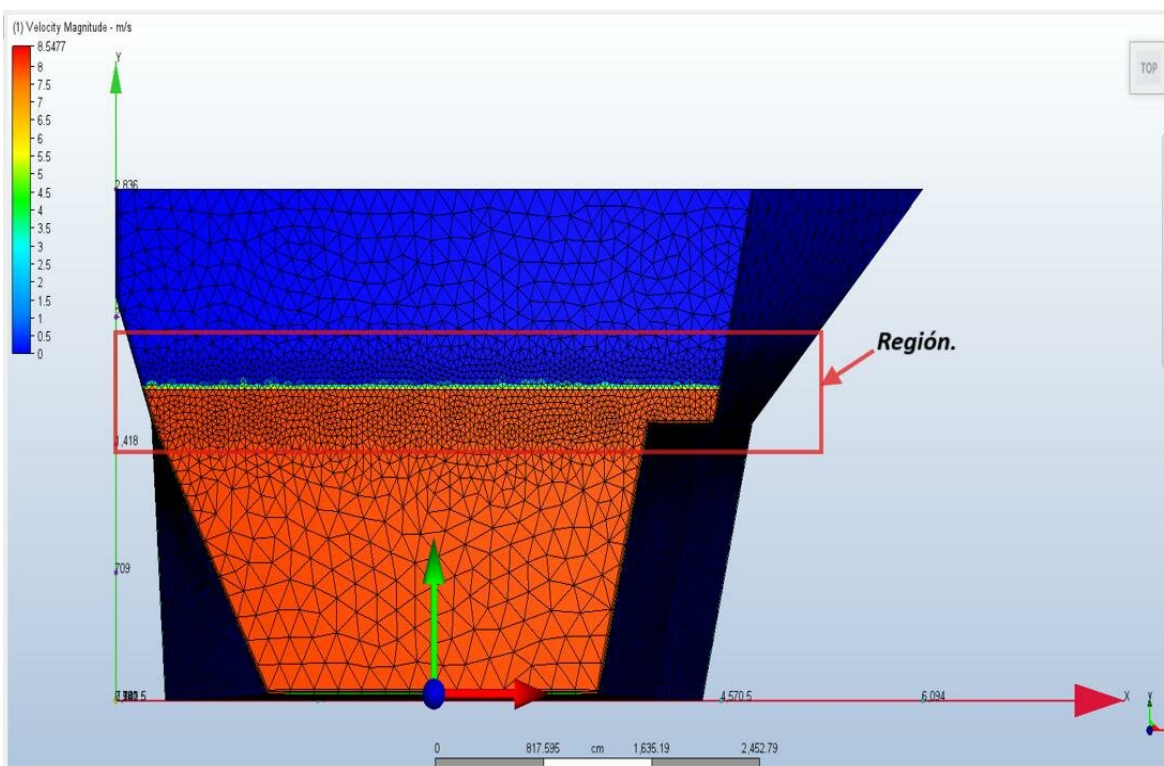


Fig. 81. Vista transversal (A. Arriba – A. Abajo) de la malla.

IV. Creado el mallado, el paso No.4 consiste en la ejecución de la simulación del fluido, para ello, se selecciona la función “Solve”, ubicado en el apartado “Set Up”, que despliega un cuadro de edición de parámetros para iniciar la simulación. Los parámetros por ajustar o verificar, fueron los siguientes:

I. Debido a que el agua se considera un fluido incompresible, en el apartado “Physics” se debe verificar que el material seleccionado coincida con estos parámetros (Fig. 82). En lo que se refiere al tipo de flujo, debido a que el fluido es a superficie libre y que el tramo analizado presenta ensanchamientos, que generan turbulencias, se debe verificar que el flujo se modele considerando un flujo turbulento, por tal motivo, en el mismo apartado, se ingresó al subapartado “Turbulence” y se verificó que la propiedad “Turbulent” se encuentre habilitada, además, se debe ingresar a las parámetros avanzados de turbulencia dando clic en el apartado “Advanced” y seleccionar la opción “Intelligent wall formulation” (Formulación Inteligente de Paredes), esta herramienta es una formulación escalable que mejora la estabilidad y la precisión con los modelos de turbulencia y reduce la sensibilidad de los resultados al nivel de refinamiento de la malla a lo largo de la pared (Fig. 82).

II. Finalmente, en el subapartado “Free Surface”, se seleccionó el apartado “Enable Free Surface” (Habilitar superficie libre), sin embargo, aunque se habilite la función de análisis a superficie libre, también se debe modificar el apartado “Earth gravity directional unit vector (Vector unitario direccional de gravedad terrestre) o la “componente Y” que se encuentra en la parte inferior. En cualquiera de estas dos secciones (o en ambas), se debe modificar la magnitud correspondiente a la gravedad con el valor “-1” con base en los ejes del dominio. Es decir, si se modifica el vector quedará como (0,-1,0) y si se modifica la componente, sólo se colocará “-1” en la componente Y, la cual representa el eje de la gravedad terrestre, para entender mejor lo explicado observe la Fig. 83.

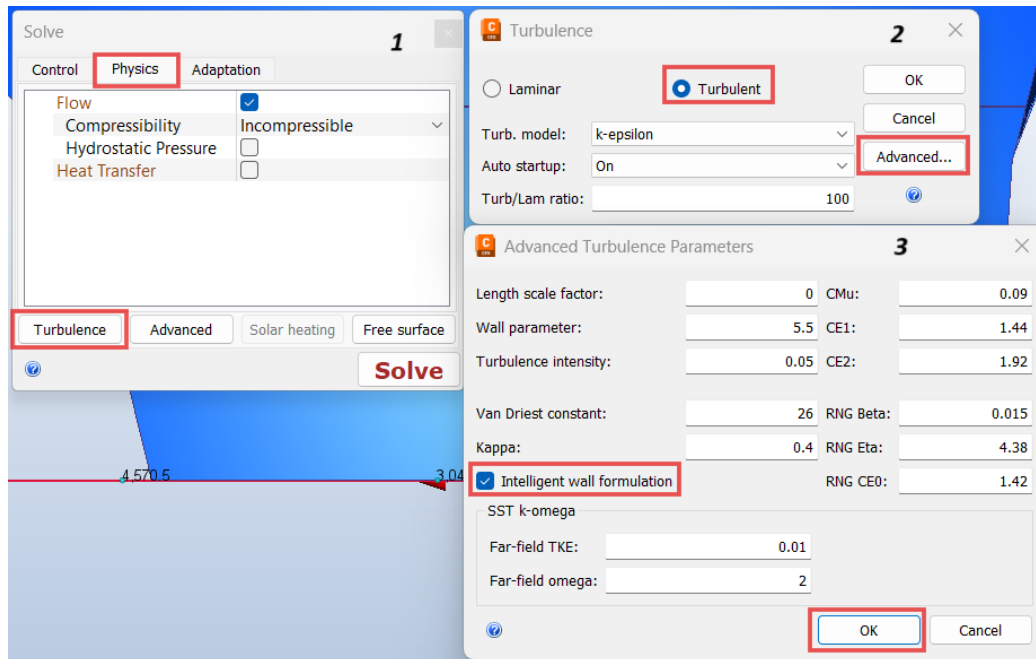


Fig. 82. Parámetros físicos del fluido.

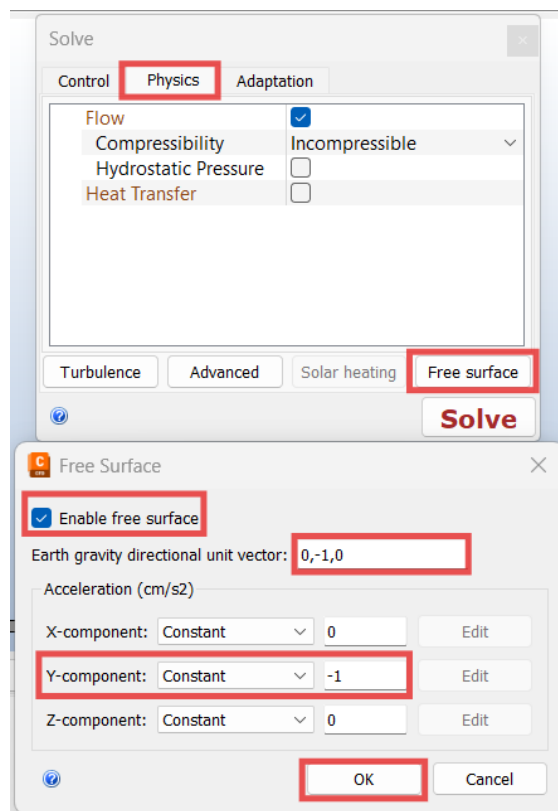


Fig. 83. Habilitación de superficie libre y asignación de la gravedad.

- III. En el apartado “Control”, primero se debe seleccionar el subapartado “Result Quantities”, en este apartado se deben elegir los valores y propiedades que la simulación mostrará como resultados, siendo para este caso, los valores de la velocidad, presión y, como propiedades del fluido, la densidad (Fig. 84). Se recomienda dejar las demás casillas sin seleccionar ya que, al calcular más parámetros, el equipo consumirá más memoria, provocando que la simulación pueda detenerse inesperadamente. Como se puede observar en la Fig. 84, los resultados que se pueden obtener tras la simulación son muy amplios por lo que, dependiendo el enfoque con el que se analice el modelo, se pueden obtener resultados para proporcionar soluciones particulares en términos de temperatura, esfuerzos en las paredes, velocidades absolutas, etc., siempre y cuando el equipo de cómputo lo permita.

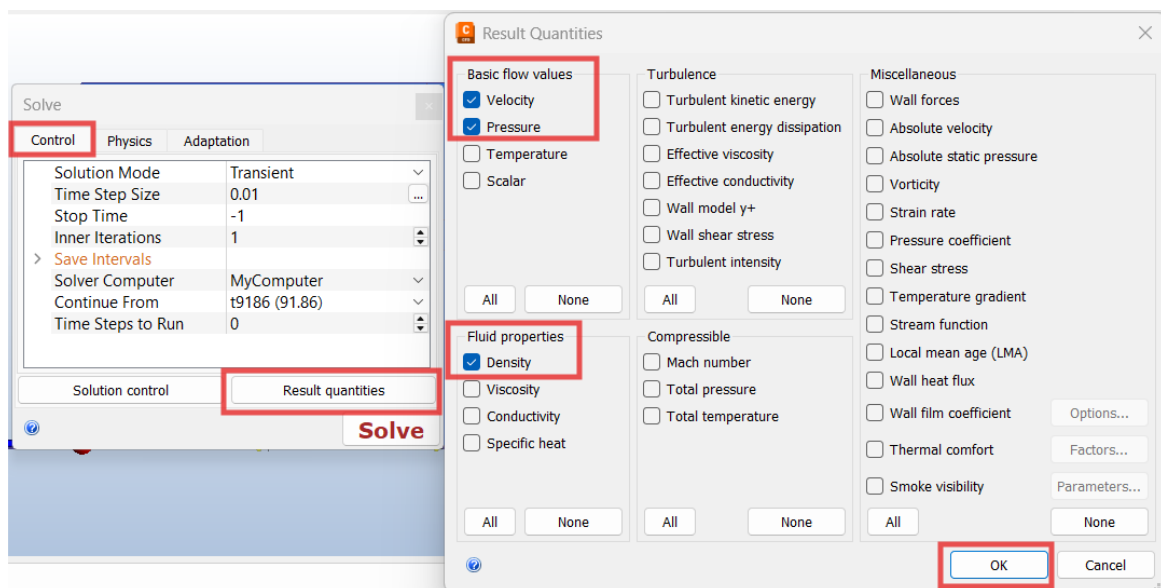


Fig. 84. Selección de resultados para la simulación.

- IV. Finalmente, en el panel principal de este apartado, modificarán los parámetros “Solution Mode”, “Time Step Size”, “Stop Time”, “Inner Iterations”, “Save intervals” y “Time Steps to Run”, quedando de la siguiente forma:

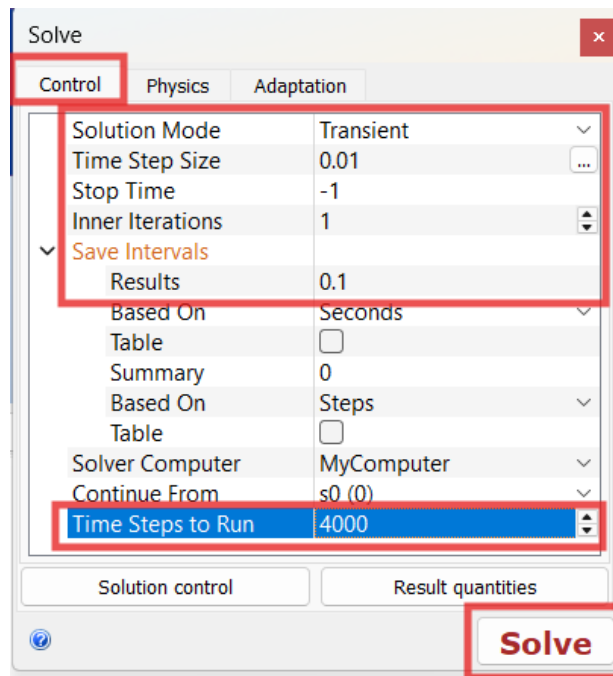


Fig. 85. *Parámetros de pasos, iteraciones y guardado de resultados.*

Es importante mencionar que en lo que se refiere al método de solución, el programa realizará técnicas matriciales iterativas para cumplir con el método “5.- Solucionador segregado” que se presenta en el punto 2.3.3.1.- Interfaz y metodología de cálculo de CFD. Para explicar de mejor manera lo que sucede al elegir los parámetros seleccionados para este último paso, se da por el entendido que el apartado “Solution Mode” se refiere a que el programa analizará el fluido como un flujo en transición ya que se encuentra en un régimen turbulento; para los apartados “Time step size”, “stop time” e “inner iterations”, los valores asignados significan que el tiempo que transcurrirá entre cada paso será 0.01 y en cada paso se realizará una (1) iteración hasta terminar el proceso que, siendo en este caso (-1), significa que el proceso terminará hasta que los métodos numéricos que utiliza el programa converjan en una solución. Para guardar los resultados, en el apartado “Save Intervals”, se puede elegir si se quieren guardar los resultados en un intervalo determinado de pasos o en un intervalo de tiempo, para este caso, se eligió que los resultados se guarden a cada 0.1 segundos. Se eligió este intervalo derivado a que el tiempo de llenado del canal es pequeño debido a que el gasto es grande. Por otro lado, con este intervalo para guardar resultados, posteriormente se puede obtener un video del llenado y del comportamiento del flujo con mayor detalle.

V. Finalmente, toda vez que el programa haya terminado el procesamiento de datos y encontrado una solución para el modelo, se procede a la visualización de resultados y análisis de los mismos. Para ello, existen diferentes formas de visualización, sin embargo, para este caso particular, se utilizaron 3 formas distintas de visualización de los resultados.

- I. La primer forma fue mediante la creación de planos transversales y longitudinales. En cada plano creado, se seleccionó el parámetro que queremos analizar, siendo para este caso la “Magnitud de la velocidad”. Para representar las magnitudes, de acuerdo con una escala de colores ubicada en la parte izquierda de la ventana gráfica, el plano se tornará de un color dependiendo la velocidad resultante en la sección analizada tal cual como se muestra en la Fig. 86 y Fig. 87; sin embargo, aunque esta representación de resultados muestra un panorama más específico de las velocidades en el canal, para observar los resultados numéricos se debe utilizar la herramienta “Bulk”.

La herramienta “Bulk” permite modificar unidades y obtener los resultados específicos de las velocidades en m/s para el plano seleccionado (Fig. 88). Para obtener la velocidad en diferentes puntos del canal, ya sea transversal o perpendicularmente, al centro del plano creado, aparecerán los 3 ejes por los cuales se podrá desplazar el plano, así como un arco que permite dar una inclinación en caso de ser necesario. Con base en lo anterior, se identifica el eje sobre el cual se desea desplazar el plano y mientras se mantiene seleccionado se arrastra en la dirección deseada, una vez que se detenga en el lugar deseado, se presionará la opción “Calculate” y se mostrarán los resultados numéricos para ese punto específico. Una vez que se hayan generado los resultados, al desplazar el plano en la dirección deseada, los resultados se actualizarán automáticamente. Para guardar los resultados del plano seleccionado, haga clic en el botón “Save”. Los

resultados de los intervalos de tiempo activos se guardarán en un archivo CSV de Excel.

Es importante tener en claro la dirección del flujo en relación con los ejes del proyecto, ya que, dependiendo de la forma en que se haya creado el modelo, la interpretación de los resultados puede cambiar. Para este caso, el fluido se mueve en el eje Z, pero la dirección del flujo es en sentido negativo al eje, por lo tanto, la magnitud de la velocidad será negativa en los resultados numéricos, sin embargo, con base en las premisas del caso de estudio y la forma de construcción del modelo, se da por entendido que, a pesar de tener signo negativo, la velocidad se considerará positiva.

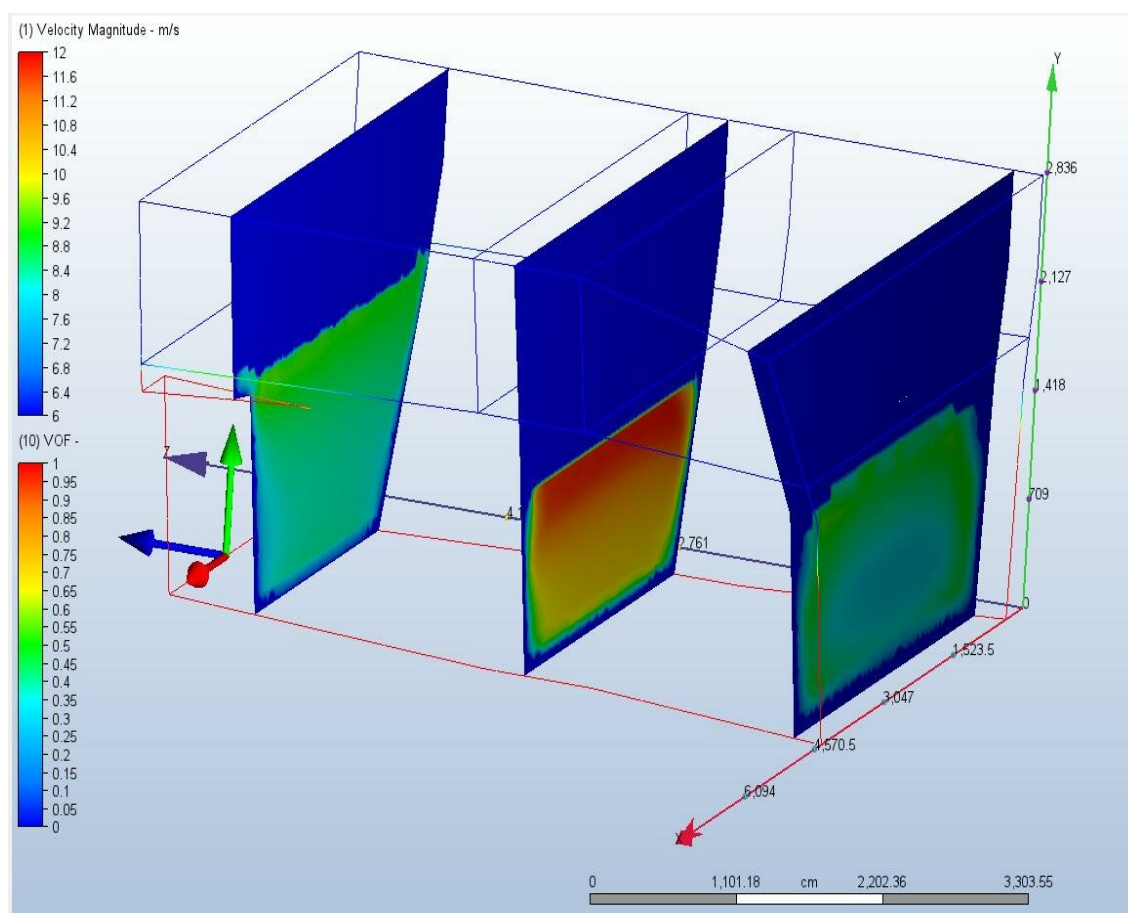


Fig. 86. Distribución de la velocidad (Planos transversales)

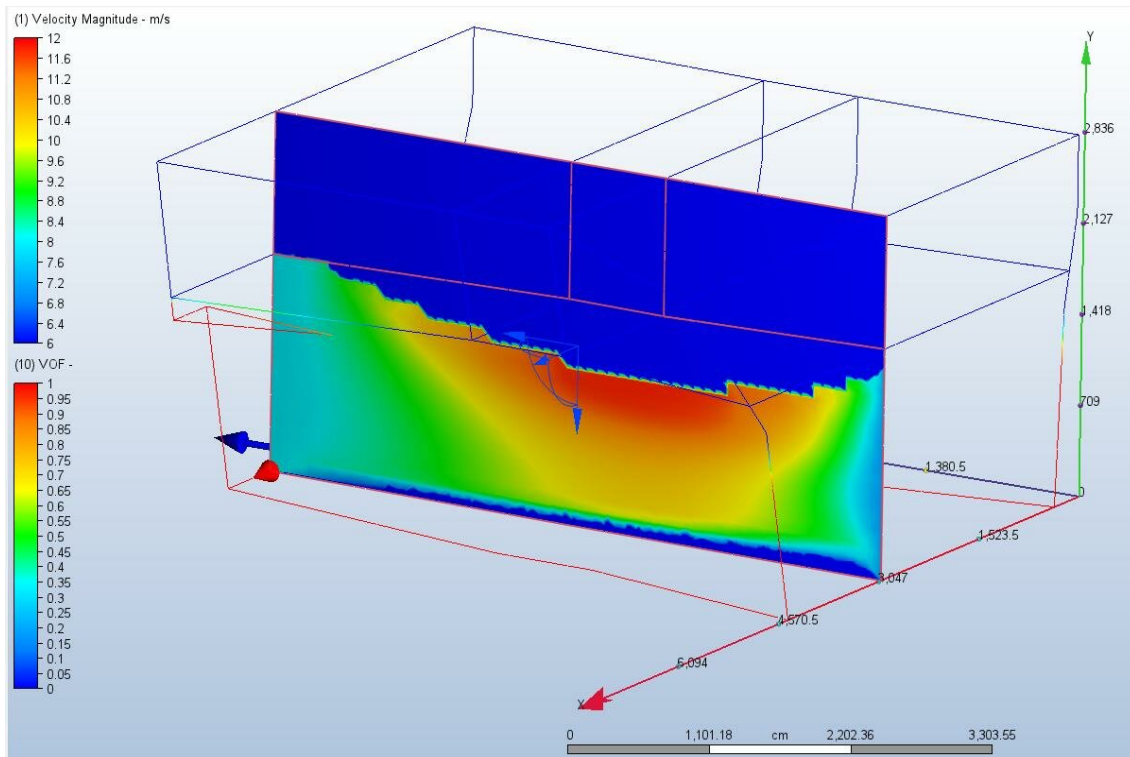


Fig. 87. Distribución de la velocidad (Plano longitudinal)

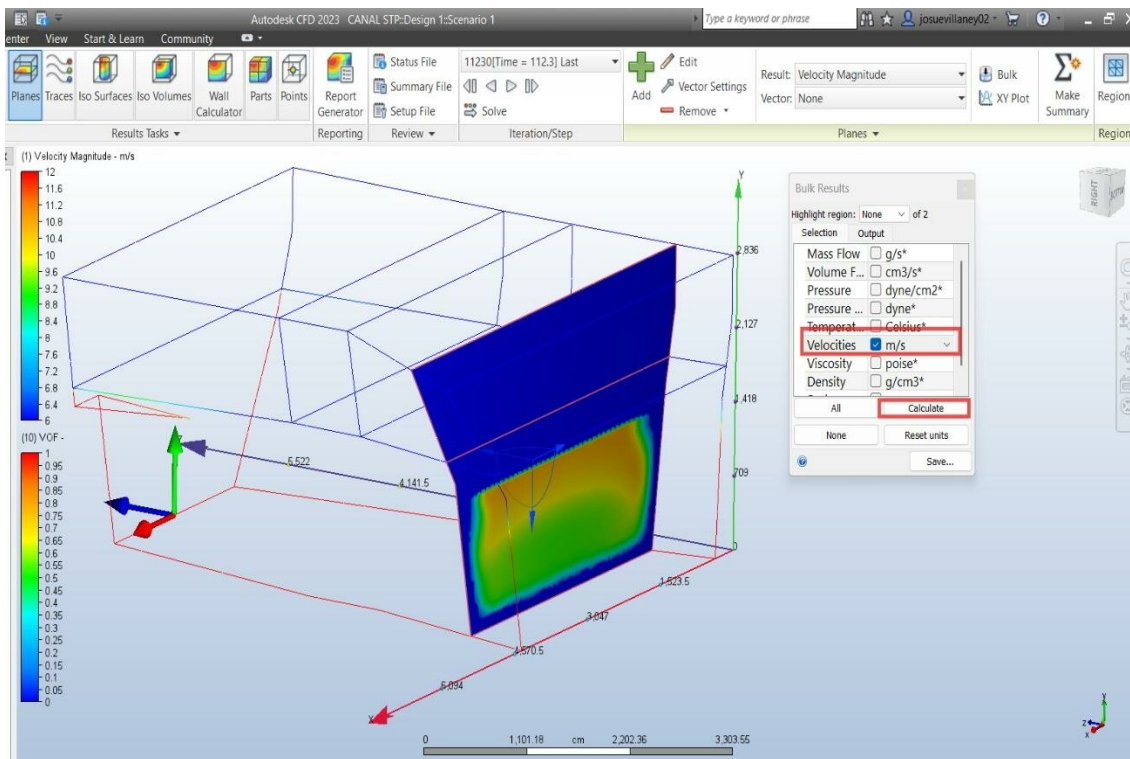


Fig. 88. Designación de unidades para resultados

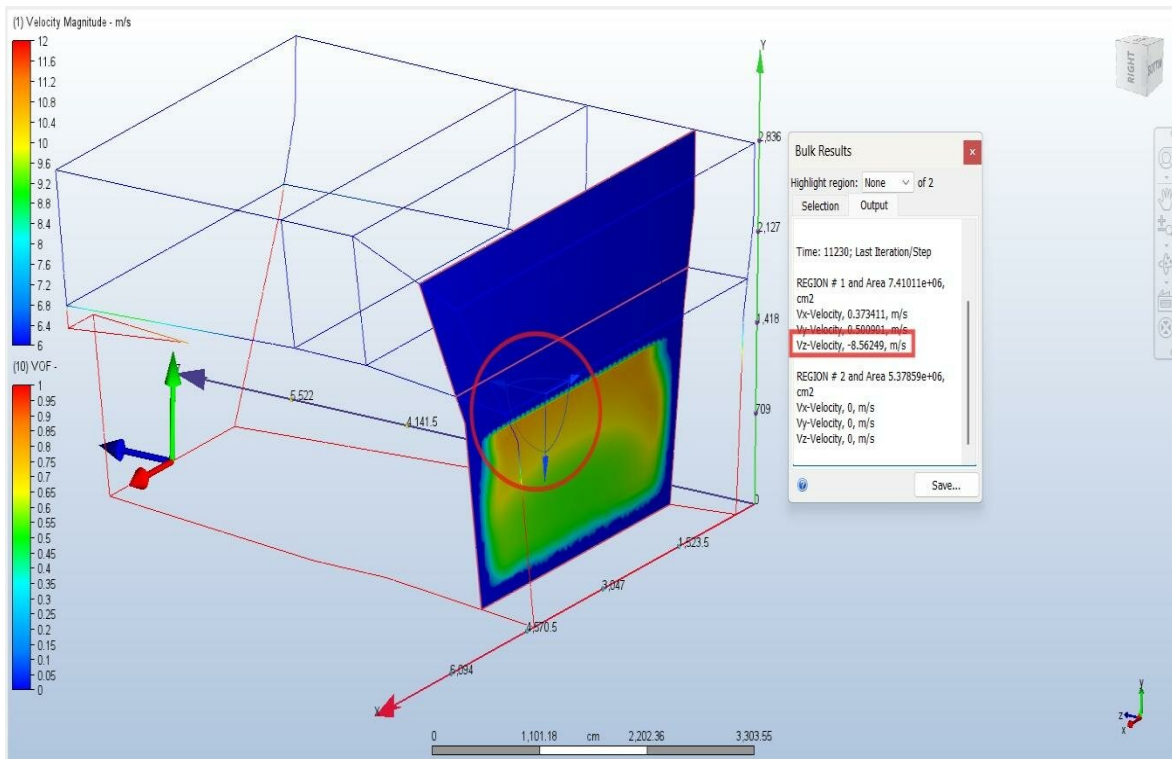


Fig. 89. Resultados de velocidad 1

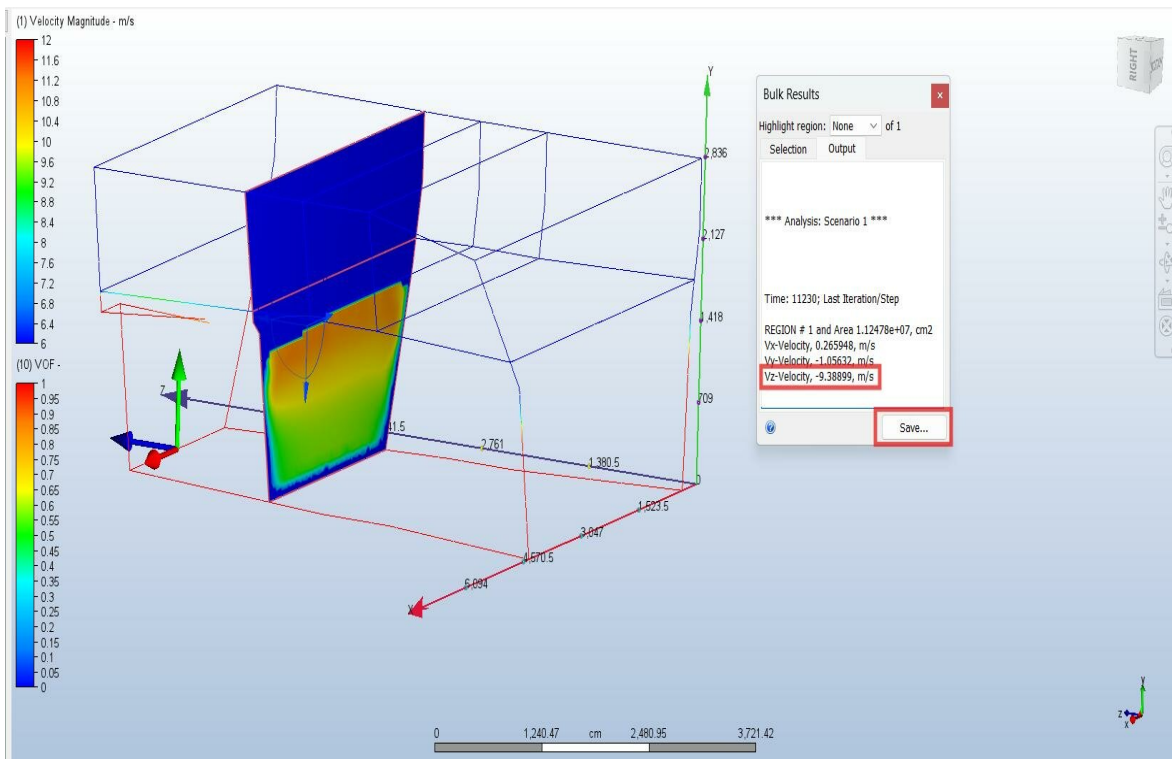


Fig. 90. Guardar resultados de velocidad

- II. La segunda forma utilizada para la visualización de resultados es mediante la creación de un isométrico del volumen (Iso Volumes) formado por el fluido. Es decir, una representación del fluido en sí mismo, a través del canal. Para agregar un volumen se debe acceder al apartado “ISO Volumes” y posteriormente, en la parte superior derecha, se debe dar clic en “Add”, con esto se creará el volumen del fluido transitado, sin embargo, se puede modificar el parámetro que se quiere representar con el volumen, así como el criterio de la escala de color Fig. 91. Para este caso, se creó el volumen a partir del volumen del fluido (VOF) y el criterio de color es con base en la Magnitud de la velocidad tal cual se muestra en la Fig. 92.

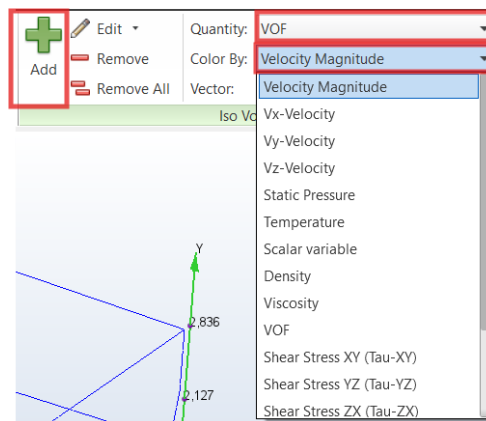


Fig. 91. Criterios de creación del fluido.

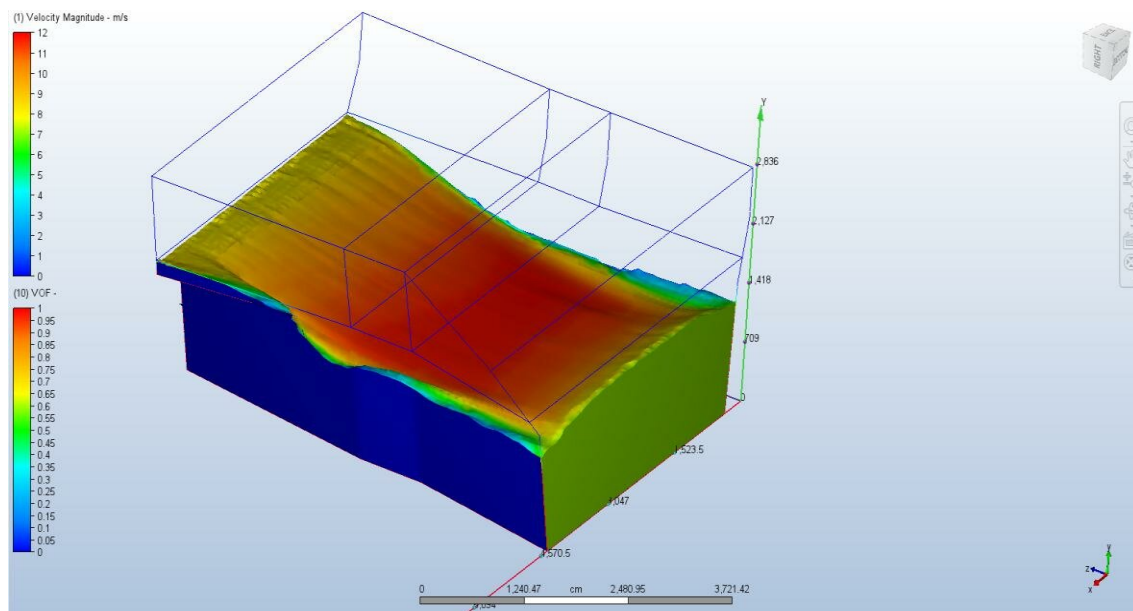


Fig. 92. Volumen del fluido.

III. La tercer forma es la creación de una animación mostrando el llenado del canal a través del tiempo, es decir, un video de la simulación de llenado del canal. Para este punto dependiendo de los parámetros ingresados en “Save Intervals” del apartado IV.IV, se podrá elegir los pasos o los intervalos de tiempo que se quiere considerar para realizar la simulación del fluido. Como se explicó en el apartado antes mencionado, entre más pequeño haya sido el intervalo en el que el programa guarda los resultados entre cada paso, se podrá tener una animación más detallada, de lo contrario, si se utilizaron intervalos muy grandes, al crear la animación se observarán saltos en la creación del fluido, es decir, en un caso exagerado, se podría observar una animación de 2 segundos en la que solamente se vea como empieza a entrar el fluido aguas arriba y al segundo dos se vería totalmente el fluido ya terminado.

Con base en lo anterior, para utilizar esta herramienta, se debe localizar el apartado Results en la barra de tareas y dar clic en “Animation” ubicado en la barra de tareas (Fig. 93), posteriormente se elegirán los pasos o los intervalos de tiempo que se quiere considerar para realizar la animación del fluido, para este caso se seleccionaron todos los pasos dando clic en “Select all”. Una vez seleccionados, se dará clic en “Animate” para crear la animación; creada la animación, en la parte inferior se elegirá el intervalo de cuadros, el cual determina la duración y la velocidad de la misma, para ello, hay que considerar que entre mayor sea el número de cuadros, la simulación será más “lenta” y viceversa, para comprender mejor lo explicado anteriormente véase la Fig. 94.

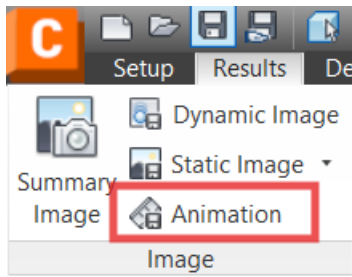


Fig. 93. Herramienta “Animation”

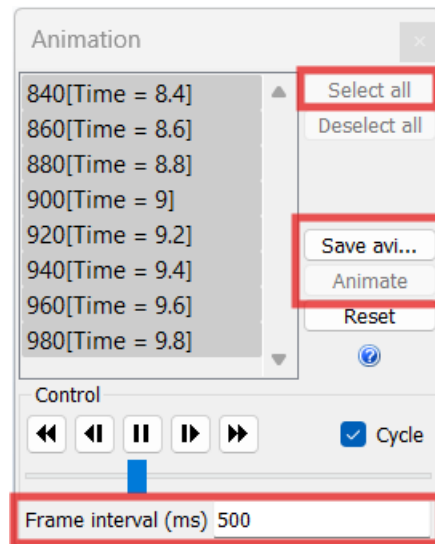


Fig. 94. Parámetros de la animación.

IV. Por último, se utilizó la herramienta “Traces” la cual muestra las líneas de flujo del fluido. Esta forma de visualización de los resultados se presenta a través de líneas que muestran la distribución de la velocidad con la cual se puede ver de forma más específica el comportamiento del flujo a lo largo del canal analizado, así mismo, al igual que con las otras formas de visualización, las líneas de flujo presentan una escala de colores en la cual se puede visualizar la magnitud de la velocidad para cada línea de flujo. Para acceder a esta herramienta, se debe ubicar el apartado “Traces” en la barra de tareas, posteriormente en la parte superior derecha, se encuentra el apartado para modificar las propiedades de la creación de las líneas de flujo, entre estas propiedades se encuentran las siguientes:

- I. Seed Type: Este apartado permite definir la forma en que se crearán las líneas de flujo, puede ser a partir de una sección rectangular o circular que el usuario dibuje, seleccionando una región del dominio creado o de forma puntual. Para este caso, debido a que el dominio se construyó de tal forma que el fluido de interés (agua) se encuentra en la parte inferior, se utilizó la opción de región para delimitar exactamente el volumen del fluido. (Fig. 97)

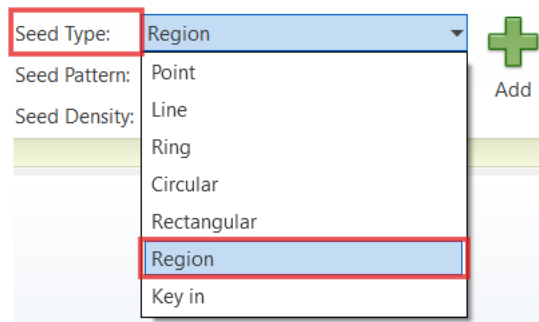


Fig. 95. Seed Type

- II. Seed Pattern: Este parámetro permite controlar el espaciado de los puntos que forman las líneas de flujo en la cuadrícula de definición a partir de 3 formas como se muestra en la Fig. 96, dichas formas son Diamante (Diamond), Cuadrícula (Grid), y Hexágono (Hexagon) Fig. 96. Para este caso se utilizó la opción de cuadrícula, esto quiere decir que, los puntos de la región que formarán las líneas de flujo, tomarán un patrón con puntos equidistantes para formar la cuadrícula, para observar mejor lo explicado anteriormente véase la Fig. 97

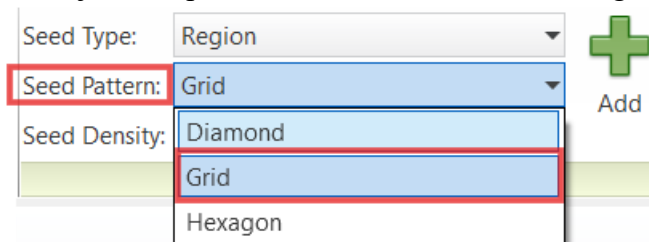


Fig. 96. Seed Pattern

- III. Seed Density: Finalmente, este parámetro define la densidad o cantidad de líneas de flujo, es como un mallado, es decir, entre más cercano a 0 (cero) sea la densidad, se crearán más líneas de flujo, lo

que hará más fina la malla. Este punto depende totalmente del usuario, ya que en ocasiones no es necesario que se formen demasiadas líneas de flujo para observar el comportamiento del flujo. Para este caso, se utilizó una densidad de 1 con la cual se puede observar de mejor manera la distribución de la velocidad como se muestra en la Fig. 98.

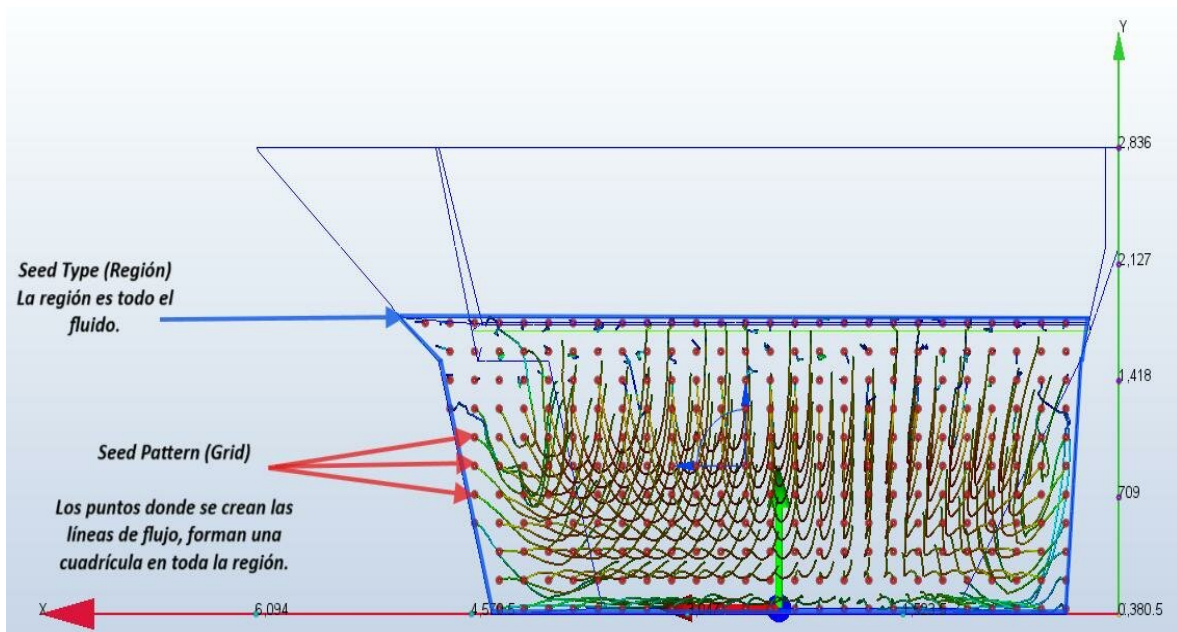


Fig. 97. Seed Type y Seed Pattern.

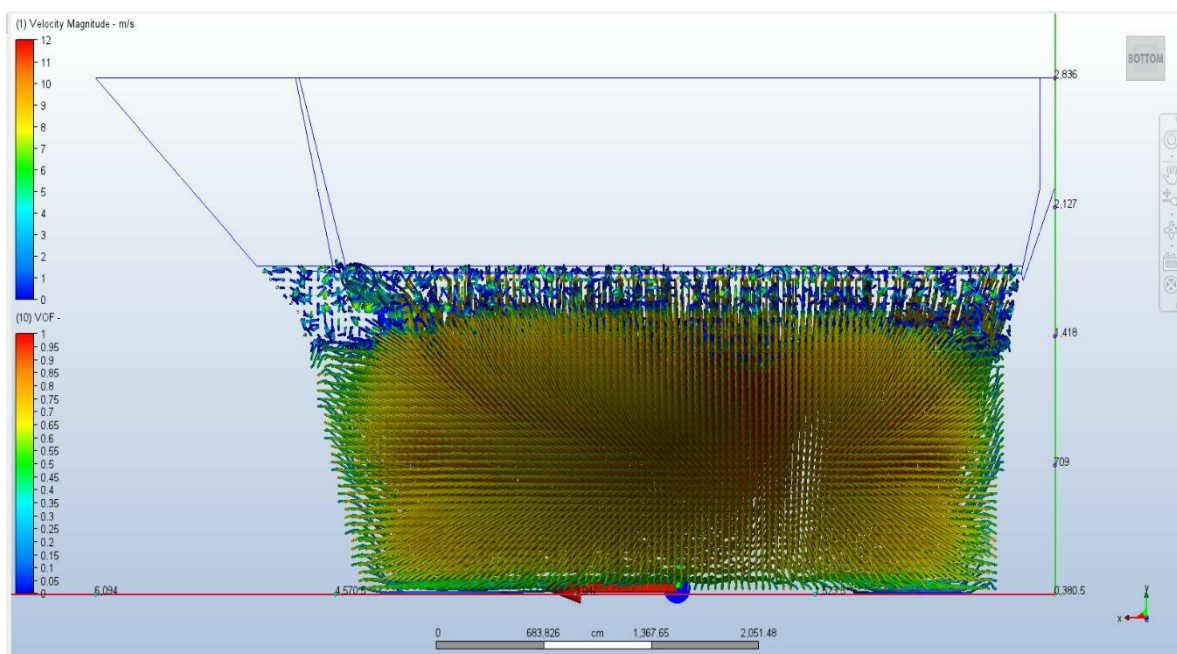


Fig. 98. Distribución de la velocidad con líneas de flujo.

3.3.3.- Análisis de resultados.

El análisis hidráulico tridimensional de un canal a superficie libre utilizando como herramienta Inventor y CFD demanda una comprensión clara de las prioridades y requerimientos particulares de cada software. Aunque ambos trabajan en 3D, sus objetivos y alcances son distintos ya que Inventor se enfoca en la construcción geométrica del dominio, mientras que CFD interpreta dicho dominio para simular el comportamiento del fluido. Esta diferencia implica que el diseño o dominio construido en Inventor, debe realizarse con la menor cantidad posible de piezas ensambladas, o de ser posible, como un solo sólido con el fin de evitar errores de interpretación en la simulación y facilitar la compatibilidad del modelo. Es importante señalar que, en Inventor, el diseño no representa la geometría del canal como estructura física, sino el volumen ocupado por el fluido. Esta abstracción en el diseño, permite construir un dominio más funcional para CFD, donde se aplican condiciones de frontera, se define el mallado y se simulan con mayor detalle los fenómenos hidráulicos que sean requeridos. Es importante mencionar que, para modelos complejos, se recomienda el uso de pares de planos que aseguren una correcta elevación y una interpretación precisa del dominio.

En cuanto a los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre la representación de las velocidades generadas por el modelo unidimensional de HEC-RAS y las obtenidas mediante Autodesk CFD. Aunque ambas herramientas coinciden en tendencias generales del flujo, las velocidades y la distribución del mismo no fueron exactamente iguales. Esto es esperable, ya que CFD proporciona una representación más realista y detallada del comportamiento del fluido, considerando aspectos tridimensionales, efectos locales de turbulencia, y condiciones físicas más cercanas a la realidad. Estas diferencias no implican errores, sino que reflejan las diferencias en los modelos matemáticos y numéricos empleados por cada software. Por ello, es recomendable usar ambas herramientas de forma complementaria y realizar un análisis para interpretar correctamente cualquier diferencia observada ya que esta integración y complementación de metodologías y procesos permite obtener un análisis más completo del flujo en canales a superficie libre, lo cual es fundamental para proyectos hidráulicos con geometrías complejas o condiciones especiales de operación.

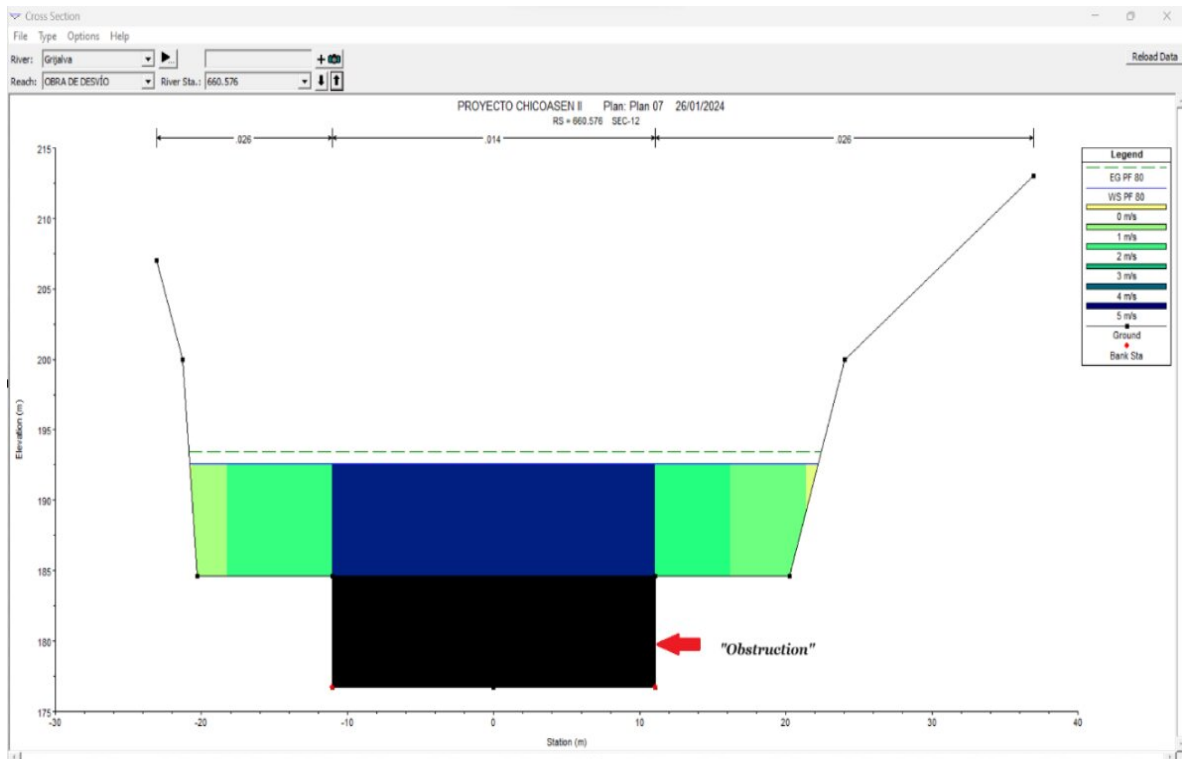


Fig. 99. Representación de la distribución de velocidades en Hec-Ras.

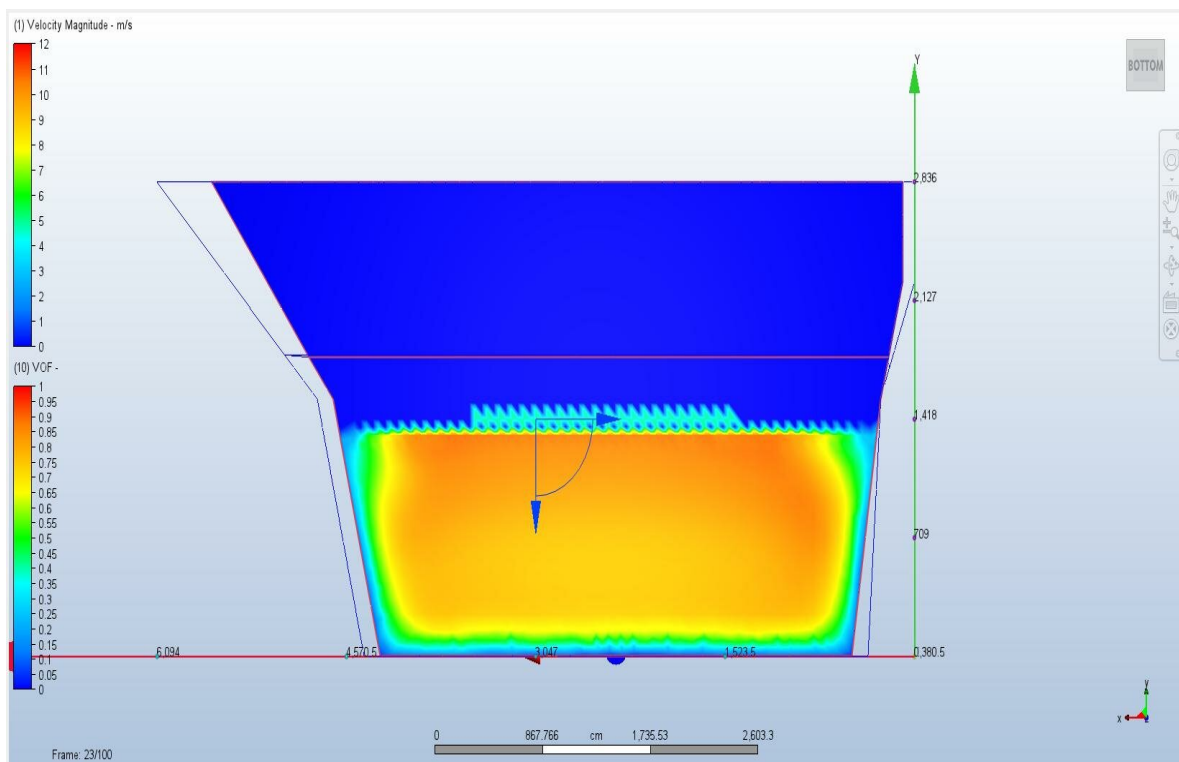
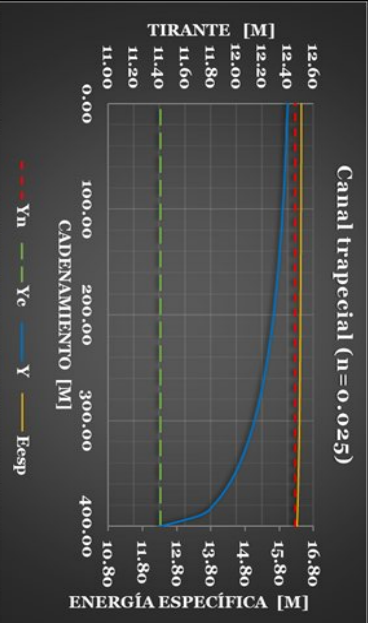
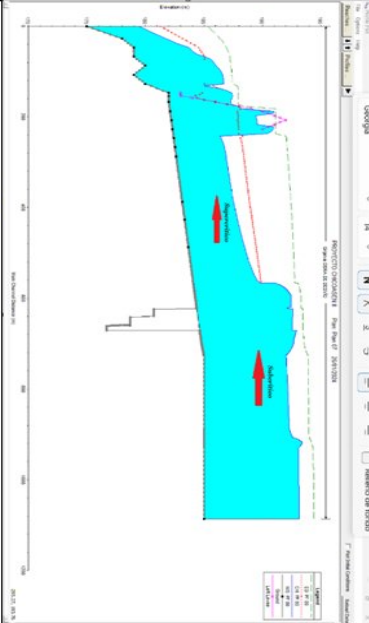
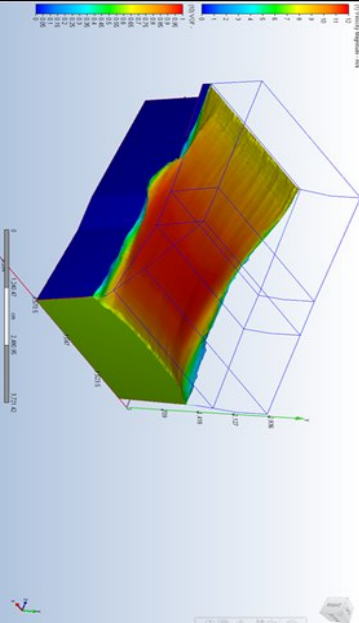


Fig. 100. Representación de la distribución de velocidades en Autodesk CFD.

4.- Conclusiones

El uso de herramientas especializadas en hidráulica es fundamental para realizar un diseño eficiente de canales a superficie libre, ya que permiten modelar y analizar con precisión los flujos y los fenómenos hidráulicos, proporcionando soluciones basadas en métodos numéricos que consideran variables como la geometría del canal, la pendiente, la rugosidad y el tipo de fluido. Estas herramientas permiten a los ingenieros optimizar las obras hidráulicas y prever su comportamiento, lo cual es esencial para garantizar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la infraestructura hidráulica. En el desarrollo de este trabajo, se aplicaron y compararon diferentes softwares (Excel, HEC-RAS, Autodesk Inventor y Autodesk CFD), cada una con un enfoque, nivel de complejidad y grado de precisión distinto. Excel permitió realizar un análisis teórico mediante cálculos manuales y macros iterativas, evidenciando su utilidad para dimensionamientos preliminares, pero también sus limitaciones en cuanto a eficiencia, visualización gráfica y representación espacial. Por otra parte, HEC-RAS es una herramienta sólida y confiable para el modelado unidimensional del flujo, con capacidad de representar regímenes hidráulicos subcríticos y supercríticos, así como validar hipótesis de diseño y distintos escenarios con rapidez y claridad. Autodesk CFD, en conjunto con Autodesk Inventor para la generación del modelo sólido tridimensional, ofreció una perspectiva avanzada al permitir la simulación tridimensional del comportamiento del flujo, incluyendo turbulencias y velocidades locales. Aunque sus resultados no coincidieron plenamente con los obtenidos en HEC-RAS, esto no representa un error, sino una consecuencia natural de las diferencias entre enfoques de modelación (1D vs. 3D). Al ser CFD una herramienta más completa y orientada a un análisis realista basado en ecuaciones complejas, sus resultados reflejan un mayor grado de fidelidad con la realidad física del fenómeno, lo cual resulta clave en proyectos donde se requiera precisión y detalle, como es el caso de estructuras hidráulicas con geometrías irregulares o condiciones de operación críticas. La elección entre HEC-RAS y CFD, o su uso conjunto, depende del tipo de problema a resolver. Mientras que HEC-RAS es ideal para flujos a superficie libre, por su facilidad de uso y rápida obtención de resultados, Autodesk CFD permite abordar fenómenos complejos a costa de una mayor exigencia técnica y computacional.

Tabla 27. Tabla comparativa de las herramientas digitales analizadas.

Herramienta	Tipo de análisis	Ventajas principales	Limitaciones	Representación visual
Microsoft Excel	Unidimensional teórico	-Alta personalización de cálculos. -Fácil acceso y uso extendido. -Ideal para cálculos rápidos y pruebas preliminares. -Permite comprender a fondo los procedimientos hidráulicos. -Posibilidad de automatización mediante macros. -Flexibilidad en fórmulas y macros -Bajo requerimiento de hardware	-Alto tiempo de elaboración de hojas de cálculo. -Escasa representación gráfica. -Requiere validación externa. -Propenso a errores si no se automatiza. -Ineficiente para geometrías complejas o grandes volúmenes de datos.	
HEC-RAS	Unidimensional 1D hidráulico	-Amplia aceptación en la ingeniería hidráulica. -Interfaz amigable y gratuita. -Ideal para canales y ríos a superficie libre. -Precisión adecuada en análisis 1D y 2D. -Buena documentación y soporte técnico.	-Limitado para geometrías complejas. -Poca resolución en turbulencias o flujos no permanentes. -Requiere simplificaciones del modelo. -Interfaz menos flexible que herramientas CFD. -No considera efectos tridimensionales del flujo.	
Autodesk CFD	Tridimensional (CFD)	-Análisis tridimensional detallado. -Alta precisión para flujos complejos. -Capacidad para simular turbulencia y condiciones reales. -Flexibilidad para modelar geometrías complejas. -Representación visual clara y detallada.	-Requiere conocimientos avanzados. -Alto consumo de recursos computacionales. -Curva de aprendizaje pronunciada. -Mayor tiempo de simulación y análisis. -Licencia costosa y configuración más técnica.	

Con base en la imagen anterior, se concluye que ninguna herramienta es superior en términos absolutos, sino que su aplicabilidad está sujeta a los requerimientos del proyecto, la etapa de diseño, los recursos disponibles y el nivel de detalle deseado, además, se reafirma que el objetivo de este trabajo no fue demostrar que los resultados obtenidos deban coincidir, sino aplicar los softwares e identificar los alcances, ventajas, desventajas y formas de representación que ofrece cada herramienta para enriquecer el análisis técnico. A través de la comparación realizada, resalta la importancia de combinar enfoques teóricos unidimensionales y tridimensionales para obtener análisis más completos, disminuir la incertidumbre y tomar decisiones que favorezcan la factibilidad del diseño de obras hidráulicas. De esta manera, se logró evidenciar la evolución del análisis y diseño hidráulico a medida que tecnología avanza y se implementa de forma exitosa a la ingeniería, esto permite ofrecer soluciones de calidad en proyectos donde la precisión, la visualización y la comprensión del flujo son factores críticos para una toma de decisiones segura y eficiente.

Se recomienda con énfasis que, para el diseño de obras y proyectos hidráulicos que involucren flujos a superficie libre, los ingenieros no se limiten al uso de un solo software ni metodología, sino que adopten un enfoque holístico y estratégico que permita aprovechar las fortalezas de cada software utilizado. En definitiva, cada ingeniero debe desarrollar la capacidad de elegir, integrar y evaluar los resultados de los softwares utilizados, considerando sus limitaciones, alcances y el contexto específico del proyecto o el problema a resolver. Esta habilidad crítica y multidisciplinaria es esencial para enfrentar los desafíos reales de la ingeniería hidráulica moderna, garantizando no solo la eficiencia técnica, sino también la seguridad y sostenibilidad de las obras diseñadas.

Referencias

- Autodesk Support. (08 de octubre de 2023). *Cómo crear una malla óptima y sencilla con Autodesk CFD*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/es/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/How-do-I-know-that-I-have-a-good-mesh.html#:~:text=La%20malla%20de%20CFD%20se,que%20CFD%20a%C3%BA%20lo%20desconoce>
- CHOW, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. R., Ed., & J. G. Saldarriaga, Trad.) Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.
- Comisión Federal de Electricidad. (1981). *Sección A. Hidrotecnia. Tomo II. Comentarios. Tema 2. Hidráulica. Capítulo 12. Obras de desvío*.
- Comisión Federal de Electricidad. (1983). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Distrito Federal: Centro Editorial de la C.F.E.
- Comisión Federal de Electricidad, Comisión Nacional del Agua. (2021). *Política de operación de compuertas del vertedor de la presa "Chicoasén"*, C.H. Ing. Manuel Moreno Torres, Chis. Ciudad de México.
- Comisión Federal de Electricidad, Comisión Nacional Del Agua. (2023). *Política de operación de compuertas del vertedor de la presa "La Angostura"*, C.H. Dr. Belisario Domínguez, Chis. Ciudad de México.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. (2017). *MEMORANDUM No. B00.7.-616*. CONAGUA.
- Cortés, D. F. (2006). *Obras de desvío*. Ciudad de México.
- Debate, E. a. (13 de julio de 2020). *Energía a Debate*. Obtenido de Presenta CFE plan de manejo de presas del Grijalva: <https://energiaadebate.com/electricidad-presenta-cfe-plan-de-manejo-de-presas-del-grijalva/>

- Electricidad, C. F. (3 de marzo de 2022). *HIDROELÉCTRICAS, ENERGÍA LIMPIA Y CONFIABLE PARA LA POBLACIÓN*. Obtenido de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2482>
- Engineers., U. A. (s.f.). *Applications of the momentum equation. HEC-RAS Technical Reference Manual*. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.4/theoretical-basis-for-one-dimensional-and-two-dimensional-hydrodynamic-calculations/1d-steady-flow-water-surface-profiles/applications-of-the-momentum-equation>
- Grupo TIC GIS Formación. (11 de noviembre de 2014). *¿Qué es HEC – RAS y para qué sirve?* Obtenido de <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>
- Gustavo, M. O. (2015). *PLANEACIÓN ESTRATÉGICA DE LAS OBRAS CIVILES DEL P. H. CHICOASEN II*. Ciudad de México.
- Luisyep. (04 de diciembre de 2021). *Ingeniería Básica*. Obtenido de La ecuaciones de Navier Stokes.
- Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, D.F.: Limusa.
- Ramos-Gutiérrez, L. d., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). *Las centrales hidroeléctricas en México: Pasado, presente y futuro*. Zapopan.
- Sarrazin, J. M. (2016). *Mallado de geometrías complejas mediante CFD*. Barcelona.
- Sotelo Ávila, G. (2011). *Hidráulica General, Fundamentos, Volumen I*. México: Limusa.
- Tamargo, J. L. (05 de abril de 2010). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de la Región Hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta.: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5141106