

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE: INGENIERÍA CIVIL



**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**“ANÁLISIS COMPUTACIONAL-MATEMÁTICO DEL
COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES DE RUGOSIDAD
ARTIFICIAL Y DISIPADOR FRONTAL PARA LA DESCARGA DE
LAS AGUAS DE EXCESO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
“SAN JOSÉ DE MINAS”**

AUTOR:

STEEV SEBASTIAN LÓPEZ MOLINA

BRYAN STEVEN VELASCO BAQUE

QUITO, DICIEMBRE 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme la familia maravillosa que tengo, por brindar de salud a todos los miembros y darnos la fortaleza para seguir apoyándonos como familia.

A mis padres, quienes son mi ejemplo y siempre han estado conmigo apoyándome incondicionalmente y enseñándome a levantar después de cada tropiezo.

Un agradecimiento especial a mi mamá por haberme acompañado y ser una luz de guía en mi camino y por su amor incondicional.

A mis hermanos, quienes jamás dejaron de estar ahí para brindarme de sus conocimientos y experiencias, de las noches de juego en equipo y las risas que alegraban nuestras vidas, sin ustedes la vida universitaria hubiese carecido de la chispa que me motivaba a seguir adelante. ¡Gracias!

Agradecer a nuestro tutor de tesis Ing. Carlos Navas por el inmenso apoyo que nos brindó y su colaboración para la realización de esta tesis.

Steven Velasco

Agradecer a Dios por haberme dado esta maravillosa oportunidad de cumplir una de mis más grandes y desafiantes metas en mi vida.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo, dedicación, compromiso y amor que me han brindado a lo largo de toda mi vida.

A mis hermanos por su apoyo incondicional que me han brindado, un agradecimiento especial.

Steev López

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a aquella persona que siempre ha creído en mí, me ha dado el aliento necesario para seguir adelante aun cuando el camino era complicado, me ha llenado de su sabiduría y conocimiento a lo largo de este trayecto, mi amigo, mi ejemplo a seguir y al gran profesional que es, mi padre.

Steven Velasco

Este trabajo es dedicado a mis padres en su totalidad, llegar hasta este punto es todo gracias a ellos, espero algún día pueda hacerlos sentir orgullosos y retribuirles al menos la mitad de todo lo que ellos se merecen, son mi modelo para seguir día a día y sin ellos probablemente hubiera desistido hace mucho tiempo.

Steev López

RESUMEN

El objetivo de una central hidroeléctrica es captar agua cruda de alguna fuente de abundante caudal como ríos, lagos o lagunas, aprovechar esta gran cantidad de energía potencial y convertirla primero en energía mecánica, para luego transformarla en energía eléctrica, después de todo este proceso se debe tomar en cuenta la descarga de las aguas de exceso.

En cada proyecto es distinta la implementación de este sistema, debido a que esto depende de varios factores uno de ellos y el más importante es la topografía en la que se implementa el sistema de descarga de las aguas de exceso.

En la central hidroeléctrica San José de Minas existe una topografía muy particular, teniendo una pendiente bastante pronunciada y de difícil acceso, por esta razón, se ha optado por la implementación de una tubería circular con rugosidad artificial en el interior de la tubería, de este modo la velocidad disminuirá y no presentará mayor socavación al suelo. En este trabajo se presentará un modelo computacional-matemático de la tubería con rugosidad artificial y un diseño matemático de un disipador frontal ubicado al final de la tubería mencionada.

ABSTRACT

The objective of a hydroelectric plant is to capture raw water from a source of abundant flow such as rivers, lakes or lagoon, take advantage of this large amount of potential energy and convert it first into mechanical energy, and then transform it into electrical energy after all this process must be taken into account the discharge of excess water.

In each project the implementation of this system is different, because this depends on several factors, one of them And the most important is the topography in which the excess water discharge system is implemented.

In the San José de Minas hydroelectric plant there is a very particular topography, having a fairly steep slope and difficult to access, for this reason, it has been opted for the implementation of a circular pipe with artificial roughness inside the pipe In this way the speed will decrease and will not present greater undermining to the ground. In this work, a computational-mathematical model of the pipe with artificial roughness will be presented and a mathematical design of a front heatsink located at the end of the mentioned pipe.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	ANTECEDENTES	10
1.2.	JUSTIFICACIÓN	10
1.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.4.	OBJETIVOS	12
1.4.1.	OBJETIVO GENERAL	12
1.4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.5.	ALCANCE	12
1.6.	HIPÓTESIS	13
2.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	13
2.1.	METODOLOGÍA CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	13
2.1.1.	CONCEPTO	13
2.1.2.	HISTORIA	13
2.1.3.	CAMPOS DE APLICACIÓN	15
2.1.4.	MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS	16
2.2.	RÁPIDAS HIDRÁULICAS	18
2.2.1.	COMPONENTES DE UNA RÁPIDA HIDRÁULICA	18
2.2.1.1.	TRANSICIÓN DE ENTRADA	18
2.2.1.2.	TRAMO INCLINADO	18
2.2.1.3.	DISIPADOR DE ENERGÍA	19
2.2.1.4.	TRANSICIÓN DE SALIDA	19
2.2.2.	TIPOS DE RÁPIDAS HIDRÁULICAS	19

2.3.	DISIPADOR DE ENERGÍA	20
2.3.1.	PÉRDIDAS DE ENERGÍA	20
2.3.2.	FUNCIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA	24
2.3.3.	RESALTO HIDRÁULICO	25
2.3.3.1.	CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO HIDRAÚLICO	27
2.3.3.2.	TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO	30
2.3.4.	PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	33
2.3.4.1.	MECANISMOS UTILIZADOS	33
2.3.4.2.	LIMITACIONES DE USO	34
2.3.5.	TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA	35
2.3.5.1.	SALTO DE ESQUI	35
2.3.5.1.1.	SALTO DE ESQUI SUMERGIDO-LISO	35
2.3.5.1.2.	SALTO DE ESQUÍ ESTRIADO	36
2.3.5.2.	CAÍDAS EN TUBO	37
2.3.5.3.	LOSAS PARA CANALES O DESCARGA DE VERTEDEROS	37
2.3.5.3.1.	LOSAS CON BLOQUES	38
2.3.5.3.2.	LOSA CON REMATE DENTADO	38
2.3.5.4.	TANQUES AMORTIGUADORES	39
2.3.5.5.	ESTANQUES AMORTIGUADORES	41
2.3.5.5.1.	ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE MENORES DE 1.7	41
2.3.5.5.2.	ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE ENTRE 1.7 Y 2.5	41
2.3.5.5.3.	ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE ENTRE 2.5 Y 4.5 O DISIPADOR USBR II	42

2.3.5.5.4.	ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE MAYORES A 4.5 O DISIPADOR USBR III	43
2.3.5.5.5.	ESTANQUES DE INMERSIÓN	44
2.3.5.6.	DISIPADOR DE REJILLAS	44
2.3.5.7.	RÁPIDAS	45
2.3.5.7.1.	LISAS	45
2.3.5.7.2.	ESCALONADAS	46
2.3.5.7.3.	COMBINADAS	47
2.4.	DISIPADORES POR RUGOSIDAD ARTIFICIAL	48
2.4.1.	TIPOS DE DISIPADORES	48
2.4.1.1.	ESCALONES	48
2.4.1.1.1.	DIQUES ESCALONADOS DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA ASENTADOS CON UNA MEZCLA FUERTE DE CEMENTO-ARENA	48
2.4.1.1.2.	ESTRUCTURAS DE ESCALONES Y RAMPAS DISIPADORAS DE ENERGÍA, DE CONCRETO SIMPLE O EMPEDRADAS	49
2.4.1.2.	ESTRUCTURAS ARTESANALES DE CAÑA GUAYAQUIL O TRONCOS	49
2.4.1.3.	COLCHONETAS DE GAVIÓN CON RECUBRIMIENTO DE PVC	49
2.5.	HEC-RAS	50
2.5.1.	DESCRIPCIÓN	50
2.5.2.	INTERFAZ	50
2.5.3.	CAPACIDADES Y VENTAJAS DE LA MODELIZACIÓN DE FLUJO EN 2D CON HEC-RAS	51

2.5.4.	LIMITACIONES ACTUALES DE LA MODELIZACIÓN EN 2D CON HEC-RAS	
		53
2.5.5.	MANEJO DEL SOFTWARE	53
2.5.6.	DATOS GEOMÉTRICOS	54
3.	MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE DISIPADORES DE RUGOSIDAD ARTIFICIAL	56
3.1.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA	56
3.1.1.	TOPOGRAFÍA	56
3.1.2.	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN JOSÉ DE MINAS	57
3.1.3.	EVENTOS DE GOLPE DE ARIETE	58
3.1.3.1.	DEFINICIÓN GOLPE DE ARIETE	58
3.1.3.2.	CAUSAS QUE ORIGINAN EL GOLPE DE ARIETE	59
3.1.3.2.1.	ARRANQUE O PARADA DE UNA BOMBA	61
3.1.3.2.2.	MANIPULACIÓN DE VÁLVULAS	61
3.1.3.3.	EFFECTOS QUE PRODUCE EL GOLPE DE ARIETE	61
3.1.4.	CÁLCULO DE CAUDAL DE EXCESO POR GOLPE DE ARIETE	62
3.1.4.1.	DEDUCCIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE GOLPE DE ARIETE	69
3.1.4.2.	GOLPE DE ARIETE POR INTERRUPCIÓN INSTANTÁNEA DEL FLUJO	69
3.2.	DISEÑO DE ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN CON RUGOSIDAD ARTIFICIAL	73
3.3.	MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE RUGOSIDAD	73

4.	DISEÑO DEL DISIPADOR FRONTAL	83
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	87
5.1.	RESULTADOS CALCULO DE GOLPER DE ARIETE	87
5.2.	RESULTADOS DEL MODELAMIENTO EN EL PROGRAMA HEC-RAS	89
5.3.	RESULTADOS DEL DISEÑO DE DISIPADOR FRONTAL	90
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
6.1.	FORMAS DE EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO POR GOLPE DE ARIETE	94
6.1.1.	CÁMARAS DE AIRE	95
6.1.1.1.	VENTAJA DE USO	95
6.1.1.2.	LIMITACIONES	95
6.1.2.	VÁLVULAS DE ALIVIO	96
6.1.2.1.	VENTAJAS DE USO	96
6.1.2.2.	LIMITACIONES	96
6.1.3.	CHIMENEAS DE EQUILIBRIO	97
6.1.3.1.	VENTAJAS DE USO	98
6.1.3.2.	LIMITACIONES	98
6.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO EN HEC-RAS	99
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
7.1.	CONCLUSIONES	99
7.2.	RECOMENDACIONES	101
8.	BIBLIOGRAFÍA	103
	ANEXOS	105

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las obras de disipación de energía son elementos fundamentales en la construcción de estructuras hidráulicas, las mismas se han ido desarrollando en base a la experiencia y a la ciencia, sin embargo, el diseño de estas estructuras se encuentra disperso en sin número de documentos, por lo que para su diseño se hace necesario disponer de un documento que agrupe toda esa información. Para el presente proyecto de titulación se utilizará información de disipadores de energía en la aplicación de redes de drenaje urbano, centrales hidroeléctricas y proyectos hidrosanitarios, con la finalidad de recolectar información y dar la mejor solución. Estas alternativas de disipadores han sido aplicadas a proyectos que requieren solucionar problemas tales como: velocidad de flujo, golpe de ariete, erosión y socavación en canales y proyectos con grandes pendientes, para ello se presentan los siguientes documentos:

- Criterios para el diseño de descargas de sistemas de drenaje pluvial en el área metropolitana de Guatemala del año 1993
- Optimización técnico – económica del pozo de bandejas como disipador de energía del año 2006.
- Modelo hidráulico físico de disipadores de energía del 2010.
- Estructuras de disipación de energía en redes de drenaje urbano del 2006

1.2. JUSTIFICACIÓN

En los proyectos de ingeniería hidráulica los problemas por socavación y erosión tienen un alto impacto y pueden provocar grandes daños no solo a la estructura en sí, también al medio natural en el que se encuentran, esto haciendo que se arrastre un volumen considerado de sedimentos trayendo así consecuencias como la configuración geológica y topográfica de la zona que pueden ser irrevertibles o que influirán en el costo a lo largo del tiempo.

Es indispensable brindar una solución con criterios de ingeniería en el tema de la hidráulica y buscar la solución técnica más viable para la disipación de energía.

En el caso específico de la central hidroeléctrica San José de Minas cuenta con una topografía muy particular con elevaciones de alto nivel que conllevan a grandes problemas el momento de la implementación de obras de ingeniería. Adicionalmente el suelo es fácilmente erosionable.

La presente investigación estará enfocada en las aguas de exceso, producto del golpe de ariete debido a que presenta un desnivel de altura de aproximadamente 200 metros de altura y una pendiente de 70 grados que evidentemente causará una afectación de socavación y erosión al final de esta descarga. Por este motivo es indispensable realizar obras de conducción y disipación de energía que no afecten a la estabilidad del suelo.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas hidráulicos de pendientes muy altas trabajan a superficie libre lo que hace que los fluidos que pasan dentro de estos alcancen velocidades demasiado altas, velocidades que pueden erosionar y arrastrar sedimentos por lo que nos vemos en la necesidad de aplicar disipadores de energía a lo largo del tramo inclinado de la tubería o del canal.

Mediante la implementación de los modelos matemáticos-computacionales utilizando varias ecuaciones de Mecánica de Fluidos y modelándolas en el software comercial HEC-RAS ya que esto nos permite economizar costos, materiales y tiempo al poder cambiar condiciones y variables hidráulicas de manera más rápida y automatizada.

Aplicando la información proporcionada por HEC-RAS se implementará un modelo matemático computacional para poder diseñar los elementos de disipación de energía incluidos en la tubería lisa de metal y así poder crear rugosidad artificial y disminuir la erosión en la descarga de las aguas de exceso de la central hidroeléctrica San José de Mina y posteriormente comprobar la eficiencia con el prototipo real construido.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar computacional y matemáticamente el comportamiento de disipadores de rugosidad artificial y disipador frontal para la descarga de las aguas de exceso de la central hidroeléctrica San José de Minas.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el funcionamiento de las estructuras hidráulicas con fuertes pendientes. y la aplicación de disipadores y su funcionamiento.
- Analizar la influencia de la rugosidad de los materiales en el comportamiento hidráulico del flujo unidireccional y sus características en la modelación en el programa HEC-RAS.
- Determinar mediante el uso del software comercial HEC-RAS el mejor medio de disipador de rugosidad artificial para la descarga de aguas de exceso por golpe de ariete de la central hidroeléctrica San José de Minas.
- Definir un modelo básico para la implementación de un disipador frontal con los datos recolectados.

1.5. ALCANCE

El presente proyecto estudiará el impacto de la implementación de disipadores de rugosidad artificial en conducciones de aguas de exceso de centrales hidroeléctricas.

Se realizarán variaciones de la rugosidad mediante el uso de modelación computacional en el software comercial HEC-RAS para aumentar la rugosidad dentro de la tubería, esto con el fin de estudiar el comportamiento de las descargas de aguas de exceso y determinar la solución óptima que brinde eficiencia constructiva, financiera y técnica.

No se utilizará algún otro modelo que incluya flujo bidireccional, además de no considerar el arrastre de sedimentos y el impacto ambiental producido por las obras actuales ni por la solución propuesta.

1.6. HIPÓTESIS

Mediante la aplicación de disipadores de rugosidad artificial se puede evidenciar una notable disipación de la energía de descarga de aguas de exceso de una central hidroeléctrica para evitar la erosión y socavación en el canal, esto como medidas emergentes o de rápida aplicabilidad.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. METODOLOGÍA CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

2.1.1. CONCEPTO

Este acrónimo hace referencia a la rama de la mecánica de fluidos denominada *Computational Fluid Dynamics*, el cual consiste en el empleo de computadores y de técnicas numéricas para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas, el arrastre de sólidos, etc. (Fernández, 2012).

2.1.2. HISTORIA

La dinámica de fluidos computacional (CFD) está basada en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes; estas son un conjunto de ecuaciones con derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido en una, dos y tres dimensiones (Anchenson, 1990).

Fueron deducidas por el ingeniero y físico francés Claude-Louis Navier y por el matemático y físico irlandés George Gabriel Stokes. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de la mecánica y termodinámica a un fluido, luego aplicando la ley de viscosidad de Newton se obtiene la formulación diferencial que es normalmente utilizada para la resolución de problemas relacionados con la mecánica de fluidos (Anchenson, 1990).

$$\rho \left(\frac{\delta V_x}{\delta t} + V_x \frac{\delta V_x}{\delta x} + V_y \frac{\delta V_x}{\delta y} + V_z \frac{\delta V_x}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 V_x}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V_x}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V_x}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta x} + \rho g_x$$

$$\rho \left(\frac{\delta V_y}{\delta t} + V_x \frac{\delta V_y}{\delta x} + V_y \frac{\delta V_y}{\delta y} + V_z \frac{\delta V_y}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 V_y}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V_y}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V_y}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta y} + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\delta V_z}{\delta t} + V_x \frac{\delta V_z}{\delta x} + V_y \frac{\delta V_z}{\delta y} + V_z \frac{\delta V_z}{\delta z} \right) = \mu \left[\frac{\delta^2 V_z}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V_z}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V_z}{\delta z^2} \right] - \frac{\delta P}{\delta z} + \rho g_z$$

Con estas ecuaciones se puede conocer el movimiento de los fluidos, tan complejos como son la atmósfera terrestre, corrientes oceánicas, o más simples como el flujo que rodea un vehículo o el agua que circula por un canal con rugosidad artificial. Por mucho tiempo resultó muy complicado el uso completo de esta metodología debido a la poca capacidad computacional que existía, pudiendo únicamente desarrollarse modelaciones en dos dimensiones o simplificando las ecuaciones de flujo hasta el punto de poder resolverlas a mano (English, 2017). La importancia de la modelación numérica nace de la necesidad de los investigadores de poder analizar varios escenarios de manera más efectiva, además de reducir las imprecisiones que pueden presentarse en los modelos físicos. Es a partir de los años 1950's en los que el desarrollo tecnológico tomó fuerza, y el uso de la dinámica de fluidos computacional empezó a ser considerado como una herramienta viable para el análisis de los procesos de flujo. A partir de 1967 esta metodología ha sido explotada para el diseño de aeronaves, y ha sido optimizada, para hacerlo más potente y accesible para desarrollos cada vez más complejos. Gran parte del desarrollo de CFD corresponde a las grandes compañías como son NASA y Boeing, y en 1995 las compañías de automóviles como GM y Ford adoptaron la tecnología para el diseño de vehículos aerodinámicos (English, 2017).

Otra aplicación de igual importancia es la modelación del comportamiento de fluidos a su paso por estructuras hidráulicas, desde la implementación de las CFD para el análisis de estructuras hidráulicas, se han generados varios casos de estudio, desde movimiento del agua en lagos y ríos, hasta el comportamiento del flujo en canales abiertos, presas hidroeléctricas, vertederos, etc. Mediante la implementación de un modelo numérico en estructuras hidráulicas se permite el

análisis de varios escenarios con relativa facilidad, cambiando las condiciones iniciales para la simulación o geometría de la obra, en tiempos relativamente cortos, en comparación con el trabajo que representa el cambio de las condiciones de una experimentación física (en laboratorio). Otra ventaja adicional de la modelación numérica es el detalle de los resultados que se obtienen, a pesar de que se trabaje con un dominio discretizado (no continuo), se tienen los parámetros de flujo (calados y velocidades entre los principales) para cada celda de domino discreto, mientras que, en una experimentación en laboratorio, generalmente las medidas son más puntuales y representativas de las condiciones promedio (Vásquez, 2013).

2.1.3. CAMPOS DE APLICACIÓN

En la industria aeroespacial, la evolución de las técnicas computacionales en la mecánica de fluidos muestra cómo emplearon estas nuevas tecnologías en el desarrollo y modelamiento de cálculos más avanzados. Sin embargo, hoy en día su utilización se ha extendido a todo tipo de procesos industriales, gracias a la universalización de códigos comerciales y a la progresiva mejora de los algoritmos que implementan.

Algunas de estas industrias son las siguientes:

- **Industria automovilística:** En la que prima el estudio de aerodinámica de vehículos, pero que también potencia el análisis de la climatización del habitáculo interior, de la refrigeración de discos de freno y bloque motor (Fernández, 2012).
- **Industria aeroespacial:** Centrada en la aerodinámica de transbordadores de aviones supersónicos y cazas militares y cohetes. También se estudia el flujo en condiciones cercanas a la ingravidez, así como las condiciones de salida y reentrada de vehículos espaciales (Fernández, 2012).
- **Industria naval:** Interesada en las características de las hélices de propulsión y en el diseño óptimo de carenas de barcos y submarinos. También se emplean estas técnicas para mejorar las prestaciones de barcos de competición (Fernández, 2012).

- **Industria de fabricación de motores:** Tanto alternativos de combustión interna, como propulsores de aviones y helicópteros, centrados en el análisis del flujo interno, la eficiencia y la transmisión de potencia, así como de las transferencias de calor y refrigeración asociadas (Fernández, 2012).
- **Industrias químicas:** Que estudia deposición de vapores químicos, flujos reactivos complejos en los que se producen intercambios de masa, calor y reacciones químicas (Fernández, 2012).
- **Industria nuclear:** Con el flujo en aquellos conductos con sustancias originadas en las reacciones nucleares, el enfriamiento del reactor y flujos en su interior, así como la eficiencia del intercambiador de calor (Fernández, 2012).
- **Industria biomédica y farmacéutica:** Para estudiar los distintos flujos vitales, flujos de aire en la caja torácica, flujos de sangre en arterias y venas y en el interior del corazón. Diseño de dispositivos para centrifugación e inyecciones intravenosas (Fernández, 2012).

2.1.4. MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

El método de volúmenes finitos es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para modelar problemas hidrodinámicos de las desembocaduras de ríos y estuarios.

Este método de volúmenes finito (también conocido como método de volumen de control) divide el dominio en un número finito de celdas no superpuestas sobre las que se impone la conservación de la variable ϕ de manera discreta. Tomando la ecuación diferencial (Fernández, 2012):

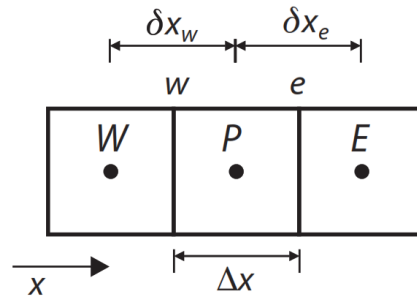
$$\frac{d\phi}{dx} + \phi = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq 1 \quad ; \quad \phi(0) = 1$$

e integrándola sobre el volumen de control unidimensional P como se plantea a continuación:

$$\int_w^e \left(\frac{d\phi}{dx} \right) dx + \int_w^e \phi dx = 0$$

Suponiendo una variación lineal entre los centroides de las celdas (en los cuales está definida la variable ϕ), y tomando el valor medio de la variación de ϕ en cada celda como $\bar{\phi}$, es directo establecer que (Fernández, 2012):

$$\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} + \bar{\phi} \Delta x = 0$$



Donde la notación adoptada es P para el nodo actual y E, W para los nodos a la derecha (este) e izquierda (oeste) respectivamente. Nótese que la aproximación anterior deja de ser exacta al haber supuesto que la variable ϕ varía de forma lineal entre los nodos de la malla. Reordenando la ecuación, se llega a (Fernández, 2012):

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b$$

Donde a_p , a_E y a_W son los coeficientes de las variables en cada nodo implicado. Ecuaciones similares se pueden obtener para cada una de las celdas de la discretización, resultando de nuevo un conjunto de ecuaciones algebraicas que se deben resolver de manera acoplada (Fernández, 2012).

En este método se garantiza la conservación de la variable sobre cada celda. Es decir: los flujos entrantes a la celda deben ser iguales a los flujos salientes. Esta propiedad, debido a la formulación, se cumple sea cual sea el tamaño de las celdas. Sin embargo, que se preserve la conservación no significa que se obtenga precisión: la solución obtenida para ϕ puede ser conservativa y a la vez imprecisa (si la discretización tiene pocas celdas) (Fernández, 2012).

2.2. RÁPIDAS HIDRÁULICAS

Las rápidas son estructuras que sirven para enlazar dos tramos de un canal donde existe un desnivel considerable en una longitud relativamente corta (Neira, 2018).

Estas rápidas son usadas para conducir agua desde una elevación mayor a una más baja. La estructura puede consistir en una entrada, un tramo inclinado, un dissipador de energía y una transición de salida. El tramo inclinado puede ser un tubo o una sección abierta. Las rápidas son similares a las caídas, excepto que ellas transportan el agua sobre distancias más largas, con pendientes más suaves y a través de distancias más largas (Marín, 2015).

2.2.1. COMPONENTES DE UNA RÁPIDA HIDRÁULICA

Una rápida hidráulica consta de la siguiente estructura:

2.2.1.1. TRANSICIÓN DE ENTRADA

La transición de entrada consiste en la transición del flujo desde el canal aguas arriba hacia el tramo inclinado que puede ser un tubo o una sección abierta. Une un estrechamiento progresivo del canal que debe proveer un control para impedir la aceleración del agua y erosión del canal (Zambrano, 2019).

2.2.1.2. TRAMO INCLINADO

El tramo inclinado con tubo o canal abierto generalmente sigue la superficie original del terreno y se conecta con un dissipador de energía en el extremo más bajo (Zambrano, 2019).

2.2.1.3. DISIPADOR DE ENERGÍA

Las pozas disipadoras o también llamadas salidas con obstáculos (baffed outlets) son usadas como disipadores de energía en este tipo de estructuras. El cambio abrupto en la pendiente, donde la pendiente suave del piso de la poza disipadora se une con el tramo corto de pendiente pronunciada, fuerza al agua hacia un salto hidráulico y la energía es disipada en la turbulencia resultante. La poza disipadora es dimensionada en los cálculos para contener el salto (Zambrano, 2019).

2.2.1.4. TRANSICIÓN DE SALIDA

Una transición de salida es usada cuando es necesario transicionar el flujo del disipador de energía y el canal aguas abajo. El tirante de aguas abajo también debe ser provisto por la construcción de un control dentro de la transición de salida. La pérdida de carga en la transición de salida es despreciable (Zambrano, 2019).

2.2.2. TIPOS DE RÁPIDAS HIDRÁULICAS

Rápida Lisa: Son aquellas estructuras revestidas con materiales de baja rugosidad, por lo que el esfuerzo cortante viscoso entre el flujo con las paredes y el fondo del canal es mínimo, lo cual aumenta la velocidad de circulación del flujo y reduce la disipación de energía (Monge, 2017).

Rápida con rugosidad artificial: En estas estructuras hidráulicas se utilizan materiales para revestir el canal, aumentando así la rugosidad de las paredes y del fondo, con el fin de reducir la velocidad del flujo y disipar energía contenida en el fluido. De esta manera se logra transportar un flujo estable, evitar deterioro de la obra y de las fuentes naturales (Monge, 2017).

Rápida escalonada: Es una mezcla entre una rápida y una caída, la sección longitudinal está compuesta de una serie de escalones, estos escalones forman continuos colchones de agua a lo largo del canal que minimizan la velocidad del flujo y aumentan la disipación de energía (Monge, 2017).

2.3. DISIPADOR DE ENERGÍA

2.3.1. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

La existencia de un gradiente de velocidad implica la existencia de esfuerzos de corte o rozamiento, ya que (Villamarin, 2013):

$$\tau = \mu \frac{d\mu}{dn}$$

En el análisis de acción de un flujo sobre un cilindro se obtuvo que la fuerza de resistencia del cuerpo para un fluido ideal es igual a cero. Para los fluidos reales la fuerza de resistencia es producto de la existencia de los esfuerzos de corte, siendo estas fuerzas el resultado de la integración de los esfuerzos de corte τ por toda la superficie (Villamarin, 2013)

$$T = \int_A u \left(\frac{du}{dn} \right) dA$$

Donde:

T : Fuerza de arrastre o resistencia de superficie

A la fuerza obtenida de esta manera se la llama resistencia de superficie, debido a que los esfuerzos de corte producidos son proporcionales a la superficie donde están actuando (Villamarin, 2013).

La existencia de los esfuerzos de corte o rasantes implica cierta transformación de energía que es proporcional a la superficie de acción; esta transformación se conoce como pérdida de energía por lo que se dice que las fuerzas de resistencia producen pérdidas de superficie (Villamarin, 2013).

A la fuerza obtenida de esta manera se la llama resistencia de superficie, debido a que los esfuerzos de corte producidos son proporcionales a la superficie donde están actuando. La existencia de los esfuerzos de corte o rasantes implica cierta transformación de energía que es proporcional a la

superficie de acción; esta transformación se conoce como pérdida de energía por lo que se dice que las fuerzas de resistencia producen pérdidas de superficie.

En resumen, la resistencia al movimiento de un cuerpo o un fluido en contacto con un cuerpo se descompone en normales y de corte o tangenciales. En ciertos puntos de la superficie del cuerpo (los puntos A y A'), debido a la desaceleración del flujo, por causa de los esfuerzos cortantes, así como por la existencia de un gradiente positivo de presiones que se opone al movimiento, la capa de fluido adyacente al cuerpo se desprende de éste, formando en la parte posterior una estela de vórtice (Villamarin, 2013).

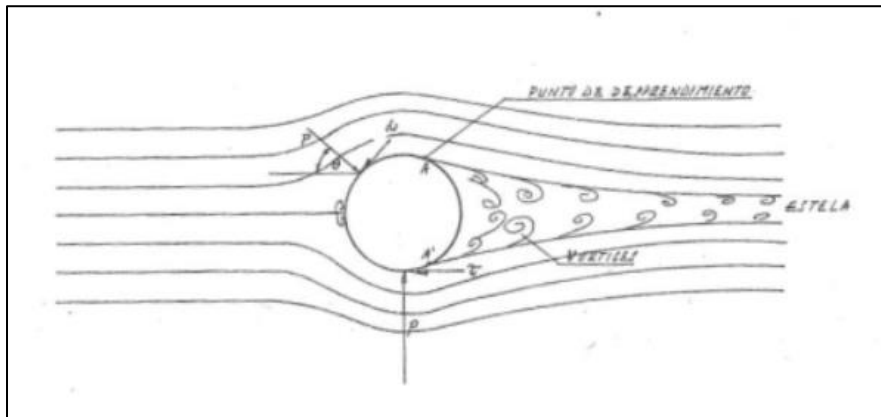


Figura 1: Desprendimiento de un flujo en un cilindro

Sandoval, W. (1993). Principios de la hidráulica. Ed. Espe. Quito, Ecuador

Indudablemente, el punto de desprendimiento o separación de la capa adyacente depende de la forma del cuerpo. Este fenómeno conduce a que la suma de los esfuerzos de presiones en los extremos anterior y posterior del cuerpo no estén en equilibrio, como en el caso del flujo con potencial (Villamarin, 2013).

A la fuerza resultante de este fenómeno se la llama fuerza de forma o resistencia de forma. A la transformación de energía, producto de este fenómeno, se la denomina pérdida de forma o local (Villamarin, 2013).

La magnitud de cada una de estas fuerzas (superficie y local) depende de la forma del cuerpo, por ejemplo: para un cuerpo de perfil aerodinámico, Fig. a, la resistencia de superficie es significativa que la resistencia de forma (Villamarin, 2013).

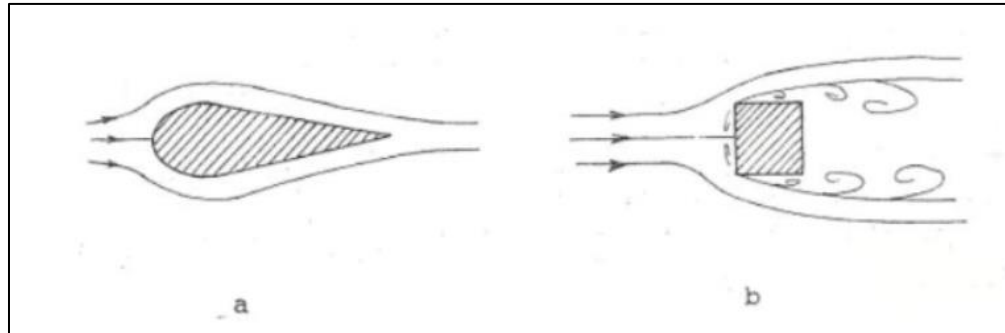


Figura 2: Resistencia en los cuerpos.

Sandoval. W. (1993). Principios de la Hidráulica, Ed. Espe. Quito. Ecuador

Para los cuerpos de contorno romo, la resistencia de forma es más significativa que la superficie. Las causas que producen la transformación de energía dan origen a la clasificación de las llamadas pérdidas de energía que son de dos tipos: pérdidas por longitud o primarias y locales o secundarias (Villamarin, 2013).

Pérdidas primarias

Son las pérdidas producto de las fuerzas de resistencia por contacto del fluido con los bordes de los cauces o contornos de los cuerpos y el rozamiento entre las mismas capas de los fluidos (Villamarin, 2013).

Pérdidas secundarias

Corresponden a las resistencias de forma y por consiguiente depende de la forma de las paredes del cauce, el contorno de los cuerpos y las condiciones del flujo, razón por la cual se les denomina

pérdidas locales. La magnitud de las fuerzas de resistencia depende de factores como: la velocidad del flujo, de los parámetros geométricos, la rugosidad entre otros (Villamarin, 2013).

Las características más importantes de una corriente son:

$$R = \frac{A}{x}$$

Donde:

R : Radio Hidráulico

A : Área de la sección transversal del flujo.

x : Parte del perímetro por la cual el flujo tiene contacto con las paredes del cauce, llamado perímetro mojado.

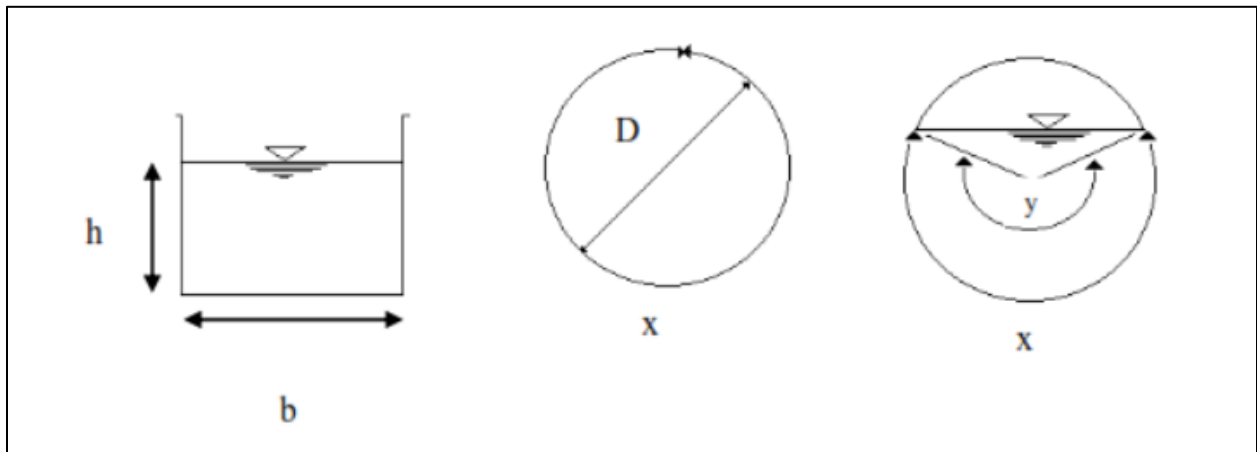


Figura 3: Características geométricas de fluidos.

Villamarin Sorayda. Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica. (2013). Quito. Ecuador

El radio hidráulico para un cauce rectangular es

$$R = \frac{A}{x} = \frac{bh}{b + 2h}$$

Para un conducto circular a sección llena

$$R = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

El radio hidráulico no es una relación que representa la forma ni dimensiones del flujo, este determina condiciones de flujo geoméricamente semejantes.

2.3.2. FUNCIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA

La energía a lo largo de las estructuras hidráulicas es generalmente grande si las descargas son a través de conductos de salida o caídas, por lo que el gasto de energía de los flujos a altas velocidades es requerido para prevenir el impacto en los cauces de ríos, minimizando la erosión, y previniendo problemas en las estructuras hidráulicas

El mecanismo de control más común, para estructuras a superficie libre, es la presencia del flujo crítico (número de Froude =1) en una ubicación bien definida, ya que en este punto es en donde se presenta la energía mínima. Sin embargo, en las estructuras de disipación de energía, por lo general el flujo de aproximación presenta variaciones entre supercrítico a subcrítico, ya que son el resultado de una amplia gama de caudales y velocidades para una geometría definida. Otro proceso que frecuentemente está presente y debe estar considerado en el análisis del flujo de aproximación es el ingreso de aire, así también como la presencia de un flujo no permanente caracterizado por un caudal pulsatorio. Estos fenómenos están relacionados con las altas velocidades de flujo, que normalmente superan los valores correspondientes al Froude crítico.

En la salida de una estructura de disipación de energía, el agua que llega con apreciable velocidad tiene un choque normal sobre el fondo. Si no se prevé la formación de un colchón de agua, existe el efecto grave de impacto del chorro a alta velocidad directamente sobre el contorno sólido. En este caso la afectación de la estructura no se limita únicamente al efecto de la abrasión sobre el fondo o paredes que reciban la incidencia del chorro, sino también a la vibración inducida.

Por tal motivo, un condicionamiento importante que debe cumplirse a la salida de una estructura de disipación de energía es la presencia de una masa de agua que amortigüe el impacto del chorro, permitiendo que la energía cinética del chorro final de caída se distribuya y se disipe adecuadamente por medio de la turbulencia local, de la vorticidad y de la introducción de aire, del intercambio de impulso a una superficie mayor. En la figura se esquematiza la definición de las condiciones del flujo aguas arriba y agua debajo de una estructura de disipación de energía que permite una correcta entrega al cauce de río.

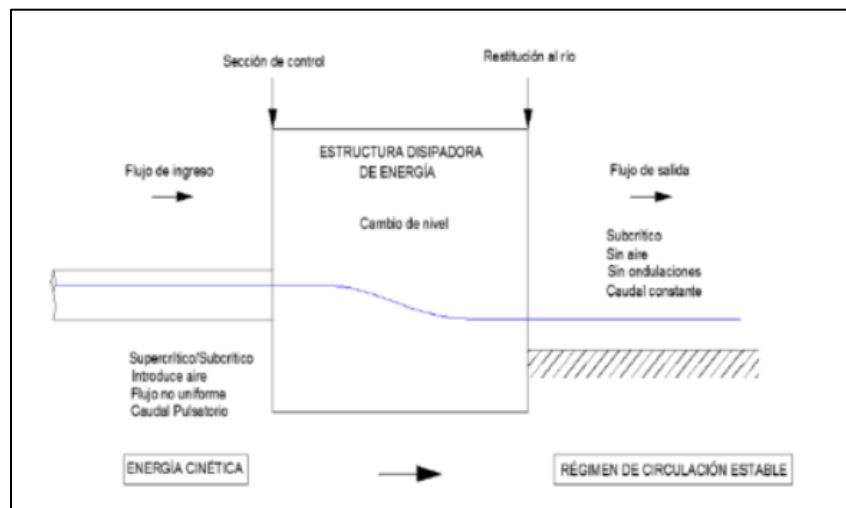


Figura 4: Condiciones de entrada y salida de una estructura de disipación de energía con restitución a un cauce de río. Juma J. 2012. Estudio en modelo hidráulica de las estructuras de salida de los túneles en el aprovechamiento hidroeléctrico soplorá.

2.3.3. RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad (Villamarin, 2013).

Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico. Es decir que la transición de este flujo se conoce como resalto hidráulico, siendo una región de flujo de variación rápida (Villamarin, 2013).

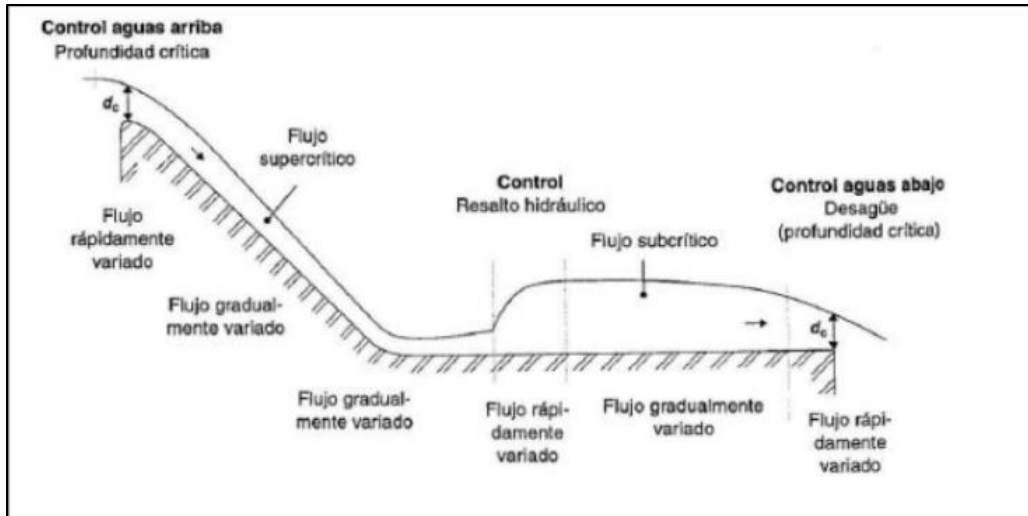


Figura 5: Transición de Flujo. Juma J. 2012. Estudio en modelo hidráulica de las estructuras de salida de los túneles en el aprovechamiento hidroeléctrico soplora.

Si el número de Froude es mayor a la unidad ($F1 > 1$), el flujo se denomina supercrítico.

En este tipo de flujo las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales. Además de esto, el flujo se presenta a velocidades y pendientes altas, y a profundidades más pequeñas. Cuando existe un flujo de este tipo en un canal un aumento en la cantidad de energía provoca una disminución de la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude, en este caso, es mayor a 1. Este estado de flujo propicia la formación de resaltos hidráulicos; estos aumentan su capacidad de disipación de energía en ciertos intervalos, alcanzando la mayor capacidad para flujos con Froude mayores a 9 (Villamarin, 2013).

Si el número de Froude es igual a la unidad ($F1 = 1$), el flujo se denomina crítico.

Este tipo de flujo presenta una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, convirtiéndolo en cierta manera en un estado intermedio y cambiante entre los otros dos tipos de flujo. Debido a esto es bastante inaceptable y poco recomendable, usarlo en el diseño de estructuras hidráulicas. Para este tipo de flujo el número de Froude es igual a 1 y en esta condición no se generan resaltos hidráulicos (disipadores de energía) (Villamarin, 2013).

Si el número de Froude es menor a la unidad ($F_1 < 1$), el flujo se denomina subcrítico.

Para este régimen de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina del agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico. Para este tipo de flujo un aumento en la energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude en este estado es menor a 1 (Villamarin, 2013).

2.3.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales a valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. El lugar geométrico en el que se presenta el resalto se denomina colchón hidráulico. Se han investigado diferentes formas de colchones hidráulicos con el objeto de lograr una mejor disipación de energía en una menor longitud. Para el diseño de colchones hidráulicos se consideran los siguientes aspectos (Villamarin, 2013).

Pérdida de energía

En el resalto hidráulico la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

Donde:

E_1 : Energía específica antes del resalto 1.

E_2 : Energía específica después del resalto.

Eficiencia

Es la relación entre la energía específica antes y después del resalto, es una función adimensional y depende sólo del número de Fraude del flujo de aproximación (Villamarin, 2013).

$$F = \frac{V1}{gy1}$$

Donde:

F : Número de Froude

V1 : Velocidad del agua en la sección de la tubería

g : Gravedad

Altura del resalto

Es la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto.

$$h_j = y_2 - y_1$$

Donde:

H_j : Altura relativa

y_2 : Profundidad inicial relativa

y_1 : Profundidad seciente relativa

Longitud

Puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hidráulico hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino (Villamarin, 2013).

Es un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas ya que definirá la necesidad de incorporar obras complementarias para reducir esta longitud y/o aplicar medidas de protección de la superficie para incrementar su resistencia a las tensiones de corte (Villamarin, 2013).

La longitud del resalto puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto y_1 hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino y_2 . Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante el número de Froude F_1 contra la relación adimensional $L/(y_2-y_1)$, L/y_1 o L/y_2 . La curva resultante de la gráfica F_1 versus L/y_2 muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos (Villamarin, 2013).

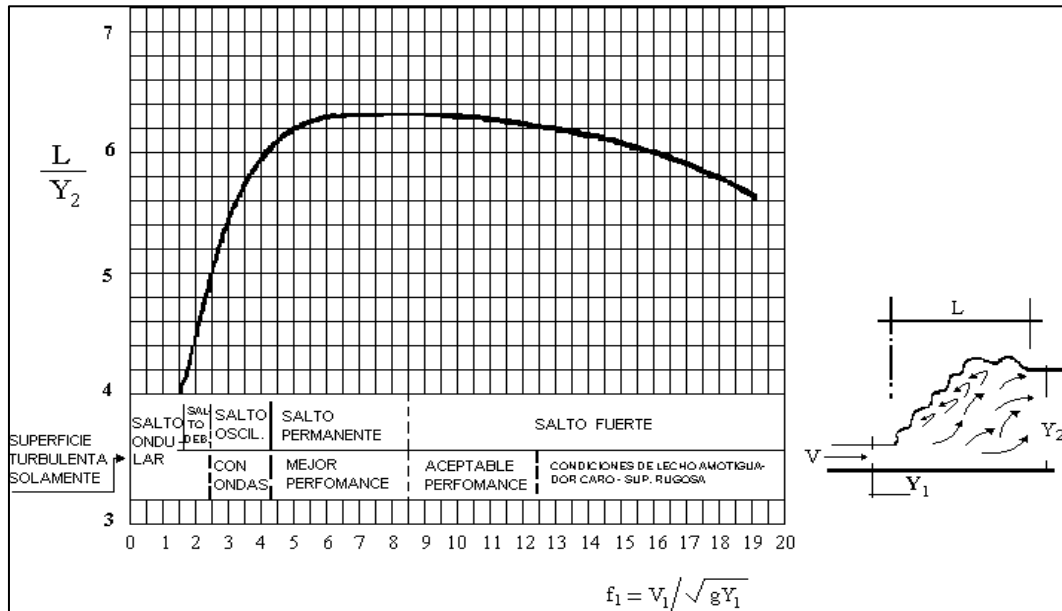


Figura 1: Relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico. Juma J. 2012. Estudio en modelo hidráulica de las estructuras de salida de los túneles en el aprovechamiento hidroeléctrico soplora.

La longitud del resalto es una variable particularmente relevante para aspectos de economía y seguridad de la obra.

2.3.3.2. TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO

Existen diferentes tipos de resalto hidráulico, cuya base de clasificación es el número de Froude aguas arriba (antes de que se produzca el resalto) (Villamarin, 2013):

$$F1 = 1$$

El flujo es crítico, por lo que no se forma resalto.

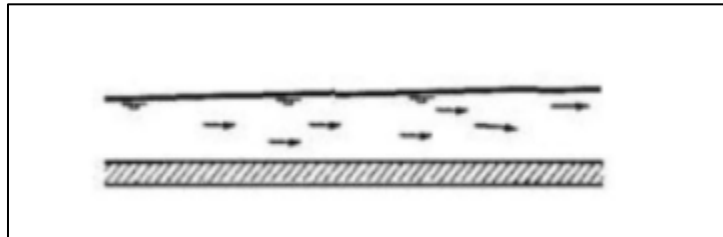


Figura 7: Resalto hidráulico Crítico. Ven Te Chow (2004). Hidráulica de canales abiertos

$$F1 = 1 \text{ a } 1.7$$

La superficie de agua muestra ondulaciones y se presenta el resalto hidráulico ondulante.

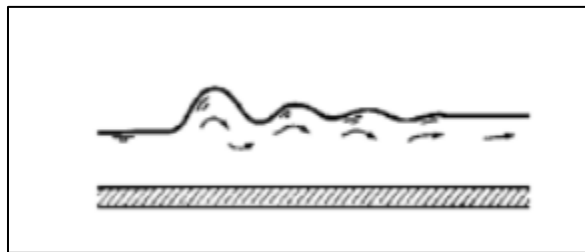


Figura 8: Resalto Hidráulico Ondulante. Ven Te Chow (2004). Hidráulica de canales abierto

$$F1 = 1.7 \text{ a } 2.5$$

El ondulamiento de la superficie en el tramo de mezcla es mayor, se presenta una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta el resalto hidráulico débil (Villamarin, 2013).

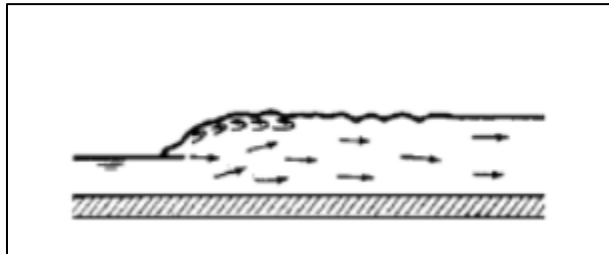


Figura 9. Resalto Hidráulico Débil. Ven Te Chow. (2004). Hidráulica de canales abiertos.

$F1 = 2.5$ a 4.5

Existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a gran distancia causando daños ilimitados a bancas de tierra y a enrocados de protección. Se produce el resalto hidráulico oscilante (Villamarin, 2013).

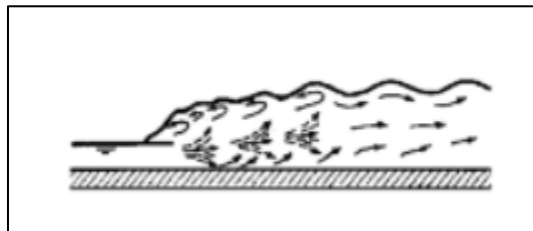


Figura 10: Resalto Hidráulico Débil. Ven Te Chow. (2004). Hidráulica de canales abiertos

$F1 = 4.5$ a 9.0

La extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado, con mayor estabilidad y el rendimiento es mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70 %. Se presenta resalto hidráulico permanente o estable (Villamarin, 2013).

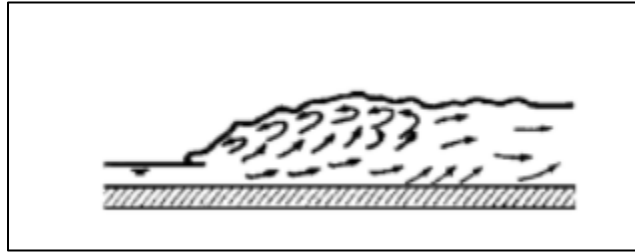


Figura 11: Resalto Hidráulico Estable. Ven Te Chow. (2004). Hidráulico de canales abiertos.

$$F1 \geq 9$$

El chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo. Existe gran ondulación de la superficie con tendencia de traslado de la zona de régimen supercrítico hacia aguas abajo. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce el resalto hidráulico fuerte (Villamarin, 2013).

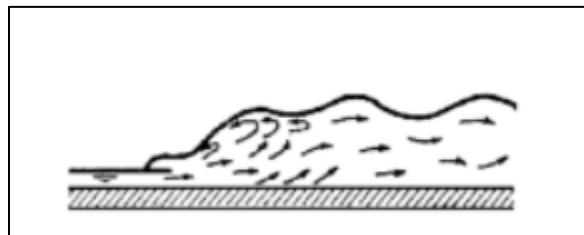


Figura 12: Resalto Hidráulico fuerte. Ven Te Chow. (2004). Hidráulica de canales abiertos.

2.3.4. PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La operación de cualquier disipador de energía debe alcanzar la eliminación del excedente de la energía cinética en un flujo, evitando así el riesgo de socavación de las estructuras y de las obras que se ubican aguas abajo (Villamarin, 2013).

En términos generales, la energía es disipada mediante procesos de difusión de la velocidad entre partículas de agua que entran con alta energía cinética dentro de una masa de agua con velocidades bajas o masa estática. Este efecto de difusión es similar al que se produce al aumento de temperatura. En base a este concepto, la energía mecánica se convierte en calor, sin embargo, este cambio de temperatura es muy pequeño y podría considerarse insignificante (Villamarin, 2013).

2.3.4.1. MECANISMOS UTILIZADOS

Para lograr los efectos que produce la disipación de energía, principalmente en hidráulica se utilizan algunas combinaciones de los siguientes métodos (Villamarin, 2013).

- Ingreso de una particular de agua dentro de una masa de agua y,
- Chorros de agua en el aire.

En el primer caso, está relacionada con el consumo de energía debido a intensos procesos de fricción interna que se manifiesta a través de la formación de vórtices, que generan principalmente en las zonas de corte o de alto gradiente de velocidad. Para inducir una eficiente disipación de energía, por lo tanto, resulta muy importante lograr zonas de alta turbulencia (Villamarin, 2013).

En el segundo caso, la disipación de energía resulta de la resistencia del aire ejercida durante la caída. Esta disipación es significativa si la altura de caída es pequeña y la diferencia de velocidades entre el chorro y el aire es considerable (Villamarin, 2013).

Frecuentemente, una combinación de estos métodos es utilizado para todo tipo de estructura de disipación. Fundamentalmente en estructuras que disipan la energía cinética mediante la fricción interna (Villamarin, 2013).

En todos los casos se logra una mayor eficiencia de la disipación de energía, mientras mayor sea la perturbación provocada en la masa del fluido (aire o agua), dentro de la que se introduce el chorro de agua con alta energía cinética (Villamarin, 2013).

2.3.4.2. LIMITACIONES DE USO

Como condición de prevención es necesario tener en cuenta que la disipación de energía se logra correctamente por una fuerte turbulencia o por una efectiva difusión del flujo. Sin embargo, los diseños de un disipador de energía y elementos hidrodinámicos están expuestos constantemente a estos efectos que pueden tener grandes consecuencias para la estabilidad de las propias obras tales como (Villamarin, 2013):

- Vibraciones
- Pulsaciones
- Abrasión o
- Cavitación
- Erosión.

Los disipadores de energía deben, por lo tanto, ser diseñados para resistir todos los efectos muchas veces inevitables desde el punto de vista dinámico. Desafortunadamente, no existe material capaz de soportar firme y permanentemente los efectos de cavitación, ni tampoco de abrasión. Esto representa una limitación importante para el dimensionamiento que debe ser considerada (Villamarin, 2013).

Es necesario, conocer y aplicar adecuadamente los límites físicos impuestos por los materiales comúnmente utilizados. La mayoría de los disipadores de energía se debe construir en acero o

concreto, de tal modo que las propiedades de estos materiales de construcción comunes fijen los límites de aplicación del diseño hidráulico (Villamarin, 2013).

2.3.5. TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA

2.3.5.1. SALTO DE ESQUI

Se utiliza para grandes descargas, principalmente en los vertederos. Ésta se hace directamente sobre el río. Se utilizan unos trampolines para hacer saltar el flujo hacia un punto aguas abajo reduciendo así la erosión en el cauce y el pie de la presa. La trayectoria del chorro depende de la descarga, de su energía en el extremo y del ángulo con el que sale del trampolín. Su funcionamiento se ve con la formación de dos remolinos uno en la superficie sobre el trampolín y el otro sumergido aguas abajo; la disipación de la energía se hace por medio de éstos. Existen dos modelos, sumergido y estriado, ambos con igual funcionamiento hidráulico y con las mismas características, que difieren únicamente en la forma de salir el agua (Villamarin, 2013).

2.3.5.1.1. SALTO DE ESQUI SUMERGIDO-LISO

El funcionamiento hidráulico de este tipo de disipador se manifiesta por la formación del resalto hidráulico en la superficie del esquí. El uso de los disipadores esquí sumergido puede ser perjudicial debido al desgaste que produce en las superficies de concreto, causado por el material que regresa a lo largo del borde del deflector debido al remolino en el fondo (Villamarin, 2013).

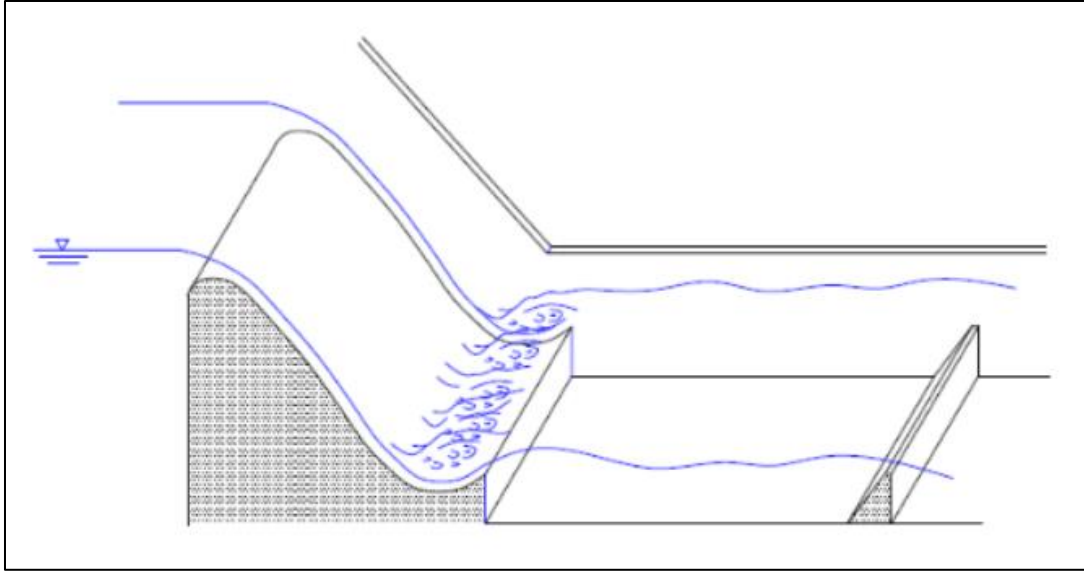


Figura 13: Salto de esquí sumergido. Ortiz F. (2010). Modelo hidráulica físico de disipadores de Energía, como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Tesis de grado

2.3.5.1.2. SALTO DE ESQUÍ ESTRIADO

Este tipo de disipador contiene estrías en el deflector obligando a separar el agua, el chorro de alta velocidad sale del borde con un ángulo menor, y solamente parte del chorro de alta velocidad va a dar a la superficie. De esta forma se produce una turbulencia menor en la superficie del vertedero, evitando así su erosión. Este tipo de disipador es más eficiente que el disipador esquí liso, ya que la corriente de agua es dividida por las estrías acelerando la dispersión de energía, el disipador tipo esquí estriado puede o no ser sumergido dependiendo las profundidades del cauce (Villamarin, 2013).

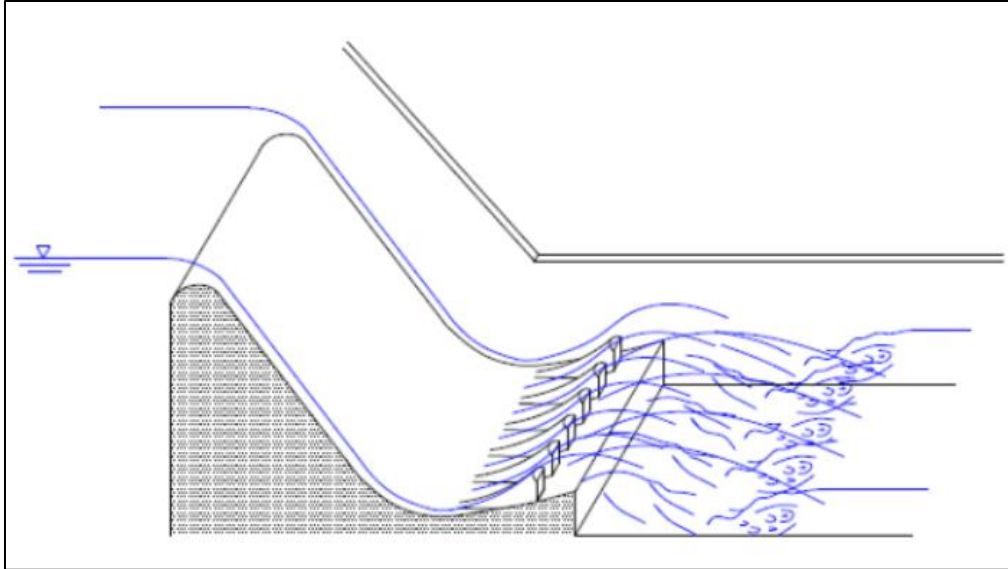


Figura 14: Salto de Esquí estriado. Ortiz F. (2010). Modelo hidráulica físico de disipadores de Energía, como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Tesis de grado

2.3.5.2. CAÍDAS EN TUBO

En estas obras, el agua entra en una cámara desde la que sale una tubería que baja el desnivel que se quiere salvar. La energía que adquiere el agua en la tubería se disipa en la salida, producto del choque que se produce contra una pantalla ubicada en la cámara terminal de la obra (Villamarin, 2013).

2.3.5.3. LOSAS PARA CANALES O DESCARGA DE VERTEDEROS

Se usa en canales donde el agua debe bajarse de una elevación a otra. La losa impide aceleraciones inconvenientes del flujo a medida que el agua avanza por el vertedero. El canal puede diseñarse para descargas hasta de $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ por metro de ancho y la caída puede ser tan grande como sea estructuralmente factible. Con la losa el agua llegará al pie del vertedero con una velocidad relativamente baja y no requerirá tanque amortiguador. Estas losas están provistas de accesorios

especiales que incluyen bloques, umbrales y pilares deflectores. Estos accesorios tienden a estabilizar el resalto y por consiguiente mejoran su comportamiento (Villamarin, 2013).

2.3.5.3.1. LOSAS CON BLOQUES

Los bloques en la rápida se utilizan para conformar una estructura dentada a la entrada del canal de entrega. Su función es dividir el chorro de entrada y elevar una parte de él desde el piso, produciendo una longitud de salto más corta que la que sería posible sin ellos (Villamarin, 2013).

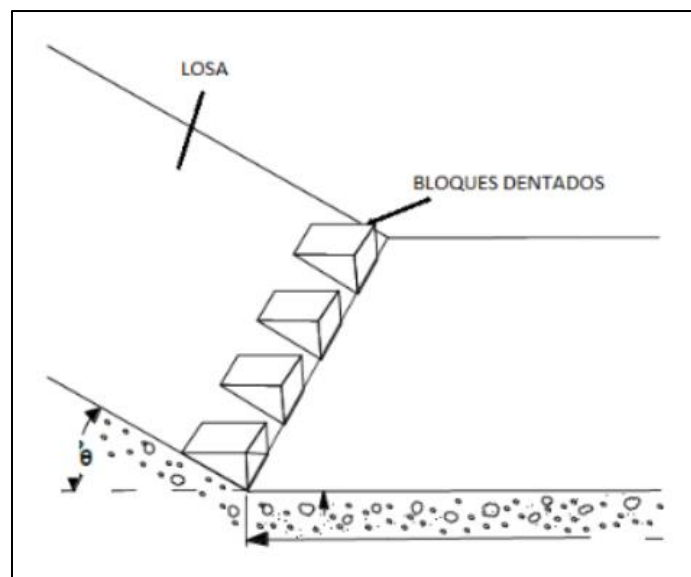


Figura 15: Losa con Bloques Dentados. Ortiz F. (2010). Modelo hidráulica físico de disipadores de Energía, como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Tesis de grado

2.3.5.3.2. LOSA CON REMATE DENTADO

Los umbrales dentados a menudo se colocan al final del canal de entrada. Su función es reducir además la longitud del resalto y controlar la socavación. Para canales largos, diseñados para altas velocidades de entrada, remate o umbral, por lo general, es dentado, para llevar a cabo la función

adicional de volar la parte residual del chorro de alta velocidad que puede alcanzar el extremo de canal de salida (Villamarin, 2013).

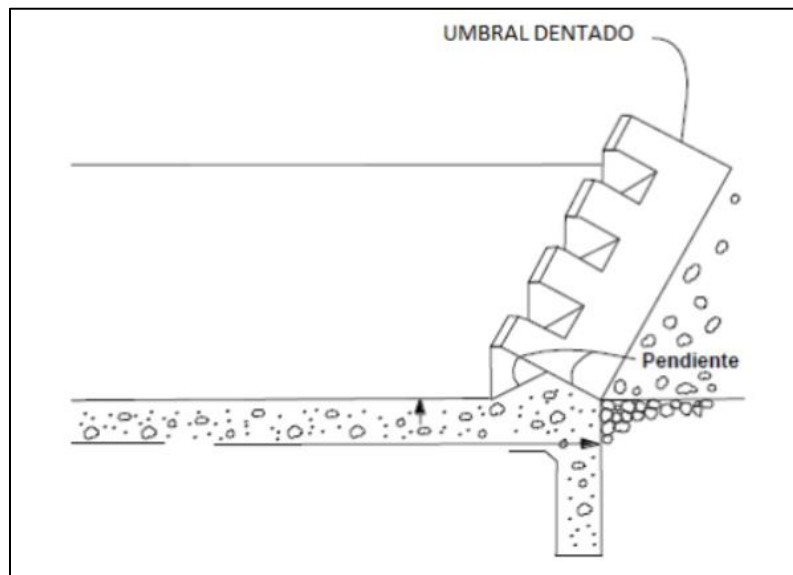


Figura 16: Umbrales a la salida del canal de entrega.

2.3.5.4. TANQUES AMORTIGUADORES

El tanque amortiguador es el sistema más común de disipación de energía que convierte el flujo supercrítico del vertedero en un flujo subcrítico compatible con el régimen del río aguas abajo. El método para lograr esta transición del flujo consiste en un simple resalto sumergido, formando un tanque de amortiguación de sección transversal rectangular. Pueden producirse variando la altura que cae el agua del vertedero o cambiando el ancho al pie de la estructura vertedora (Villamarin, 2013).

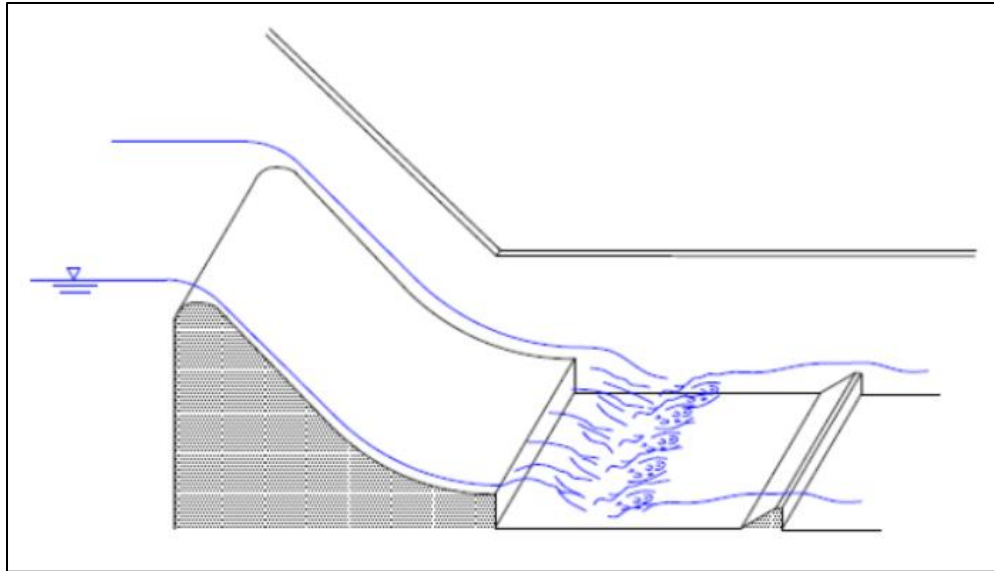


Figura 17: Disipador tipo de tanque por cambio de profundidad. Ortiz F. (2010). Modelo hidráulica físico de disipadores de Energía, como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Tesis de grado

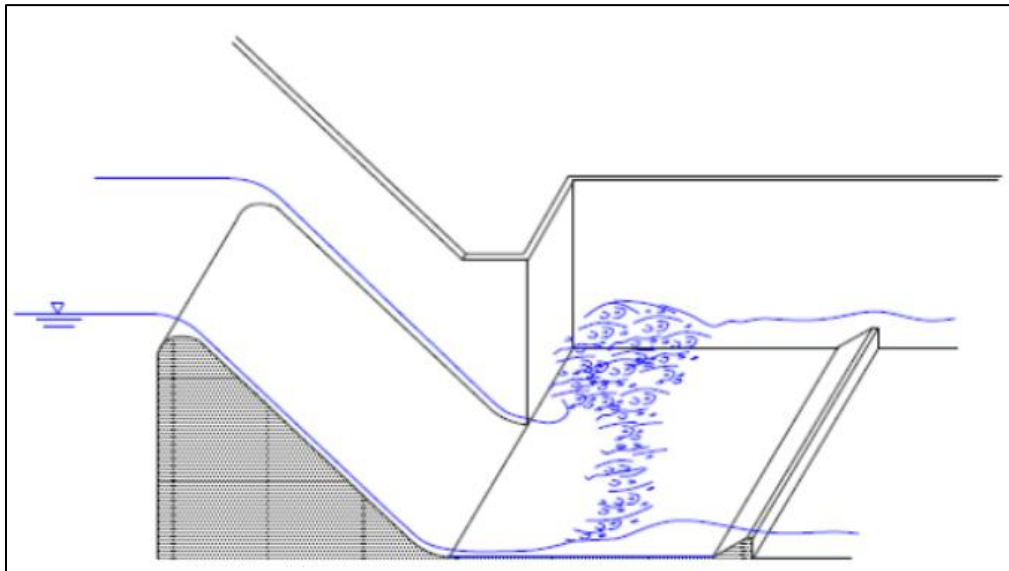


Figura 18: Disipador tipo de tanque por cambio de ancho. Ortiz F. (2010). Modelo hidráulica físico de disipadores de Energía, como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Tesis de grado

2.3.5.5. ESTANQUES AMORTIGUADORES

El resalto que se produce en un estanque amortiguador tiene características especiales y toma una forma definida que depende de la energía de la corriente que debe disiparse en relación con el tirante, el Bureau of Reclamation ha efectuado una serie completa de pruebas para determinar las propiedades del resalto hidráulico. La forma del resalto y las características de su régimen se puede relacionar al factor cinético, de la descarga que entra al estanque; al tirante crítico o al parámetro del número de Froude (Villamarin, 2013).

Estanques adecuados con relación al número de Froude pueden producir un efecto amortiguador en las diferentes formas de resalto se describe como:

2.3.5.5.1. ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE MENORES DE 1.7

Cuando el número de Froude es 1.7 el tirante conjugado es aproximadamente el doble del tirante de llegada o aproximadamente 40% mayor que el tirante crítico. La velocidad de salida es 30% menos que la velocidad crítica. No es necesario emplear estanques amortiguadores para la corriente cuando el número de Froude es menor a 1.7 (Villamarin, 2013).

2.3.5.5.2. ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE ENTRE 1.7 Y 2.5

Los fenómenos de la circulación para estanques en los que los factores que influyen en ella tienen números de Froude que varían entre 1.7 y 2.5 quedarían en la forma designada como etapa previa del resalto. Como estas corrientes no están acompañadas de una turbulencia activa no son necesarios amortiguadores ni umbrales. El estanque debe ser lo suficientemente largo para dar cabida al prisma de la corriente en la que se está produciendo la retardación. Los tirantes conjugados y las longitudes del estanque permiten construir buenos estanques (Villamarin, 2013).

2.3.5.5.3. ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE ENTRE 2.5 Y 4.5 O DISIPADOR USBR II

Los fenómenos de resalto cuando los factores de la corriente de llegada tienen números de Froude que varían de 2.5 a 4.5 se designan como regímenes de transición, porque no se forma un verdadero resalto. Los estanques amortiguadores para este tipo de régimen son menos adecuados para producir una disipación efectiva, porque el oleaje resultante ordinariamente no se puede controlar con los dispositivos usuales en los estanques. Las ondas generadas por las corrientes persistirán más allá del extremo del estanque y con frecuencia debe amortiguarse por medios diferentes del estanque (Villamarin, 2013).

Cuando se tiene que construir un dispositivo amortiguador para disipar la energía en corrientes que tienen números de Froude comprendidos dentro de esta serie, el estanque se designa con el nombre de estanque tipo I o USBR según el U.S. Bureau of Reclamation (Departamento de Recuperación de los EE. UU) (Villamarin, 2013).

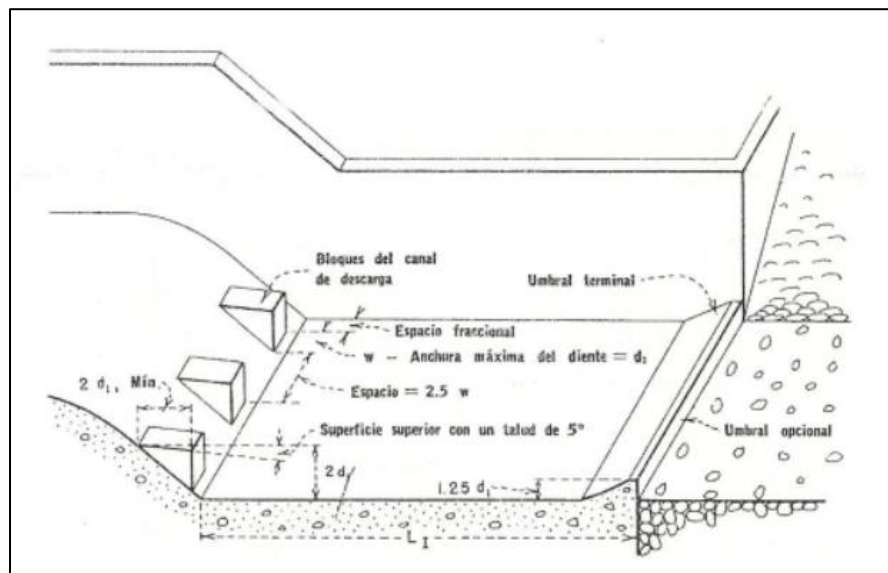


Figura 19: Dimensiones del estanque Tipo I. Diseño de presas pequeñas. Pg. 325.

2.3.5.5.4. ESTANQUES PARA NÚMERO DE FROUDE MAYORES A 4.5 O DISIPADOR USBR III

En los estanques en los que el valor del número de Froude del agua que llega es mayor de 4.5, se forma un verdadero resalto hidráulico. Los elementos del resalto varían de acuerdo con el número de Froude. La instalación de dispositivos adicionales, como bloques, deflectores y umbrales a lo largo del piso del estanque producen un efecto estabilizador en el resalto lo que permite acortar el estanque y proporciona un factor de seguridad contra el deslizamiento del resalto debido a lo inadecuado del tirante del agua de descarga (Villamarin, 2013).

El estanque que se muestra en la siguiente figura puede ser adoptado cuando las velocidades de llegada no excedan de 50 pies/seg. En este estanque se utilizan bloques, bloques amortiguadores y un umbral terminal, para acortar la longitud del resalto y para disipar la elevada velocidad de circulación dentro del estanque acortado (Villamarin, 2013).

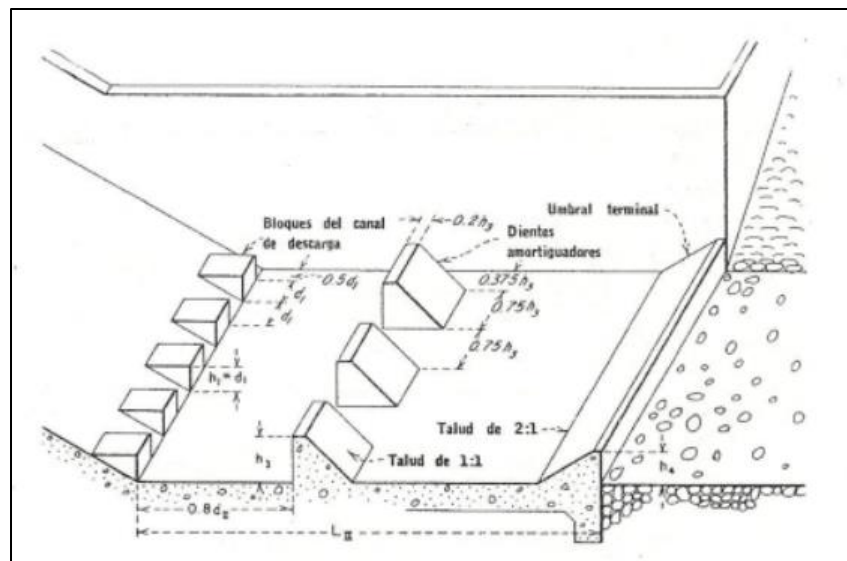


Figura 20: Dimensiones del estanque Tipo II. Diseño de Presas Pequeñas. Pg. 326.

Cuando las velocidades de llegada pasan de 50 pies/seg, o cuando se emplean bloques amortiguadores, se puede adoptar el estanque designado como del Tipo III, debido a que la disipación se debe principalmente al efecto del resalto hidráulico, la longitud del estanque será mayor que la indicada para el estanque del Tipo II. Sin embargo, todavía serán efectivos los

bloques del canal de descarga y el umbral terminal dentado para reducir la longitud que sería necesaria si no se usaran (Villamarin, 2013).

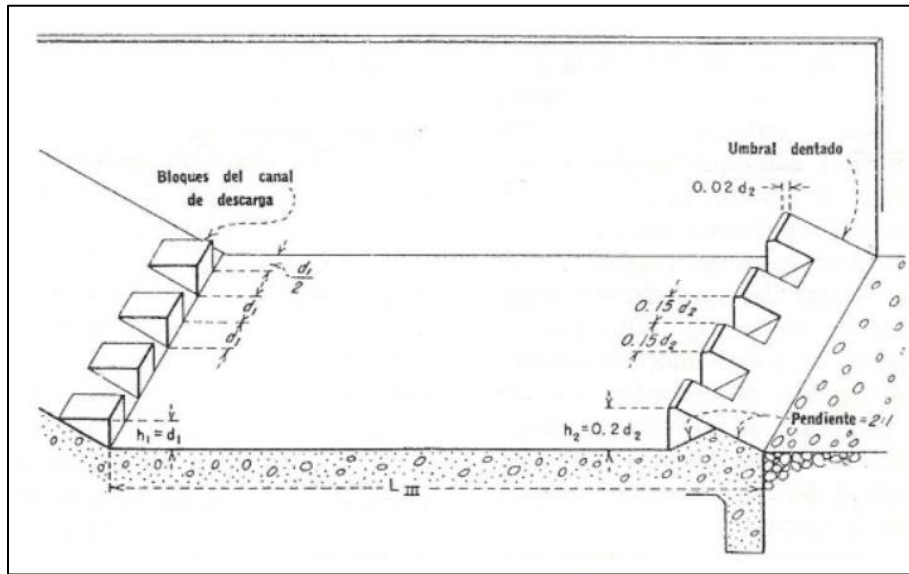


Figura 21: Dimensiones del estanque Tipo III. Diseño de Presas Pequeñas. Pg. 328

2.3.5.5. ESTANQUES DE INMERSIÓN

La energía se disipa por medio de choque ya que el agua cae libre y verticalmente en un estanque en el lecho del río. Debido al gran poder erosivo del agua, se tiene que revestir el cauce y sus paredes con rocas o concreto de modo que quede como una especie de piscina de clavados. De todas maneras, los materiales sufren mucho desgaste por el constante choque por lo cual se le debe hacer un buen mantenimiento (Villamarin, 2013).

2.3.5.6. DISIPADOR DE REJILLAS

Es un disipador efectivo para pequeñas caídas. Esta estructura se ha probado para números de Froude con valores que varían de 2.5 a 4.5, determinados al nivel del lavadero. En este sistema la lámina vertiente se separa en varios segmentos largos, delgados, que caen casi verticalmente en el

estanque que queda abajo, donde la disipación de la energía se hace por turbulencia. Para que sea efectiva, la longitud de la rejilla debe ser tal, que toda la corriente caiga a través de las ranuras antes de llegar al extremo de aguas abajo. La longitud es, por lo tanto, una función de la descarga total, de la velocidad de llegada y del área de las ranuras de la rejilla. Par mejorar el funcionamiento hidráulico se emplea un umbral semejante al del estanque del tipo I (Villamarin, 2013).

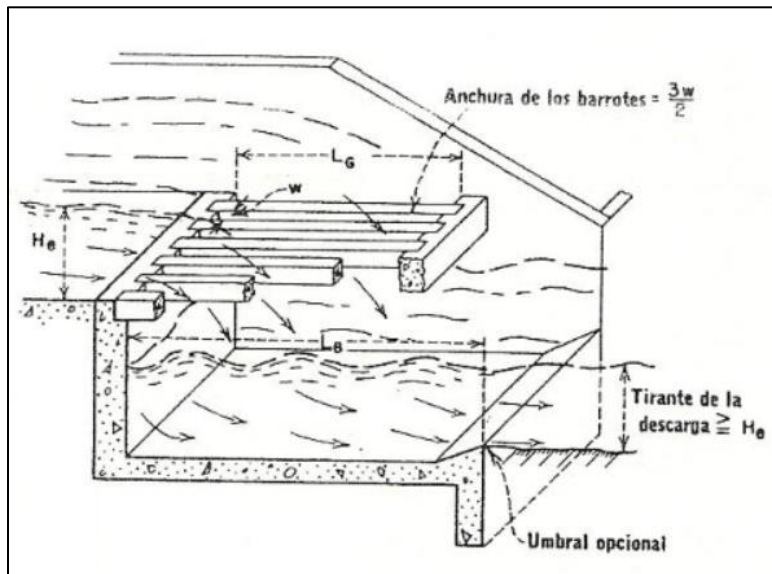


Figura 22: Disipador de rejillas de barrotes longitudinales. Diseño de presas pequeñas. Pg. 340.

2.3.5.7. RÁPIDAS

2.3.5.7.1. LISAS

Son canales de fondo liso con pendientes adecuadas al terreno y donde el agua escurre a velocidad apreciable, llegando al pie de la ladera o talud con gran cantidad de energía cinética que requiere ser disipada mediante tanques amortiguadores para no erosionar el lecho del cauce receptor del agua, ni poner en peligro la estructura por socavación de su pie. Son apropiados cuando la pendiente del terreno es superior al 30%. La estructura de este tipo de canales debe ser fuerte para soportar velocidades mayores a 6 m/s (Villamarin, 2013).

2.3.5.7.2. ESCALONADAS

Son canales con gradas o escalones donde, a la vez que se conduce el agua, se va disipando la energía cinética del flujo por impacto con los escalones, llegando el agua al pie de la rápida con energía disipada, por lo que no se hace necesaria alguna estructura adicional, o, dado el caso, una estructura pequeña. Primero, se debe definir el régimen preferencial del flujo para el caudal de diseño, en cuanto a si este sería saltante (se caracteriza por una sucesión de chorros en caída libre que chocan en el siguiente escalón, seguidos por un resalto hidráulico parcial o totalmente desarrollado) o rasante (en él, el agua fluye sobre los escalones como una corriente estable rasando sobre ellos y amortiguándose por el fluido re circulante atrapado entre los escalones), teniendo en cuenta que la disipación de la energía, en el régimen saltante, se produce en cada escalón, al romperse el chorro en el aire, al mezclarse en el escalón o por formación de resaltos hidráulicos; y en el régimen rasante, se produce en la formación de vórtices en las gradas, debido a que las gradas actúan como una macro rugosidad en el canal (Villamarin, 2013).

Para el diseño de rápidas escalonadas se recomiendan:

- Estimar el caudal de diseño.
- Evaluar la geometría del canal (pendiente, altura y ancho).
- Seleccionar la altura óptima del escalón, para obtener el régimen de flujo seleccionado.
- Calcular las características hidráulicas del flujo.
- Calcular el contenido de aire disuelto aguas abajo de la estructura. En los regímenes de flujo saltante se debe airear el salto en su caída libre de un escalón a otro.
- Diseñar la cresta de la rápida.

Calcular la altura de las paredes del canal considerando un borde libre, para recoger las posibles salpicaduras o aumentos de caudal no previstos (Villamarin, 2013).

Si se desea disipar mayor energía se puede adicionar elementos para este propósito como bloques de cemento o salientes en la grada (que bloquean el flujo), rápidas escalonadas con tapas (que interceptan los chorros de agua o rápidas escalonadas con vertedero y pantalla (Villamarin, 2013).

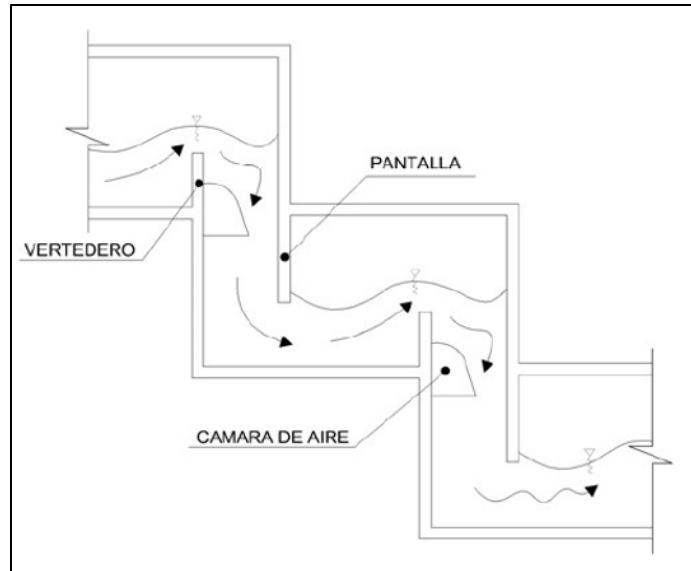


Figura 23: Rápida escalonada con vertedero y pantalla.

2.3.5.7.3. COMBINADAS

Son estructuras conformadas por canales de rápidas lisas que incluyen en su desarrollo longitudinal un escalón u otro elemento disipador de la energía cinética del flujo, prescindiendo en la mayoría de los casos del empleo de estructuras disipadoras en el pie de la estructura (Villamarin, 2013).

A este tipo de estructuras pertenecen: Canal de Pantallas Deflectoras (CPD) y Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CR TC) estas estructuras requieren de un diseño especial debido a que disipan la energía del flujo a lo largo del canal y no al pie de ésta (Villamarin, 2013).

Canal de Pantallas Deflectoras (CPD)

Es un canal de sección rectangular y fondo liso que incluye pantallas deflectoras alternas colocadas a 45° con el eje del canal, las cuales cumplen el papel de elementos disipadores de energía, y pestañas longitudinales sobre los bordes de ambas paredes del canal que impiden que la estructura rebose (Villamarin, 2013).

Canal de Rápidas con Tapa y Columpio (CR TC)

Es un canal aplicable al caso de conducciones a lo largo de pendientes altas o muy altas (entre el 50% y el 173%) conformado por una serie de rápidas lisas de sección rectangular, que se interrumpen en las terrazas de un talud tratado o cada cierto tramo, de tal forma que en la transición de una rápida a otra se tiene un columpio que deflacta el chorro y lo proyecta contra una tapa existente en el inicio de la siguiente rápidas aguas abajo. El sistema columpio – tapa es complementado con un deflector que obliga al flujo a volver al canal (Villamarin, 2013).

2.4. DISIPADORES POR RUGOSIDAD ARTIFICIAL

Son canales rugosos que disipan energía, debido a la turbulencia causada por esa rugosidad. Comúnmente se construyen de piedra pegada con concreto o de elementos prefabricados

2.4.1. TIPOS DE DISIPADORES

2.4.1.1. ESCALONES

2.4.1.1.1. DIQUES ESCALONADOS DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA ASENTADOS CON UNA MEZCLA FUERTE DE CEMENTO- ARENA

Para este tipo de estructura se deben tener un adecuado sistema de drenaje que permita evacuar el flujo de agua y lodo. Se debe mantener una descolmatación de piedras y sedimentos antes de las lluvias después de la acción de cada huayco (Villamarin, 2013).

2.4.1.1.2. ESTRUCTURAS DE ESCALONES Y RAMPAS DISIPADORAS DE ENERGÍA, DE CONCRETO SIMPLE O EMPEDRADAS

Estructura que protege las laderas, ubicadas en los cauces de las quebradas, contra la erosión del agua y flujo de lodo y rocas evitando la formación de cárcava o proteger el cauce de las cárcavas que afecten a la población asentada en la cercanía de esta. En algunos casos se hace necesaria la construcción de rampas en quebrada con pendiente fuertes, reduciéndose así la energía mediante el impacto y la disipación del aire que se produce. Se recomienda mantener una descolmatación de piedras y sedimentos antes y después de las lluvias. Por su alto costo son poco usadas (Villamarin, 2013).

2.4.1.2. ESTRUCTURAS ARTESANALES DE CAÑA GUAYAQUIL O TRONCOS

Estructura que protege a la población, ubicada en pequeñas quebradas y taludes de laderas, contra la energía hidráulica de las aguas de lluvias y lodos. Se recomendaciones mantener una descolmatación de materiales orgánicos y sedimentos antes y durante las lluvias (Villamarin, 2013).

2.4.1.3. COLCHONETAS DE GAVIÓN CON RECUBRIMIENTO DE PVC

Las colchonetas se construyeron en forma longitudinal y transversal internadamente a lo largo de los cauces, para aumentar la rugosidad del lecho y disminuir así, la velocidad de la corriente del agua, controlando la energía hidráulica (Villamarin, 2013).

2.5. HEC-RAS

2.5.1. DESCRIPCIÓN

HEC-RAS es una herramienta que ha venido evolucionando, y que a la fecha en su versión 5.0 (versión beta), cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D, así como totalmente 2D; basa su aplicación en las ecuaciones de Onda Difusiva y Saint Venant (a criterio del usuario) las cuales resuelve mediante el algoritmo de Volúmenes Finitos Implícitos. Lo novedoso de esta nueva versión, es que incorpora la ventana de interface RasMapper en la cual el usuario incorpora el modelo digital del terreno, lo cual es fundamental para la simulación en 2D (Lluén, 2015).

La evaluación de esta nueva versión de HEC-RAS nos permite entender sus capacidades y limitaciones que puedan encontrarse al desarrollar alguna simulación hidráulica. En la parte final de este trabajo HEC-RAS se contrasta con el software IBER 2.2., y de esta manera, mostrar las posibles aplicaciones de dos herramientas informáticas en el campo de la ingeniería fluvial que a primera vista podrían parecer similares, pero las diferencias en su aproximación al problema (interfaz, método de mallado, importación de datos georreferenciados, etc.), condicionan su potencial en cuanto a tipologías de problema a estudiar y resultados obtenidos (Lluén, 2015).

2.5.2. INTERFAZ

HEC-RAS es un software de uso libre, cuyo proceso evolutivo ha venido desarrollando nuevas herramientas de trabajo para el análisis de flujo en diferentes condiciones. Esta evolución va desde la versión 2.2, la cual analiza el flujo de forma unidimensional en condiciones permanentes, hasta la actual versión 5.0, que permite la modelización en una y dos dimensiones para condiciones permanentes y no permanentes. Para darnos una idea de la evolución del software, mostramos en el siguiente cuadro el tipo de modelización y las herramientas que han sido incorporadas en cada una de las versiones desarrolladas. Gráficamente, la interfaz generada en cada una de las versiones desarrolladas se puede ver en la siguiente imagen (Lluén, 2015):

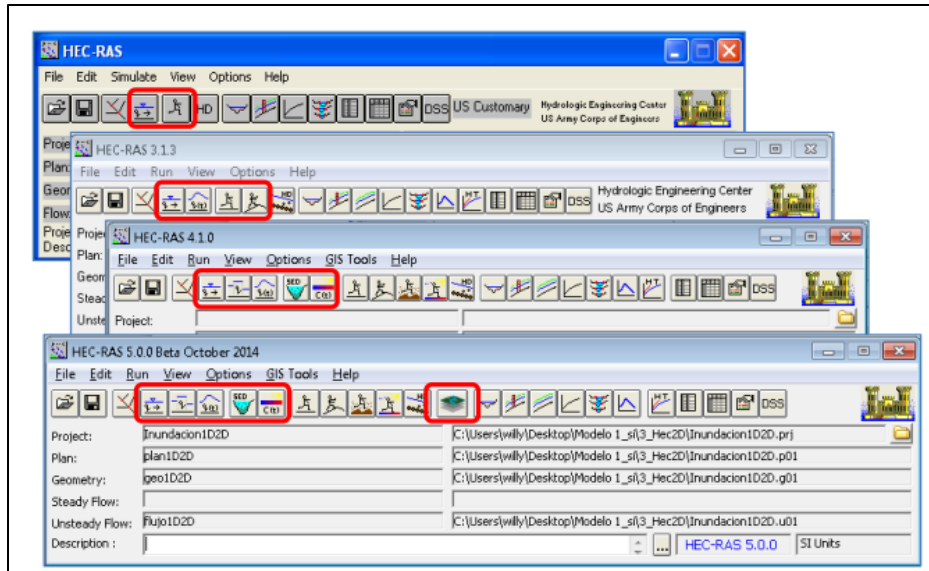


Figura 24: Interfaz Hec-Ras

2.5.3. CAPACIDADES Y VENTAJAS DE LA MODELIZACIÓN DE FLUJO EN 2D CON HEC-RAS

HEC-RAS en su versión 5.0, resulta novedosa por su análisis en 2D. Este tipo de modelización ha permitido que desarrolle nuevas capacidades para la simulación de flujo en 2D; así por ejemplo puede ejecutar modelos en 1D, 2D o una combinación de ambos. Estas capacidades serán descritas a continuación (la información fue tomada del manual del usuario de HEC-RAS 2D) (Lluén, 2015).

- Puede realizar modelización en 1D, 2D o una combinación de ambos.

La capacidad de ejecutar modelos combinados permite al usuario trabajar en amplios sistemas de ríos, por ejemplo, se puede usar el modelo 1D sobre el cauce de un río y el modelo 2D sobre las zonas adyacentes al mismo, en donde se requiere mayor detalle los resultados hidráulicos (Lluén, 2015).

- Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D.

El programa permite elegir entre las ecuaciones de Saint-Venant u Onda Difusa en 2D para llevar a cabo la modelización. De forma general las ecuaciones de Onda Difusa en 2D permiten que el software procese la información rápidamente y tiene mayores propiedades de estabilidad, sin embargo, las ecuaciones de Saint-Venant 2D son aplicables a una gama más amplia en la resolución de problemas (Lluén, 2015).

- Esquema numérico empleado: Volumen Finito Implícito.

El método de volúmenes finitos incrementa la mejora en la estabilidad y robustez sobre las técnicas de diferencias y elementos finitos; pudiendo manejar adecuadamente situaciones de flujo en regímenes Subcrítico, Supercrítico y Mixto (Lluén, 2015).

- Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos 1D y 2D.

Este algoritmo permite la retroalimentación directa en cada paso de tiempo entre los elementos de flujo 1D y 2D. Por ejemplo, el caso del río modelado en 1D que se conecta a cualquiera área (modelada en 2D) mediante algún dique (estructura lateral) (Lluén, 2015).

Si consideramos que el flujo se desplaza por encima del dique, o por efecto de la ruptura del dique, del modelo 1D hacia el 2D, entonces el programa emplea la ecuación de vertedero para resolver el cómputo del flujo. Por cada paso de tiempo, la ecuación de vertedero emplea los resultados de los modelos 1D y 2D permitiendo la contabilización exacta del vertedero sumergido (Lluén, 2015).

- Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas.

HEC-RAS 5.0 fue diseñado para trabajar con mallas no estructuradas, pero también puede trabajar con mallas estructuradas. Las celdas computacionales de una determinada malla pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o polígonos de hasta 8 lados como máximo (Lluén, 2015).

La malla computacional no necesita ser ortogonal, sin embargo, si fuera así la discretización numérica es más simplificada y eficiente (Lluén, 2015).

2.5.4. LIMITACIONES ACTUALES DE LA MODELIZACIÓN EN 2D CON HEC-RAS

A continuación, se mencionarán algunas de las limitaciones de la modelización en HEC-RAS 2D, para su versión 5.0. (La información fue tomada del manual del usuario de HEC-RAS 2D) (Lluén, 2015).

- Ofrece poca flexibilidad para añadir estructuras hidráulicas dentro de un área 2D
- No se puede ejecutar simulación de transportes de sedimentos producto de la erosión o deposición dentro de un área 2D.
- No se puede ejecutar simulación de calidad de agua dentro de un área 2D.
- No se puede conectar centrales de bombeo dentro de un área 2D.
- No se puede utilizar las capacidades de modelización de puentes de HEC-RAS dentro de un área 2D. Se pueden modelar alcantarillas, vertederos, y rupturas, pero usando la herramienta SA/2D Área Conn (Ver Figura N°9)

2.5.5. MANEJO DEL SOFTWARE

HEC-RAS 5.0 presenta una interfaz gráfica, que respecto a su versión anterior, ahora incluye un ícono con la extensión RAS Mapper (ver Figura N°1), con el cual prácticamente, inicia el proceso de modelización en 2D, y en donde, además, se pueden apreciar los resultados de forma interactiva. Se debe tener en cuenta que muchas de los pasos a seguir son similares a los que se ejecutan en las versiones anteriores del software (Lluén, 2015).

A continuación, se describirán los pasos y consideraciones necesarias para modelar el flujo de agua en HEC-RAS 5.0, a partir de un ejemplo básico que considera un canal simple que desborda, empleando parámetros referenciales para la modelización (Lluén, 2015).

2.5.6. DATOS GEOMÉTRICOS

El esquema numérico empleado en HEC-RAS 2D, permite generar una geometría de mallas estructuradas y no estructuradas, cuyos lados varían de 3 hasta 8 lados por malla. La creación de la malla se realiza desde la herramienta Geometric Data, tal y como se estila hacer para los modelos en 1D. De manera resumida, el proceso consiste en dibujar un polígono que encierre el área a evaluar, indicar el tamaño de malla que se empleará en la modelización y finalmente dibujar el borde donde se impondrán las condiciones de contorno. A continuación, se explicará los pasos necesarios para generar la geometría 2D (Lluén, 2015).

Dentro de la ventana de Geometric Data, debemos reconocer inicialmente tres herramientas básicas para generar el modelo en 2D (Lluén, 2015).

- Lo primero que debemos hacer es cargar la imagen de fondo creada en RAS Mapper; que como se dijo anteriormente nos ayudará a delimitar la zona a evaluar. Esta acción se realiza con la herramienta Background Pictures, que carga la figura georreferenciada, y por lo tanto evita generar incongruencias al momento de relacionar la geometría 2D con el modelo digital del terreno (Lluén, 2015).

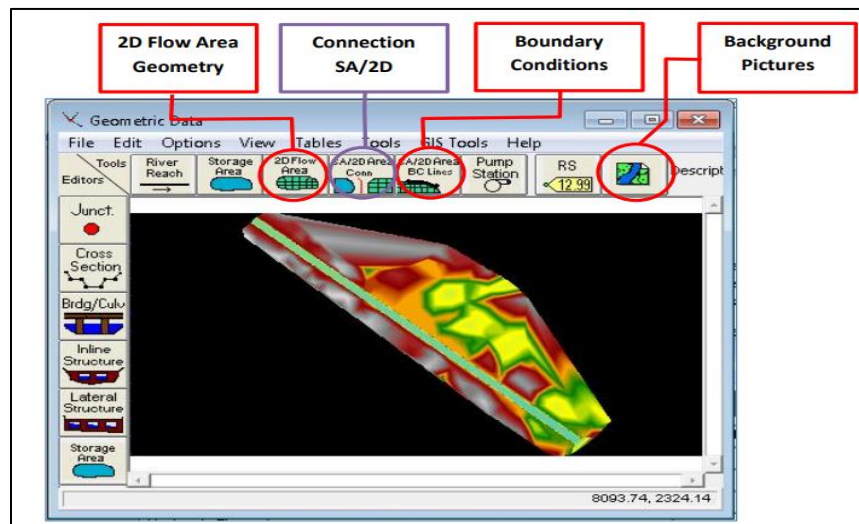


Figura 25: Datos Geométricos

- El segundo paso, consiste en delimitar el área 2D que se quiere analizar, y para lo cual se empleará la herramienta 2D Flow Area Geometry (Ver Figura N°9), que, al ser activada, el puntero que por defecto aparece en el entorno Windows, se convierte a forma de lápiz, indicando que se puede iniciar con el dibujo del polígono. Al finalizar el dibujo, aparecerá en la pantalla el polígono creado, que, al ser seleccionado, muestra una serie de opciones, de las cuales debemos elegir Edit 2D Flow Area (Ver Figura N°10) y así poder configurar algunas tolerancias para la generación de la malla 2D, colocar un valor de Manning que asumirá el programa por defecto y especificar la dimensión de la malla (Ver Figura N°11). HEC-RAS 2D, como se puede apreciar, inicia el proceso de mallado con mallas estructuradas, las cuales pueden ser modificadas con la intención de adecuarse a la morfología del terreno (Lluén, 2015).

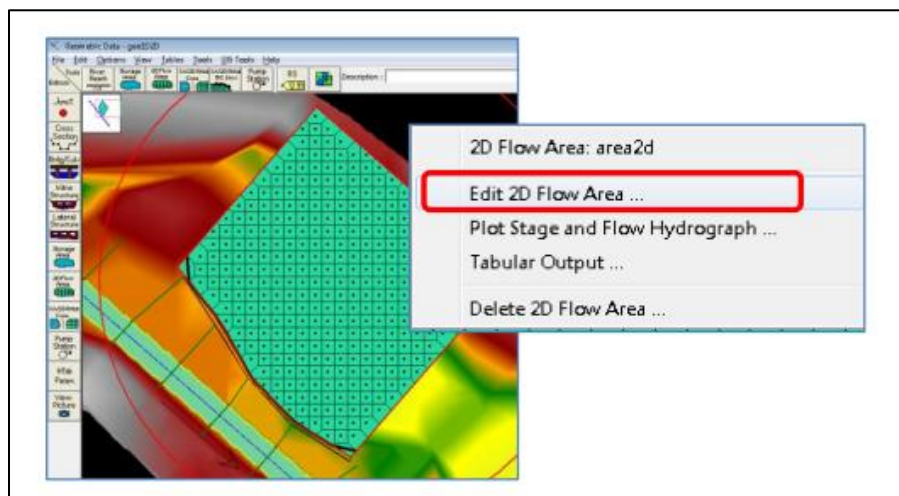


Figura 26: Datos Geométricos

- El paso final del proceso de generación del mallado 2D, consiste en indicarle al software la ubicación de las condiciones de contorno, la cual se puede realizar usando la herramienta Boundary Conditions (Ver Figura N°12). En esta etapa, al seleccionar la opción Edit BC Line Name, solo nos solicitará el nombre con el queremos designar a la condición de contorno; pues la forma de ingresar los datos hidráulicos en la modelización sigue siendo la misma que emplea HEC-RAS en sus versiones anteriores (Lluén, 2015).

3. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE DISIPADORES DE RUGOSIDAD ARTIFICIAL

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA

3.1.1. TOPOGRAFÍA

El estudio se realizó en la provincia Pichincha en la microcuenca del río Cubí. Esta microcuenca comprende una superficie de 7749,01 ha, su rango altitudinal comprende desde los 1.780 hasta los 4.200 msnm, su temperatura oscila entre los 7 a 19 °C y sus precipitaciones varían a partir de los 500 hasta 3.000 mm de lluvia anual. Esta variación morfo climática permite la conformación y establecimiento de diferentes ecosistemas naturales con una predominancia de bosques húmedos (Peralta, 2015).

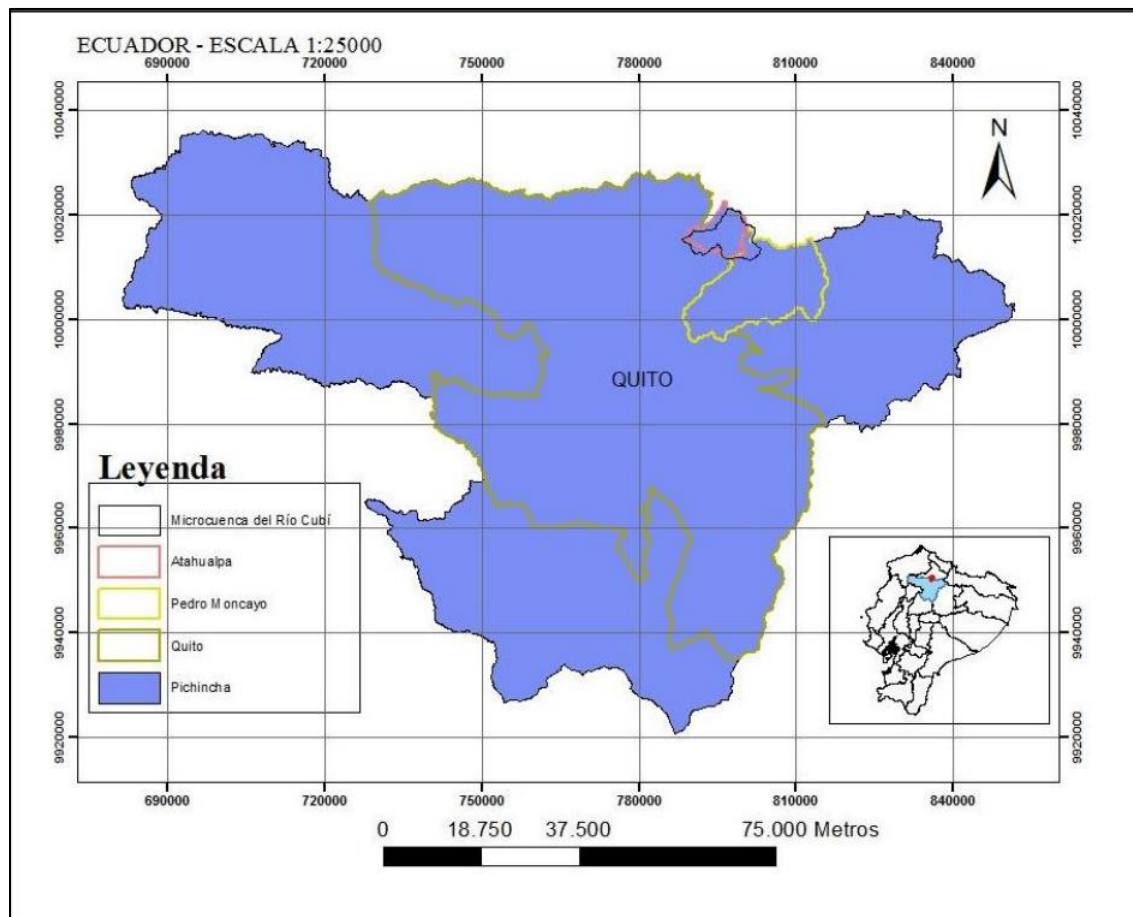


Figura 27: Ubicación comunidad San José de Minas

3.1.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN JOSÉ DE MINAS

La central hidroeléctrica tiene un azud de derivación de 2.5m de altura que desvía el flujo hasta un desarenador y después hasta un canal de conducción de 4720m, al final de este canal hay un tanque de presión que permite la puesta en carga de una tubería de acero de diámetro 1.07m y de 536m de longitud. La casa de máquinas está equipada con dos turbinas Pelton iguales en eje horizontal (HIDROPROYECTOS, 2014).

NOMBRE DEL PROYECTO	SAN JOSE DE MINAS
UBICACIÓN	CANTÓN QUITO, PICHINCHA
NOMBRE DEL RÍO	RÍO CUBÍ - RÍO PERLABÍ
COTA DE OBRA DE TOMA	1755 msnm
CAUDAL MEDIO DEL RÍO	2.29 m ³ /s
CAUDAL DE DISEÑO	8.3 m ³ /s
FACTOR DE PLANTA	1.20 m ³ /s
POTENCIA INSTALADA	6 MW

Tabla 1. Datos Técnicos Central Hidroeléctrica San José de Minas

Utilizando el software comercial HCanales se obtuvieron adicional los siguientes datos:

PARÁMETROS	CANTIDAD	UNIDAD
TIRANTE NORMAL	0.6532	m
ÁREA HIDRÁULICA	0.8913	m ²
ESPEJO DE AGUA	1.8759	m
NÚMERO DE FROUDE	4.3133	

TIPO DE FLUJO	SUPERCRÍTICO	
PERÍMETRO MOJADO (p)	2.4332	m
RADIO HIDRÁULICO (R)	0.3663	m
VELOCIDAD (v)	9.3122	m/s
ENERGÍA ESPECÍFICA (E)	5.073	m-kg/kg

Tabla 2. Datos Técnicos del programa HCanales

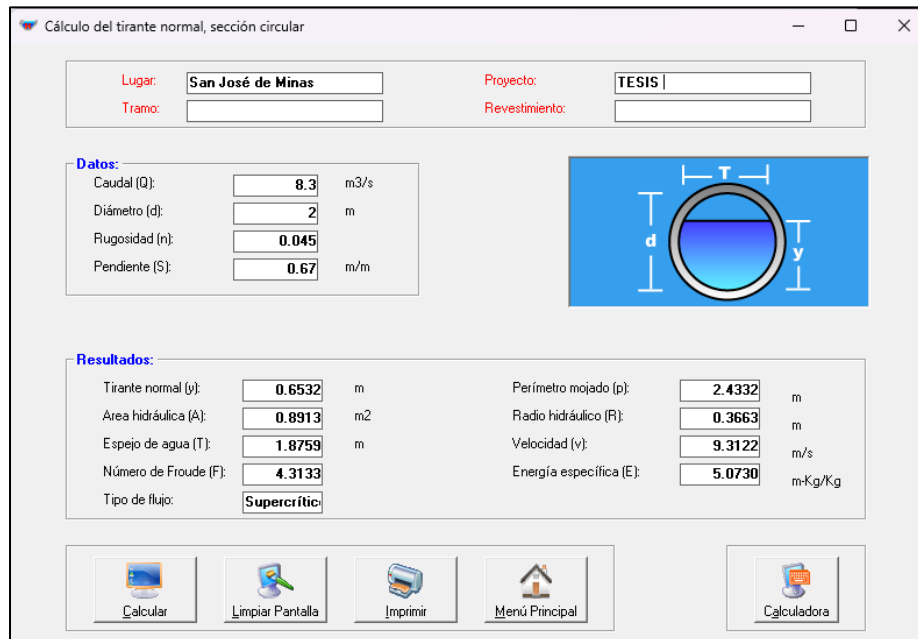


Figura 28. Resultados HCanales

3.1.3. EVENTOS DE GOLPE DE ARIETE

3.1.3.1. DEFINICIÓN GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete, también llamado “waterhammer”, puede definirse como el fenómeno hidráulico ocasionado por rápidas fluctuaciones en el flujo debido a la interrupción o inicio súbitos del flujo

en una tubería, produciendo una variación de presión por encima o debajo de la presión de operación y cambios bruscos en la velocidad del flujo (Ortiz G., 2006).

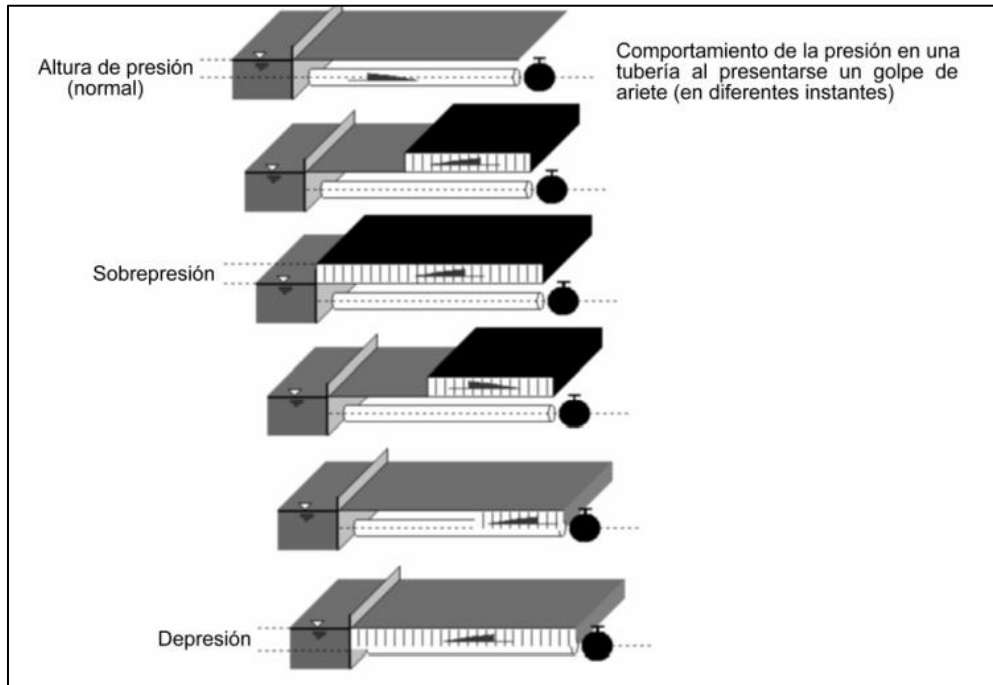


Figura 29: Estudios de transitorios: golpe de ariete. Vera César. (2006). El golpe de ariete en sistemas de abastecimientos de agua potable.

3.1.3.2. CAUSAS QUE ORIGINAN EL GOLPE DE ARIETE

Se denomina golpe de ariete a la serie de perturbaciones que son originadas en un conducto a presión, debido a los cambios más o menos bruscos del caudal que circula por el mismo, y que producen variaciones violentas de la presión interior en forma de ondas elásticas que viajan por el conducto (ESCALANTE, 1996).

Estas variaciones dentro de una tubería, en sistemas de abastecimiento de agua potable son causadas principalmente debido a:

- Operación de bombas
- Manipulación momentánea de válvulas

En un sistema con conducción por gravedad el golpe de ariete es debido a abrir o cerrar una válvula y cuando la conducción es por bombeo se debe al arranque o parada de una bomba (Ortiz G., 2006).

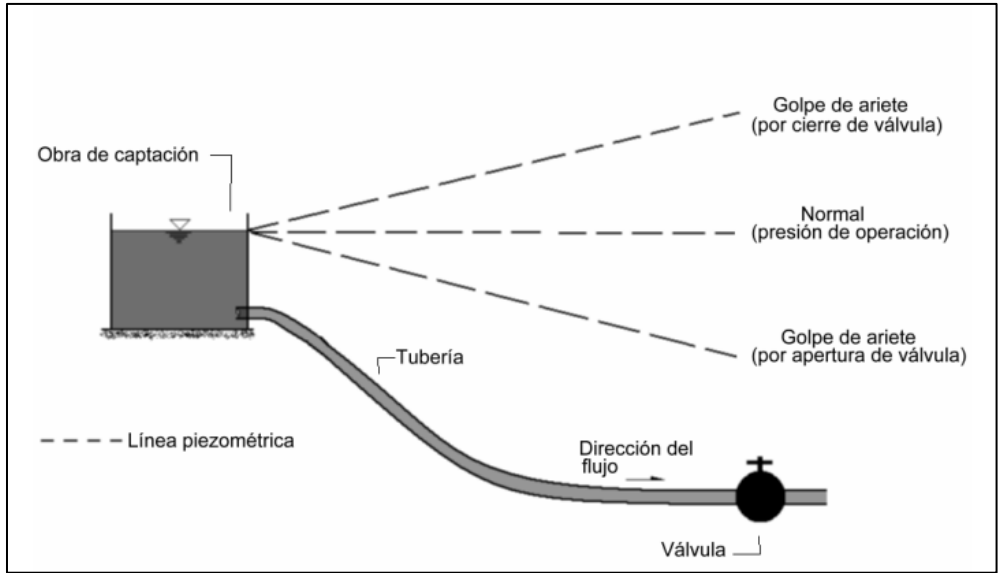


Figura 30: Golpe de ariete en una conducción por gravedad.

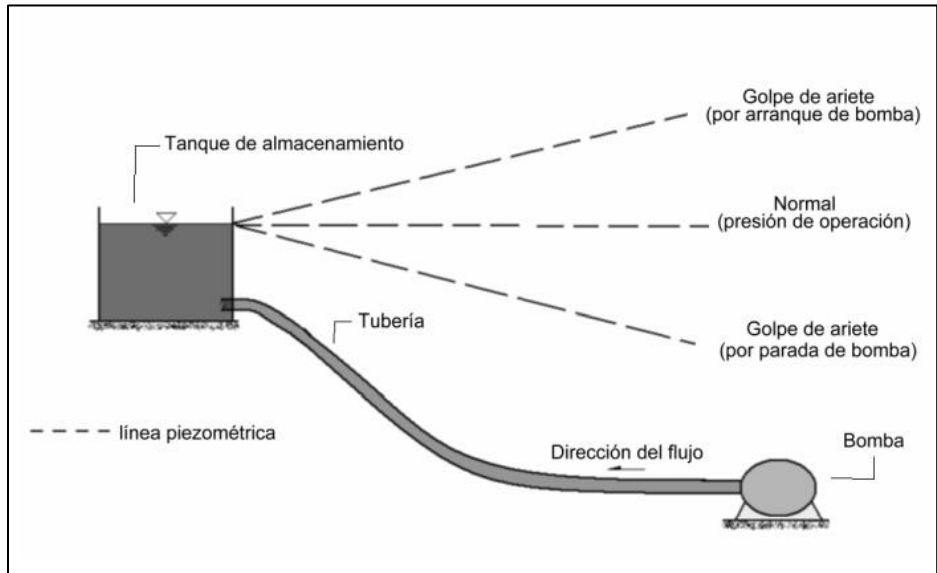


Figura 31: Golpe de ariete en una conducción por bombeo

Las situaciones a las que puede deberse la interrupción o inicio del flujo son las siguientes:

- Arranque o parada de una bomba
- Manipulación de válvulas

3.1.3.2.1. ARRANQUE O PARADA DE UNA BOMBA

Cuando se utiliza equipo de bombeo, las bombas no trabajan de manera permanente, muchas veces por razones económicas, por lo que se diseña la conducción por bombeo para funcionar en un plazo de horas diarias que son suficientes para brindar el volumen de agua necesario para cubrir la demanda del proyecto. También se interrumpe el funcionamiento por problemas fortuitos tales como la interrupción del suministro de energía a la bomba, cuando se excede la capacidad del tanque de almacenamiento, cuando existe algún desperfecto en la línea de la tubería, cuando la bomba necesita mantenimiento o cuando la bomba falla en su estado operativo (Ortiz G., 2006).

3.1.3.2.2. MANIPULACIÓN DE VÁLVULAS

Una válvula se utiliza para controlar el flujo dentro de una tubería, en ocasiones simplemente para graduar el flujo, pero en ciertas circunstancias deben de detener el flujo, por ejemplo, cuando existe la necesidad de revisar un tramo de tubería por posibles fugas, limpieza de tanques y cajas, excedencias en el suministro, etc. (Ortiz G., 2006).

3.1.3.3. EFECTOS QUE PRODUCE EL GOLPE DE ARIETE

Como consecuencia del aumento brusco y repentino de la presión dentro de un conducto ocasionada por el golpe de ariete, en un sistema de abastecimiento de agua potable pueden producirse los siguientes efectos:

- a) **Ruido:** Quizás sea el efecto menos nocivo (no afecta al sistema como tal), pero afecta a las poblaciones cercanas al lugar en donde se produce el golpe de ariete, interrumpiendo sus actividades y provocando alteraciones en su conducta lo cual puede generar estrés (Ortiz G., 2006).
- b) **Vibraciones:** Las variaciones de presión al momento de ser absorbidas por el sistema generan vibraciones en las tuberías y en las estructuras cercanas al tramo afectado, ocasionando debilitamiento en su resistencia, agrietamiento (causa de fugas), también pueden aflojar el terreno causando inestabilidad y hundimientos en el suelo. Esta situación empeora el estado del sistema gradualmente cada vez que vuelve a ocurrir el fenómeno (los daños son progresivos) (Ortiz G., 2006).
- c) **Falla en bombas, válvulas y otros accesorios:** Cada uno de los componentes del sistema está diseñado para soportar un valor de presión determinado e incluso tienen un cierto margen de tolerancia, pero el aumento de presión que ocurre en un golpe de ariete puede sobrepasar ese límite y causar desperfectos en los artefactos, teniendo que realizar en esas circunstancias reparaciones o incluso el reemplazo de la pieza dañada (Ortiz G., 2006).
- d) **Ruptura de tuberías:** El caso más indeseable que puede presentarse a causa del golpe de ariete es el colapso de algún tramo de tubería, esto requeriría atención inmediata ya que el suministro de agua quedaría interrumpido hasta el momento de corregir el problema suscitado (Ortiz G., 2006).

3.1.4. CÁLCULO DE CAUDAL DE EXCESO POR GOLPE DE ARIETE

Para plantear la ecuación de golpe de ariete se comienza con la ecuación general de la rapidez de una onda elástica, también llamada celeridad de onda, cuya formulación es la siguiente para un líquido (Ortiz G., 2006):

$$c = \sqrt{\left(\frac{Ev}{\rho}\right)}$$

Si se multiplica y divide por g:

$$c = \sqrt{\left(\frac{g * Ev}{\gamma}\right)}$$

Donde:

- c : Celeridad o velocidad de la onda
- Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- ρ : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración debida a la gravedad

Dado que el fluido viaja dentro de una tubería y esta tiene cierta elasticidad, en la ecuación anterior el módulo de compresibilidad volumétrico del fluido se reemplaza por el módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica, el cual considera la acción que ejerce la tubería ante el flujo (Ortiz G., 2006).

El módulo de compresibilidad volumétrico de un fluido Ev , es el cambio de volumen de un fluido debido a un cambio de presión, se expresa así (Ortiz G., 2006):

$$Ev = \frac{Vol dP}{dVol}$$

Donde:

- Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- Vol : Volumen unitario de fluido

dP : Cambio de presión

$dVol$: Cambio de volumen (compresibilidad del fluido)

Cuando además de deformarse el fluido (cambio de volumen), también la tubería sufre deformación, en la ecuación de E_v se agrega un nuevo término referido al cambio en la tubería debido al cambio de presión (dando lugar a E_c), la expresión queda de la siguiente manera (Ortiz G., 2006):

$$E_c = \frac{Vol \, dP}{dVol} + \frac{Vol \, dP}{dA}$$

Donde:

E_c : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica

Vol : Volumen unitario de fluido

dP : Cambio de presión

$dVol$: Cambio de volumen (compresibilidad del fluido)

dA : Cambio en la sección transversal interna de la tubería

El volumen unitario de fluido en el conducto es el área transversal interna de la tubería por unidad de longitud:

$$Vol = \pi * r^2$$

El cambio de área de la tubería puede expresarse en función del radio del conducto (variación del área a razón de la variación del radio):

$$A_{tub} = \pi r^2 \rightarrow dA_{tub} = \pi r dr$$

Donde:

- Vol* : Volumen unitario de fluido
Atub : Área interna de la tubería
dA : Cambio en la sección transversal interna de la tubería
r : Radio interno de la tubería
dr : Cambio en el radio interno de la tubería

La capacidad de deformarse de la tubería está delimitada por el módulo de elasticidad E de su material de fabricación (Ortiz G., 2006):

$$E = \frac{\text{Incremento de esfuerzo}}{\text{Incremento de Deformación Unitaria}}$$

Ya que una tubería es conducto de pared delgada, el incremento del esfuerzo es la variación del radio de la tubería a causa del cambio de presión con respecto al espesor de esta:

$$\text{Incremento de Esfuerzo} = \frac{rdP}{e}$$

La deformación unitaria de la tubería expresada en términos de la longitud de su circunferencia (perímetro) es:

$$\text{Circunferencia} = 2\pi r \rightarrow \text{Deformación Unitaria} = \frac{dl}{2\pi r}; dl = 2\pi dr$$

Sustituyendo dl en la deformación unitaria:

$$\text{Deformación Unitaria} = \frac{2\pi dr}{2\pi r} \rightarrow \frac{dr}{r}$$

Donde:

- r : Radio interno de la tubería
- dP : Cambio de presión
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería
- dl : Cambio en la longitud de la circunferencia de la tubería

Sustituyendo el incremento de esfuerzo y la deformación unitaria en E:

$$E = \frac{r^2 dP}{e dr}$$

De la expresión anterior se puede despejar la variable dP:

$$dP: \frac{e E dr}{r^2}$$

Donde:

- E : Modulo de elasticidad del material de la tubería
- dP : Cambio de presión
- r : Radio interno de la tubería
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Entonces, la compresibilidad volumétrica del conducto, sustituyendo el volumen, el diferencial del área interna de la tubería en términos del radio y la expresión hallada para el cambio de presión, tenemos (Ortiz G., 2006):

$$\frac{(\pi^2) \frac{eE dr}{r^2}}{\pi r dr}$$

Simplificando el término:

$$\frac{eE}{2r}; D = 2r \rightarrow \frac{eE}{D}$$

Donde:

- eE/D : Compresibilidad de la tubería debido a la presión
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- r : Radio interno de la tubería
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

El módulo de volumen combinado de un fluido E_c es:

$$E_c = E_v + \frac{eE}{D}$$

Arreglando la expresión de otra manera, elevando ambos lados de esta a la (-1) potencia:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE}$$

Despejando Ec:

$$Ec = \frac{1}{\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE}}$$

Donde:

- Ec : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
- Ev : Módulos de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Entonces, la ecuación de la celeridad de la onda queda de la siguiente forma:

$$C_t = \sqrt{\frac{g}{\gamma} Ec}$$

Sustituyendo Ec por la expresión completa:

$$C_t = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Donde:

- Ct : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- Ec : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
- g : Aceleración debida a la gravedad
- Y : Peso específico del fluido
- Ev : Módulo de compresibilidad del material de la tubería
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería

- D : Diámetro interno de la tubería
 e : Espesor de la tubería

Obtenida la ecuación de la celeridad se procede a la deducción de la ecuación para el cálculo del golpe de ariete.

3.1.4.1. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete nos muestra el valor máximo de presión que ocurre por su causa, es decir, el análisis se limita a conocer el valor extremo que puede suceder y no al comportamiento de este hasta que termina, ya que los elementos del sistema que puedan someterse a este fenómeno es ese valor crítico de presión que puede alcanzarse (Ortiz G., 2006).

3.1.4.2. GOLPE DE ARIETE POR INTERRUPCIÓN INSTANTÁNEA DEL FLUJO

Se determinará el tiempo que tarda una onda de presión en viajar desde el punto donde se interrumpe el flujo hasta donde inicia la tubería y vuelve otra vez al punto inicial

$$T_{cr} = \frac{Dist}{C_t} \rightarrow T_{cr} = \frac{2L}{C_t}$$

A este periodo de tiempo se le denomina tiempo crítico o tiempo de fase

Donde:

T_{cr} : Tiempo que requiere una onda de presión para pasar de un extremo a otro de la tubería y volver al punto de partida

$Dist$: Distancia que debe recorrer la onda de presión

L : Longitud del tramo de tubería

C_t : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Durante el tiempo T_{cr} , la onda de presión permanece constante (máximo valor de presión por el golpe de ariete). La presión comienza a decrecer paulatinamente de acuerdo con la oposición que ofrece la tubería (deformándose) y por la compresibilidad del fluido. Continúan generándose ondas, cada vez de menor magnitud, hasta que se regulariza o normaliza la presión del fluido en el conducto después de un tiempo y número de ondas determinado (Ortiz G., 2006).

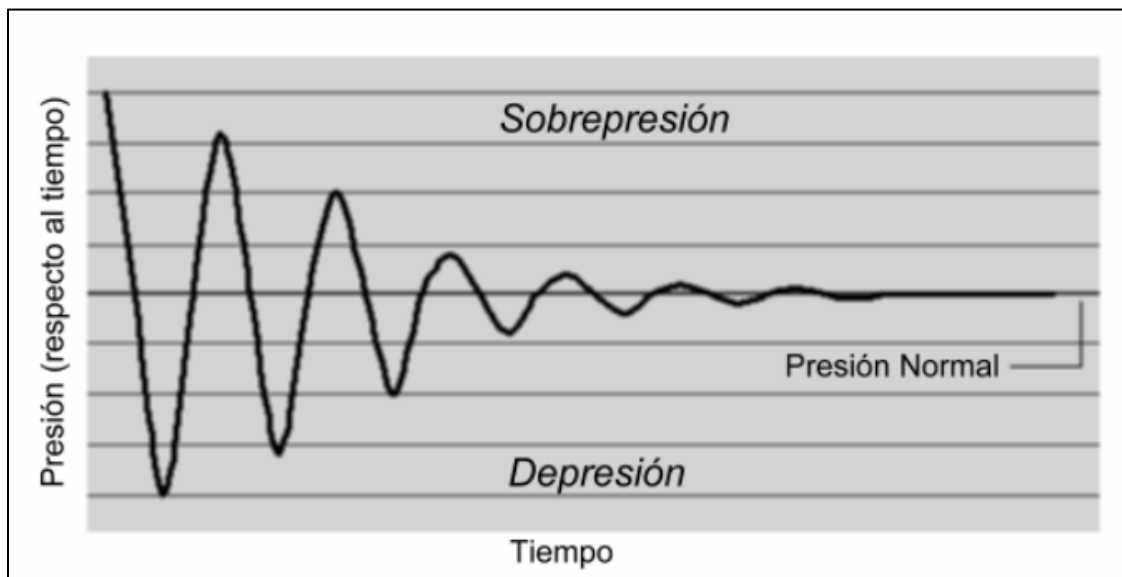


Figura 32: Estudio de transitorios

Para calcular el cambio de presión causado por el golpe de ariete, se procede de la manera siguiente:

Al momento de la interrupción del flujo se propaga una onda de presión con velocidad C_t ; al transcurrir un intervalo de tiempo, el fluido de longitud $C_t\Delta t$ (despejando de la ecuación del tiempo crítico) sufre una desaceleración. La masa de fluido desacelerada en ese intervalo de tiempo es:

$$m = \rho(Vol); Vol = AL_f \rightarrow Vol = A(C_t\Delta t)$$

Sustituyendo Vol en la ecuación de la masa:

$$m = \rho A(Ct\Delta t)$$

Donde:

m : Masa del fluido

ρ : Densidad del fluido

Vol : Volumen del fluido

A : Área transversal interna de la tubería

$L_f, Ct\Delta t$: Longitud del fluido

Ct : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Δt : Intervalo de tiempo transcurrido después de la interrupción del flujo

Si se aplica la segunda ley de Newton y se desprecia la fricción, tenemos:

$$F\Delta t = m\Delta V$$

Sustituyendo términos para la situación del golpe de ariete:

$$[PA - (P + \Delta P)A]\Delta t = (\rho ACt\Delta t)\Delta V$$

F : Fuerza debida a la presión

Δt : Intervalo de tiempo transcurrido después de la interrupción del flujo

m : Masa del fluido

ΔV : Cambio de velocidad del flujo

P : Presión normal en el conducto

A : Área transversal interna de la tubería

- ρ : Densidad del fluido
- Ct : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Considerando a ΔP como el golpe de ariete que se produce en un conducto por interrupción del flujo, de manera resumida puede decirse que el golpe de ariete por interrupción instantánea, total o parcial del flujo, simplificando la ecuación anterior (Ortiz G., 2006):

$$GA = -\Delta V \rho Ct$$

Sustituyendo Ct de la ecuación anterior, la ecuación para el golpe de ariete por interrupción instantánea, parcial o total del flujo queda de la siguiente manera:

$$GA = -\Delta V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}; \quad \Delta V = Vf - Vo$$

Donde:

- GA : Golpe de ariete (valor de presión)
- ΔV : Cambio de velocidad del flujo
- Vf : Velocidad del flujo después de la interrupción
- Vo : Velocidad del flujo antes de la interrupción
- ρ : Densidad del fluido
- Ct : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración debida a la gravedad
- Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería

- D : Diámetro interno de la tubería
 e : Espesor de la tubería

La interrupción instantánea del flujo es imposible que ocurra en la realidad, lo que sucede realmente, es una interrupción rápida, ya que se emplea cuando menos un tiempo T_c para interrumpir el flujo (Ortiz G., 2006).

Se considera que la interrupción del flujo es rápida cuando el tiempo a emplear en el proceso es mayor que cero, pero menor o igual al tiempo T_{cr} en que se desplaza la onda de presión:

$$\text{Interrupción rápida} \rightarrow tc \leq T_{cr}$$

3.2. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN CON RUGOSIDAD ARTIFICIAL

De acuerdo con la topografía del terreno y características hidráulicas, se plantea que la mejor alternativa para captación y recolección de las aguas de exceso de la Central Hidroeléctrica San José de minas, debe ser una tubería circular de acero, esto en cuanto a la facilidad de implementación y construcción.

Esta tubería de acero circular, para aumentar su coeficiente de rugosidad y de este modo disminuir la velocidad de descarga de las aguas de exceso, se ha optado por implementar dentro de la tubería varillas de acero de diámetro doce (12) el cual ayudaran a disminuir gradualmente la velocidad.

3.3. MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE RUGOSIDAD

Se procede a crear un nuevo proyecto donde se recomienda especificar la sección en la que se está trabajando como se observa en la imagen.

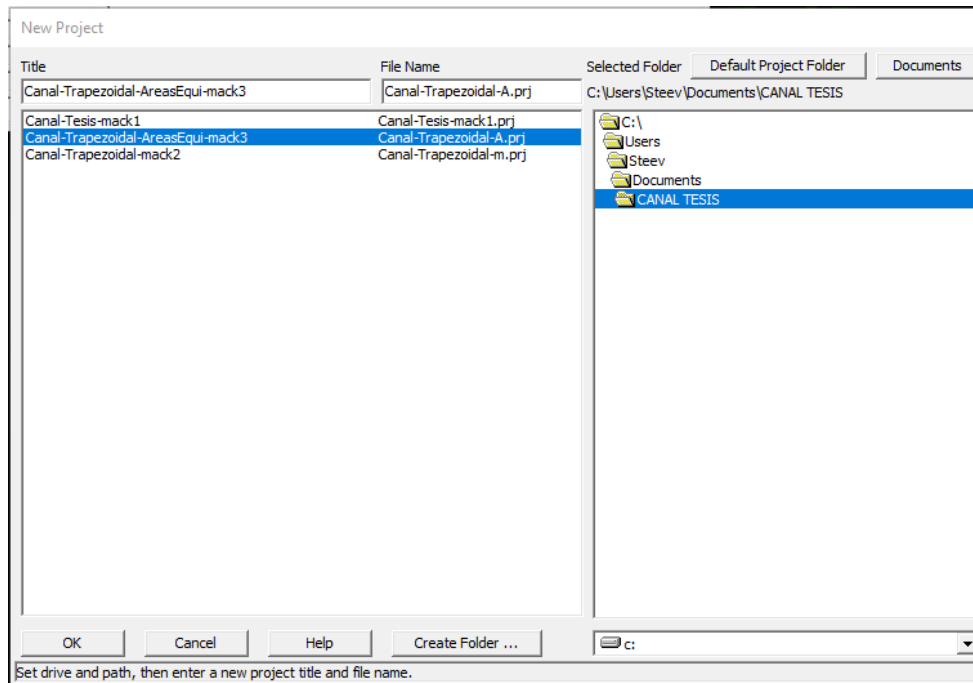


Figura 33. Obtenido de Hec-ras

Se insertará la dirección de río, sea el caso en estudio en la dirección o pendiente de aguas arriba hacia aguas abajo como se presenta en la siguiente figura.

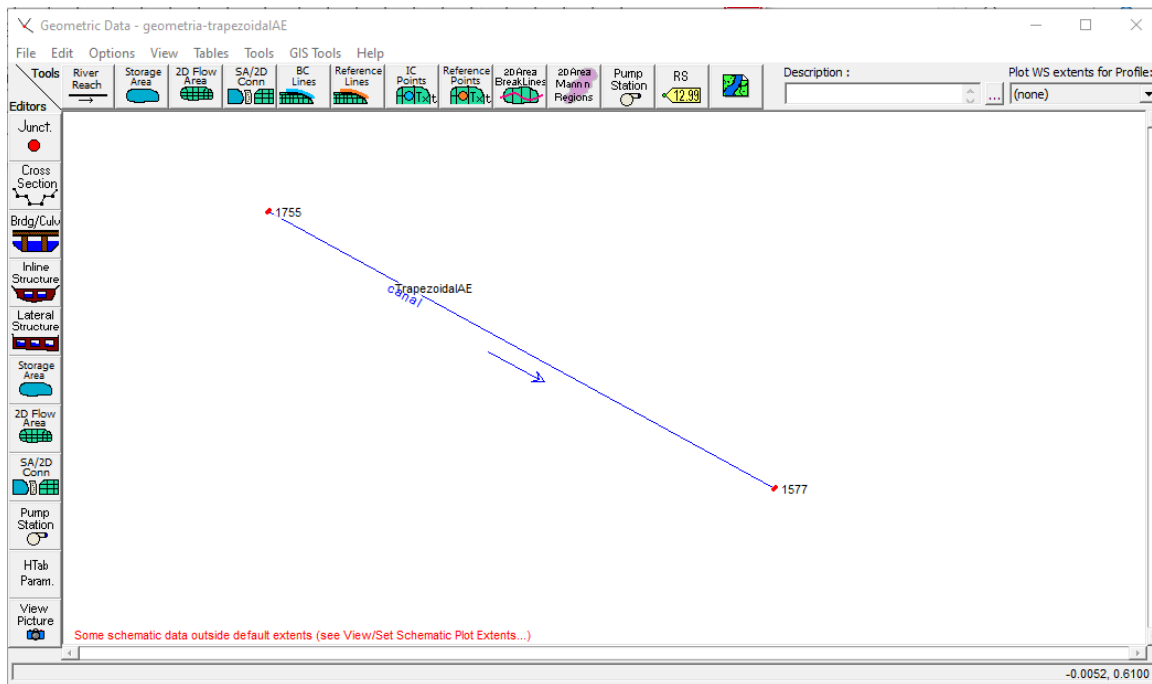


Figura 34: Obtenido de Hec-ras

Insertamos nuestra sección aguas arriba del canal; es importante recalcar que la sección propuesta fue una tubería circular de 2 metros de diámetro, para facilidad del cálculo se modeló como una sección trapezoidal con áreas equivalentes para ello se ingresaron de acuerdo con las siguientes dimensiones:

ESTACIÓN (m)	ELEVACIÓN (m)
0.00	2.00
0.50	0.00
1.50	0.00
2.00	2.00

Tabla 3. Dimensiones del canal

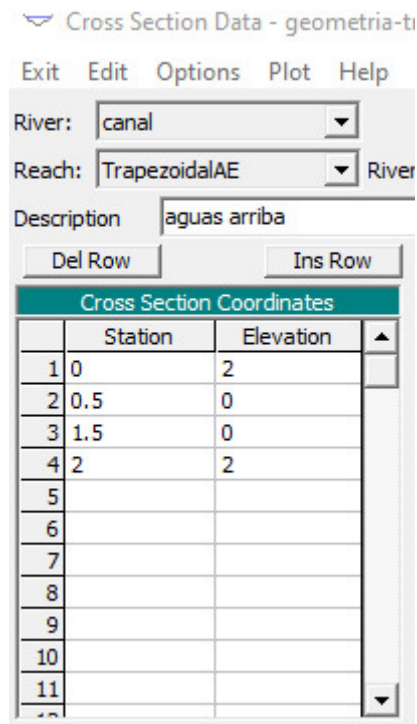


Figura 35. Sección del canal

Obtenido el esquema de la sección del canal, se procede a insertar el coeficiente de rugosidad. Para ello se considerará 2 iteraciones. La primera se calculará con el coeficiente de rugosidad de una

tubería de acero inoxidable de 0.045 y dependiendo del resultado se variará el mismo para disminuir la velocidad.

Rugosidades de tuberías

Material	Rugosidad (mm)
Acero remachado	1-10
Concreto	0,3-3
Hierro fundido	0,26
Hierro Galvanizado	0,15
Acero comercial	0,045

Tabla 4. Coeficientes de rugosidad

rapezoidalAE

The screenshot shows the HEC-RAS software interface for a trapezoidal channel. The 'Manning's n Values' table is highlighted, showing values of 0.045 for the LOB, Channel, and ROB. Three blue callout boxes with arrows point to these values: 'Coeficiente de Rugosidad costado izquierdo' points to the LOB value, 'Coeficiente de Rugosidad centro de tubería' points to the Channel value, and 'Coeficiente de Rugosidad costado derecho' points to the ROB value. The interface also shows 'Downstream Reach Lengths' and 'Main Channel Bank Stations' tables.

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
34.	34.	34.

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.045	0.045	0.045

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
0	2.

Figura 36. Coeficiente de rugosidad HEC-RAS

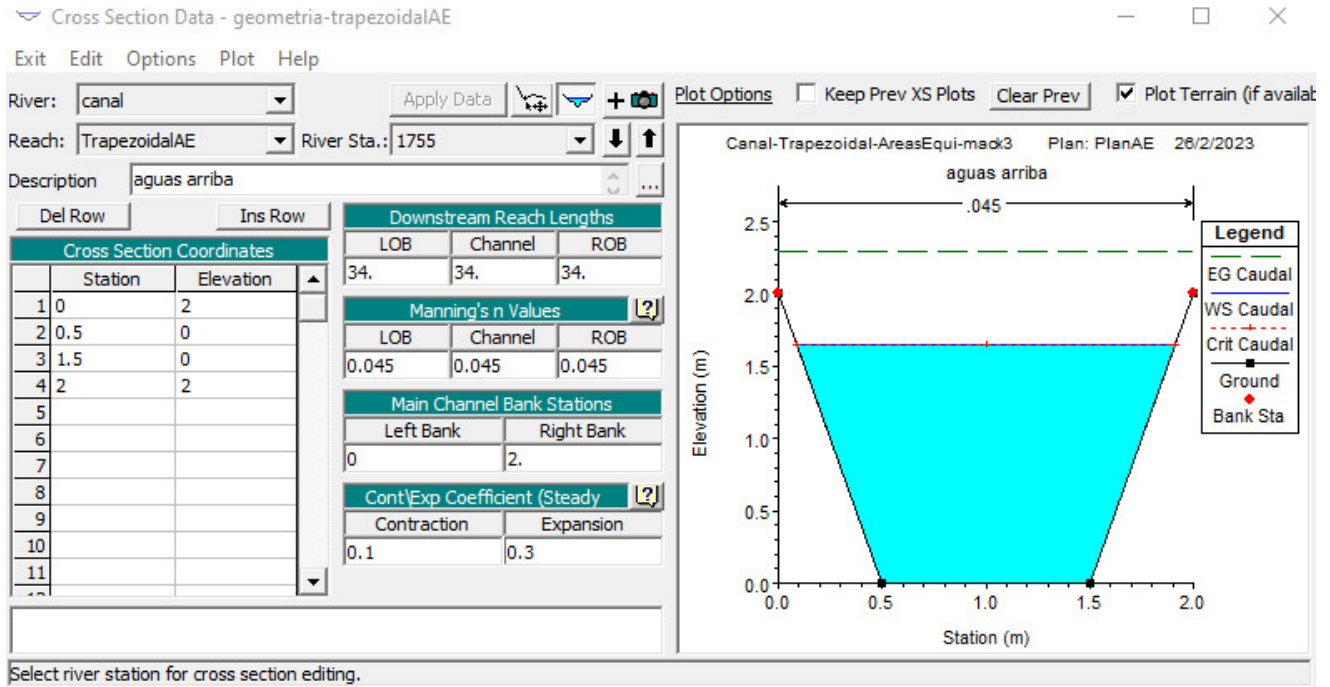


Figura 37: Obtenido de HEC-RAS

Insertamos la posición de nuestra sección con respecto a nuestro eje principal. Para el caso en estudio es de 340 m la variación entre los niveles de altura; como se modeló como un canal trapezoidal, esta distancia viene a ser la misma en la parte de la izquierda, central y derecha.

Realizado el diseño de la sección del canal, se procede a interpolar para mayor precisión de los resultados. Para ello se realizará el siguiente procedimiento:

Ir a la opción “Tools – XS Interpolation – Between 2 XS’...” como se indica en la imagen:

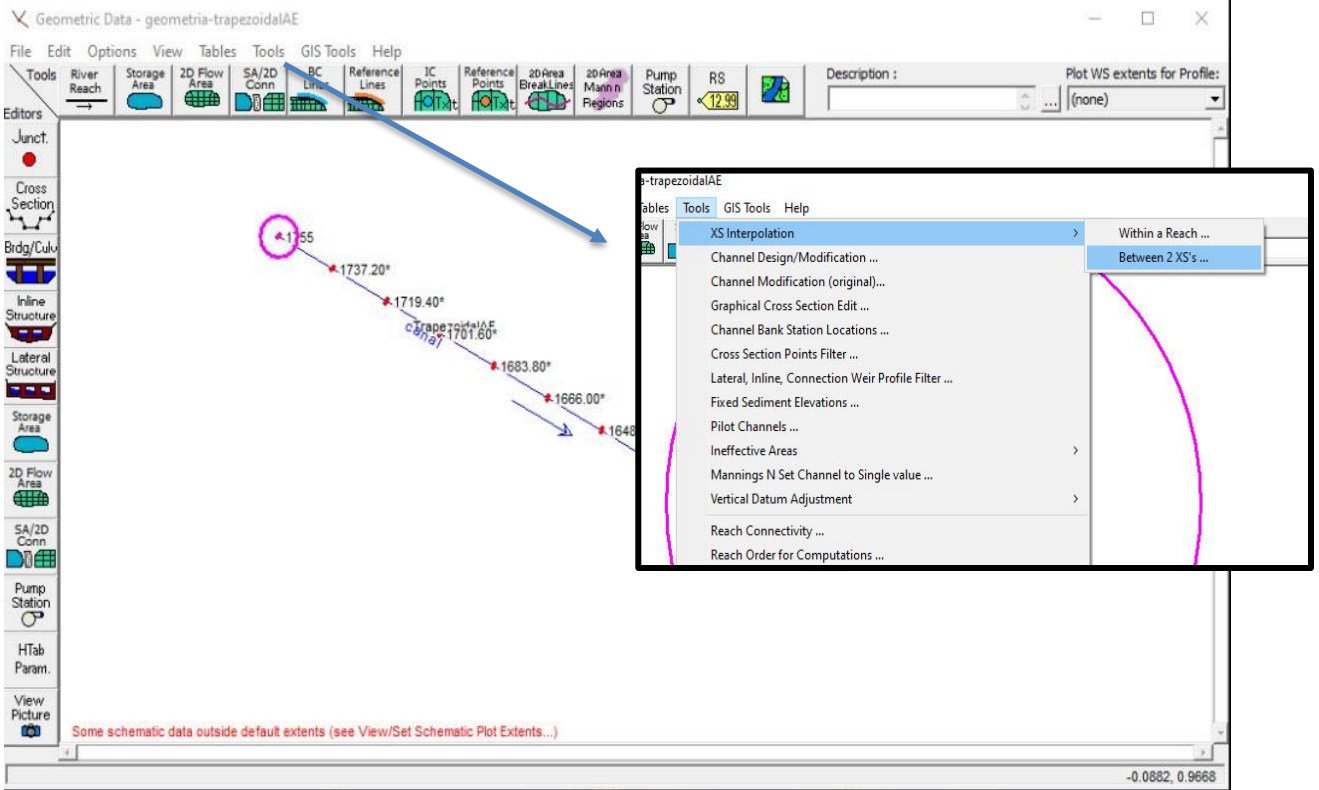


Figura 38. Interpolación

Se interpolará en 10 secciones de cada 34 m. como se muestra en la siguiente figura:

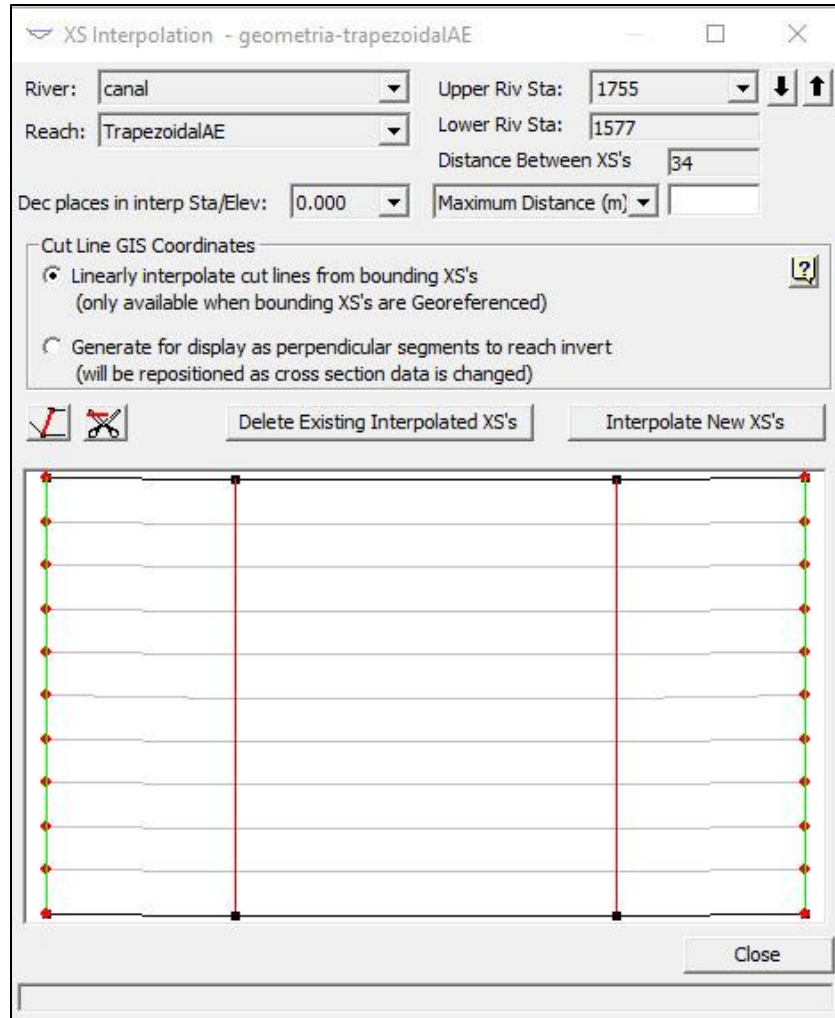


Figura 39. Ventana de Interpolación

Por último, insertamos la zona de inundación que viene a ser la parte más alta del canal, como se muestra en la figura, insertamos las coordenadas en el programa y nos queda nuestra sección modelada.

Replicamos la sección para modelarla agua abajo, para ello hay que insertar una elevación, la elevación la calculamos multiplicando la pendiente por la longitud total del canal. Así la elevación del canal se ve afectada como se muestra a continuación.

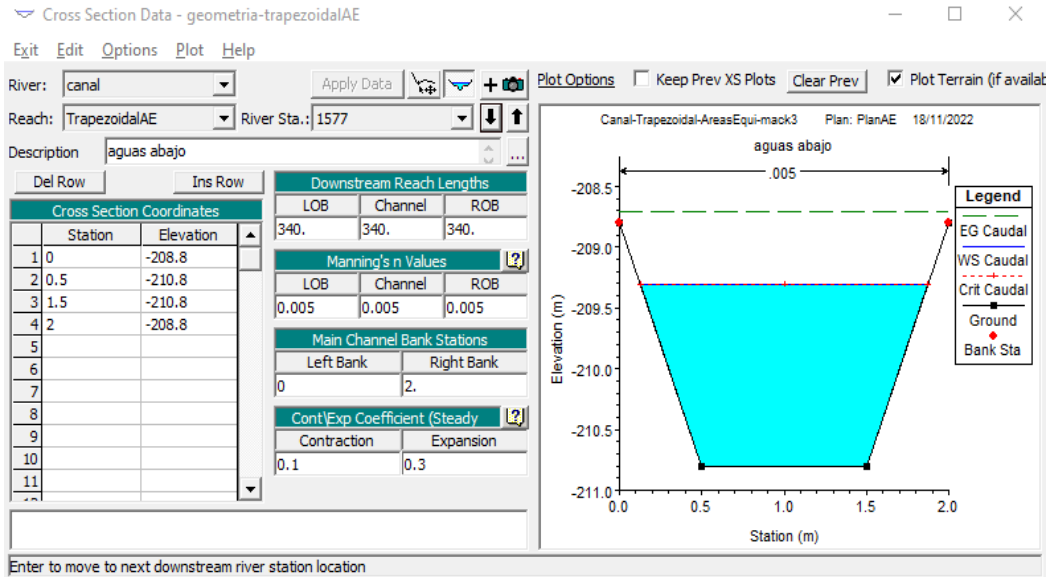


Figura 40.: Sección del Canal aguas arriba

Para determinar el caudal de entrada, se consideran dos factores fundamentales: el caudal generado por el golpe de ariete y la presencia de un tanque de almacenamiento. El tanque juega un papel importante, ya que retiene una parte considerable del caudal generado por el golpe de ariete. Como resultado, el caudal que fluye hacia afuera se reduce significativamente, alcanzando los 8.3 m/s, que es el valor a tener en cuenta para los cálculos en el programa HEC-RAS.

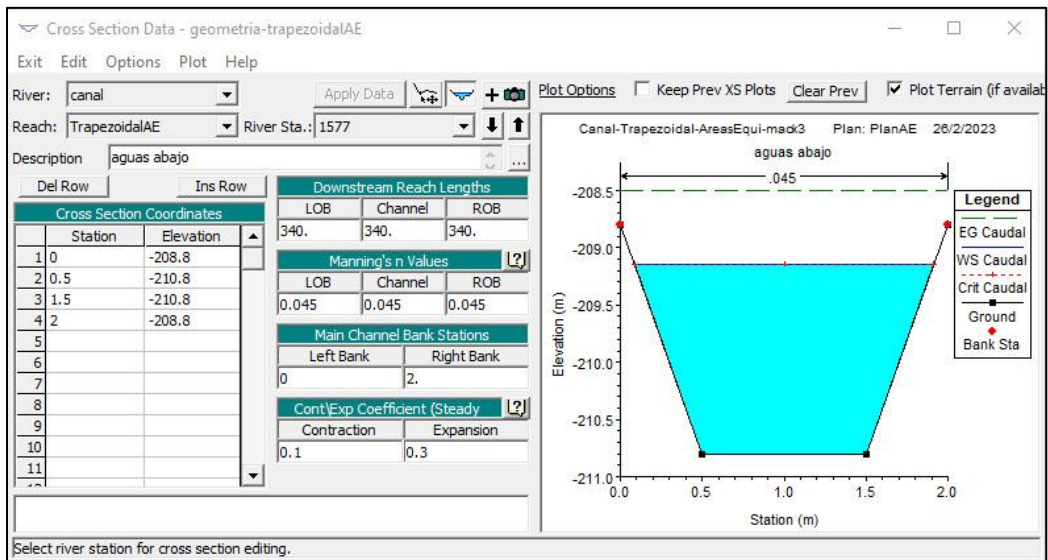


Figura 41.. Sección del Canal aguas abajo

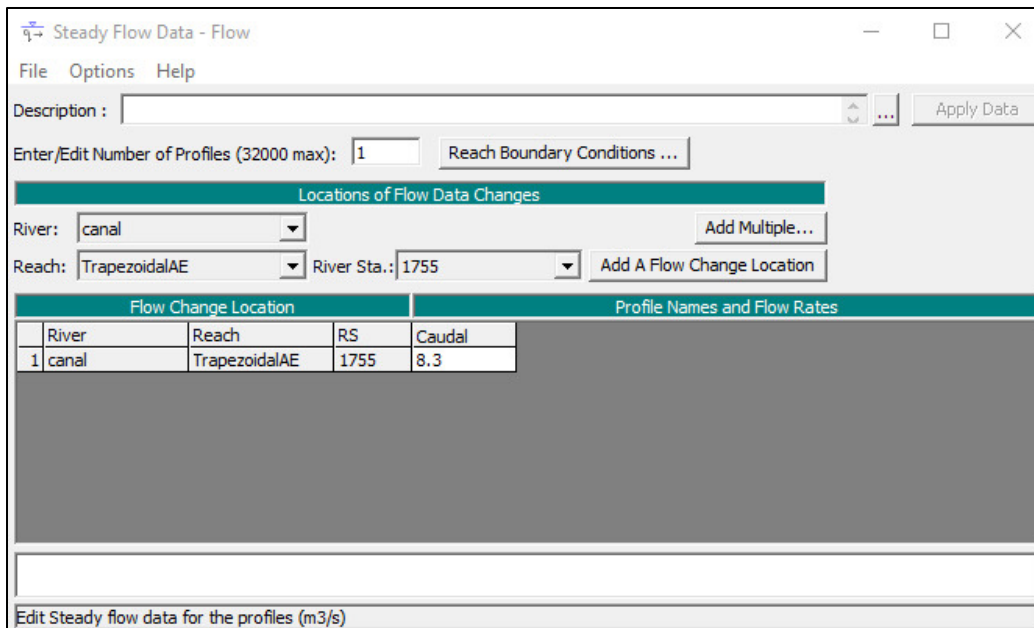


Figura 42: Obtenido de Hec-ras

Se inicia la segunda iteración, enfocada en aumentar el coeficiente de rugosidad. Se propone un valor de 0.052 como coeficiente de rugosidad para reducir la velocidad. Para lograrlo, se instalan varillas de acero de 12 mm de diámetro, espaciadas cada 30 cm.

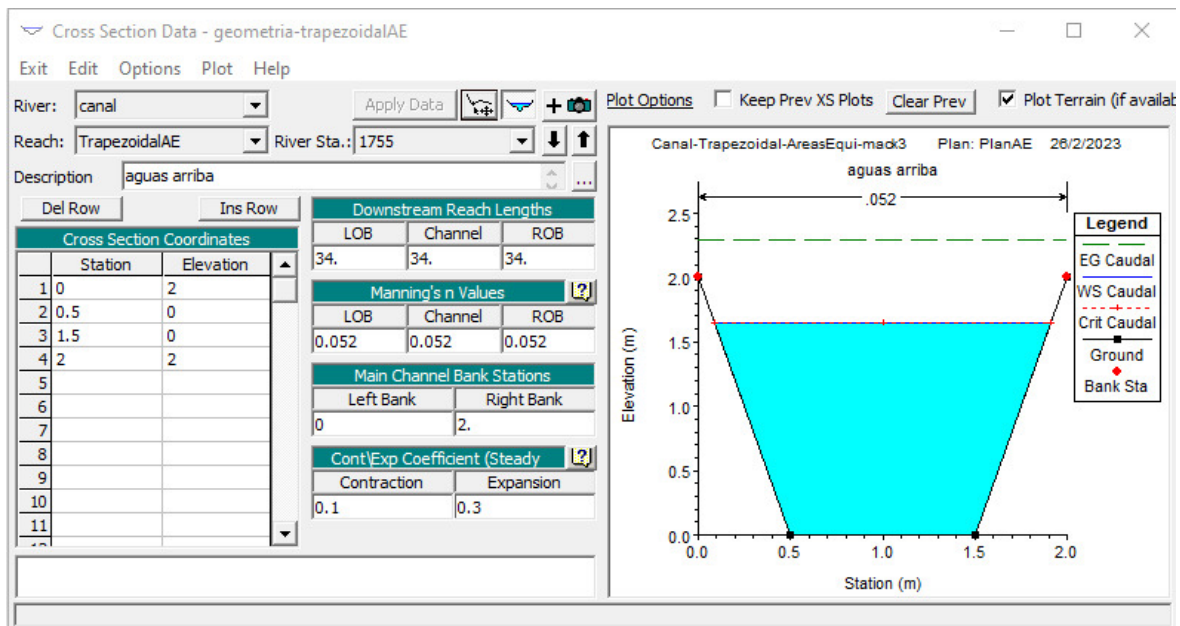


Figura 43. Sección del Canal aguas arriba

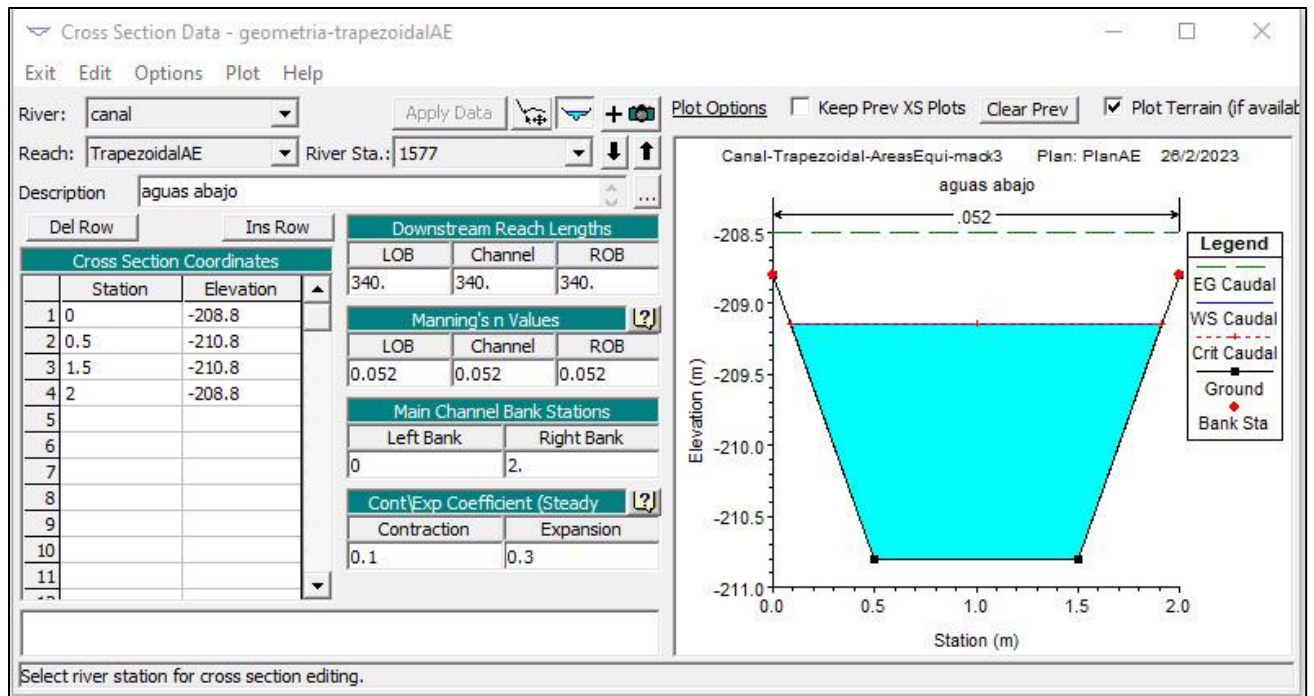


Figura 44. Sección del Canal aguas abajo

4. DISEÑO DEL DISIPADOR FRONTAL

Pozo amortiguador ubicado al pie de una rápida.

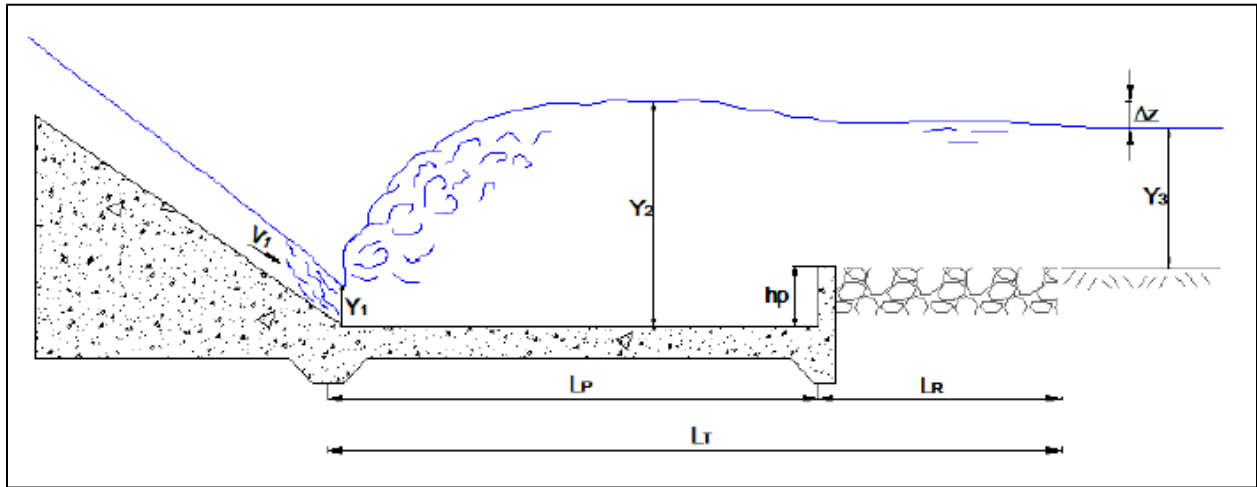


Figura 45. Figuro pozo amortiguador

Donde:

$Y_1 =$ Profundidad de circulación en la sección inicial del salto (m)

$Y_2 =$ Profundidad de circulación en la sección despues del salto (m)

$Y_3 =$ Posición final a la salida del salto

$L_p =$ Longitud del pozo (m)

$\Delta_z =$ Diferencia de flujo Y_2 y Y_3 (m)

$h_p =$ Altura del escalón del pozo (m)

Empezamos calculando la tirante conjugada Y_2

Ya conocida la curva superficial de la rápida se conoce el tirante final de la rápida que será el mismo tirante a la entrada del pozo amortiguador o Y_1 por lo que se procede a calcular el tirante conjugado con la siguiente ecuación.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right)$$

Donde:

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$$

$$V_1 = \frac{Q}{b * Y_1}$$

b es el ancho de la rápida.

A continuación, comparamos Y_2 con Y_3 para valorar si es necesario o no el uso del pozo.

Si $Y_2 \leq Y_3$ no se requiere pozo

Si $Y_2 \geq Y_3$ si se requiere pozo

Si caemos en el segundo caso, procedemos a calcular la altura del escalón del pozo, para ello se debe conocer en qué lugar se encuentra el salto hidráulico, como se conoce que el régimen es uniforme procedemos con los siguientes cálculos.

El tirante Y_1 no varía independientemente de la cota a la que se ubique el fondo del pozo amortiguador.

El tirante Y_2 es el mismo que se calculó en el paso 1

La diferencia de altura Δ_z es:

$$\Delta_z = \frac{V_{cansal}^2}{2g\phi_p^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2g\eta^2}$$

Donde:

$\phi_p =$ Coeficiente de pérdidas por el escalón del pozo (0.80 – 0.95)

$g =$ Aceleración de caída libre

$\eta =$ Factor de seguridad (1,00 – 1,10)

Para $Fr_1 < 4,5$ se asume $\eta = 1,1$

Para $Fr_1 > 4,5$ se asume $\eta = (1,0 - 1,05)$

$V_{cansal} =$ Velocidad de canal de salida $\left(\frac{m}{s}\right)$

$$V_{cansal} = \frac{Q}{A_{cansal}} = \frac{Q}{b_v * Y_3}$$

$A_{cansal} =$ Área del canal de salida (m^2)

$Q =$ Caudal de diseño $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$V_{pozo} =$ Velocidad del pozo $\left(\frac{m}{s}\right)$

$$V_{pozo} = \frac{Q}{A_{pozo}} = \frac{Q}{b_{pozo} * Y_2}$$

$b_{\text{pozo}} = \text{Base del pozo igual al ancho de la rapida (m)}$

$Y_2 = \text{Conjugada del tirante al inicio del pozo}$

Con los datos Y_1 , Y_2 , Δ_z y η se procede a calcular la altura del pozo $h_p = h_{cal}$

$$h_p = h_{cal} = \eta * Y_2 - (Y_3 + \Delta_z)$$

Por último, procedemos a realizar el cálculo de la longitud del pozo (L_p) y de la longitud de la risberma (L_R).

La longitud del pozo se obtendrá de las siguientes ecuaciones:

$$L_p = 3Y_2 \text{ si } q \leq 5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$L_p = L_s \text{ si } q > 5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$$

La longitud total del pozo:

$$L_T = 9(Y_2 - Y_1)$$

La longitud de la risberma:

$$L_R = L_T - L_p$$

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1. RESULTADOS CALCULO DE GOLPER DE ARIETE

CÁLCULO DE LA CELERIDAD

Con base a lo descrito en el capítulo anterior se procede a formular los datos recolectados por la casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica San José de Minas, otros valores como la gravedad, el peso específico del agua, el módulo de compresibilidad volumétrico del agua y módulo de elasticidad del material, fueron tomados de tablas normadas.

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\gamma = 9.81 \frac{N}{m^3}$$

$$E_V = 2.2 \times 10^9 Pa$$

$$E = 20.6 \times 10^{10} \frac{N}{m^2}$$

$$e = 2.54 \text{ cm}$$

$$D = 200 \text{ cm} - 2.54 \text{ cm}$$

$$D = 1.975 \text{ m}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{E_V} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

$$C_T = 3.467 \times 10^4 \frac{m}{s}$$

CÁLCULO DEL CAUDAL POR GOLPE DE ARIETE

$$GA = 21.2 \text{ PSI}$$

$$\gamma = 9.81 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$E_V = 2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$E = 20.6 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$e = 2.54 \text{ cm}$$

$$D = 200 \text{ cm} - 2.54 \text{ cm}$$

$$D = 1.975 \text{ m}$$

$$GA = V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{E_V} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Despejamos la velocidad

$$V = \frac{GA}{\sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{E_V} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

$$V = 4.21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sabemos que

$$V = \frac{Q}{A}$$

Despejamos Caudal (Q)

$$Q = V * A$$

Sabiendo que el área de la tubería la obtenemos mediante la siguiente ecuación

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$A = 3.062 \text{ m}^2$$

Reemplazando datos tenemos que nuestro caudal por golpe de ariete es igual a

$$Q = 12.9 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

5.2. RESULTADOS DEL MODELAMIENTO EN EL PROGRAMA HEC-RAS

De acuerdo con el modelamiento realizado en el programa HEC-RAS se presenta los valores obtenidos en las siguientes tablas:

Primera Iteración

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/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 (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
TrapezoidalAE	1755	Caudal	8.30	0.00	1.65	1.65	2.30	0.047313	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1737.20*	Caudal	8.30	-21.08	-19.43	-19.43	-18.78	0.047312	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1719.40*	Caudal	8.30	-42.16	-40.51	-40.51	-39.86	0.047305	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1701.60*	Caudal	8.30	-63.24	-61.59	-61.59	-60.94	0.047315	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1683.80*	Caudal	8.30	-84.32	-82.67	-82.67	-82.02	0.047305	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1666.00*	Caudal	8.30	-105.40	-103.75	-103.75	-103.10	0.047320	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1648.20*	Caudal	8.30	-126.48	-124.83	-124.83	-124.18	0.047322	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1630.40*	Caudal	8.30	-147.56	-145.91	-145.91	-145.26	0.047305	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1612.60*	Caudal	8.30	-168.64	-166.99	-166.99	-166.34	0.047313	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1594.80*	Caudal	8.30	-189.72	-188.07	-188.07	-187.42	0.047287	9.36	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1577	Caudal	8.30	-210.80	-209.15	-209.15	-208.50	0.047418	9.36	2.33	1.82	1.01

Tabla 5. Resultado Primer Modelamiento Hec-ras

Segunda Iteración

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
TrapezoidalAE	1755	Caudal	8.30	0.00	1.65	1.65	2.30	0.079958	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1737.20*	Caudal	8.30	-21.08	-19.43	-19.43	-18.78	0.079958	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1719.40*	Caudal	8.30	-42.16	-40.51	-40.51	-39.86	0.079946	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1701.60*	Caudal	8.30	-63.24	-61.59	-61.59	-60.94	0.079962	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1683.80*	Caudal	8.30	-84.32	-82.67	-82.67	-82.02	0.079946	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1666.00*	Caudal	8.30	-105.40	-103.75	-103.75	-103.10	0.079971	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1648.20*	Caudal	8.30	-126.48	-124.83	-124.83	-124.18	0.079974	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1630.40*	Caudal	8.30	-147.56	-145.91	-145.91	-145.26	0.079945	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1612.60*	Caudal	8.30	-168.64	-166.99	-166.99	-166.34	0.079960	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1594.80*	Caudal	8.30	-189.72	-188.07	-188.07	-187.42	0.079915	3.56	2.33	1.83	1.01
TrapezoidalAE	1577	Caudal	8.30	-210.80	-209.15	-209.15	-208.50	0.080137	3.56	2.33	1.82	1.01

Tabla 6. Resultado Segunda Modelamiento Hec-ras

5.3. RESULTADOS DEL DISEÑO DE DISIPADOR FRONTAL

Cálculo del disipador frontal

Datos:

DATOS PARA CÁLCULO DE DISIPADOR		
PARÁMETROS	CANTIDAD	UNIDAD
CAUDAL	8.30	m ³ /s
ANCHO DE LA RÁPIDA (b)	3.50	m
PROFUNDIDAD DE CIRCULACIÓN EN LA SECCIÓN INICIAL DEL SALTO (Y1)	0.36	m
POSICIÓN FINAL A LA SALIDA DEL SALTO (Y3)	1.00	m
PENDIENTE (S)	0.67	
GRAVEDAD (g)	9.81	m/s ²
ANCHO DEL POZO (bpozo)	1.00	m

Cálculo de la tirante conjugada (Y_2):

$$V_1 = \frac{Q}{b * Y_1}$$

$$V_1 = 6.587 \frac{m}{s}$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$$

$$Fr_1 = 3.505$$

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left(\sqrt{8 * (Fr_1)^2 + 1} - 1 \right)$$

$$Y_2 = 1.614 m$$

Comparamos Y_2 con Y_3 para determinar si es necesario o no el uso de un pozo disipador.

$$Y_2 = 1.614 m$$

$$Y_3 = 1 m$$

Como: $Y_2 > Y_3$

Entonces: Si requiere pozo

Cálculo de la altura del escalón del pozo (h_p)

$$\phi_p = 0.92$$

$$\eta = 1.1$$

$$V_{cansal} = \frac{Q}{b_{pozo} * Y_2}$$

$$V_{cansal} = 5.144 \frac{m}{s}$$

$$V_{pozo} = \frac{Q}{b_{pozo} * Y_3}$$

$$V_{pozo} = 8.3 \frac{m}{s}$$

$$\Delta_Z = \frac{V_{cansal}^2}{2 * g * \phi_p^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2 * g * \eta^2}$$

$$\Delta_Z = -1.309 m$$

$$h_p = 2.084 m$$

Cálculo de la longitud del pozo y la longitud de la risberma

$$q = \frac{Q}{b}$$

$$q = 2.371 \frac{m^2}{s}$$

Como $q < 5m/s/m$ entonces:

$$L_p = 3 * Y_2$$

$$L_p = 4.841 m$$

Longitud total del pozo:

$$L_T = 9 * (Y_2 - Y_1)$$

$$L_T = 11.283 m$$

Longitud de la risberma:

$$L = L_T - L_p$$

$$L = 6.442 \text{ m}$$

NOTA: Los valores obtenidos pueden ser ajustados por dimensiones constructivas.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. FORMAS DE EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO POR GOLPE DE ARIETE

Evitar que se produzca un golpe de ariete es casi imposible, en realidad lo más pertinente para controlarlo es buscar algún mecanismo de protección contra el fenómeno o alguna forma de atenuar su efecto (Vera, 2006).

Es posible que un sistema soporte las variaciones de presión causadas por el golpe de ariete utilizando tuberías de mayor espesor y de materiales más resistentes, pero en algunas ocasiones las sobrepresiones alcanzan valores muy elevados o simplemente el costo del sistema aumenta demasiado (Vera, 2006).

Cuando el golpe de ariete es ocasionado por manipulación de válvulas, la magnitud de este puede minimizarse mediante el control del tiempo de apertura o cierre de la válvula, tal que sea lo suficientemente lento para no generar sobrepresiones que sobrepasen los valores estipulados en el diseño (Vera, 2006).

Para el caso del golpe de ariete a raíz del paro o arranque de una bomba, la magnitud de la variación de presión es bastante significativa y no puede evitarse. Para esta situación existen diferentes mecanismos que ayudan a disipar la presión generada reduciendo el impacto de esta en el sistema (Vera, 2006).

Los mecanismos utilizados con mayor frecuencia para controlar el golpe de ariete son:

- a) Cámaras de aire.
- b) Válvulas de alivio
- c) Chimeneas de equilibrio

Cabe aclarar que estos mecanismos deben instalarse a la menor distancia posible del punto donde se origina el golpe de ariete, con la finalidad de evitar que las ondas de presión se propaguen mientras son disipadas (Vera, 2006).

6.1.1. CÁMARAS DE AIRE

Una cámara de aire, colchón de aire o “air chamber”, no es más que una tubería relativamente corta, unida verticalmente a la tubería de conducción, llena de aire o cualquier otro gas y con una tapa en su extremo superior. Estas cámaras funcionan amortiguando la sobrepresión del golpe de ariete cuando el agua ingresa al conducto lleno de aire y choca contra este, disipando gran parte de la energía de presión que se produce (Vera, 2006).

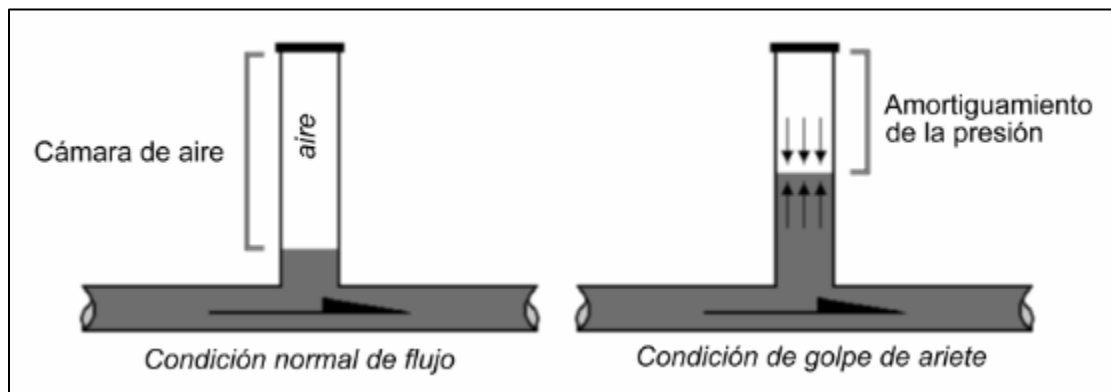


Figura 46. Cámaras de aire

6.1.1.1. VENTAJA DE USO

- Fácil instalación
- Bajo costo
- Bastante capacidad para disipar presión

6.1.1.2. LIMITACIONES

El problema de las cámaras de aire es que con el tiempo el agua absorbe el aire hasta anegarlas completamente, quedando inservibles para proteger al sistema (Vera, 2006).

6.1.2. VÁLVULAS DE ALIVIO

Las válvulas de alivio o compensadoras de presión, son dispositivos que pueden absorber variaciones repentinas de presión mediante la expulsión de agua a través de sí mismas, tienen una salida de desfogue ante el exceso de presión (Vera, 2006).

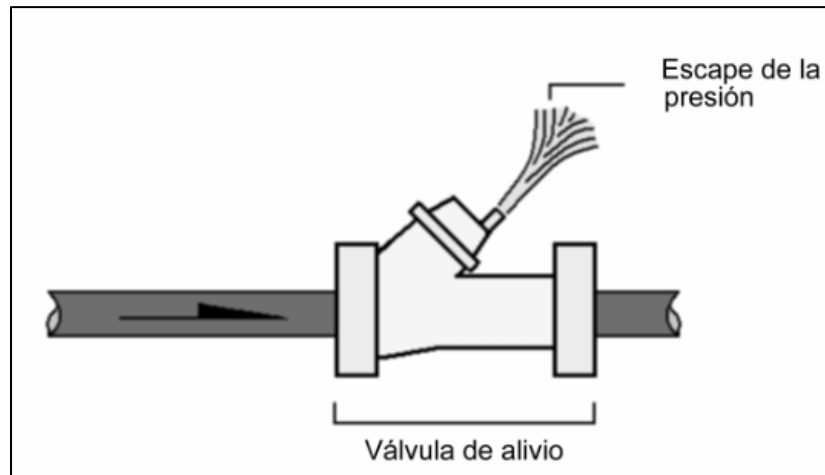


Figura 47. Válvula de alivio

6.1.2.1. VENTAJAS DE USO

- Son fabricadas industrialmente (capacidad garantizada)
- No ocupan mucho espacio
- Puede regularse la velocidad de apertura y cierre de acuerdo a las condiciones en que opera el sistema

6.1.2.2. LIMITACIONES

La principal limitación de las válvulas de alivio es su capacidad de amortiguamiento de presión, ya que en promedio resisten hasta 50 mca de sobrepresión, lo cual es insuficiente en algunas situaciones (Vera, 2006).

Otro inconveniente, es que los diámetros disponibles son limitados, aunque existe diversidad de accesorios para acoplarlas, pero esto disminuye su efectividad (Vera, 2006).

6.1.3. CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Una chimenea de equilibrio, también conocida como pozo piezométrico o “surge tank”, es un depósito abierto a la atmosfera en su extremo superior conectado perpendicularmente a la tubería de conducción. La chimenea tiene por objeto recibir la onda de sobrepresión del golpe de ariete, disipándola mediante la fluctuación del agua en su interior por medio de la fricción del agua con las paredes de la misma, esta acción es conocida como oscilación de masa (Vera, 2006).

Dependiendo de la magnitud del golpe de ariete que pueda ocurrir en el sistema (de acuerdo con los análisis), pueden construirse dos tipos de chimeneas: verticales o con cámara de expansión (para reducir la altura del depósito). Así mismo, para reducir el tiempo en que se disipe el golpe de ariete puede instalarse más de una chimenea (Vera, 2006).

En sistemas de abastecimiento de agua potable, no suele emplearse este tipo de protección. Las chimeneas de equilibrio están destinadas para obras en donde los caudales y las velocidades de flujo son bastante significativas, tal el caso de las centrales hidroeléctricas (Vera, 2006).

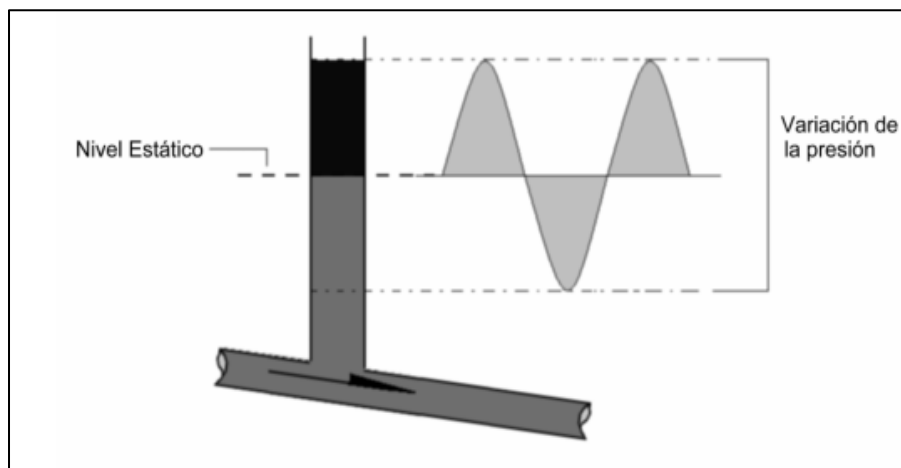


Figura 48. Chimeneas de Equilibrio

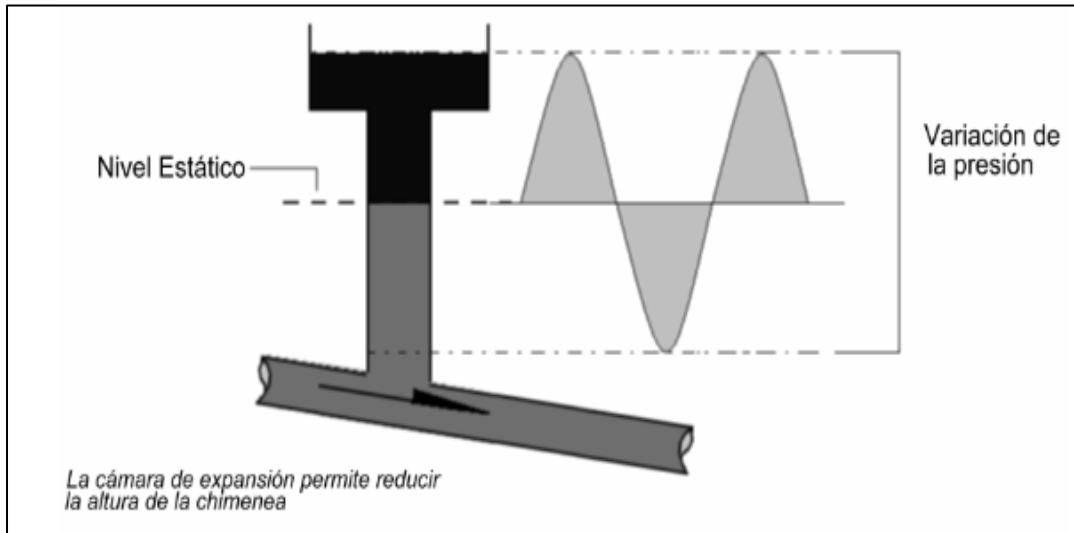


Figura 49. Chimeneas de equilibrio

6.1.3.1. VENTAJAS DE USO

- Capaces de absorber grandes variaciones de presión
- Vida útil bastante prolongada
- Pueden diseñarse con suficiente precisión, evitando de esa forma sobredimensionamiento.

6.1.3.2. LIMITACIONES

Las limitantes de este mecanismo de protección contra el golpe de ariete es que su costo puede elevarse dependiendo de la altura que requieran y porque en algunas ocasiones se dificulta su construcción debido a las condiciones de topografía y espacio, lo cual puede generar problemas para lograr la estabilidad de la estructura (Vera, 2006).

6.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO EN HEC-RAS

Se obtienen los siguientes resultados de acuerdo con el modelamiento:

PARÁMETROS	PRIMER MODELAMIENTO	SEGUNDO MODELAMIENTO
GEOMETRÍA	TRAPEZOIDAL	TRAPEZOIDAL
COEF. RUGOSIDAD	0.045	0.052
VELOCIDAD	9.36 m/s	3.56 m/s
MATERIAL	ACERO LISO	ACERO IMPLEMENTADO RUGOSIDAD
CAUDAL	8.3 m ³ /s	8.3 m ³ /s

Tabla 7 Cuadro comparativo de ambos modelamientos

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

En el presente estudio sobre las estructuras hidráulicas en pendientes pronunciadas, se ha determinado, a través de la modelación, que la velocidad es un factor crucial que debe ser controlado. Esto se debe a que la fuerte pendiente resultaba en una velocidad de descarga de 9.36 m/s, la cual debe ser contrarrestada mediante la implementación de disipadores de energía. En este caso, se propone la aplicación de elementos estructurales que aumenten la rugosidad y, como resultado, reduzcan la velocidad de descarga.

Tras realizar diversos modelos de nuestra tubería, donde el coeficiente de Manning fue el principal factor de iteración, hemos llegado a la conclusión de que, a mayor rugosidad, menor será la velocidad del fluido al final del recorrido. Esto se evidenció claramente en nuestro primer modelo, donde utilizamos el coeficiente de Manning estándar del acero, con un valor de 0.045, y obtuvimos una velocidad de salida de 9.36 m/s, claramente elevada. Sin embargo, al aumentar el coeficiente a 0.052, se logró reducir la velocidad a 3.56 m/s. Esto demuestra de manera notoria la influencia que tiene el coeficiente de Manning.

Es crucial ejercer criterio al seleccionar el coeficiente adecuado, considerando factores como la facilidad de construcción, implementación e incluso los costos asociados. Estos aspectos deben tenerse en cuenta para tomar decisiones informadas en el diseño y construcción de la tubería.

De acuerdo con los datos recopilados de la central hidroeléctrica San José de Minas, se procedió con el modelamiento en el programa Hec-Ras en el cual se ingresaron valores para su modelamiento. De acuerdo con la topografía del terreno se consideró una tubería circular de diámetro externo 2 m y un espesor de 10mm. Para el modelamiento en el programa Hec-Ras, se considera un canal trapezoidal de los siguientes datos:

Datos del Canal		
Descripción	Longitud	Unidad
Base Mayor	2,00	m
Base Menor	1,00	m
Altura	2,00	m
Área	3,00	m ²

Esta consideración es debida a la facilidad de modelamiento dentro del programa, teniendo en cuenta que el área de la tubería circular 3.11 m² sea equivalente con el área del canal trapezoidal 3m². El aumento de rugosidad (teóricamente) se logró mediante la implementación de varillas de acero de diámetro doce milímetros dentro de la tubería, distanciadas cada 30 cm, siendo así la mejor alternativa para el diseño del canal de aguas de descarga, con esto se llega a velocidad requerida para el diseño del dissipador.

La presencia de rugosidad artificial en un canal genera una diferencia significativa en el comportamiento del flujo en comparación con un canal sin rugosidad. En el caso de un canal con rugosidad artificial, el flujo se vuelve más turbulento debido a la fricción generada entre el agua y las paredes del canal. Esta fricción resultante de la rugosidad artificial altera la forma en que el agua se desplaza a lo largo del canal, provocando remolinos y vórtices que contribuyen a la turbulencia del flujo. Esta diferencia en el comportamiento del flujo es importante de considerar

al diseñar y analizar sistemas de canalización, ya que puede afectar el transporte de sedimentos, la capacidad de conducción del canal y otros aspectos hidráulicos relevantes.

La implementación de varillas de acero soldadas a la tubería puede teóricamente dar lugar a la formación de un resalto hidráulico. Este fenómeno se produce debido al incremento en la rugosidad de la superficie, lo que a su vez implica una pérdida significativa de energía en el flujo. El resalto hidráulico se caracteriza por un cambio abrupto en la elevación del agua y una agitación intensa del flujo. Es importante tener en cuenta esta posible consecuencia al considerar la instalación de las varillas de acero, ya que puede tener efectos tanto positivos como negativos en el sistema hidráulico. Además, se deben evaluar cuidadosamente los beneficios y las posibles implicaciones de la formación de un resalto hidráulico en términos de diseño, eficiencia y mantenimiento de la tubería.

Las tuberías de acero resultan la mejor alternativa en cuanto a construcción debido a su facilidad de aplicación de elementos estructurales que faciliten el aumento del coeficiente de rugosidad artificial para la disminución de la velocidad de descarga

Con los resultados obtenidos del modelamiento y la velocidad de descarga, se realizó el diseño de un dissipador frontal tipo pozo amortiguador debido a que cumple con los requerimientos para la implementación a canales de fuertes pendientes.

7.2. RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado es recomendable realizar un estudio previo a la implementación de cualquier estructura hidráulica, en el caso de estudio, lo primordial es la investigación y levantamiento topográfico, el cual permite la determinación de la fuerte pendiente y proponer un correcto modelamiento y alternativa de construcción.

Es recomendable tomar en consideración los factores antes mencionados (constructibilidad, implementación y materiales de construcción) al momento de plantear una solución de rugosidad artificial para realizar un correcto modelamiento.

Para facilidad de modelamiento se recomienda el uso de distintos programas comerciales dirigidos al área de hidráulica, el cual ayuda a la verificación de resultados obtenidos y la obtención de datos necesarios para el modelamiento en el programa Hec-Ras.

Como materiales de construcción para terrenos topográficos de alta pendientes se recomienda el uso de tuberías de acero el cual facilita a la aplicación de mecanismos que ayudan a la reducción del coeficiente de rugosidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmadian, R. F., & Lejeune, A. (2014). *Hydro Power-Introduction*. Elsevier.
- Anchenson, D. (1990). *Elementary Fluid Mechanics. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series*.
- English, T. (2017). *A look at the history of computational fluid dynamics. The short sleeve and tie club*.
- ESCALANTE, M. (1996). *Golpe de Ariete en centrales hidroeléctricas y sistemas de bombeo*. Quito: Tesis de grado.
- Fernandez, J. (2012). *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el método de volúmenes Finitos*. España: Reverté.
- Fernández, J. (2012). *Técnicas numéricas en Ingeniería de Fluidos*. Barcelona: Reverté.
- Indacochea, E. (1981). *Minicentrales Hidroeléctricas: manual para toma de decisiones*. Quito, Ecuador: OLADE.
- Le Chevallier, M., Gullick, R., & Karim, M. (2003). *The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients*.
- Lluén, W. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta Hec-Ras 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Barcelona.
- Marín, G. (Julio de 2015). *Modelización hidrológica e hidráulica y sistemas de captación en cauces efímeros*. Cartagena: Paseo Alfonso XIII.
- Monge, C. (2017). *Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software ANSYS CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM*. Quito: Tesis de grado.

Neira, E. (mayo de 2018). SCRIBD. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/378587808/Rapidas>.

Ortiz, F. (2010). *Modelo Hidráulico Físico de Disipadores de Energía*. Quito.

Ortiz, G. (2006). *El golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable*. Guatemala: Tesis de grado.

Pardo, R., & Alegret, E. (2012). *Diseño Hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas*. La Habana: Félix Varela.

Peralta, D. (2015). *Aplicación del Modelo Rusle para el cálculo de la erosión hídrica en la microcuenca Río Cubí*. Quito-Ecuador: Tesis de Grado.

Plúa, F. (2001). *Análisis del Problema de Disipación de Energía al Pie de una Rápida*. Quito: Tesis de EPN.

Sandoval, W. (1993). *Desprendimiento de un flujo en un cilindro*. Quito.

USACE Hydrologic Engineering Center. (29 de Agosto de 2022). *Hec-Ras User's Manual*. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/introduction-to-hec-ras>

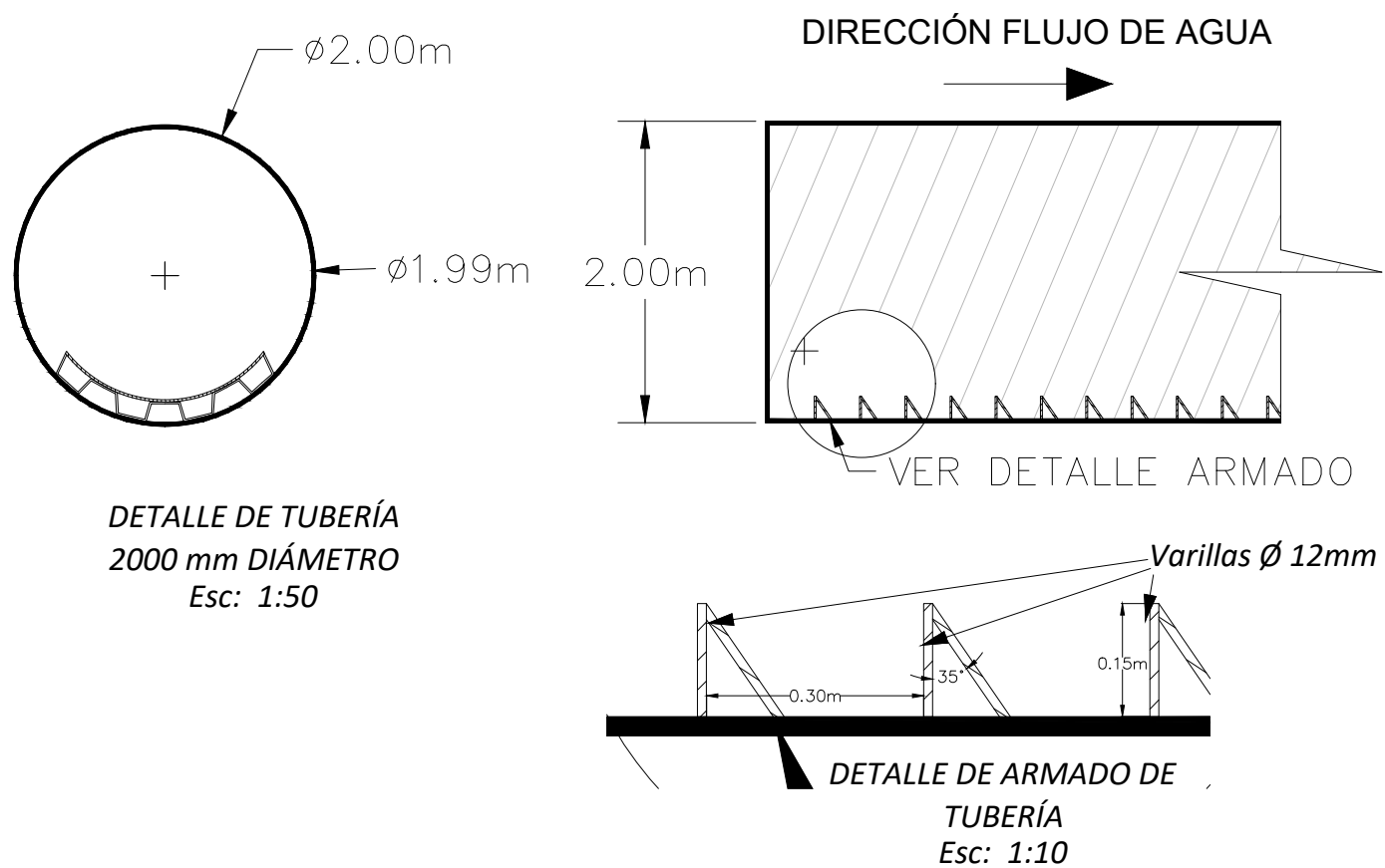
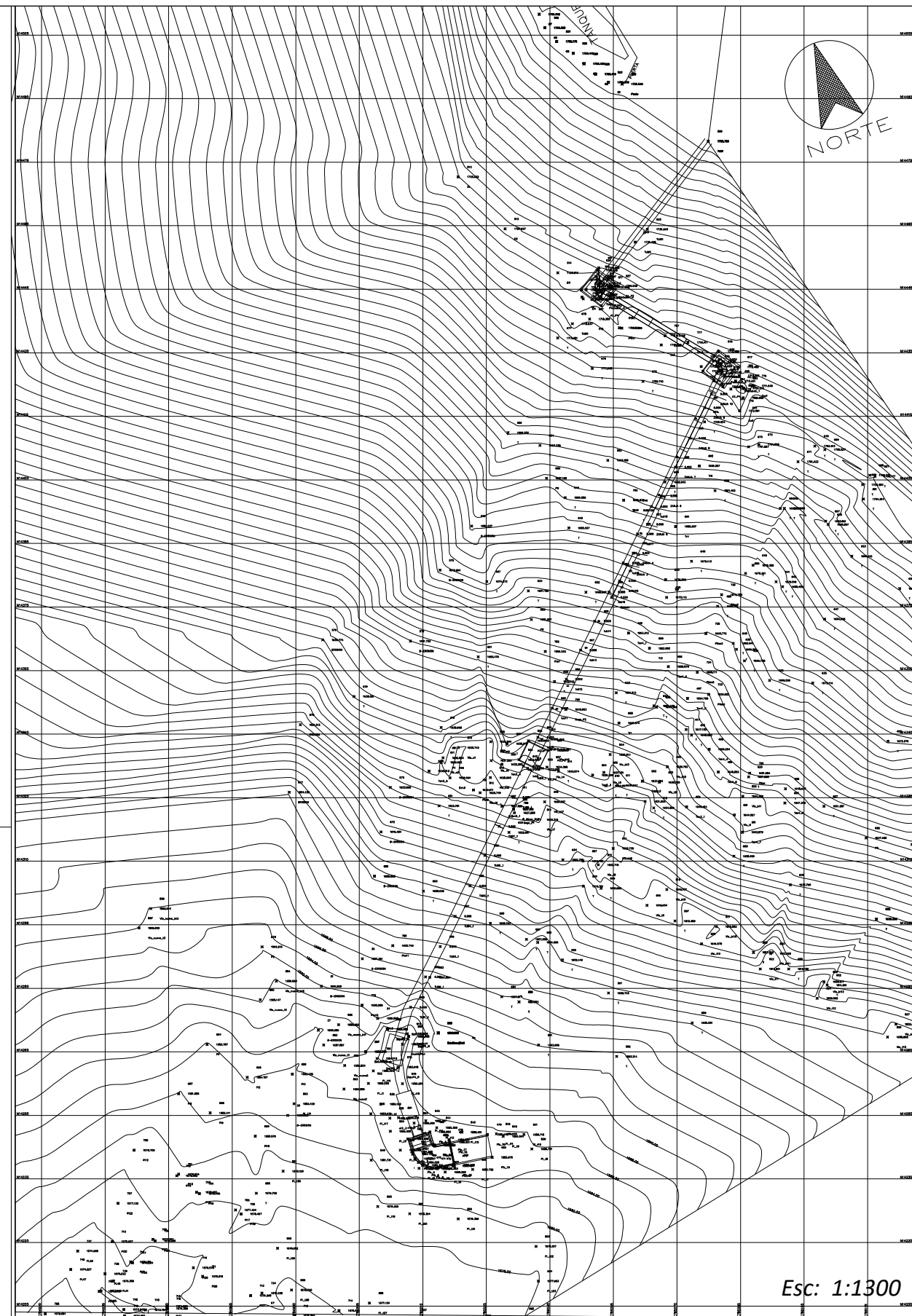
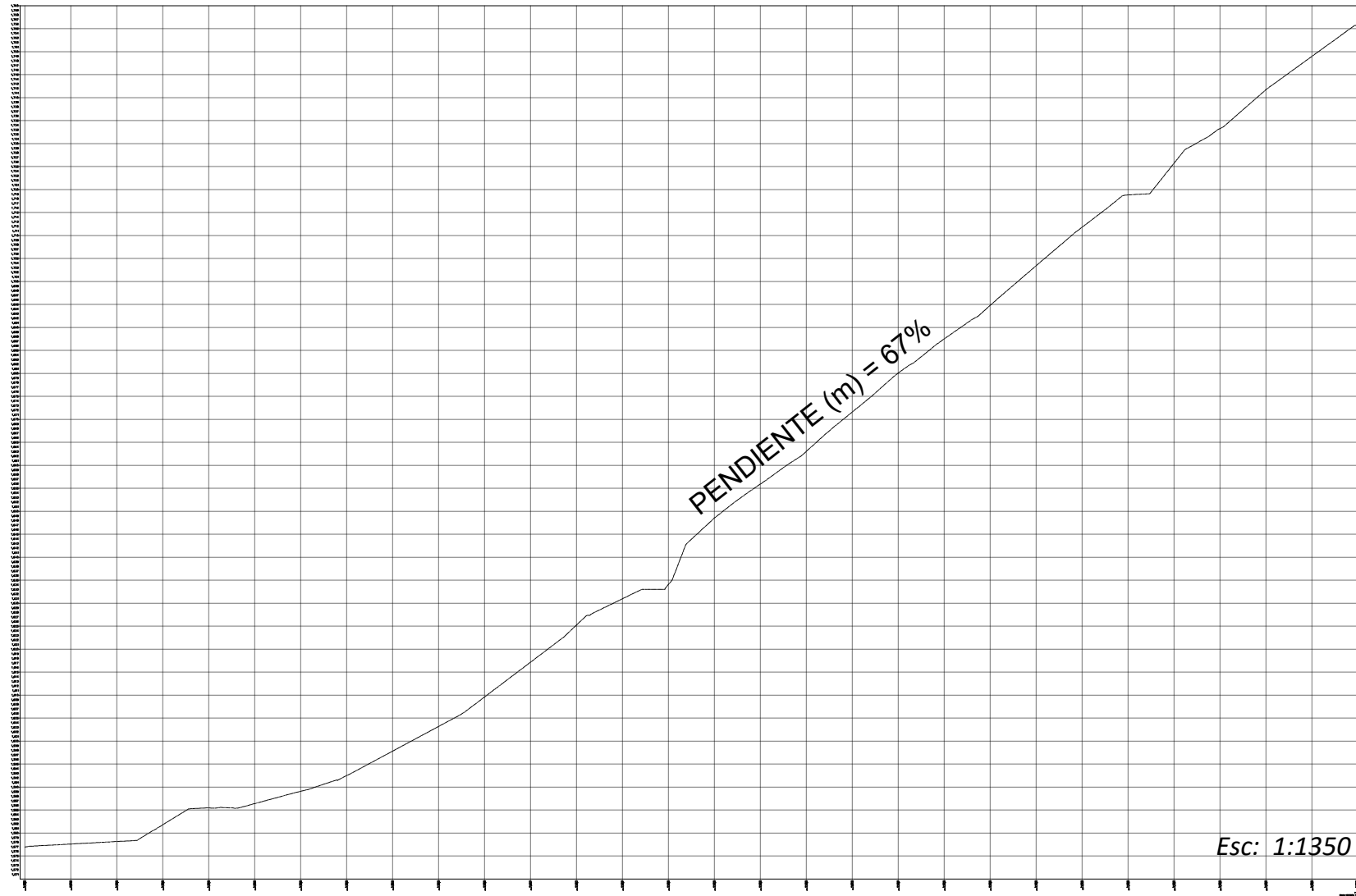
Vásquez, K. (2013). *Ventajas y desventajas de la simulación por computadora*.

Vera, C. (2006). *El golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable*. Guatemala: Tesis de Grado.

Villamarin, S. (2013). *Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica*. Quito: Tesis de grado.

Zambrano, C. (2019). *Diseño de una rápida hidráulica de gran pendiente para fines de laboratorio*. Manabí: Tesis de grado.

ANEXOS



ELABORADO POR:
 BRYAN STEVEN VELASCO BAQUE
 STEEV SEBASTIAN LÓPEZ MOLINA



CONTIENE:
 1. Implantación tubería para aguas de descarga.
 2. Perfil Longitudinal
 3. Detalle de tubería para aguas de descarga

PROYECTO:
 Análisis computacional-matemático del comportamiento de disipadores de rugosidad artificial y disipador frontal para la descarga de las aguas de exceso de la Central Hidroeléctrica San José de Minas

ESCALA:
 INDICADAS

FECHA:
 2 DICIEMBRE 2022