

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1 TEORÍA DE MODELOS

El primer modelo físico hidráulico fue construido en el año 1795 por el ingeniero Luis Jerónimo Fargue sobre un tramo del Río Garona. En el año 1885, Reynolds construyó un modelo del río Merssey, cerca de Liverpool. Él anotó que la relación existente entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna era de gran importancia para el diseño de los modelos hidráulicos. Hoy en día, esta relación se denomina número de Reynolds, parámetro adimensional muy significativo en los modelos hidráulicos actuales.

En mecánica de fluidos el riguroso tratamiento matemático de los problemas, con base exclusivamente en los métodos analíticos, no siempre permite llegar a la solución completa, a menos que se planteen hipótesis simplificadoras que, además de restar generalidad a la solución, pueden llegar a falsear los resultados a tal grado que no tengan relación alguna con el comportamiento real del fenómeno.

Al realizar la modelación física antes de la construcción de la obra, se pretende que la seguridad y costo de la obra cuantificable en dinero, sea un mínimo al finalizar el proyecto. Es de mucha importancia efectuar con mayor cuidado la planeación de las fases iniciales de un proyecto de manera que la inversión total al finalizar la obra sea el menor posible.

Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Sólo podemos hacerlo parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos del que se disponen para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la Naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos. Ambos se complementan.

Mediante el uso de modelos físicos es posible experimentar a costos relativamente bajos y con economías substanciales de tiempo, hasta obtener condiciones óptimas.

Los modelos hidráulicos han encontrado creciente aplicación para controlar y modificar diseños analíticos de estructuras hidráulicas. Lo anterior en ningún caso significa que una técnica sustituya a la otra. Sería un error suponer que una serie de resultados y reglas obtenidas de la investigación experimental supla un tratamiento racional del mismo, pudiendo ocurrir que dichos resultados tuvieran validez sólo en el intervalo de valores para el cual se efectuaron las mediciones.

El estudio comparativo entre modelo y prototipo ha mostrado con evidencia de muchas experiencias que la correspondencia de comportamiento es buena, fuera de las limitaciones esperadas, como lo atestigua el correcto funcionamiento de muchas estructuras diseñadas a partir de ensayos sobre modelos.

1.1.1 MODELOS UTILIZADOS PARA ESTUDIOS

En el planeamiento y diseño de una obra civil se emplea métodos como la simulación y predicción del comportamiento del proyecto mediante diferentes técnicas. La figura siguiente muestra el camino que se sigue al escoger un cierto tipo de simulación, que dependen de diferentes parámetros, y que tienen el mismo objetivo. Estas técnicas las conocemos como modelos y se pueden agrupar de la siguiente manera:

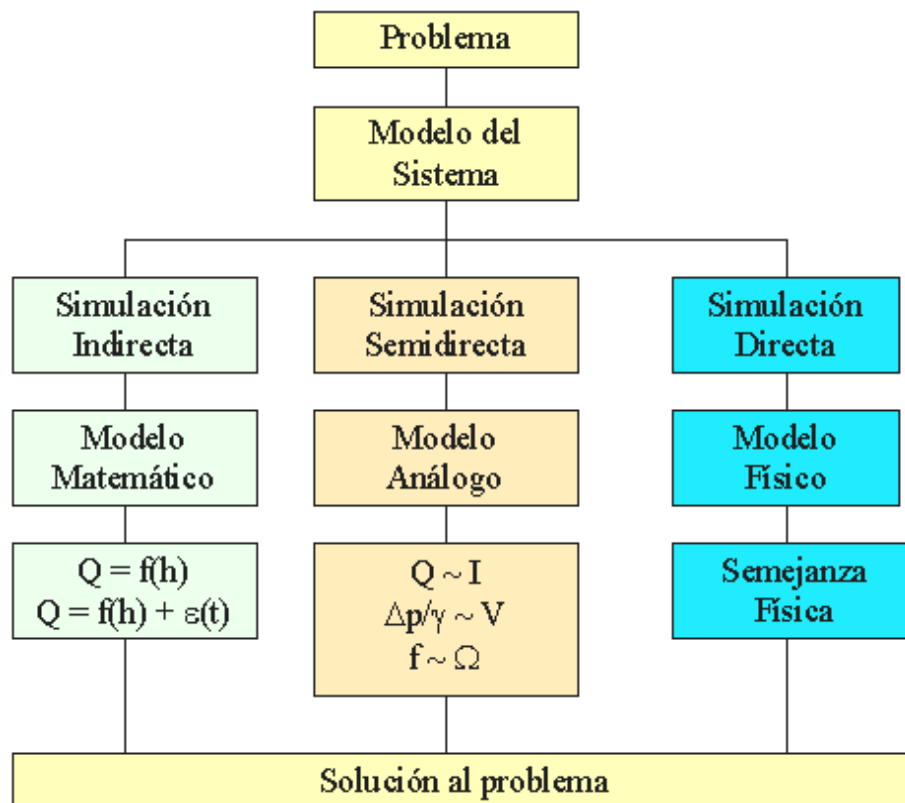


Figura 3: Esquema del estudio de los modelos

1.1.2 MODELOS FÍSICOS

- El término "modelo" puede ser tan amplio como uno desee; de manera simplificada puede definirse como la descripción de un sistema físico existente. La simulación a nivel laboratorio constituye una herramienta imprescindible para la predicción del comportamiento del flujo, y de ésta forma, llegar a la planeación de estrategias de protección y la remediación para un mejor aprovechamiento del recurso agua.
- La palabra "modelo" no es exclusiva de la hidráulica. Por lo tanto, no debe entenderse únicamente con el significado restringido que en ella tiene. Modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio.

Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones, en verdad deformaciones, de la realidad. Tanto los modelos matemáticos como los modelos físicos representan esquematizaciones del mundo natural.

- Esquematizar es simplificar. Esta concepción teórica es la que nos lleva, por ejemplo a considerar, que en un escurrimiento, el coeficiente de resistencia es sólo un coeficiente de rugosidad. Aún más, nos lleva también, por ejemplo, a considerar erróneamente, que dicho coeficiente es independiente de la concentración de sólidos en suspensión.
- En el modelo matemático se recurre a métodos analíticos para representar la realidad y predecir su comportamiento.
- Los métodos matemáticos plantean soluciones con modelos matemáticos idealizados, lo que permite simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida o de tipo analógico.
- En el modelo análogo se recurre a la similitud que se puede establecer entre una variable de interés, el caudal en un flujo laminar por ejemplo, y una variable a la cuál se puede recurrir para su representación análoga, como la corriente eléctrica, por ejemplo.
- En el modelo físico se representa a escala al objeto real o prototipo tal como un fenómeno, una estructura o máquina, y cumple ciertas condiciones matemáticas.
- El modelamiento matemático es ampliamente conocido, el modelo análogo preferencialmente es objeto de estudio en otras áreas de la técnica y en lo sucesivo éste apartado se refiere a los aspectos concernientes al modelamiento físico.
- En la foto siguiente podemos apreciar un modelo donde se estudio las condiciones de aproximación del flujo a las torres de captación, para obtener

las soluciones necesarias que permitan evitar la circulación general alrededor de las torres, la formación de vórtices y el arrastre de aire.



Foto 1: Departamento de Antioquia, Colombia
Desarrollo Hidroeléctrico del río Nare, Central de Guatapé
Modelo Hidráulico, Similitud Froude, escala 30. Caudal captado: $62 \text{ m}^3/\text{s}$
Laboratorio de Hidráulica
Universidad Nacional, Facultad de Minas

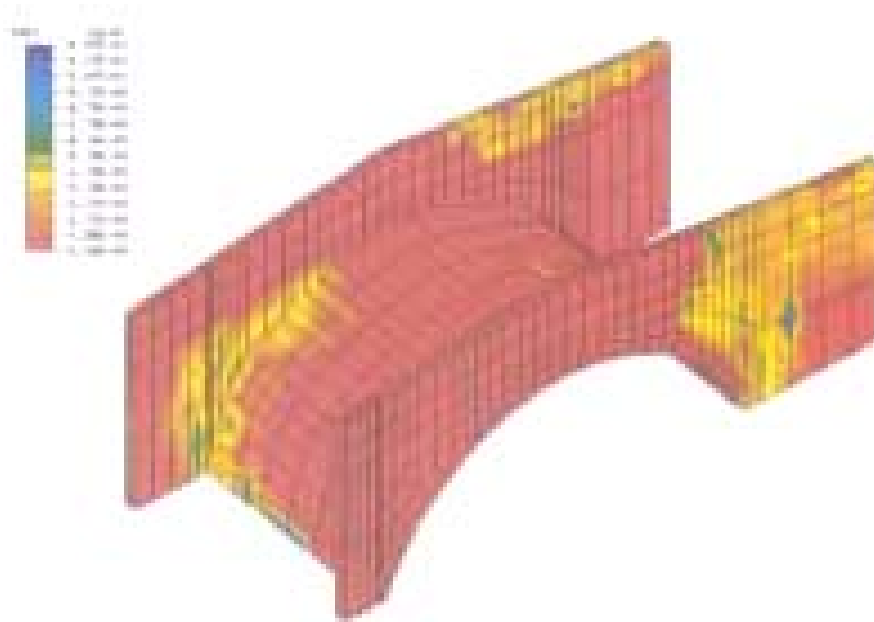


Figura 4: Modelo Numérico de puente de fábrica sobre la garganta de Buitrera (España)

1.1.3 ESCALAS A SATISFACER PARA ALCANZAR LA SIMILITUD ENTRE PROTOTIPO Y MODELO

1.1.3.1 Escala

Es la relación constante entre las variables del mismo tipo entre dos estructuras similares. Si las variables son B_p en el prototipo y B_m en el modelo, en puntos análogos de la estructura, diremos que la escala de la variable B es E_B y se define como:

$$E_B = \frac{B_m}{B_p}$$

Existirán entonces escalas para la longitud, área, el volumen, la aceleración, velocidad, el caudal, la fuerza y el tiempo.

1.1.3.2 Fuerzas que intervienen en el Movimiento

Las fuerzas que intervienen en el movimiento pueden ser cualquiera de las siguientes, o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitatorias, fuerzas debido a la tensión superficial y fuerzas elásticas. Para una mayor comprensión las ilustraremos en el cuadro N°1:

CUADRO N° 1

Tipo de Fuerza	Símbolo	Equivalencia	Significado Variables
Viscosidad	F_{μ}	$\tau \cdot A = \mu \cdot V \cdot L$	τ = Esfuerzo cortante, N/m ² A = Área, m ² L = Longitud, m V = Velocidad, m/s μ = Viscosidad dinámica, kg/(m·s)
Gravedad	F_g	$m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g$	m = Masa, kg g = Aceleración de la gravedad, m/s ² L = Longitud, m ρ = densidad, Kg/m ³

CUADRO N° 1

Tipo de Fuerza	Símbolo	Equivalencia	Significado Variables
Inercia	Fi	$m \cdot a = \rho \cdot L^2 \cdot V^2$	m = Masa, kg a = Aceleración, m/s ² L = Longitud, m V = Velocidad, m/s ρ =Densidad, Kg/m ³
Presión	Fp	$P \cdot A = P \cdot L^2$	P = Presión, N/m ² A = Área, m ² L = Longitud, m
Tensión Superficial	Fσ	$\sigma \cdot L$	σ = Esfuerzo, N/m ² L = Longitud, m
Elástica	Fe	$E \cdot A = E \cdot L^2$	E = Modulo de elasticidad, Kg/m ² A = Área, m ² L = Longitud, m

Dar preferencia a las fuerzas más importantes, permiten obtener una similitud incompleta, pero representativa y normalmente suficiente, para afinar los diseños hasta los niveles requeridos en cuanto a confiabilidad y buen desempeño de las estructuras hidráulicas.

1.1.3.3 Utilización del Análisis Dimensional y de las Ecuaciones Físico – Matemáticas de los casos en Estudio.

1.1.3.3.1 Análisis Dimensional

Los análisis requeridos en mecánica de fluidos implican la manipulación algebraica de varios términos. Las ecuaciones a menudo son complejas, y es de extrema importancia que los resultados sean dimensionalmente correctos (esto es, deben tener las unidades apropiadas).

El análisis dimensional trata de las relaciones matemáticas, de las dimensiones de las magnitudes físicas y constituye otra herramienta muy útil de la moderna mecánica de los fluidos. Por otra parte, la mecánica de fluidos emplea los principios del análisis dimensional para incorporar las variables, que la experiencia ha demostrado como esenciales. En toda ecuación que exprese una relación física entre magnitudes debe verificarse la igualdad al sustituir las magnitudes por sus valores numéricos y también por sus dimensiones. En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, como ser:

- 1) Fuerza (F)
- 2) Longitud (L)
- 3) Tiempo (T)

O bien también pueden reducirse como:

- 1) Masa (M)
- 2) Longitud (L)
- 3) Tiempo (T)

Entre las aplicaciones se incluyen:

- 1) Conversión de un sistema de unidades a otro.
- 2) Desarrollo de ecuaciones
- 3) Reducción del número de variables requeridas en un programa experimental.
- 4) Establecimiento de los principios para el diseño de modelos.

La formulación del análisis dimensional para el caso en estudio está basada en el Teorema π de Buckingham y en la determinación de las variables relevantes al problema tratado.

1.1.3.3.2 Ecuaciones Físico – Matemáticas de los casos en Estudio.

La ecuación físico matemática más importante para la modelación en éste caso sería aquella que relaciona la fuerza de inercia con la fuerza de gravedad en un flujo, ésta relación es conocido como el Número de Froude. La formulación del análisis dimensional para el caso en estudio está basada en el Teorema π de Buckingham y en la disposición de las variables relevantes al problema tratado. A continuación para nuestro caso en estudio desarrollaremos ésta ecuación (conocido como Número de Froude), aplicando el Teorema π de Buckingham para fijar las variables relevantes al problema en estudio, de la siguiente manera:

- 1) Del planteamiento del movimiento del flujo en un canal rectangular tenemos como variables relevantes la ρ (densidad), L (longitud), V (velocidad) y g (gravedad).

$$f(\rho, L, V, g) = 0$$

Expresando cada magnitud en función de la fuerza F, la longitud L y el tiempo T, tenemos el cuadro N°2:

CUADRO N° 2: Expresión de las magnitudes en función de la fuerza F, la longitud L y el tiempo T

SIMBOLO	MAGNITUDES
P	F T ² L ⁻⁴
L	L
V	L T ⁻¹
g	L T ⁻²

Suponiendo que la velocidad está en función de la densidad, longitud y gravedad, tenemos:

$$V = f(\rho, L, g)$$

$$V = K \rho^{\alpha_1} g^{\alpha_2} L^{\alpha_3}$$

Donde K viene a ser el coeficiente adimensional a puntualizar.

Elaboramos el siguiente cuadro para determinar los coeficientes desconocidos α_1 , α_2 y α_3 .

CUADRO N° 3

	Fuerza	Longitud	Tiempo
V	0	1	-1
ρ	1	-4	2
L	0	1	0
g	0	1	-2

Adimensionalizando V con ρ , L y g, tenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$1 \alpha_1 + 0 \alpha_2 + 0 \alpha_3 = 0$$

$$-4 \alpha_1 + 1 \alpha_2 + 1 \alpha_3 = 1$$

$$2 \alpha_1 + 0 \alpha_2 - 2 \alpha_3 = -1$$

Donde al resolver el sistema de ecuaciones:

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2}$$

Reemplazando y despejando K tenemos:

$$V = K \rho^0 g^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$$

$$K = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

K coeficiente adimensional conocido como Número de Froude.

Las demás ecuaciones empleadas en el diseño de los disipadores de energía se explicaran con mayor detalle en el capítulo VII (metodología de diseño de disipadores de energía).

1.1.4 LABORATORIO DE HIDRÁULICA

El laboratorio viene a ser un lugar dedicado a experimentos y pruebas científicas que tienen distinta naturaleza y finalidad, debe estar provisto del equipo necesario para las diferentes investigaciones.

El primer laboratorio hidráulico fue fundado en Dresden (Alemania), en 1891, por el Profesor Engels, y después de éste muchos otros aparecieron en casi todos los países del mundo; hoy en día hay más de un centenar, y con base en sus funciones se pueden clasificar de la siguiente manera:

a.- Docencia e Investigación Pura

b.- Investigación Aplicada

Los primeros, en cuanto a docencia, son utilizados en las universidades para demostrar a los estudiantes los fenómenos básicos de la hidráulica; en cuanto a la investigación pura, verifican las nuevas teorías en éste campo. Los otros se pueden encontrar en entidades oficiales, a veces en las empresas privadas y también en algunas universidades, y contribuyen al buen funcionamiento de las obras hidráulicas y al conocimiento y mejora de los productos industriales.

Los principales requisitos para una investigación realizada en un laboratorio son los siguientes:

- a) Determinar el equipo que represente correctamente las condiciones especificadas para la investigación que se pretende ejecutar.
- b) Disponer de la instrumentación necesaria para la medición de las diferentes variables involucradas en el experimento (caudal, niveles, y presión, etc.).
- c) Desarrollar el experimento con el suficiente número de medidas exactas, con el fin de obtener resultados significativos.
- d) Presentar los resultados de manera clara y concisa.
- e) Discutir e interpretar los resultados y de acuerdo con ello sacar conclusiones.

Sin embargo, para el desarrollo de experimentos en laboratorio no se puede limitar las varias técnicas de investigación que se pueden afrontar para un fenómeno. Estas pueden ser tan variadas como los problemas que presentan los diferentes flujos que ocurren en la naturaleza o en las estructuras hidráulicas, especialmente por las aportaciones de la matemática estadística que permite hacer una planeación adecuada de las pruebas y una interpretación más racional de los resultados experimentales.



Foto 2: Interior del Laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (Tarija-Bolivia)

Hay otros tipos de laboratorio, por lo general privados, donde se examinan y evalúan diversos productos manufacturados, con el fin de mejorar la calidad o de crear nuevos productos.

Por último decir que en los laboratorios de hidráulica normalmente la investigación experimental suministra las constantes numéricas y la verificación esencial sobre la exactitud del análisis; también trae consigo el estudio de las características del flujo (en nuestro caso el tirante, velocidad y caudal) aunadas a las propiedades del fluido y a las condiciones de frontera o geometría del mismo.

1.2 ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA

1.1 DEFINICIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA

Son de sección rectangular, siendo su función principal la de absorber la energía cinética del agua al pie de la caída.

Los disipadores deben tener una longitud suficiente diseñada con el objetivo de absorber parte de la energía cinética generada en el aliviadero escalonado, mediante la producción del resalto hidráulico dentro de la poza.



Foto 3: Presa de forcross situada en YORKSHIRE
(REINO UNIDO)



Foto 4: Estanque Amortiguador de la Presa de forcross situada en yorkshire (Reino Unido)

1.2.1.1 APLICACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA

La disipación de la energía cinética puede lograrse aplicando diferentes medidas, a saber: Generación de resalto hidráulico, impacto o incremento de la rugosidad.

Las estructuras hidráulicas son el conjunto de obras construidas con el objeto de manejar el agua cualquiera que sea su origen, con fines de su aprovechamiento o protección.

En la protección contra la erosión

Hay que evitar que el agua que se envía río abajo erosione la base de la presa. Para reducir la velocidad del agua se construyen unos embalses llamados cuencos amortiguadores, que forman parte de la estructura de la presa. Existen dos tipos de estructura que se utilizan para disipar la energía destructiva que lleva el agua al caer. Uno en el que el flujo rápido y de poca profundidad que baja de la presa se convierte en un flujo profundo y lento (en nuestro caso) ingresa a un cuenco en el que pasa a lento con la formación de un resalto, esto conlleva una gran absorción de energía que se transforma en turbulencia y

calor, y está construido río abajo desde la base de la presa. En el otro tipo la base de la presa tiene una forma que desvía el flujo, que baja a gran velocidad, hacia arriba y lo hace girar es decir la corriente se lanza al cauce por medio de un trampolín de forma que caiga a cierta distancia de éste. La energía se amortigua en el propio cauce al formarse un resalto natural en un cuenco creado por la propia erosión en la zona de caída.

En uno y otro caso el amortiguamiento no es total, y la energía remanente se va disipando de forma más o menos lineal en un tramo aguas abajo.

El cuenco amortiguador es la solución más común al pie de las presas vertedor. El lanzamiento en trampolín es más propio de los aliviaderos separados de la presa. Pero éstas reglas no son absolutas.

Un ejemplo es el desastre ocurrido con la presa Vaiont, en los Alpes Italianos ocurrido el 9 de octubre de 1963 perdieron la vida 4.000 personas cuando un desprendimiento de rocas detrás de la presa produjo una enorme ola que rebaso los 265 m de la estructura de hormigón. La fuerza de ésta ola, al caer desde una altura tan grande, devasto varios kilómetros de valle río abajo. Varios factores fueron responsables del desprendimiento, sobre todo el debilitamiento de las paredes de roca, inestable en el agua embalsada.

Los disipadores de energía vienen a ser las estructuras más frecuentemente empleadas para la disipación de energía, son las de control del resalto hidráulico, esta se realiza mediante obstáculos y en el presente trabajo hablaremos de ellas, entre las cuales comentaremos el cuenco disipador, SAF(San Antonio Falls), el USBR (creado por el cuerpo de Ingenieros de la Armada Naval de Estados Unidos) tipo II y IV, los cuales son los más usados debido a su seguridad y eficiencia.

1.2.1.2 ESTUDIO EN MODELO Y EN PROTOTIPO

1.2.1.2.1 Estudio en Modelo Físico

Modelo físico es una representación que se hace del prototipo con el propósito de estudiar detalladamente el comportamiento de la estructura, o parte de ella, bajo ciertas circunstancias pre-establecidas de flujo.

Usualmente, especialmente en hidráulica, el modelo físico es más pequeño, en tamaño, que el prototipo que representa, pero existe correspondencia entre uno y otro de manera inequívoca, en laboratorios de investigación biológica el modelo físico es más grande que el prototipo, como por ejemplo la creación de replicas de virus originales.

Un modelo físico es de fondo fijo cuando su contorno no se modifica durante la operación, un canal revestido que transporta agua sin sedimentos, por ejemplo; y es de fondo móvil cuando esto puede ocurrir, como es el caso de un río en el que se estudiará la evolución de sus meandros.



Foto 5: Modelos Físicos de dos Virus [Instituto de Virología de Winsconsi - Estados Unidos]

1.2.1.2.2 Estudio en Prototipo

Prototipo es el nombre genérico de la estructura hidráulica de interés.

Usualmente se diseña el prototipo recurriendo a las técnicas de modelamiento matemático, que incluyen, entre otras, las ecuaciones de la energía específica, de Bernoulli, de Euler, ley de viscosidad de Newton, Manning, Hazen-Williams, Cross, Chézy, Darcy-Weisbach....etc.

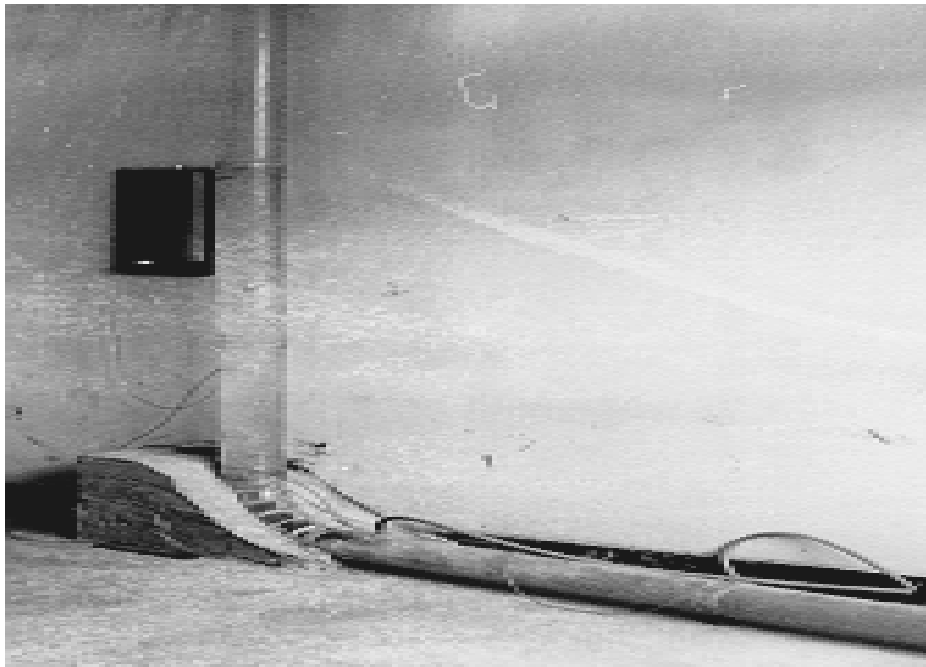


Foto 6: Departamento de Antioquia, Colombia desarrollo Hidroeléctrico del río Nare Central de Guatapé Modelo Hidráulico, escala 30. Laboratorio de Hidráulica Universidad Nacional, Facultad de Minas.



Foto 7: Municipio de Medellín Colombia Confluencia de las quebradas Hueso y Pelahueso (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional – Facultad de Minas)

PROTOTIPO.



Foto 8: Municipio de Medellín Colombia Confluencia de las quebradas Hueso y Pelahueso (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional – Facultad de Minas). Modelo Físico reducido de fondo fijo escala 30.

MODELO.

1.2.1.3 FLUJOS SOBRE DISIPADORES DE ENERGÍA

Los escurrimientos presentes en los disipadores de energía serían; escurrimiento supercrítico y escurrimiento subcrítico, donde el primero se caracteriza por bajas alturas de escurrimiento y grandes velocidades, mientras que el segundo se caracteriza por grandes alturas de escurrimiento y bajas velocidades. Un segundo análisis de éstas alturas es que en el primer caso prevalecen los esfuerzos inerciales por sobre los gravitacionales (Número de Froude > 1.0), mientras que en el segundo prevalecen los gravitacionales sobre los inerciales (Número de Froude < 1.0)

Finalmente, considerando que la información en canales abiertos se transmite de un punto a otro con la velocidad de ondas superficiales o celeridad de la onda superficial, y ésta es $(gh)^{1/2}$, es posible determinar una característica importante asociada a éstas dos alturas de escurrimiento. Si el escurrimiento es supercrítico, la velocidad de éste es mayor que la celeridad de la onda superficial, por lo tanto, la información asociada sólo se transmite hacia aguas abajo, mientras que si el escurrimiento es subcrítico, la celeridad de la onda superficial es mayor que la velocidad de escurrimiento, por lo tanto, la información se transmite tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo.

Del punto anterior se deduce que los escurrimientos supercríticos son controlados por aguas arriba, mientras que los subcríticos son controlados por aguas abajo.

1.2.1.4 RESALTO HIDRÁULICO

La mejor manera de amortiguar la energía es por medio del resalto hidráulico. En él se forman los remolinos, que conducen a una elevación de temperatura del líquido y del nivel del agua.

Para comprender mejor el significado del fenómeno conocido como salto hidráulico, consideremos un uso práctico el cuál se ilustrado en la figura 5.

El agua fluyendo sobre el vertedero normalmente tiene una velocidad de altura en el rango supercrítico cuando éste alcanza el fondo de la relativamente abrupta pendiente en la sección 1. Si está velocidad se fuera a mantener en la cama de corriente natural más allá de la estructura (vertedero), los lados y el fondo de la corriente natural pueden erosionar en una forma severa. En lugar de eso, un buen diseño provocaría un salto hidráulico como se muestra, donde la profundidad del flujo cambia en forma abrupta de y_1 a y_2 . Dos efectos benéficos resultan del salto hidráulico.

- 1) Primero, la velocidad del flujo disminuye en forma sustancial, reduciendo la tendencia del flujo a erosionar la cama de la corriente.
- 2) Segundo, mucho del exceso de energía contenido en el flujo de alta velocidad se disipa en el salto. La disipación de energía se presenta debido a que el flujo en el salto es extremadamente turbulento.

Con el fin de que se presente un salto hidráulico, el flujo antes del salto debe estar en el rango supercrítico. Esto es, en la sección 1 de la figura 5, y_1 es menor que la profundidad crítica para el canal y el número de Froude NF_1 en la sección 1 es mayor que 1.

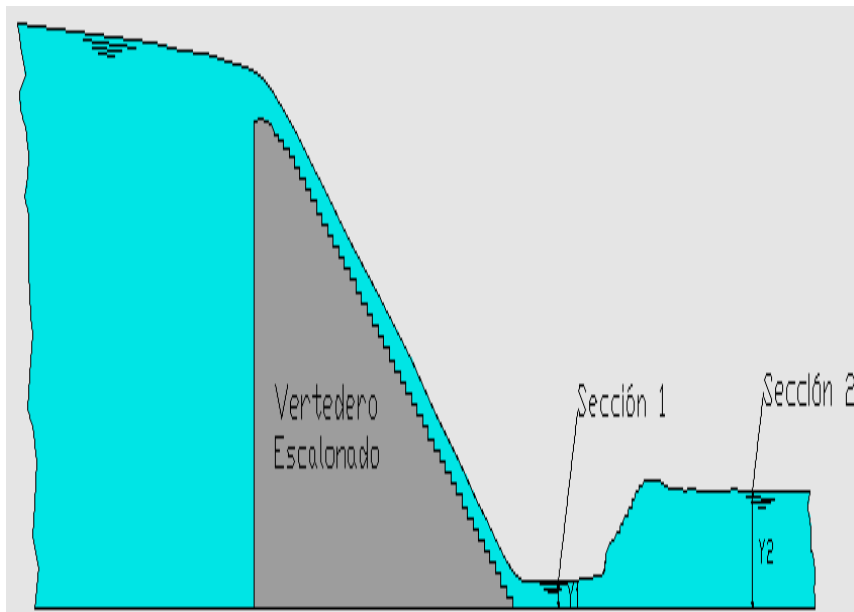


Figura 5: Formación del Resalto Hidráulico

La figura 5 ilustra lo que pasa en un salto hidráulico utilizando una curva de energía específica.

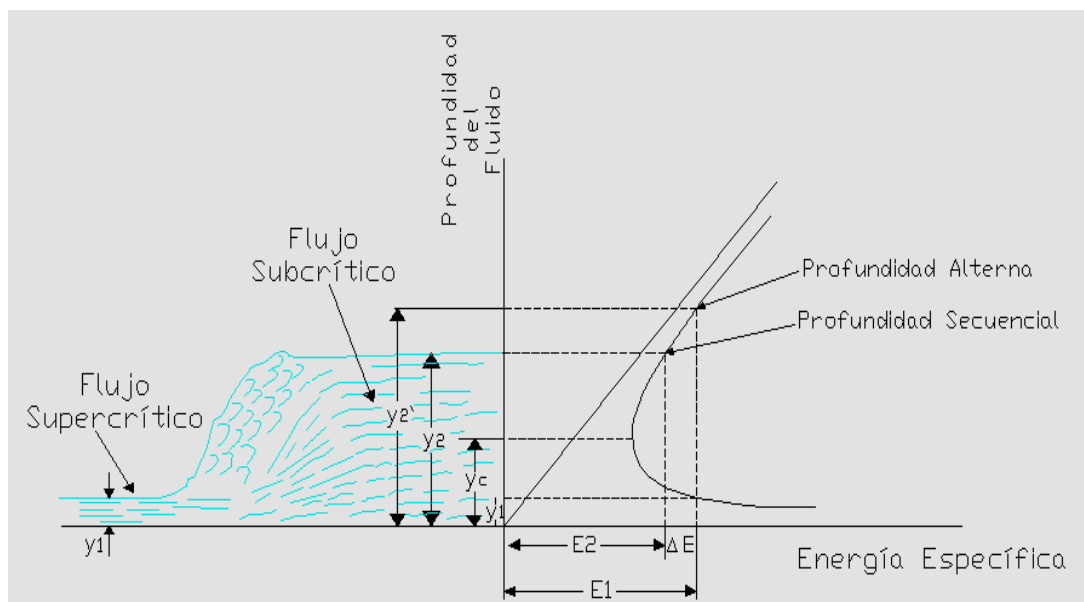


Figura 6: Energía y profundidades de un Salto Hidráulico

El flujo entra al salto con una energía E_1 que corresponde a una profundidad supercrítica y_1 . En el salto, se incrementa en forma abrupta la profundidad. Si no se perdiera energía, la nueva profundidad sería y_2' que es la profundidad alterna para y_1 . Sin embargo, puesto que la energía se disipa en forma parcial, ΔE , de la nueva profundidad real y_2 corresponde a un nivel de energía E_2 . Aún y_2 se encuentra en el rango de flujo subcrítico y se mantendría un flujo tranquilo hacia abajo del salto. El nombre dado a la profundidad real y_2 después del salto es profundidad secuencial o conjugada.

Llamando 1 a la sección de aguas arriba donde se tiene el escurrimiento supercrítico y 2 a la sección de aguas abajo donde existe escurrimiento subcrítico, y despreciando el peso del fluido en la dirección del escurrimiento y los esfuerzos de corte sobre el fondo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 \cdot y_2}$$

Donde:

ΔE = Pérdida de energía, m

E_1 = Energía en sección 1, m

E_2 = Energía en sección 2, m

y_1 = Altura conjugada en sección 1, m

y_2 = Altura conjugada en sección 2, m

donde ΔE es la pérdida de energía debida al resalto. Se define como la diferencia de energías específicas antes y después del resalto, donde y_1 y y_2 son las alturas conjugadas del resalto. Éstas están relacionadas por la ecuación de Belanger, la que se obtiene de la condición de igualdad de momentum o ecuación de cantidad de movimiento en el resalto. Aplicada al canal

rectangular tenemos que la relación de calados resultante aguas arriba y abajo del resalto se obtiene de aplicar las ecuaciones de la cantidad de movimiento y de continuidad:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

Donde:

y_1 = Altura conjugada en sección 1, m

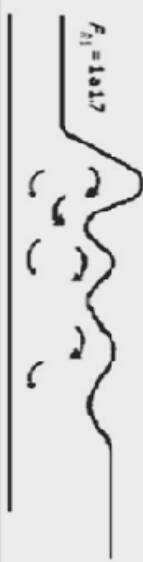


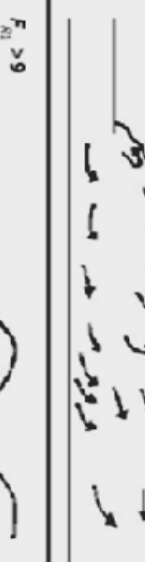
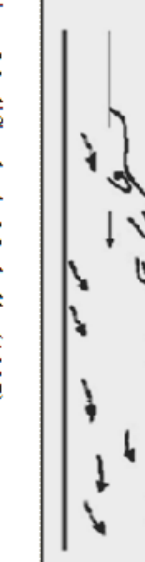
y_2 = Altura conjugada en sección 2, m

F_1 = Número de froude, adimensional

Es importante recalcar que los resaltos hidráulicos son la única manera que existe en que, siguiendo la dirección del caudal, un escurrimiento supercrítico puede pasar a escurrimiento subcrítico. Además, al ser el escurrimiento subcrítico controlado por aguas abajo y los escurrimientos supercríticos por aguas arriba, el resalto no influye en las alturas de escurrimiento en el resto del canal, sino que éste se ubica en un lugar tal que la ecuación de cantidad de movimiento antes y después se iguala.

1.2.1.5 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO

El Bureau of Reclamation investigó diferentes tipos de resalto hidráulico en canales horizontales, cuya base de clasificación es el número de Froude como se puede observar en el cuadro N° 4:

F_{Ri}	Tipo	Características del resalto	Esquema
$F_{Ri} = 1$		Flujo crítico, por lo que no se forma ningún resalto.	
$1 < F_{Ri} < 1.7$	Ondular	La superficie de agua presenta la tendencia a la formación de ondulaciones. La disipación de energía es baja, menor del 5%.	 <p>$F_{Ri} = 1.0 \text{ a } 1.7$</p>
$1.7 < F_{Ri} < 2.5$	Debil	El ondulamiento de la superficie en el tramo de mezcla es mayor y aguas abajo las perturbaciones superficiales son menores. Se generan muchos rodillos de agua en la superficie del resalto, seguidos de una superficie suave y estable. La energía disipada está entre el 5%-15%.	 <p>$F_{Ri} = 1.7 \text{ a } 2.5$</p>
$2.5 < F_{Ri} < 4.5$	Oscilante	Presenta un chorro intermitente sin ninguna periodicidad, que parte desde el fondo y se manifiesta hasta la superficie, y retrocede nuevamente. Cada oscilación produce una gran onda que puede viajar largas distancias. La disipación de energía es del 15%-45%.	 <p>$F_{Ri} = 2.5 \text{ a } 4.5$</p>
$4.5 < F_{Ri} < 9.0$	Estable	Se trata de un resalto plenamente formado, con mayor estabilidad y el rendimiento es mejor, pudiendo variar la energía disipada entre 45 % a 70 %.	 <p>$F_{Ri} = 4.5 \text{ a } 9$</p>
$F_{Ri} > 9.0$	Fuerte	Resalto con gran disipación de energía (hasta 80 %), gran ondulación de la superficie con tendencia de traslado de la zona de régimen supercrítico hacia aguas abajo. Caracterizado por altas velocidades y turbulencia, con generación de ondas y formación de una superficie tosca aguas abajo.	 <p>$F_{Ri} > 9$</p>

CUADRO N° 4: Clasificación de los resaltos hidráulicos Modificado de Marbello (1997)

1.2.1.6 EFICIENCIA DEL RESALTO HIDRÁULICO

Se define la eficiencia de un resalto hidráulico como la relación de energía específica después y antes del resalto:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8Fr_1 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)}$$

Donde:

E_1 = Energía específica en sección 1, m.

E_2 = Energía específica en sección 2, m.

y_1 = Altura conjugada en sección 1, m.

y_2 = Altura conjugada en sección 2, m.

Fr_1 = Número de Froude, adimensional

Por lo que se puede advertir, la eficiencia de un resalto hidráulico depende únicamente del número de Froude antes del mismo.

1.2.1.7 PERDIDA DE ENERGÍA DEL RESALTO HIDRÁULICO

La pérdida de energía en el salto es igual a la diferencia en energía específica antes y después del salto. Se puede mostrar que la pérdida es:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

Donde:

E_1 = Energía específica en sección 1, m.

E_2 = Energía específica en sección 2, m.

y_1 = Altura conjugada en sección 1, m.

y_2 = Altura conjugada en sección 2, m.

ΔE = Pérdida de energía, en m.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA, METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DATOS ACERCA DEL PROTOTIPO

La Hidráulica con la ayuda de los laboratorios, hoy en día es una ciencia básica de la ingeniería, estuvo durante mucho tiempo basada en resultados empíricos obtenidos de anteriores obras hidráulicas. Con el desarrollo paulatino de teorías y técnicas desarrolladas tanto en modelos reducidos como en modelos matemáticos, ha cambiado ésta orientación empirista. Como muchas veces una descripción matemática de los fenómenos hidráulicos es muy complicada o imposible al menos por ahora, dado el estado del conocimiento humano, se hace necesaria la experimentación en modelos hidráulicos a escala reducida, los que además son útiles para la calibración de los modelos matemáticos.

Las áreas de estudio de los laboratorios comprende la hidráulica básica, hidráulica aplicada a obras, hidráulica fluvial, puertos, hidrología, etc., utilizándose según los casos modelos físicos y/o modelos matemáticos.

Para la descripción detallada del modelo objeto de estudio debemos tener presente dos aspectos fundamentales, los cuáles son:

- a) Infraestructura con que se cuenta en el Laboratorio de Hidráulica
- b) Modelos reducidos de 3 disipadores de energía.

La experiencia del presente estudio se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología ubicado en el campus de El Tejar pertenecientes a la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”.

1.3.1 ANÁLISIS DEL CAMPO DE APLICACIÓN Y COBERTURA DEL ESTUDIO

La infraestructura con que cuenta el Laboratorio de Hidráulica para el funcionamiento del modelo hidráulico en estudio, está constituido básicamente en un sistema el cual está dispuesto por una instalación clásica de bombeo, dos bombas con una capacidad total de 150 l/s., que se esquematiza en la fotos 9 y figura 7:



Foto 9: Bombas en paralelo que impulsan el sistema instalado en el Laboratorio de Hidráulica (con capacidad de 150 l/s) a una altura geométrica de 10 metros.

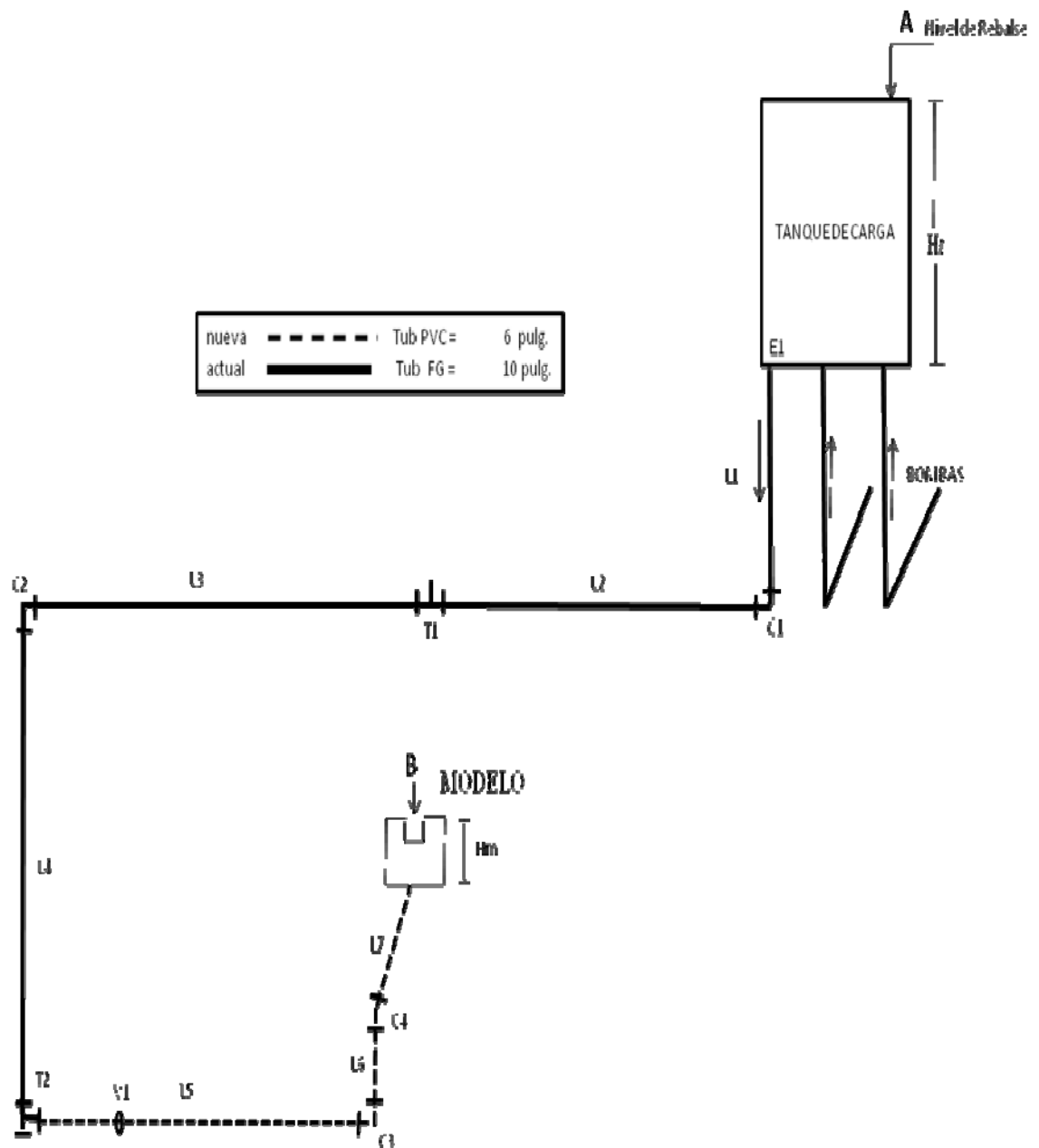


Figura 7: Esquema del sistema completo de suministro de agua del Laboratorio de Hidráulica, hasta el Modelo Físico Reducido.

1.3.2 IDEALIZACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Primeramente se tomo en cuenta toda la bibliografía sobre el estudio en modelos hidráulicos, para su diseño, construcción y funcionamiento de los tres modelos (disipadores de energía) se asumió la misma escala del aliviadero escalonado ya estudiado anteriormente, la cual se analiza en la cuadro 5.

Cuadro 5: Idealización del Modelo

Escala Longitudes	Base Prototipo (m)	Caudal Unitario (m ³ /s-m)	Caudal Prototipo (m ³ /s)	Escala Caudales	Caudal Mín. Modelo (lt/s)	Tirante Modelo (cm)	Altura Presa modelo (m)	Altura Total Modelo (m)
eL	Bp	q	Qp	eq	Qm	Ym	Hm	H Total
14	8.40	2.64	22.18	733.36	30.24	7.50	2.13	2.20
15	9.00	2.64	23.76	871.42	27.27	7.00	1.98	2.12
16	9.60	2.64	25.34	1024.00	24.75	6.56	1.86	1.93
17	10.20	2.64	26.93	1191.58	22.60	6.18	1.75	1.81
18	10.80	2.64	28.51	1374.62	20.74	5.83	1.65	1.71
19	11.40	2.64	30.10	1573.56	19.13	5.53	1.57	1.62
20	12.00	2.64	31.68	1788.85	17.71	5.25	1.49	1.54
21	12.60	2.64	33.26	2020.92	16.46	5.00	1.42	1.47
22	13.20	2.64	34.85	2270.16	15.35	4.77	1.35	1.40
23	13.80	2.64	36.43	2536.99	14.36	4.57	1.29	1.34
24	14.40	2.64	38.02	2821.81	13.47	4.38	1.24	1.28
25	15.00	2.64	39.60	3125.00	12.67	4.20	1.19	1.23

Asumida la escala 1:15, procedemos para cada prueba o ensayo a unir cada disipador con el aliviadero escalonado ya armado anteriormente como lo podemos ver en las fotos 10 y 11 :



Foto 10: Modelo del Aliviadero inicialmente instalado en el Laboratorio de Hidráulica, hasta el Modelo Físico Reducido.



Foto 11: Modelo del Aliviadero finalmente instalado en el Laboratorio de Hidráulica.

Con un tanque de carga conectado primeramente con una tubería de 4 pulgadas al sistema del laboratorio, la cual fue cambiada con una tubería PVC de 6 pulgadas con lo que se aumento de 28,51 l/s, a un caudal máximo de 39,46 l/s.



Foto 12: Instalación final en el Laboratorio del Modelo Físico Reducido (Pozo Amortiguador y aliviadero), escala 1:15.



Foto 13: Instalación final en el Laboratorio del Modelo Físico Reducido (Tanque TIPO I y aliviadero escalonado), escala 1:15.



Foto 14: Modelo Físico Reducido Tanque TIPO III, Instalación en el Laboratorio puesto en funcionamiento. Escala 1:15.

1.3.3 ESTRUCTURA SOPORTE DEL MODELO

El modelo físico hidráulico ensayado, parte de un depósito elevado situado sobre una estructura metálica, tiene como fin recibir el agua a una determinada cota, tranquilizarla (con una rejilla) y finalmente distribuirla al modelo conectado a ella. Esta cota fue aumentada de 2,05 m a una cota de 2,12 m, aumentando la cota 7 cm mediante unos soportes de madera. El tanque de carga elevado mantiene las mismas características anteriores es decir tiene una plataforma de 1,2 x 0,6 m², tiene una superficie de 1,2 x 0,6 m, y una altura de 1,0 m y es alimentado desde el depósito regulador (caudal máximo de 39,46 l/s).



Foto 15: Soportes de madera aumentando 7 centímetros al tanque de carga instalado.

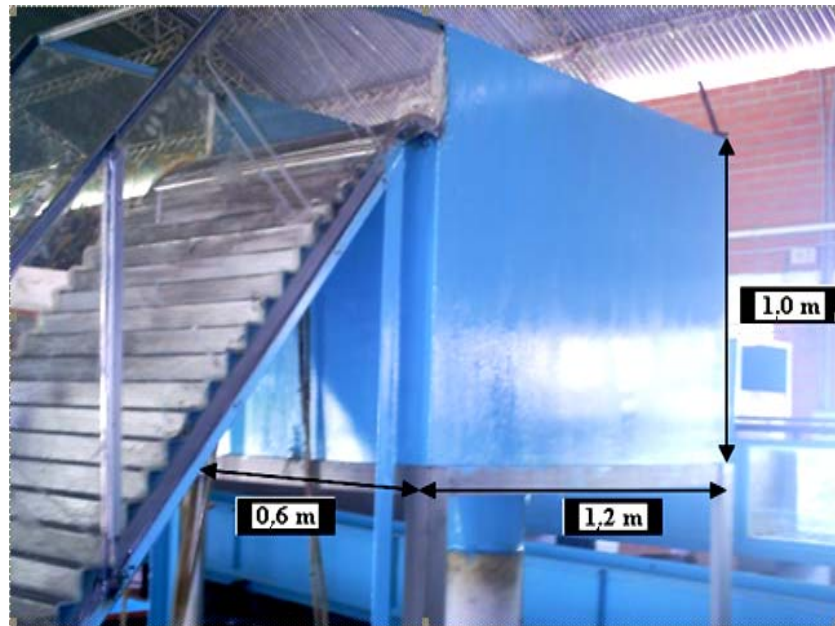


Foto 16: Dimensiones del tanque de carga que alimenta al sistema, para el funcionamiento del modelo físico reducido

1.3.4 PROYECTO INTEGRADO ESCANA

1.3.4.1 Antecedentes

La corporación Regional de Desarrollo de Chuquisaca, en cumplimiento estricto de los objetivos para los que fue creada, lideriza y/o coadyuva en el desarrollo de los sectores rurales del Departamento.

En este caso particular, se trata de áreas altas (cabeza de valle) que presentan indicadores de mayor pobreza, menores recursos, alta densidad poblacional, etc., priorizando su desarrollo a un mediano plazo.

Habiéndose estudiado la zona y determinando objetivamente la potencialidad con que cuenta, se definió elaborar un documento a nivel diseño final que sirva como instrumento para lograr interesar al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

La gerencia y planificación de proyectos, a través del Departamento de Elaboración de Análisis, estructura el presente documento pretendiendo que su implementación posibilite el desarrollo tecnológico del sector agropecuario económicamente y socialmente, mejoramiento de la producción y productividad, eliminándose la erosión de las cuencas creando así posibilidades de mejorar nivel de vida de los campesinos pobladores del área del proyecto.

El proyecto integrado Escana se encuentra ubicado en el municipio de Yamparáez a 25 km. de la ciudad capital del departamento de Chuquisaca, en la actualidad está en la etapa de implementación de riego localizado por aspersión.

Asimismo, es importante destacar la inquietud e interés de los propios campesinos del área estudiada, en la pretensión de crear las condiciones necesarias para salir del estado de pobreza en que actualmente se encuentran; con lo que es posible deducir que el contenido marco del estudio es en gran medida la expresión y pretensión de los mismos.

1.3.4.2 Área del Proyecto

El proyecto se encuentra ubicado en el cantón de Yamparáez, provincia del mismo nombre del departamento de Chuquisaca. Específicamente abarca dos áreas (alta y baja), unidas por el río Pulqui.

La primera está situada a 3100 m.s.n.m. y distante a 25 km. de la ciudad Sucre sobre la carretera hacia Tarabuco, adicionando 10 km, de ruta vecinal. Esta zona será beneficiada con los siguientes componentes: Forestación (destinado a controlar cuencas, eliminándose posibilidades de sedimentación en presa y mejoramiento del ambiente), participación de la mujer (Salud, Educación y Vivienda) y Energía Eléctrica.

La zona baja a 2600 m.s.n.m. y 38 km. de la ciudad de Sucre sobre la misma carretera, mas 10 km. de camino vecinal, será beneficiada con los siguientes componentes: Agrícola (300 Has. Bajo Riego, 484 Has.).

A secano con cultivos forraje, perennes y anuales con posibilidades de doble cosecha, Pecuario (introduciendo 160 vacas de raza holandesa), participación de la mujer, Crédito, Extensión y Energía Eléctrica.

Las familias a beneficiarse en toda el área suman aproximadamente a 700, con una media de 5 miembros por cada una, distribuidas en 400 en la zona alta y 300 en la zona baja.

1.3.4.3 Justificación del Proyecto Integrado ESCANA

La potencialidad de los recursos agropecuarios de la zona, en combinación directa con una actividad positiva e interés abierto y demostrado de la población del área del proyecto, integradas ambas, con una mayor participación y con perspectivas de incrementar sus niveles de ingresos que determinara en última instancia elevar los niveles de vida; son aspectos que justifican la preparación del presente Proyecto.

Es también importante considerar que los términos de elaboración del proyecto están enmarcados dentro de los planes y estrategias asignadas a la región en el Plan 2010.

Solo la acción combinada e integra podrá contribuir a solucionar los problemas, incrementándose la producción agrícola y forestal mejoramiento de los servicios de apoyo producción comercialización. El efectuar acciones independientes no tendrá un impacto deliberante, contribuyendo en una menor escala a mejorar las condiciones de vida del sector rural en general.

1.3.4.3.1 Objetivos del Proyecto Integrado ESCANA

- Elevar el nivel de ingresos de los beneficiarios del área del Proyecto mediante el incremento de la producción y productividad agropecuaria.
- Reducir el nivel de subempleo del área rural, mediante una mejor ocupación de la mano de obra familiar e incremento de la oferta de trabajo en el sector agropecuario, con la introducción de innovaciones tecnológicas y prácticas en el mismo.

1.3.4.3.2 Metas del Proyecto Integrado ESCANA

- Irrigar 300 Has. De tierras habilitadas para la agricultura tecnificada, pretendiéndose realizar doble cosecha.
- Otorgar 160 cabezas de ganado vacuno lechero a 120 beneficiarios en 2 módulos (80 de 1 cabeza y 40 de 2 cabezas) en períodos anuales.
- Forestar 290 Has. De tierras marginales con variedades aptas al área, evitando la erosión y controlar la cuenca del Río Pulqui del área de proyecto.
- Proveer de energía eléctrica a 700 familias mediante la electrificación rural.

1.3.4.3.3 COMPONENTES DEL PROYECTO INTEGRADO ESCANA

1.3.4.3.3.1 COMPONENTE PECUARIO

Comprende la introducción de 160 cabezas de ganado vacuno Holstein en 2 años dentro de las condiciones del programa de Fomento Lechero PIL – CORDECH.

1.3.4.3.3.2 COMPONENTE FORESTAL

Implantación de 290 Has. Con plantas aptas a las áreas altas (pino y eucalipto) en 4 años de acuerdo a cronogramas propuestos, con el fin de evitar erosión, control de la cuenca eliminar posibilidad de sedimentación en presa y mejorar el medio ambiente.

1.3.4.3.3.3 COMPONENTE DE PARTICIPACIÓN DE LA MUJER

Se pretende que mediante cursillos, y folletería, etc. Se mejore la vida familiar campesina, enseñando a la mujer como núcleo de la familia, métodos modernos y técnicos en salud, higiene alimentación, y vivienda, etc.

1.3.4.3.3.4 COMPONENTE DE EXTENSIÓN Y CRÉDITO

Si se desean lograr los objetivos y metas propuestos, se debe apoyar a los componentes antes indicados introduciendo el servicio de extensión, crédito y comercialización, mediante los cuáles se podrá organizar a los beneficiarios quienes, luego de un período de aproximadamente 5 años, estarán en condiciones de mejorar su proyecto por sí mismos.

1.3.4.3.3.5 COMPONENTE ENERGÉTICO

Este componente permitirá que 700 familias obtengan este servicio, el que se transformara en gran ayuda a la producción agropecuaria, así como el mejoramiento de la vida campesina y con posibilidades futuras de ingresar a la competencia agroindustrial.

1.3.4.3.3.6 COMPONENTE DE RIEGO

PRESA

Capacidad de Embalse

➤ Volumen útil	2,80 Hm ³
➤ Volumen Muerto	0,40 Hm ³
➤ Volumen Total	3,20 Hm ³
➤ Caudal Máximo de Servicio	0,40 m ³ /s
➤ Caudal de Máximo de Vertido	50,0 m ³ /s

Características de la Presa

➤ Tipo de Presa	Gravedad (H ^o C ^o)
-----------------	---

➤ Altura máxima de Presa	30,81 m
➤ Altura máxima de la Presa	2.981,20 m.s.n.m.
➤ Longitud de la corona	118,00 m
➤ Ancho de Corona	1,54 m
➤ Ancho máximo pie de presa	25,32 m
➤ Borde Libre N.A.M.	2,50 m
➤ Talud aguas arriba V:H	1:1
➤ Talud aguas abajo V:H	1:0,75
➤ Entrada de Sedimentos	1488,00 m ³ /año
➤ Volumen de Presa	14.500 m ³

Aliviadero

➤ Caudal de Diseño 127 m ³ /s; T=100 años; 201 m ³ /s; T = 1000 años	
➤ Nivel de Aguas Normales m.s.n.m.	2.979,90
➤ Ancho de Cresta	50,00m; 70,00m
➤ Tirante de Diseño	1,50 m
➤ Nivel de aguas máximas 2.980,75 m.s.n.m.; 2.981,13 m.s.n.m.	

Obra de Toma

➤ Caudal de Diseño	400 l/s
➤ Nivel de aguas máximo m.s.n.m.	2.980,75
➤ Nivel de explotación mínima	2.964,10 m.s.n.m.
➤ Longitud de conducto	36,00 m
➤ Sección de conducto	0,3 m Diámetro

➤ Pendiente de fondo	0,002
➤ Tamaño de compuerta	0,55*0,55 m ²
➤ Fuerza vertical máxima de operación	2,50 Tn

Canales de Riego

Longitudes

▪ Canal 1 Norte	3250,00 m
▪ Canal 2 Sud	2448,00 m

Revestimiento de Canal 1

▪ En Roca	500,00 m
▪ En Suelo	2750,00 m

Revestimiento de Canal 2

▪ En Roca	238,00 m
▪ En Suelo	2210,00 m

Caudales

▪ Canal 1	280,00 l/s
▪ Canal 2	1321,00 l/s

Áreas a Irrigar

▪ Canal 1	200 Has.
▪ Canal 2	120 Has.



Vista aguas abajo de la presa, vertedor de excedencias y obra de toma

Características generales

Tipo de presa	Gravedad	Uso	Riego
Área de la cuenca	26,08 km ²	Municipio	Yamparáez
Altura de la presa	34,50 m	Latitud	19°14'53"
Longitud coronamiento	118 m	Longitud	65°06'17"
Capacidad de embalse	2.800.000 m ³	Cuenca de influencia	Escana
Cota coronamiento	3.174 msnm	Río de la presa	Pulqui

Foto 17: Presa Escana, resumen de sus características.

1.3.4.3.3.7 COMPONENTE AGRÍCOLA

Los cultivos que se realizan son los tradicionales en éstas zonas y se identifican los siguientes:

Sin Proyecto

Cultivos	Superficie (Has)		Rendimiento (Tn)		Costo	Valor de Producción
	Sin Riego	Con Riego	Sin Riego	Con Riego	Total (\$us)	(\$us)
Maíz	246,00	17,00	1,00	1,00	39.098,70	41.880,00
Papa	81,00	46,00	4,13	4,15	61.428,70	66.373,00
Garbanzo	161,00	----	0,91	----	29.173,20	85.805,00
Cultivos	Superficie (Has)		Rendimiento (Tn)		Costo	Valor de Producción
	Sin Riego	Con Riego	Sin Riego	Con Riego	Total (\$us)	(\$us)
Trigo	200,00	46,00	0,73	0,73	33.106,20	24.412,00
Cebada	8,00	17,00	0,80	0,80	337,1	2.713,00
Higuera	8,25	----	4,84	----	455,40	16.590,00
Durazno	8,25	----	4,00	----	420,75	15.180,00
Vid	----	2,50	3,00	----	73,50	2.170,00
Tuna	5,50	----	3,00	----	57,75	3.440,00
Otras Frutas	----	0,50	6,00	----	14,70	2.400,00
	718,00	129,00	----	----	167.166,0	260.963,00

Con Proyecto

Cultivos	Superficie (Has)		Rendimiento (Tn)		Costo	Valor de Producción
	Sin Riego	Con Riego	Sin Riego	Con Riego	Total (\$us)	(\$us)
Maíz Ch.	----	360,00	----	3,00	9.087,00	45.500,00
Maíz G.	130,00	30,00	2,00	2,50	42.484,00	48.575,00
Papa	----	60,00	----	8,00	44.418,00	64.800,00
Haba V.	----	30,00	----	5,00	5.878,00	18.500,00
Maní	----	30,00	----	2,00	8.076,00	14.800,00
Garbanzo	161,00	----	1,50	----	51.970,00	148.900,00

Trigo	150,00	----	1,20	----	34.425,00	3.100,00
Cebada	33,00	----	1,20	----	6.042,00	1.128,00
Cebolla C.	----	50,00	----	8,00	27.025,00	95.000,00
Zanahoria	----	40,00	----	8,00	19.200,00	65.760,00
Cebolla V.	----	20,00	----	6,50	9.806,00	25.600,00
Cultivos	Superficie (Has)		Rendimiento (Tn)		Costo	Valor de Producción
	Sin Riego	Con Riego	Sin Riego	Con Riego	Total (\$us)	(\$us)
Repollo	----	12,00	----	6,00	5.250,00	1.500,00
Higuera	----	12,00	----	6,00	774,00	30.240,00
Durazno	----	20,00	----	7,00	1.874,00	64.400,00
Vid	----	8,00	----	6,00	963,00	17.280,00
Tuna	10,00	----	6,00	----	294,00	15.000,00
Frutilla(1)	----	8,00	----	2,00	1.316,00	13.600,00
Alfa alfa(1)	----	80,00	----	11,00	31.648,00	110.280,00
Avena(2)	----	60,00	----	7,00	12.150,00	50.364,00
	484,00	820,00	----	----	31.280,00	834.327,00

(1) Cultivo a intercalar con Vid

(2) Valor Agregado por producción Pecuaria

EVALUACIÓN ECONÓMICA

TIR	35,52
VAN (13%) (\$us)	1.831.143,00
TIR Cuando la inversión se incrementa el 20 %	27,30 %
TIR Cuando la inversión se incrementa el 0 %	26,20 %
TIR Cuando los egresos decrecimiento el 20 %	18,46 %
TIR Cuando la inversión se incrementa el 15 % y los ingresos disminuyen 15 %	15,27 %
Inversión Total (Sin electrificación) (\$us)	1.484.107,00

1.4 MODELAGE HIDRÁULICO Y TRABAJO DE LABORATORIO

1.4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS EN EL LABORATORIO

El laboratorio debe proveer de los medios necesarios para efectuar experimentos y trabajos de carácter científico o técnico.

Los experimentos de laboratorio pretenden fomentar la observación, el espíritu crítico y un adiestramiento en técnicas que despertaran el interés por la investigación.

La experimentación en el laboratorio de hidráulica en nuestro estudio, se basa en el diseño, construcción y operación de tres modelos hidráulicos reducidos de disipadores de energía a escala, realizando la observación del comportamiento del flujo en los diferentes modelos, cuyo tamaño de los modelos se supedita a factores como espacio disponible, capacidad de las instalaciones del laboratorio, efectos de escala, etc. Para la operación se requieren los aparatos y dispositivos que midan las características hidráulicas del escurrimiento: Gastos, tirantes y altura de presión.

En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas de modelación física de fenómenos hidráulicos, que unidas al desarrollo de instrumento de medición empleados en el laboratorio y equipos generadores de fenómenos a escala, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el prototipo y, por tanto, se obtienen óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras a construir. Esto justifica ampliamente la utilización de modelos hidráulicos.

El empleo de un modelo hidráulico implica establecer un programa definido de investigación experimental sobre todas las variables que intervienen, en forma particular o en grupo. Lo anterior se hace para poder verificar en su caso la validez de soluciones analíticas de un problema dado, o determinar las leyes de relación entre las diferentes variables que, extrapoladas al prototipo,

permitan optimizar la eficiencia de cada uno de los elementos del sistema modelo-prototipo. En ciertas etapas del programa y cuando el problema se puede describir con suficiente detalle utilizando modelos matemáticos, éstos se emplean complementariamente con resultados satisfactorios.

1.4.1.1 Instrumentos para la Medición en Laboratorio

Para realizar la modelación de los disipadores se midieron las siguientes variables:

- Caudales
- Tirantes
- Altura de Presión o Carga de Presión

Con estos datos esencialmente determinamos:

- Velocidades
- Número de Froude

Caudal.- Este se midió mediante un instrumento nuevo de reciente adquisición del laboratorio, es un caudalímetro electromagnético formado por un tubo sensor y un medidor electrónico, con las siguientes características técnicas:

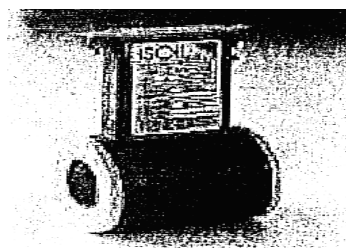


Foto 18: Tubo MS 1000 “WAFER”

- Sensor tipo “wafer” para montar con contra bridas de varios tipos (DIN, ANSI, KIS, etc.)
- Material del caudalímetro
 - Acero al Carbono pintado RAL 6028/Acero inoxidable AISI304.
- Diámetro nominal
 - PN 16 (revest. PP, Ebonita)/ PN40 (revest. PTFE)
- Conexiones de proceso
- Material de la conexión
- Temperatura del líquido
 - 0 a 100 °C (revest.PP) / 0 A 80 °C (revest. Ebonita)
 - -20 a 100 °C (revest. PTFE, compacto)
 - -20 a 150 °C (revest. PTFE, separado)
- Material de revestimiento PP/Ebonita/PTFE/otros
- Material de los electrodos
 - Acero Inox. AISI 316L/Hastelloy B o C/Platino
 - Tántalo/Titanio/Otros
- Clase de protección
 - Compacto – IP67
 - Separado C (máximo 10 metros) – IP68
 - Separado L (máximo 500 metros) – IP67 (opcional IP68)

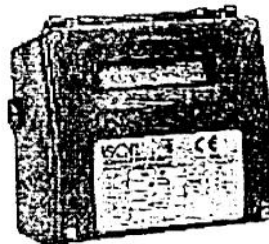


Foto 19: Electrónica ML110

- Material
 - Nylon + fibra de vidrio
- Acero inoxidable

- AISI304 pulido
- Dimensiones
 - 120 x 120 x 55
- Protección
 - IP65
- Prensa cables
 - N.2 PG11 n.1 PG 16,5
- Temperatura ambiente
 - 0 a 50°C
- Pantalla
 - 2 líneas x 16 caracteres, retro iluminado
- Teclado de programación
 - 3 teclas
- Salida Pulsos / Frecuencia
 - N.2 1250 Hz (100 mA, 40 Vdc) (programable)
- Salida de corriente
 - N.1 (0/4-20 Ma – RL 800 Ohm)
- Data logger
 - No
- Medición bi-direccional
 - Sí
- Doble Rango
 - Sí
- Valor de FS
 - Entre 0,4 y 10 m/s
- Interface serie
 - RS485 y RS232
- Función auto diagnóstico
 - Si
- Detección de tubo vacío
 - Si
- Separación galvánica
 - Todas las entradas y salidas están separadas galvánicamente
- Almacenamiento de datos
 - Los datos quedan registrados en una EEPROM (fallo corriente)
- Programación
 - Por teclado o PC
- Función dosificación (Batch)
 - No
- Certificación CE
 - Equipo certificado CE
- Exactitud de la medida
 - $\pm 0,4\%$ v.m. o $\pm 0,8\%$ (para velocidades $> 1\text{m/s}$)

- Repetibilidad
 - Mejor del 0,1 %
- Alimentación
 - 90-265 Vac (45-60Hz) / 10-63 Vdc/15-45 Vac (45-66Hz)/10-25 Vcd
- Consumo
 - 5 VA 4VA(CA) / 3 W (CC)

El caudal se midió treinta veces, para cada uno de los caudales de ensayo realizado en el laboratorio.

Tirante.- O altura de agua viene a ser uno de los principales datos que se midieron, pues de su comportamiento depende el diseño hidráulico del vertedor y de las obras abajo del mismo. En una primera instancia se trato de emplear una cámara digital, pero no se obtuvo la claridad necesaria en cada punto de medición. Por último se coloco cinta métrica en la superficie lateral derecha de cada disipador, en cada punto de medición a distancias que varían de un mínimo de 2,5 centímetros y un máximo de 5 centímetros, las lecturas en cada punto se llevaron a cabo visualmente. La instalación final de la cinta métrica se visualiza en las siguientes fotografías para cada disipador:

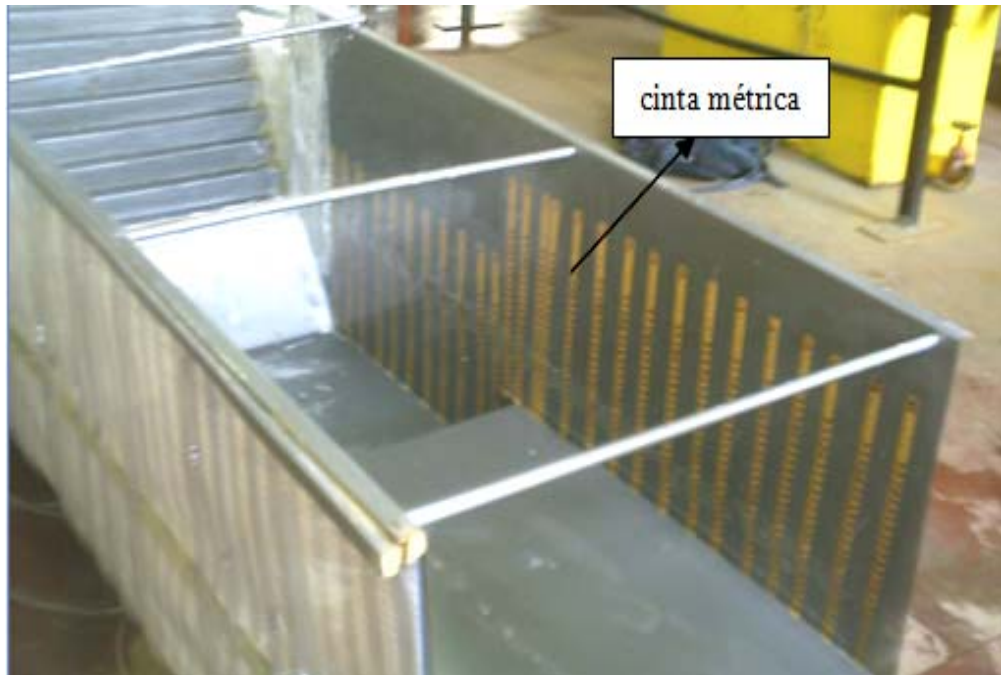


Foto 20: Cinta métrica colocada en el Pozo Amortiguador



Foto 21: Cinta métrica colocada en el Tanque TIPO I.



Foto 22: Cinta métrica colocada en el Tanque TIPO III.

El tirante se midió de la siguiente manera para cada disipador ensayado:

Pozo Amortiguador.- En éste disipador se midió el tirante perpendicularmente a su base en 27 distintos puntos realizando diez mediciones en cada punto, con la cinta métrica la cuál tiene una precisión de 1 mm, igualmente para los dos restantes disipadores.

Estanque Tipo I.- En éste disipador también se midió el tirante perpendicularmente a su base en 36 distintos puntos efectuando diez mediciones en cada punto.

Estanque Tipo III.- Por último en éste disipador se midió el tirante perpendicularmente a su base en 35 distintos puntos ejecutando diez mediciones en cada punto.

Altura de Presión.- O carga de presión, con ésta altura determinamos la presión manométrica. Para la medición empleamos mangueras las cuáles se conectan a soportes de madera ubicados en los bordes de la pared lateral izquierda de cada dissipador y así por diferencia de alturas obtenemos la altura de presión o carga de presión dentro de la línea central de cada dissipador, a una distancia de 5 centímetros aproximadamente.

En las siguientes fotografías podemos visualizar la manera en que quedaron instaladas dichas mangueras para cada uno de los dissipadores empleados:



Foto 23: Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Pozo Amortiguador.



Foto 24: Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Tanque TIPO I.



Foto 25: Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Tanque TIPO III.

La altura de presión manométrica se midió de la siguiente manera para cada disipador ensayado:

Tanque Amortiguador.- En éste disipador se midió la altura de presión en la línea central de la base del disipador en 24 distintos puntos realizando diez mediciones en cada punto, con una precisión de 1mm, igualmente para los dos restantes disipadores.

Tanque Tipo I.- En éste disipador también se midió la altura de presión en la línea central de la base en 27 distintos puntos ejecutando diez mediciones en cada punto.

Tanque Tipo III.- Por último en éste disipador se midió la altura de presión en la línea central de la base en 27 distintos puntos efectuando diez mediciones en cada punto.

1.4.2 MEDICIÓN DE DATOS

Debemos tomar la mayor cantidad de mediciones posibles, con lo cuál reunimos datos, para así poder analizar mejor el comportamiento del flujo y alcanzar los objetivos del trabajo. Con la ayuda de los instrumentos anteriormente descritos llevamos a cabo la medición de caudales, tirantes y alturas de presión variando desde el 75% de caudal de diseño hasta un 110% del caudal, obteniendo seis caudales diferentes al finalizar la medición para cada disipador. Se obtiene entre las mediciones de caudales, tirantes y alturas de presión un total de diez mil quinientos (10500) mediciones, considerando toda esta cantidad de datos lo suficientemente válidos para realizar un análisis del comportamiento hidráulico del flujo sobre los disipadores.

1.4.3 ADMINISTRACIÓN DE LOS ARCHIVOS REGISTRADOS

Aquí llevamos a cabo la ordenación de los registros, durante las sesiones de ensayo los archivos son almacenados en las planillas de toma de datos en carpetas nombradas según el caudal que se efectuó en la sesión. Para tener bien organizados los registros los ordenamos en una base de datos, que se completaba con más registros al concluir cada sesión, en ésta base de datos se detallan las principales características de los registros que íbamos obteniendo en cada sesión. En anexos se detalla el modelo de los registros de la base de datos.

Prosiguiendo, en gabinete se reordenaron y renombraron cada uno de las diez mil quinientos (10500) mediciones entre caudales, tirantes y alturas de presión, que se tomaron durante las sesiones en el laboratorio. La reordenación la establecimos según objetivos del experimento, así tuvimos 3 tipos diferentes:

- CAUDALES
- TIRANTES
- ALTURAS DE PRESIÓN

1.4.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el manejo de los equipos de laboratorio como en su operación se requiere un planeamiento cuidadoso de los pasos a seguir para modificar las variables que intervienen en el fenómeno: Apertura y cierre de válvulas, variación de caudales y tiempos de operación, procedimientos para lecturas de la instrumentación, medición y registro del efecto principal. Un programa experimental puede ser dividido en diferentes fases, por ejemplo consideremos las siguientes:

- a) **Fase de Planeación.-** Se consideran y evalúan distintas aproximaciones que pueden seguirse para la solución del problema formulado. También ésta fase es conocida como diseño preliminar.
- b) **Fase de diseño.-** Aquí determinamos la instrumentación necesaria y los detalles para la configuración de los aparatos que se usaran en el experimento, de acuerdo con la información recopilada en la fase anterior.
- c) **Fase de construcción.-** Se debe unir cada elemento seleccionado al equipo experimental y efectuar la calibración de los instrumentos para la experimentación.
- d) **Fase de depuración.-** Se lleva a cabo la utilización del equipo, también es común en ésta fase descubrir imprevistos que siempre es de esperar. Es decir, según los resultados obtenidos en ésta fase se puede llevar a cabo algún rediseño y a cambios en la construcción u operación del equipo experimental.
- e) **Fase de ejecución.-** Realizamos el experimento y obtenemos los datos, los registramos y los almacenamos.
- f) **Fase de análisis de datos.-** Llevamos a cabo un estudio de los datos para poder obtener una respuesta o una solución al problema que está siendo investigado.
- g) **Fase de reporte.-** Los resultados y las condiciones deben presentarse de una manera clara para que se maximice la utilidad de los resultados experimentales.

Generalmente en la operación del modelo se observan otros aspectos no previstos en la definición de objetivos principales, pero que influyen con el buen o mal desempeño de la estructura hidráulica. Es necesario dentro del experimento realizar todas las modificaciones que el investigador considere pertinentes para una mejor comprensión del fenómeno o fenómenos

involucrados, para así llegar a las mejores condiciones en el comportamiento hidráulico del modelo diseñado.

CAPÍTULO II
METODOLOGÍA DE DISEÑO DE
DISIPADORES DE ENERGÍA

2.1 METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA

2.1.1 DISIPADORES DE ENERGÍA

Cuando el agua corre por el vertedero y los canales o túneles de descarga contiene gran cantidad de energía y mucho poder destructivo debido a las altas presiones y velocidades. Éstas pueden causar erosión en el lecho del río, al pie de la presa, o en las estructuras mismas de conducción, poniendo en peligro la estabilidad de las estructuras hidráulicas. Por lo tanto se deben colocar disipadores de energía.

Para la selección del tipo de disipador se debe tener las siguientes consideraciones:

1. Energía de la corriente.
2. Economía y mantenimiento ya que éste eleva mucho el costo.
3. Condiciones del cauce aguas abajo (roca, y suelo erosionable, etc.).
4. Ubicación de las vías de acceso, casa de máquinas, y demás estructuras hidráulicas ya que su seguridad no puede quedar comprometida.
5. Congelamiento.
6. Efecto de las subpresiones y del vapor de agua sobre las instalaciones.
7. Daños causados a la fauna y la flora por la erosión.
8. Proyectos y poblaciones aguas abajo.

Existen varios tipos de disipadores de energía, como por ejemplo los estanques amortiguadores que utilizan el resalto hidráulico para absorber parte de la energía de la corriente, también tenemos los trampolines que lanzan el agua a distancia para alejar la zona de caída y por consiguiente la erosión.

2.1.2 TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA

Existen diferentes tipos de disipadores de energía, entre los cuáles podemos mencionar los siguientes:

- a) El Pozo Amortiguador
- b) El Estanque Amortiguador
- c) Estanque de Inmersión
- d) El trampolín

En los siguientes subtítulos se dará una explicación más detallada de los disipadores antes mencionados.

2.1.3 EL POZO AMORTIGUADOR

El cálculo de un pozo amortiguador se basa fundamentalmente en la obtención de la altura h del escalón del pozo capaz de garantizar, que la conjugada del tirante que se tiene al inicio del pozo, coincida con el tirante de que se dispone aguas debajo de éste, para de esa manera lograr la ocurrencia del salto hidráulico al pie de cimacio vertedor o la rápida según sea el caso. Una vez determinada ésta altura se procederá a calcular la longitud de revestimiento de dicho pozo. (Ver figura 9).

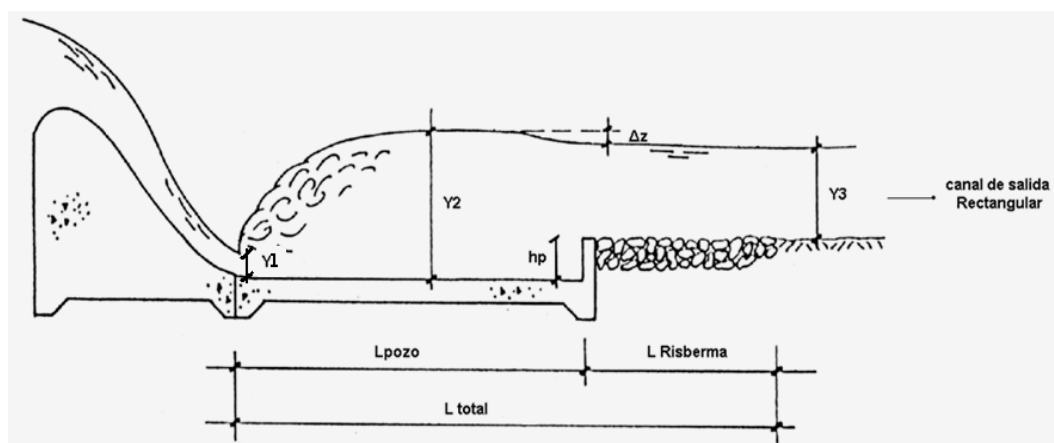


Figura 8: Esquema del Pozo Amortiguador

En el cálculo de un pozo amortiguador es importante tener presente lo siguiente:

- 1) La condición fundamental para ejecutar el cálculo de un pozo amortiguador es que $y_2 > y_3$ (en lo adelante se denominará y_3 tirante aguas abajo).
- 2) Es frecuente usar como criterio para el cálculo de la altura del pozo un cierto factor de seguridad conocido como η que oscila entre 1,00 y 1,10 y tiene como objetivo, lograr un cierto incremento en el valor de conjugada y_2 para de esa manera tener una seguridad en el cálculo del escalón del pozo con el propósito de garantizar siempre la ocurrencia del salto dentro de los límites concebidos para el pozo amortiguador.

En relación con la selección del valor de η que se deberá asumir para el cálculo del pozo amortiguador, resulta frecuente en la práctica, utilizar como criterio de selección el siguiente:

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

2.1.3.1 Metodología para el diseño de un pozo amortiguador ubicado al pie de un cimacio vertedor

Esta metodología ha sido concebida a partir de considerar conocidos los siguientes parámetros:

- Q (caudal de diseño)
- H_o (Carga total o de diseño)
- P^* (Altura del paramento inferior del cimacio vertedor)
- B (Ancho del pozo amortiguador)
- Y_3 (tirante aguas abajo)

Determinar: Longitud del pozo L_p , Profundidad del pozo h_p y longitud de la risberma L_r .

Los pasos a seguir serian los siguientes:

Donde:

η = Factor de seguridad, adimensional.

Fr_1 = Número de froude, adimensional.

Q = Caudal de diseño, en m^3/s .

q = Caudal unitario, en m^2/s .

H_o = Carga total o de diseño, m.

E_o = Energía del flujo, en m.

P^* = Altura del paramento inferior del cimacio vertedor, en m.

Δz = Pérdida de energía, en m.

B = Ancho del pozo amortiguador, en m.

y_3 = Tirante aguas abajo, m.

L_p = Longitud del pozo, en m.

L_t = Longitud total del pozo, en m.

h_p = Profundidad del pozo, en m.

L_r = Longitud de risberma, en m.

ϕ_p = Coeficiente que considera las pérdidas por el escalón del pozo (0,80 a 0,95).

b_{cs} = ancho del fondo del canal de salida, en m

y_1 = conjugada del tirante al inicio del pozo, en m

y_2 = conjugada del tirante al final del pozo, en m

g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

$h_{sup.}$ = Altura supuesta del pozo, en m.

$h_{cal.}$ = Altura calculada del pozo, en m.

I. Calcular el tirante contraído al pie del cimacio y_1 .

$$y_1 = \left[\frac{E_o}{3} \right] \cdot \left[1 - 2 \cdot \cos \left(60 + \frac{\theta^*}{3} \right) \right]$$

Procedimiento a seguir:

- a) Suponer un valor de altura del pozo (**hsup.**)
- b) Calcular los parámetros de las restantes columnas de la tabla anterior mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$\text{i. - } \boxed{Eo = Ho + (P^* + h_{sup})} \quad (7.7)$$

$$\text{ii. - } \boxed{\theta^\circ = \arccos\left[1 - \left(0.73 \cdot q^2 \cdot Eo^{-3}\right)\right]} \quad (7.2)$$

$$\text{iii. - } \boxed{y_1 = \left[\frac{Eo}{3}\right] \cdot \left[1 - 2 \cdot \cos\left(60 + \frac{\theta^\circ}{3}\right)\right]} \quad (7.1)$$

$$\text{iv. - } \boxed{\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8 \cdot Fr_1^2 + 1} - 1 \right]} \quad (7.5)$$

$$\text{v. - } \boxed{\Delta Z = \frac{V_{cansal}^2}{2 \cdot g \cdot \varphi p^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2 \cdot g \cdot \eta^2}} \quad (7.8)$$

$$\text{vi. - } \boxed{V_{cansal} = \frac{Q}{A_{cansal}}} \quad (7.9)$$

Si el canal de salida es de sección:

- Trapecial $\boxed{A_{can\ sal} = b_{cs} \cdot y_3 + m \cdot y_3^2}$ (7.10)

- Rectangular $\boxed{A_{can\ sal} = b_{cs} \cdot y_3}$ (7.11)

$$\text{vii. - } \boxed{V_{pozo} = \frac{Q}{A_{pozo}} = \frac{Q}{b_{pozo} \cdot Y_2}} \quad (7.12)$$

Donde:

$\phi_p = (0,80 \text{ a } 0,95)$ coeficiente que considera las pérdidas por el escalón del pozo.

b_{cs} = ancho del fondo del canal de salida, en m.

y_3 = tirante en el canal de salida, en m.

b_{pozo} = ancho del pozo, en m.

y_2 = conjugada del tirante al inicio del pozo, en m.

g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

η = factor de seguridad ya definido, adimensional.

$$\text{viii.} \quad - \quad \boxed{h_{calc} = \eta \cdot y_2 - (y_3 + \Delta z)} \quad (7.13)$$

$$\text{ix.} \quad - \quad \boxed{Error\ Relativo = \frac{h_{sup} - h_{calc}}{h_{calc}} < 1\%} \quad (7.14)$$

Si no se cumple que el Error Relativo $< 1\%$, se procede a suponer un nuevo valor de (**h**). Resulta aconsejable asumir, como nuevo valor de (**h_{sup}**), el valor de (**h_{calc}**) obtenido anteriormente.

Este proceso se repetirá hasta cumplir con el requisito antes mencionado.

V. Cálculo la longitud del pozo (L_p) y la longitud de la risberma (L_r) colchón de grava colocado después del salto hidráulico (salida del Pozo Amortiguador).

Empleamos las siguientes relaciones, las cuáles están condicionados según caudal unitario (q).

$$L_p = 3 \cdot y_2 \quad Si \ q \leq 5 \text{ m}^2 / s \quad (7.15)$$

$$L_p = L_s \quad Si \ q > 5 \text{ m}^2 / s \quad (7.16)$$

$$\boxed{L_t = 9 \cdot (y_2 - y_1)} \quad (7.17)$$

$$\boxed{Lr = L_t - Lp} \quad (7.18)$$

VI. Por último dibujar el pozo amortiguador a partir de los resultados obtenidos.

2.1.3.2 Metodología para el diseño de un pozo amortiguador ubicado al pie de una rápida

En el cálculo de un pozo amortiguador que se ubica al pie de una rápida, se pueden presentar dos casos fundamentalmente, que están relacionados con el régimen de circulación que se tenga al final de la misma, por ejemplo, si al fin de la rápida se alcanza el régimen uniforme en el cálculo del pozo amortiguador no es necesario iterar pues el tirante que se obtendrá al inicio del pozo será siempre el mismo, independientemente de la cota de fondo que éste requiera. Ahora bien, si por el contrario el régimen de circulación al final de la rápida no resulta ser uniforme, entonces a la hora de calcular el pozo amortiguador, se deberá tener presente que en la medida en que se varía la cota de fondo de dicho pozo es necesario la prolongación de la rápida, razón por la cuál el tirante entonces varía. Este último aspecto evidencia la necesidad de prolongar el cálculo de la curva superficial del flujo que circula por la rápida, más allá de donde se prevea inicialmente concluir ésta, con el propósito de contar con la información necesaria a la hora de acometer el diseño del pozo amortiguador.

A continuación se presenta una metodología para el diseño de un pozo amortiguador al pie de una rápida, cuyo régimen de circulación al terminar la

misma es gradualmente variado. Esta metodología ha sido concebida a partir de suponer como conocida la siguiente información:

- Cota final de la rápida.
- Q (caudal de diseño), en m³/s
- b (ancho de la rápida), en m.
- g (aceleración de la gravedad 9,81 m/s²)
- i (pendiente de la rápida), adimensional.
- Cálculo de la curva superficial de la rápida prolongada a una longitud mayor que la que se dispone hasta la cota concebida como final de la rápida.
- Y₃ (tirante aguas abajo), en m.

Determinar: Longitud del pozo L_p, Profundidad del pozo h_p y longitud de la risberma L_r.

Los pasos a seguir serian los siguientes:

- I. A partir de la curva superficial de la rápida se conoce el tirante que se analiza al final de ésta, el cual resulta ser a los efectos del cálculo del pozo amortiguador, el tirante a la entrada del mismo Y₁, entonces se procede a calcular el tirante conjugado Y₂.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8 \cdot Fr^2 + 1} - 1 \right] \quad (7.5)$$

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot Y_1}} \quad (7.19)$$

$$V_1 = \frac{Q}{B \cdot Y_1} \quad (7.6)$$

Donde:

Q = Caudal de diseño, en m³/s.

B = Ancho de la rápida igual al ancho pozo amortiguador, en m.

- II. Comparar Y_2 con Y_3 para valorar si es necesario o no el uso del pozo
- a) Si $Y_2 \leq Y_3 \Rightarrow$ no se requiere pozo
- b) Si $Y_2 > Y_3 \Rightarrow$ sí se requiere pozo
- III. En caso de requerirse pozo amortiguador, se procede al cálculo de la altura del escalón del pozo (h_p).

Con el propósito de organizar los resultados que se deben ir obteniendo durante el proceso iterativo, se recomienda utilizar la siguiente tabla:

hsup. (m)	ΔX (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Δz (m)	hcalc. (m)	Error relativo

Procedimiento a seguir:

- a) Suponer un valor de altura del pozo (**hsup.**)
- b) Calcular los parámetros de las restantes columnas de la tabla anterior mediante el uso de las siguientes expresiones:

i.
$$\Delta_x = \frac{h_{\text{sup}}}{\text{sen} \alpha} \quad (7.20)$$

Con el valor de Δx calculado, se obtiene de la curva superficial la profundidad de circulación que se tiene a esa distancia. El valor del tirante obtenido, constituye ahora el nuevo valor de Y_1 .

$$\text{ii. } \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8 \cdot F_r^2 + 1} - 1 \right] \quad (7.5)$$

$$\text{iii. } \Delta Z = \frac{V_{can.sal}^2}{2 \cdot g \cdot \phi p^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2 \cdot g \cdot \eta^2} \quad (7.8)$$

$$\text{iv. } V_{can.sal} = \frac{Q}{A_{can.sal}} \quad (7.9)$$

Si el canal de salida es de sección:

$$\text{Trapezoidal } A_{can.sal} = b_{cs} Y_3 + m Y_3^2 \quad (7.10)$$

$$\bullet \text{ Rectangular } A_{can.sal} = b_{cs} * Y_3 \quad (7.11)$$

$$\text{v. } V_{pozo} = \frac{Q}{A_{pozo}} = \frac{Q}{b_{pozo} Y_2} \quad (7.12)$$

Donde:

Δx = prolongación de la rápida, en m.

α = arctan i (ángulo de inclinación de la rápida), adimensional.

ϕp = (0,80 a 0,95) coeficiente que considera las pérdidas por el escalón del pozo, adimensional.

b_{cs} = ancho del fondo del canal de salida, en m.

Y_3 = tirante en el canal de salida, en m.

b_{pozo} = ancho del pozo igual al ancho de la rápida, en m.

Y_2 = conjugada del tirante al inicio del pozo, en m.

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

η = factor de seguridad donde:

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

$$\text{vi.} \quad \boxed{h_{calc} = \eta \cdot Y_2 - (Y_3 + \Delta z)} \quad (7.13)$$

$$\text{vii.} \quad \boxed{Error\ Relativo = \frac{h_{sup} - h_{calc}}{h_{calc}} < 1\%} \quad (7.14)$$

Si no se cumple que el Error Relativo $< 1\%$, se procede a suponer un nuevo valor de (**h**). Resulta aconsejable asumir, como nuevo valor de (**h_{sup}**), el valor de (**h_{calc}**) obtenido anteriormente.

Este proceso se repetirá hasta cumplir con el requisito antes mencionado.

IV. Cálculo la longitud del pozo (L_p) y la longitud de la risberma (L_r).

Empleamos las siguientes relaciones, las cuales están condicionados según caudal unitario (q).

$$L_p = 3 \cdot Y_2 \quad Si \ q \leq 5 \ m^2 / s \quad (7.15)$$

$$L_p = L_s \quad Si \ q > 5 \ m^2 / s \quad (7.16)$$

$$\boxed{L_t = 9 \cdot (Y_2 - Y_1)} \quad (7.17)$$

$$\boxed{Lr = Lt - Lp} \quad (7.18)$$

V. Dibujar el pozo amortiguador a partir de los resultados obtenidos.

Por último en relación con el cálculo de un pozo amortiguador ubicado al pie de una rápida, en donde el régimen que se tenga al finalizar la misma sea uniforme se deben seguir los pasos que se describen en la metodología anterior, con la única excepción de que en éste caso específico como el tirante Y_1 no varía independientemente de la cota a la que se ubique el fondo del pozo amortiguador, entonces una vez demostrado el 2^{do} paso de la metodología anterior, que se requiere de un pozo amortiguador, deberá calcularse en el 3^{er} paso, lo que a continuación se presenta y no lo que la metodología anterior aparece:

Empezamos paso III Calculando la altura del escalón del pozo (h_{pozo})

$$\boxed{h_{\text{pozo}} = \eta \cdot Y_2 - (Y_3 + \Delta z)} \quad (7.20)$$

Donde:

Y_2 = conjugada del tirante al inicio del pozo (obtenido en el paso 1)

η = factor de seguridad:

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

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

Para el cálculo de (Δz) empleamos las siguientes ecuaciones.

$$\boxed{V_{\text{can.sal}} = \frac{Q}{A_{\text{can.sal}}}} \quad (7.9)$$

Si el canal de salida es de sección:

- Trapecial
$$A_{can\ sal} = b_{cs} \cdot Y_3 + m Y_3^2 \quad (7.10)$$

- Rectangular
$$A_{can\ sal} = b_{cs} \cdot Y_3 \quad (7.11)$$

$$V_{pozo} = \frac{Q}{A_{pozo}} = \frac{Q}{b_{pozo} Y_2} \quad (7.12)$$

Para calcular de (Δz) empleamos la siguiente fórmula:

$$\Delta Z = \frac{V_{cansal}^2}{2 \cdot g \cdot \varphi p^2} - \frac{V_{pozo}^2}{2 \cdot g \cdot \eta^2} \quad (7.8)$$

Por último en el paso IV calculamos la longitud del pozo (L_p)

$$L_p = 3 * Y_2 \quad Si \ q \leq 5 \ m^2 / s \quad (7.15)$$

$$L_p = L_s \quad Si \ q > 5 \ m^2 / s \quad (7.16)$$

$$L_t = 9 \cdot (Y_2 - Y_1) \quad (7.17)$$

$$L_r = L_t - L_p \quad (7.18)$$

Según se puede apreciar la diferencia consiste en eliminar el proceso iterativo para obtener y_1 .

2.1.4 EL ESTANQUE AMORTIGUADOR

Por definición, un estanque amortiguador es un tramo corto de canal ubicado al final de un vertedor, o cualquier otra estructura que produzca flujo supercrítico.

A causa del uso frecuente de estanques amortiguadores, se han desarrollado varios diseños generalizados basados en estudios de modelos, así como en la experiencia y la observación de estanques amortiguadores existentes. Estos estanques disipan la energía cinética del flujo supercrítico al pie de la rápida de descarga, antes de que el agua retorne al cauce del río. Todos los diseños de estanques amortiguadores se basan en el principio del resalto hidráulico, el cual es la conversión de altas velocidades del flujo a velocidades que no puedan dañar el conducto de aguas abajo. La longitud del estanque debe ser aproximadamente la longitud del resalto. Ésta se puede disminuir construyendo bloques de concreto, dientes o sobre elevando la salida (umbral terminal). Es muy importante tener en cuenta el número de Froude para saber la forma y características del resalto y del flujo y así definir el tipo de estanque.

Ecuación del Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

Donde:

v = Velocidad media del flujo, en m/s

g = Aceleración de la gravedad, en m/s²

d = Longitud característica, en m.

La longitud característica se define como el área de la sección transversal del flujo de agua, normal a la dirección del flujo en el canal, dividida por el ancho

de la superficie libre (para canales rectangulares esto es igual a la profundidad de la sección del flujo).

De acuerdo con el número de Froude, los tanques empleados son:

1. Cuando Froude es menor que 1,7 no necesita emplear tanques amortiguadores, deflectores u otros dispositivos amortiguadores.
2. Cuando $1,7 < Fr < 2,5$, es la etapa previa al resalto. Como no tiene turbulencia, no son necesarios amortiguadores pero el tanque debe ser lo suficientemente largo para almacenar toda la longitud en la que se produce la retardación.
3. Cuando $2,5 < Fr < 4,5$, es el tanque tipo I. No se forma un verdadero resalto, es un régimen de transición. Aunque reduce el oleaje excesivo creado por saltos imperfectos, las olas seguirán más allá del estanque, por lo que se deben usar dispositivos amortiguadores. Este estanque viene a ser uno de los que se diseñó en el presente trabajo de investigación.
4. Cuando $Fr > 4,5$ es el estanque tipo III. Se forma un verdadero resalto. La instalación de dispositivos como bloques deflectores, dientes amortiguadores y umbral terminal en el suelo del estanque, permiten acortar su longitud en un 60%. Se usa para canales de descarga de vertedores y estructuras pequeñas en canales, donde la velocidad no exceda de 15-18 m/s. Este estanque también es uno de los que se diseñó para el presente trabajo de investigación.
5. Para $Fr > 4.5$ es el tanque tipo II. La longitud del tanque está reducida alrededor del 33% con dientes al principio y al final del tanque. Se usa en grandes caídas, descargas de vertedores o canales.

2.1.4.1 Principio de Disipación

La disipación de la energía a través del uso de un estanque amortiguador, se realiza al igual que en el pozo por medio de la ocurrencia de un salto

hidráulico con la única diferencia, que en éste tipo de disipador se utilizan distintos accesorios con el propósito de incrementar por un lado la disipación de la energía y contribuir por otro en la estabilización del flujo que abandona dicho estanque.

Es muy importante tener en cuenta el número de Froude para saber la forma y características del resalto y del flujo y así definir el tipo de estanque.

Es una estructura amortiguadora donde la disipación se da cuando el caudal de llegada choca y se provocan los remolinos que se forman debido al cambio de régimen del flujo.

2.1.4.2 Tipos de Accesorios que se emplean en el Estanque Amortiguador (Funciones)

Entre los accesorios que se utilizan en el estanque amortiguador se tienen los siguientes:

- 1) Dientes deflectores
- 2) Dados amortiguadores
- 3) Umbral terminal
- 4) Escalones

Los cuáles que continuación se detallan:

2.1.4.2.1 Dientes deflectores

Se colocan a la entrada del tanque amortiguador para dispersar el flujo. También se colocan en los vertederos y canales de descarga para disminuir la energía por medio de impacto. Cuando se colocan en la contraescarpa distribuyen el impacto en un área mayor.

Por medio del uso de modelos reducidos se ha llegado a la conclusión que son muy eficaces para caudales pequeños, pero para grandes el agua se subdivide

con violencia y es lanzada en arco de gran altura y al caer provoca socavaciones en el terreno.

Son aquellos elementos que se ubican a la entrada del estanque, para fragmentar el chorro e incrementar la profundidad del flujo que entra a dicha estructura. Además se puede señalar, que su presencia contribuye a crear la turbulencia requerida en la disipación de la energía y como resultado de esto se pueden obtener longitudes de estanques más cortas.

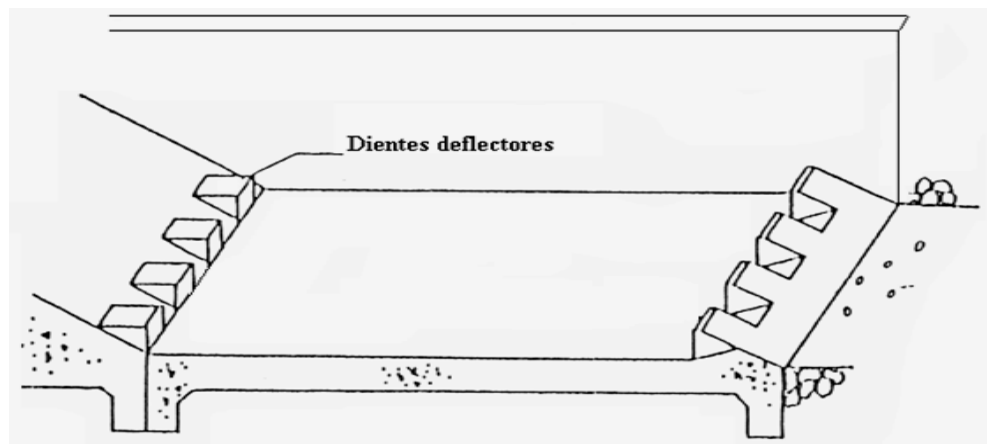


Figura 9: Estanque TIPO III

Como una aplicación tenemos el Estanque amortiguador Tipo III, que se desarrolló para cuencos disipadores de uso común en vertederos de presas altas y de presas de tierra y para estructuras de canales grandes. El cuenco contiene bloques en la rápida del extremo de aguas arriba y un umbral dentado cerca del extremo de aguas abajo. No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades relativamente altas que entran al resalto pueden causar cavitación en dichos bloques.

2.1.4.2.2 Dados Amortiguadores

Los dados amortiguadores son instalados en el estanque principalmente para estabilizar la formación del salto hidráulico e incrementar la turbulencia del flujo, con lo cual se logra una mejor disipación de la energía. Es importante resaltar que cuando por el aliviadero circulan gastos pequeños, aquellos contribuyen a compensar las deficiencias del tirante aguas abajo, mientras que para gastos grandes de circulación, ellos ayudan a deflectar el flujo alejado del lecho del río.

Cuando la velocidad a la entrada del estanque excede los 15 m/s no se recomienda su uso ya que corre el peligro de que ocurra en ellos la cavitación. Para evitar esta situación, los dados pueden ser colocados lo suficientemente lejos de la entrada, donde exista suficiente sumersión bajo el tirante aguas abajo.

Una de las dimensiones más importantes en el dado amortiguador resulta ser su altura pues si la misma es demasiado grande se produciría una cascada y si por el contrario es muy baja puede resultar una superficie rugosa y no cumplir con su objetivo de diseño o colocación.

Los dados amortiguadores se localizan en posiciones intermedias sobre el piso del cuenco. Su función es disipar la energía principalmente mediante una acción de impacto.

Debe tenerse en cuenta las cargas adicionales sobre la estructura que transmiten los dados amortiguadores al vertedero, para que por mal diseño de estos no se comprometa la estabilidad de la presa.

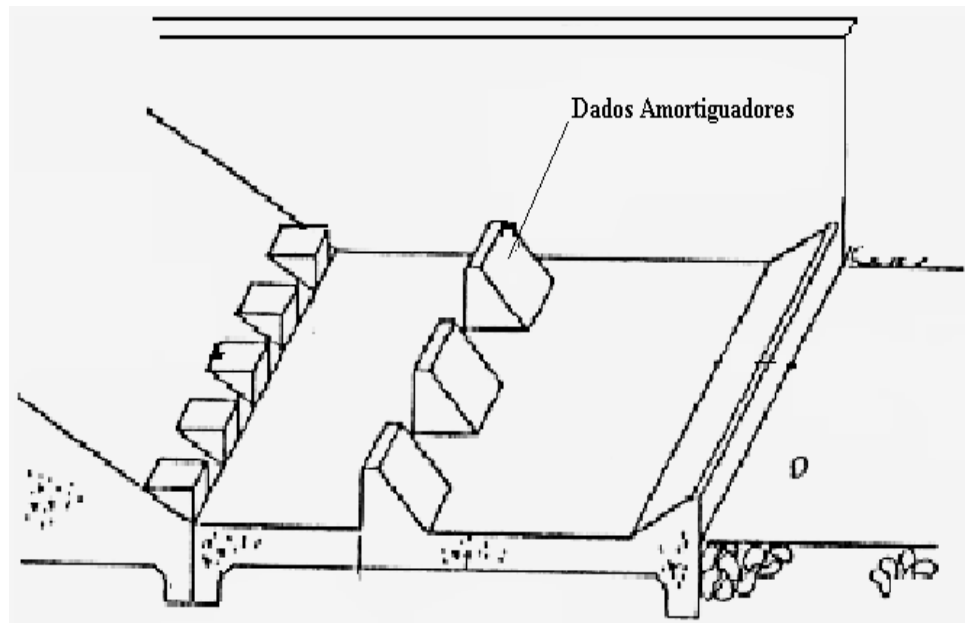


Figura 10: Estanque TIPO II



Foto 26: Dados amortiguadores en funcionamiento



Foto 27: Dados amortiguadores en funcionamiento vistos desde otra perspectiva

Los dados amortiguadores del piso deben ocupar entre el 40% y el 55% del ancho del cuenco disipador.

2.1.4.2.3 Umbral Terminal

Son aquellos umbrales que se construyen al final del estanque con el propósito de controlar la erosión que se producirá en el lecho del río. Las pruebas de laboratorio indican que éste elemento terminal, incrementa la eficiencia del estanque pues reducen apreciablemente la erosión del cauce aguas abajo.

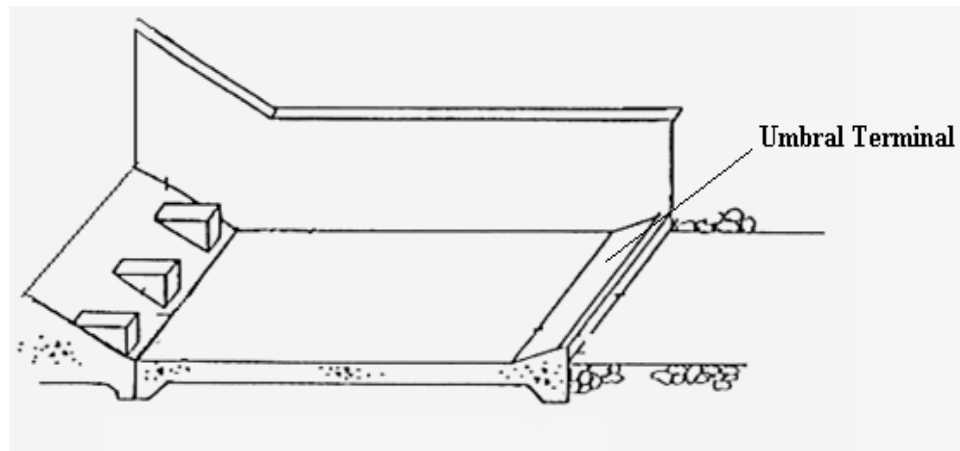


Figura 11: Estanque amortiguador Tipo I, con umbral terminal liso

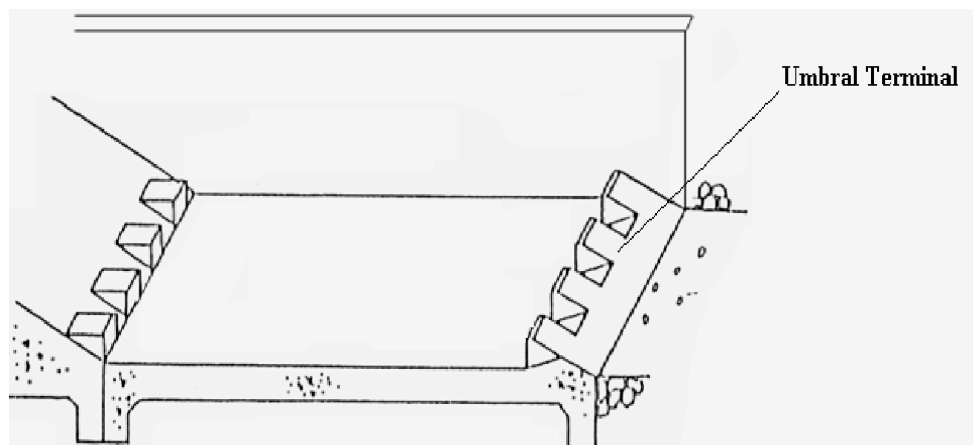


Figura 12: Estanque amortiguador Tipo III, con umbral terminal dentado

Los umbrales dentados, o sólidos, a menudo se colocan al final del cuenco disipador. Su función es reducir además la longitud del resalto y controlar la socavación. Para cuencos grandes diseñados para altas velocidades de entrada, el umbral por lo general es dentado para llevar a cabo la función adicional de difundir la parte residual del chorro de alta velocidad que puede alcanzar el extremo del cuenco.

2.1.4.2.4 Escalones

Se colocan con mayor frecuencia en el canal de descarga o rápida antes de llegar al estanque amortiguador, y disipan la energía por medio de impacto e incorporación de aire al agua.

Tenemos a las losas dentadas para canales o descarga de vertederos los cuales se usan 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.

En la siguiente gráfica podemos apreciar la diferencia en la disminución de energía que ocurre entre una rápida lisa y una rápida rugosa (es decir colocando escalones que ayudan a la disipación de energía).

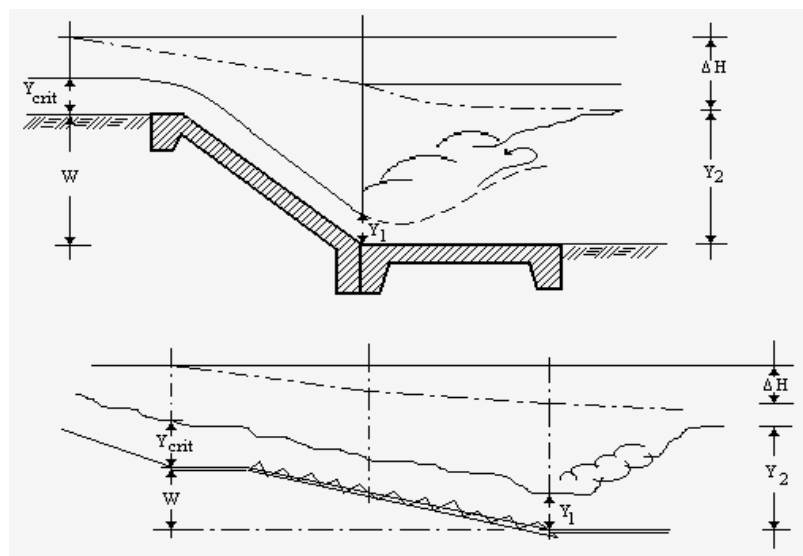


Figura 13 Diferencia entre una rápida lisa y rugosa H. Blind.

2.1.4.3 Metodología de Diseño Estanque Tipo I

Se recomienda para ser utilizado en estructuras grandes de vertederos, canales, etc., donde $Fr > 4.5$. La longitud del resalto y del cuenco se reduce alrededor del 33% mediante el uso de accesorios.

La metodología que a continuación se presenta para el diseño de un estanque amortiguador Tipo I, parte de conocer como datos:

Q = Gasto, en m^3/s .

b = ancho del estanque, en m.

y_3 = tirante aguas abajo (impuesto por el río o el canal de salida), en m.

y_1 = tirante a la entra del estanque, en m.

- Si hay rápida y_1 es el tirante al final de la rápida.

- Si es al pie de un cimacio, se calcula y_1 de la siguiente manera:

$$Eo = P^* + Ho \quad (7.4)$$

$$q = \frac{Q}{Lt} = \frac{Q}{b} \quad (7.3)$$

$$\theta^\circ = \arccos[1 - (0,73 \cdot q^2 \cdot Eo^{-3})] \quad (7.2)$$

$$y_1 = \left(\frac{Eo}{3}\right) \cdot \left[1 - 2 \cdot \cos\left(60^\circ + \frac{\theta^\circ}{2}\right)\right] \quad (7.1)$$

Donde:

Fr = Número de froude, adimensional.

Q = Caudal de diseño, en m^3/s .

q = Caudal unitario, en m^2/s .

b = Ancho del pozo amortiguador, en m.

y_3 = Tirante aguas abajo, m.

y_1 = conjugada del tirante al inicio del pozo, en m

y_2 = conjugada del tirante al final del pozo, en m

L_1 = Longitud del estanque TIPO I, en m.

- L = Longitud del umbral, en m.
 Lu = Ancho del umbral terminal, en m.
 hu = Alto del umbral terminal, en m.
 V = Velocidad al final de la rápida, en m/s.
 g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
 n = Número de dientes, en m.

PASOS A SEGUIR PARA EL DISEÑO DE UN ESTANQUE

- 1) Cálculo la velocidad a la entrada del estanque (V).

$$V = \frac{q}{y_1} \quad (7.21)$$

- 2) Cálculo el número de Froude a la entrada del estanque (Fr).

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (7.19)$$

- 3) Una vez calculado el número de Froude se analiza que tipo de salto va a tener lugar en el estanque y a partir de aquél se decide el tipo de estanque a diseñar. Teniendo los siguientes casos:

- a) Si $2.5 \leq Fr \leq 4.5$ → Salto oscilante → se diseña en éste caso un estanque Tipo I
- b) Si $Fr > 4.5$ → Salto estable entonces diseñamos:
- Si $V < 15$ m/s se diseña un Estanque Tipo II
 - Si $V \geq 15$ m/s se diseña un Estanque Tipo III

Diseño de un Estanque TIPO I ($2.5 \leq Fr \leq 4.5$)

- 1) Calcular el valor de TA de la siguiente ecuación

$$TA = y_1 \cdot (1,539 \cdot Fr - 0,471) \quad (7.22)$$

2) Calcular el tirante conjugado (y_2)

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[\sqrt{8 \cdot Fr^2 + 1} - 1 \right] \quad (7.23)$$

3) Determinar la longitud del estanque amortiguador (L_1)

$$L_1 = y_2 \cdot (1,50 + 1,768 \cdot Fr - 0,174 \cdot Fr^2) \quad (7.24)$$

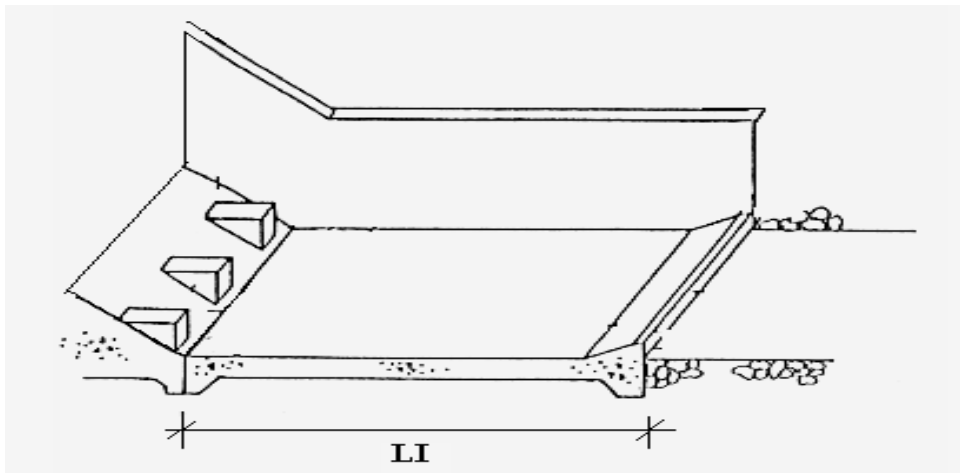


Figura 14: Longitud del Estanque Tipo I.

4) Calcular las dimensiones de los dientes deflectores, de la siguiente manera:

$$\text{Altura} = 2 \cdot y_1 \quad (7.25)$$

$$\text{Ancho} = y_1 \quad (7.26)$$

$$\text{Largo} = 2 \cdot y_1 \quad (7.27)$$

$$\text{Espacio entre dientes} = 2,5 \cdot y_1 \quad (7.28)$$

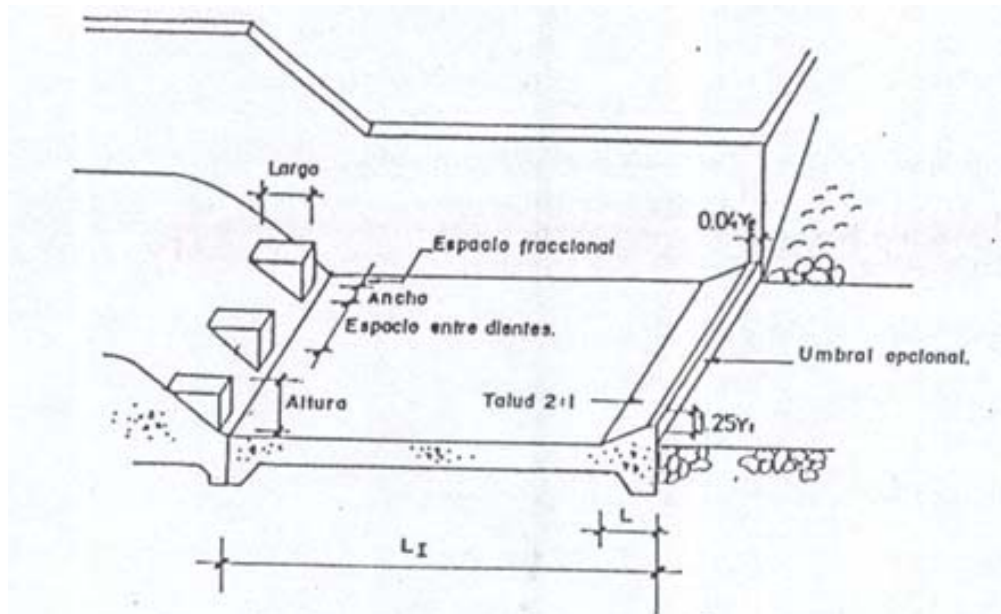


Figura 15: Dimensiones de los dientes deflectores Estanque Tipo I.

- 5) Calcular el número de dientes (n)

$$n = \frac{(b + 2,5 \cdot y_1)}{3,5 \cdot y_1} \quad (7.29)$$

- 6) Calcular el espacio fraccional entre la pared y el diente deflector.

$$\text{Espacio Fraccional} = \frac{[b - (3,5 \cdot y_1 \cdot n - 2,5 \cdot y_1)]}{2} \quad (7.30)$$

- 7) Obtener el dimensionamiento del umbral terminal.

$$L = 2,5 \cdot y_1 + 0,04 \cdot y_2 \quad (7.31)$$

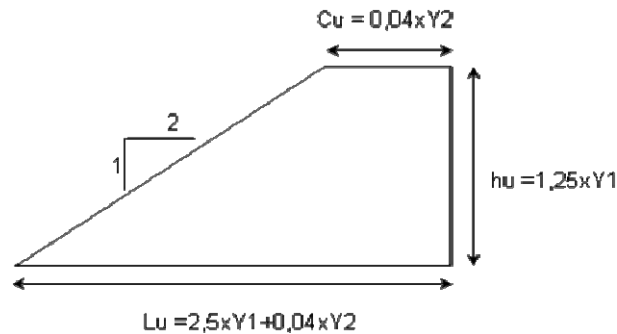


Figura 16: Dimensiones del umbral terminal

- 8) Finalmente dibujar y dimensionar el estanque amortiguador obtenido.

2.1.4.4 Metodología de Diseño Estanque Tipo III

Se desarrolló para cuencos disipadores de uso común en vertederos de presas altas y de presas de tierra y para estructuras de canales grandes. El cuenco contiene bloques en la rápida del extremo de aguas arriba y un umbral dentado cerca del extremo de aguas abajo

Estudios desarrollados indican que el comportamiento de este cuenco, tanto en su longitud como en la del resalto puede reducirse alrededor del 60%, con accesorios.

Donde:

Fr = Número de froude, adimensional.

Q = Caudal de diseño, en m^3/s .

q = Caudal unitario, en m^2/s .

b = Ancho del pozo amortiguador, en m.

y_1 = conjugada del tirante al inicio del pozo, en m

y_2 = conjugada del tirante al final del pozo, en m

L_{III} = Longitud del estanque TIPO III, en m.

V = Velocidad al final de la rápida, en m/s.

g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

n = Número de dientes, en m.

Diseño de un Estanque TIPO III ($F_r > 4.5$); ($V > 15 \text{ m/s}$)

- 1) Cálculo el valor de TA de la siguiente ecuación

$$TA = y_1 \cdot (1,469 \cdot F_r - 0,318) \quad (7.32)$$

- 2) Cálculo del tirante conjugado (y_2)

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[\sqrt{8 \cdot F_r^2 + 1} - 1 \right] \quad (7.23)$$

- 3) Determinar la longitud del estanque (L_{III})

$$L_{III} = y_2 \cdot (3,55 + 0,06 \cdot F_r - 0,00015 \cdot F_r^2) \quad (7.33)$$

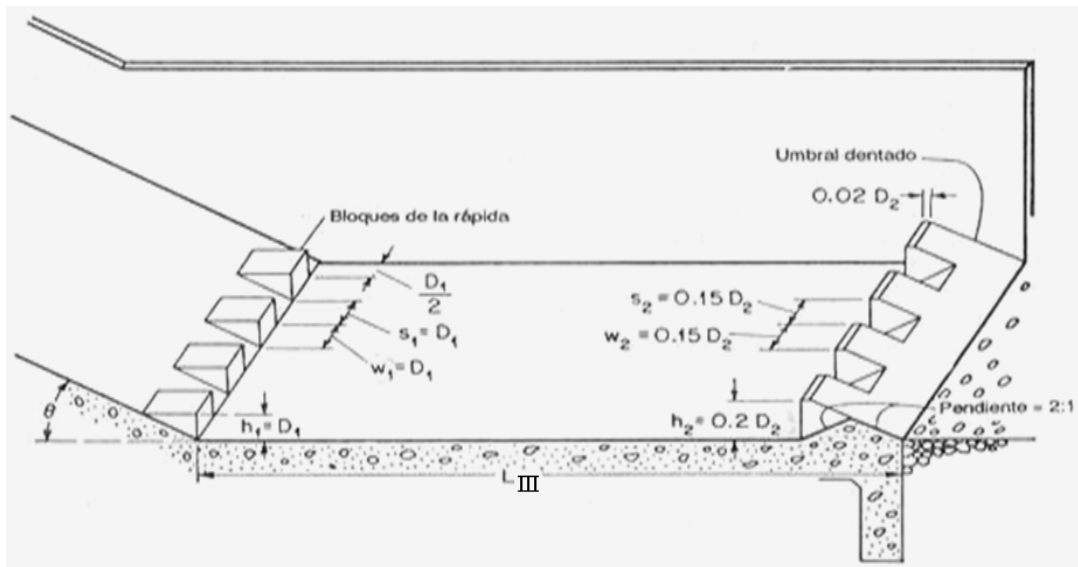


Figura 17: Longitud del Estanque Tipo III.

- 4) Calcular las dimensiones de los dientes deflectores.

$$\text{Ancho} = y_1 \quad (7.26)$$

$$\text{Alto} = y_1 \quad (7.34)$$

Largo = sale constructivamente una horizontal por la altura del diente hasta cortar la rápida o el cimacio según el caso.

$$\text{Espacio entre dientes} = y_1 \quad (7.35)$$

$$\text{Espacio fraccional} = 0,5 \cdot y_1 \quad (7.36)$$

5) Cálculo del número de dientes (n)

$$n = \frac{b}{2 \cdot y_1} \quad (7.37)$$

6) Cálculo de las dimensiones del umbral Terminal

$$\text{Altura} = 0,2 \cdot y_2 \quad (7.38)$$

$$\text{Ancho} = 0,15 \cdot y_2 \quad (7.39)$$

$$\text{Espacio entre dientes} = 0,15 \cdot y_2 \quad (7.40)$$

$$\text{Ancho superior del diente} = 0,02 \cdot y_2 \quad (7.41)$$

7) Finalmente dibujar y dimensionar el estanque amortiguador obtenido

2.1.5 El Estanque 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.

2.1.6 El Trampolín o Salto de Esquí

Se utiliza para grandes descargas, principalmente en los vertederos. Ésta se hace directamente sobre el río. Se emplean 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, trampolín liso y trampolín estriado, ambos con igual funcionamiento hidráulico y con las mismas características, que difieren únicamente en la forma de salir el agua del trampolín.

En el liso el agua sale con mayor ángulo y choca con la superficie, creando remolinos y haciendo que el flujo aguas abajo no sea uniforme.

En el estriado, el agua sale con menor ángulo lo que hace que el choque con la superficie sea más suave y que el flujo aguas abajo sea uniforme. Debido a que tiene dos ángulos diferentes de lanzamiento, incorpora aire y también genera remolinos horizontales disipando mayor cantidad de energía.

Aunque en el trampolín estriado se obtiene mejor disipación con menos perturbación, es más sensible con las variaciones de caudal, veamos:

Cuando la descarga es insuficiente (mínima), el chorro empuja el remolino a lo largo del cauce, produciendo erosión aguas abajo ya que se lo puede llevar a una zona que no esté protegida.

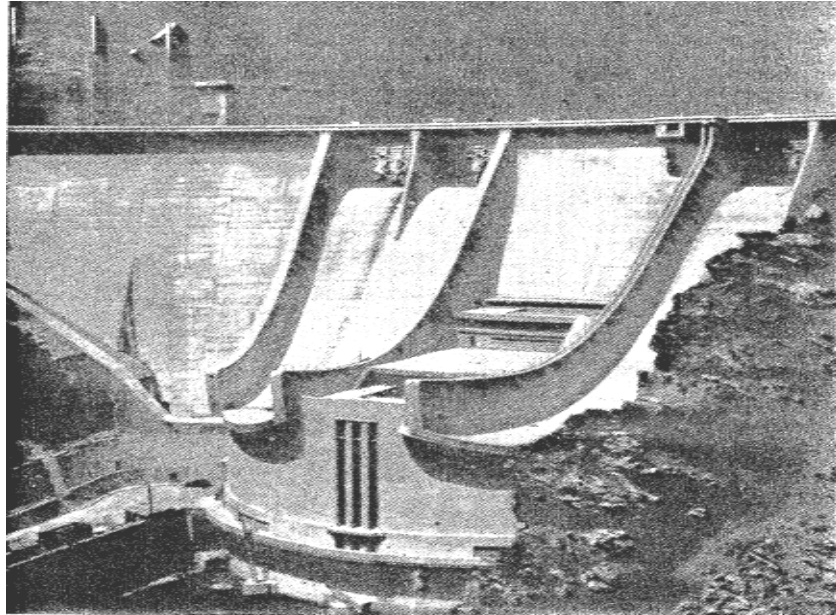


Foto 28: El vertedero en salto de esquí de la presa l' AIGLE(cortesía de P. Danel, Ets. NEYRPIC).

Al aumentar el caudal, el remolino empieza a remontar, desplazándose aguas arriba, llegando al comportamiento ideal, pero el caudal sigue aumentando y cuando es demasiado grande, se produce el fenómeno de chorro ahogado. El chorro ya no se eleva al salir del trampolín si no que sigue por el fondo del canal, y el remolino se forma en la superficie, lo que produce erosión.

Cuando el caudal empieza a disminuir, el chorro se empieza a elevar y a producir el remolino en el fondo, rellenando lo erosionado (etapa B), en este proceso es muy importante tener en cuenta la dirección de los remolinos en cada etapa para poder entender lo que sucede.

Por último podemos afirmar que en el uso tanto de un pozo amortiguador como de un estanque, todos los elementos anteriormente mencionados son los principales o los que más se han desarrollado, pero para cada proyecto puede decirse que se crea un nuevo dissipador ya que todos los proyectos son distintos y tienen diferentes regímenes; además las combinaciones que se

pueden hacer son infinitas. También se debe estar consciente, que una falla en el diseño, instalación u operación de los disipadores puede llevar a problemas como socavación, erosión o retención de material, que pueden terminar produciendo la falla del vertedero y posteriormente la falla de la presa. Así pues los diseños de estructuras disipadoras de energía, obedecen a estudios experimentales que tienen en cuenta las características propias del flujo a manejar, del sitio de la construcción y su engranaje con el conjunto total de la obra, lo que hace que cada diseño sea único, y crea la necesidad de construir modelos hidráulicos para garantizar que el funcionamiento corresponda a lo planteado teóricamente.

2.1.7 Estanque y Pozo Amortiguador (Diseño Generalizado)

En trabajos importantes o en aquellos que involucran un gran número de estanques y pozos disipadores, a menudo se necesitan diseños generalizados de los estanques y pozos por razones económicas y para cumplir requerimientos específicos. Estos diseños pueden desarrollarse a través de años de experiencia y observaciones sobre estructuras existentes, o mediante investigaciones en modelo, o ambos. Los estanques y pozos diseñados de ésta manera a menudo están provistos de accesorios especiales, incluidos dientes deflectores, bloques de rápida, umbrales terminales, dados amortiguadores y escalones.

Existen muchos diseños generalizados como los estudiados en el presente trabajo los cuáles se basan en el empleo de cuencos disipadores que utilizan un resalto hidráulico como medio para la disipación de energía.

CAPÍTULO III
ANÁLISIS DE DATOS

3.1 ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Para manejar los datos resultados de un experimento de una manera estadísticas, lo primero que debemos hacer es organizar los resultados obtenidos, ordenándoles y clasificándolos, es decir, haciendo lo que se llama un recuento de datos. La estadística nos permite hacer una planeación adecuada de las pruebas y dar una interpretación más racional de los resultados experimentales. En ellos interviene una amplia variedad de factores sujetos a la exactitud en la construcción del modelo; apreciación de las mediciones por el operador; precisión del instrumental que se utiliza; los efectos de escala y, desde luego reconocer que no existe similitud absoluta.

Para su extrapolación de dichos resultados a un aliviadero real (prototipo) se debe considerar una ley de semejanza que prime la conservación de los valores relativos de las diferentes fuerzas más significativas actuantes en el movimiento del fluido como ser: Peso, viscosidad, fuerzas de carácter elástico y fuerza de tensión superficial. Estas fuerzas vienen ligadas a diferentes propiedades del agua.

En el flujo rasante sobre un aliviadero escalonado, las variables que intervienen son: Las que definen la geometría del canal de la caída, la geometría de los peldaños y la geometría del pozo amortiguador al final de la caída; las características cinemáticas como la velocidad media (v) o caudal unitario (q); la aceleración de la gravedad (g); y las propiedades físicas del fluido, como su densidad (ρ), su viscosidad dinámica (μ), su tensión superficial (σ_a) y su modulo de compresibilidad volumétrica (E).

3.1.1 ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE ESCALA

El laboratorio debe proveer de los medios necesarios para efectuar experimentos y trabajos de carácter científico o técnico.

Los experimentos de laboratorio pretenden fomentar la observación, el espíritu crítico y un adiestramiento en técnicas que despertaran el interés por la investigación.

Debemos tomar bien en cuenta, que es necesario considerar que los modelos demasiado pequeños pueden resultar incómodos para efectuar mediciones adecuadas. En un modelo a escala mediana habrá mayor flexibilidad para lograr con mayor facilidad los objetivos perseguidos, si bien éstos implican disponibilidad de espacio y suficiente caudal de agua. No existen reglas específicas para elegir la escala de un modelo hidráulico, a pesar de ser uno de los factores más importantes en la planeación del modelo. En nuestro experimento utilizamos una escala de 1/15 igual a la escala del vertedor diseñado en un estudio anterior.

Con respecto a los efectos de escala, en el estudio sobre modelos hidráulicos realizado por Boes, examina varios modelos correspondientes a distintas escalas, a fin de estudiar los efectos de escala sobre las medidas de concentraciones de aire y distribuciones de velocidad a lo largo de la rápida escalonada. Termina concluyendo que “los resultados obtenidos de modelos de escalas pequeñas pueden ser extrapolados a prototipo”, a partir de la ley de similitud de Froude con efectos de escala despreciables.

3.1.2 CONSIDERACIONES RESPECTO AL AGUA DE DESCARGA

En el manejo de los equipos de laboratorio como en su operación se requiere un planeamiento cuidadoso de los pasos a seguir para modificar las variables que intervienen en el fenómeno: Apertura y cierre de válvulas y compuertas, variación de caudales y tiempos de operación, procedimientos para lecturas de la instrumentación, medición y registro del efecto principal.

La fuente agua debe proveer un caudal continuo y suficiente, con el fin de poder medir y variar el caudal. En el estudio presente trabajamos con seis caudales diferentes para así apreciar mejor el comportamiento hidráulico sobre cada dissipador de energía, donde el caudal máximo empleado en nuestro estudio fue de 39,46 l/seg. y el caudal mínimo fue de 18,61 l/seg.

3.1.3 ANÁLISIS DE DATOS DE MANERA ESTADÍSTICA

Debido a la complejidad de los procesos naturales que intervienen en los problemas hidráulicos, es difícil examinarlos mediante un razonamiento deductivo riguroso. No siempre es aplicable la ley física fundamental para determinar los resultados hidráulicos esperados.

Es razonable partir de una serie de datos observados, analizarlos y tratar de establecer la noma que gobierna los sucesos.

Una vez realizadas las mediciones se procedió a ordenar y a examinar las variables medidas, es decir caudales, tirantes y altura presión.

- **Caudales.**- Como muestran las planillas de registro de datos, estos valores fueron tomados en función del tiempo en intervalos de cuatro segundos llegando a tomarse 30 mediciones para cada caudal de ensayado, el promedio de dichas mediciones es el caudal aforado, como se muestra en la figura 8.

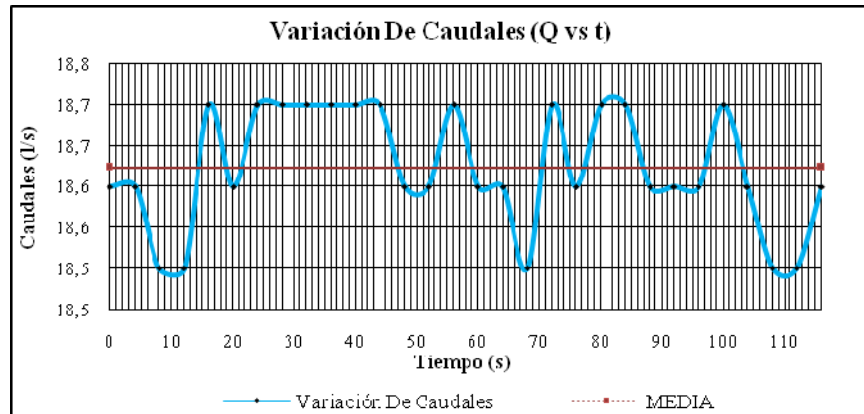


Figura 18: Variación de caudales en función del tiempo

- **Altura de presión.-** Se tomarán 10 mediciones para cada punto para 6 caudales distintos en cada uno de los disipadores ensayados, para el Pozo Amortiguador se midieron en 24 piezómetros, para el Estanque Tipo I se midió en 27 piezómetros y para el estanque Tipo III se midió en 27 piezómetros, reportando un total de 4680 mediciones de altura de presión. Finalmente para realizar el análisis se ajustó a una distribución normal, donde los valores máximos se ajustan para un 95 % de probabilidad y los valores mínimos para un 5 % de probabilidad de ocurrencia. En el anexo resumen fotográfico se visualiza los piezómetros instalados para cada disipador de energía puesto a prueba.
- **Tirantes.-** Primeramente se intentó medir los tirantes mediante fotografía digital pero no se obtuvo la claridad esperada. Finalmente los tirantes se midieron visualmente, mediante cinta métrica colocada en la pared interior de cada disipador. Se tomaron 10 mediciones para cada punto para 6 caudales distintos en cada uno de los disipadores ensayados, para el Pozo Amortiguador se midieron en 27 puntos, para el Estanque Tipo I se midió en 36 puntos y para el estanque Tipo III se midió en 35 piezómetros, reportando un total de 5880 mediciones de tirante.

3.1.4 ANÁLISIS DE DATOS EN FUNCIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO

Para analizar los datos en función de caudales medidos se procedió de la siguiente manera: Primeramente a los caudales aforados los empleamos para determinar la velocidad media de flujo para así obtener el número de Froude y el número de Reynolds con lo cuál podemos clasificar el flujo en subcrítico, crítico y supercrítico según Froude, y en laminar de transición o en turbulento según el número de Reynolds. Finalmente analizamos la variación del comportamiento del flujo según los diferentes caudales aforados, con lo que podemos obtener los tirantes máximos generados para determinar la altura de la pared de cada dissipador.

3.1.5 ANÁLISIS DE DATOS EN FUNCIÓN DE LA PÉRDIDA DE ENERGÍA

La energía total se mide en relación con el fondo del canal y se compone de energía potencial debido a la profundidad del fluido más la energía cinética debido a su velocidad. Denotando como E la energía total, obtenemos:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (6.1)$$

Donde:

E = Energía Total, m

y = Tirante en, m

v = Velocidad promedio, m/s

g = Aceleración de la gravedad, en 9,81 m/s².

En el análisis de flujo en canal abierto, a E normalmente se le conoce como energía específica. Para una descarga determinada Q, la velocidad es Q/A. Por consiguiente,

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (6.2)$$

E = Energía Total, m

y = Tirante en, m

Q = Caudal, m³/s

A = Área, m²

g = Aceleración de la gravedad, en 9,81 m/s².

Puesto que el área puede expresarse en términos de la profundidad de flujo, la ecuación (6-2) relaciona la energía específica debido a la profundidad del flujo. Es decir una profundidad pequeña conlleva un flujo con una alta velocidad (flujo supercrítico), al contrario una profundidad mayor conlleva una velocidad pequeña de flujo (flujo subcrítico). Por lo tanto en el presente estudio analizaremos éstas variables que son la velocidad promedio del flujo y los diferentes tirantes o alturas de agua que se generan en las diferentes secciones de cada uno de los modelos a estudiar, obteniendo una idea más clara de la energía que posea el flujo en las diferentes secciones de los disipadores puestos a ensayo.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En problemas concretos de proyecto de una obra hidráulica, el modelo reducido, aunque es caro y necesita un tiempo de construcción y ensayo, puede suponer un ahorro mucho mayor gracias a las mejoras introducidas, a la corrección de defectos que hubieran obligado a obras futuras de reparación o al mejor conocimiento y a la mayor seguridad que se consigue al analizar la futura obra hidráulica mediante un modelo físico antes de llevar a cabo la construcción.

En general podemos afirmar que cada problema hidráulico es único y las conclusiones no pueden interpolarse o trasladarse a otro problema. Esto ha ocasionado que muchas veces se juzgue un método de cálculo de forma equivocada, al no tenerse en cuenta sus limitaciones en su aplicación.

En cuanto a los disipadores de energía estos son los principales o los que más se han desarrollado, pero para cada proyecto puede decirse que se crea un nuevo disipador ya que todos los proyectos son distintos y tienen diferentes regímenes de flujo; además las combinaciones que se pueden hacerse son infinitas. También se debe estar consciente, que una falla en el diseño, instalación u operación de los disipadores puede llevar a problemas como socavación, erosión o retención de material, que pueden terminar produciendo la falla del vertedero y posteriormente la falla de la presa. Así pues los diseños de estructuras disipadoras de energía, obedecen a estudios experimentales que tienen en cuenta las características propias del flujo a manejar, del sitio de la construcción y su engranaje con el conjunto total de la obra, lo que hace que cada diseño sea único, y crea la necesidad de construir modelos hidráulicos para garantizar que el funcionamiento corresponda a lo planteado teóricamente.

A las conclusiones y resultados que llegamos en el presente trabajo con respecto a los seis caudales ensayados los cuales provocan diferentes regímenes y tomando en cuenta los factores más importantes en el

comportamiento del flujo como ser, tirantes conjugados generados, la variación de la energía, tirantes máximos, las velocidades medias en cada sección observada, la variación de los diferentes parámetros al variar el caudal, y otros factores que influyen en el fenómeno nos dan una idea más clara del comportamiento del flujo que transita a través de cada disipador ensayado, de lo anteriormente considerado podemos resumir los resultados a lo siguiente según cada disipador ensayado:

CUADRO N° 6: Pozo Amortiguador, eficiencia del salto y pérdida de energía

POZO AMORTIGUADOR			
Caudales	Eficiencia del Salto E_2/E_1	Pérdida de Energía ΔE (Modelo)	Pérdida de Energía ΔE (Prototipo)
(l/s)	(-----)	(cm)	(cm)
18,62	0,91	3,80	56,97
23,83	0,85	3,09	46,29
25,67	0,77	2,01	30,09
28,53	0,78	2,15	32,19
33,04	0,78	2,04	30,63
39,46	0,78	2,00	29,96

CUADRO N° 7: Estanque Tipo I, eficiencia del salto y pérdida de energía

ESTANQUE TIPO I			
Caudales	Eficiencia del Salto E_2/E_1	Pérdida de Energía ΔE (Modelo)	Pérdida de Energía ΔE (Prototipo)
(l/s)	(-----)	(cm)	(cm)
18,62	0,92	0,00	0,07
23,83	0,93	0,00	0,05
25,67	0,94	0,02	0,23
28,53	0,92	0,01	0,16
33,04	0,94	0,06	0,94
39,46	0,95	0,05	0,68

CUADRO N° 8: Estanque Tipo III, eficiencia del salto y pérdida de energía

ESTANQUE TIPO III			
Caudales	Eficiencia del Salto E_2/E_1	Pérdida de Energía ΔE (modelo)	Pérdida de Energía ΔE (Prototipo)
(l/s)	(-----)	(cm)	(cm)
18,62	0,92	0,02	0,23
23,83	0,92	0,05	0,81
25,67	0,93	0,01	0,18
28,53	0,92	0,06	0,97
33,04	0,92	0,01	0,11
39,46	0,92	0,01	0,16

RESUMEN DEL ANÁLISIS DE LOS TIRANTES
CONJUGADOS

POZO AMORTIGUADOR

CUADRO N° 9: Pozo Amortiguador, análisis de tirante inicial y_1

POZO AMORTIGUADOR				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_1 (cm)	Teórico y_1 (cm)	Medido y_1 (m)	Teórico y_1 (m)
18,62	5,80	5,91	0,87	0,89
23,83	6,90	7,75	1,04	1,16
25,67	8,20	8,30	1,23	1,24
28,53	8,60	9,08	1,29	1,36
33,04	9,70	10,17	1,46	1,53
39,46	11,00	11,50	1,65	1,72

CUADRO N° 10: Pozo Amortiguador, análisis de tirante final y_2

POZO AMORTIGUADOR				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_2 (cm)	Teórico y_2 (cm)	Medido y_2 (m)	Teórico y_2 (m)
18,62	17,25	17,33	2,59	2,60
23,83	18,50	18,53	2,78	2,78
25,67	18,90	19,17	2,84	2,88
28,53	20,00	20,29	3,00	3,04
33,04	21,70	22,03	3,26	3,31
39,46	23,00	23,65	3,45	3,55

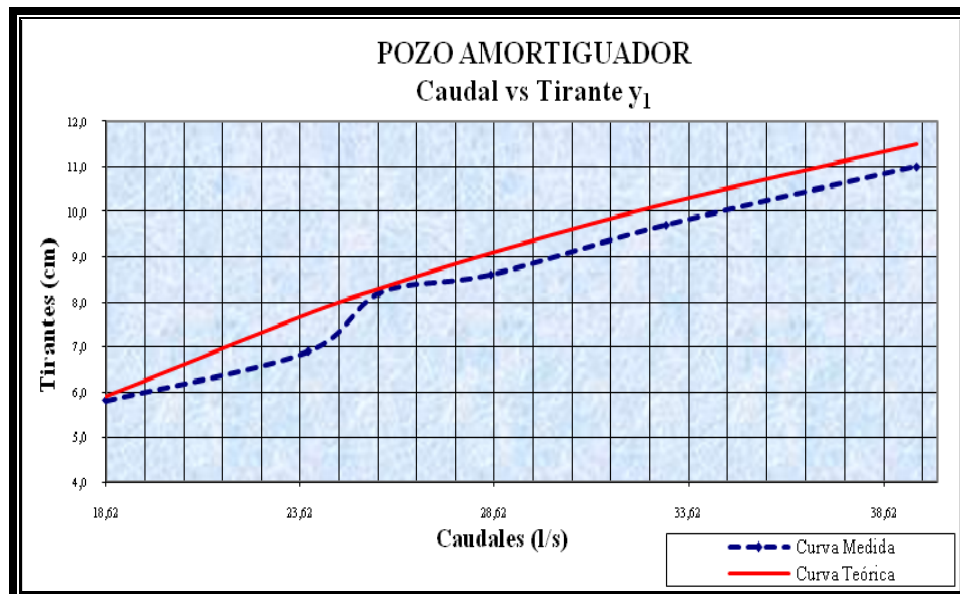


Figura 19: Pozo Amortiguador, relación entre caudal y tirante inicial y_1 .
(Coeficiente de correlación = 0.98 %)

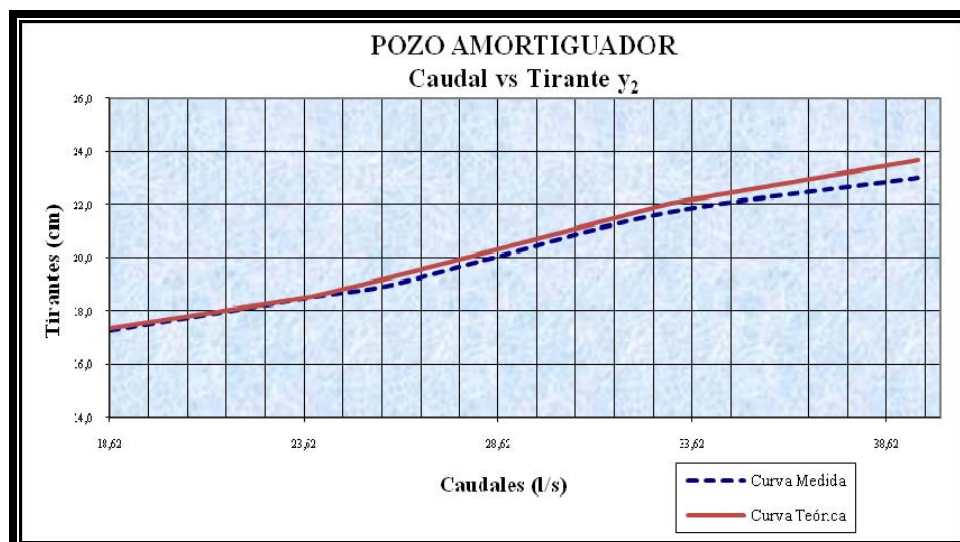


Figura 20: Pozo Amortiguador, relación entre caudal y tirante final y_2 .
(Coeficiente de correlación = 0.99 %)

ECUACIONES GENERADAS

Válida para caudales entre $16,22 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 34,39 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q \text{ (l/s)} = 0,001146211 \cdot Q \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$y_1 = 7,435365 \cdot \text{LN}(Q) - 15,8319$$

$$y_2 = -0,0009 \cdot Q^3 + 0,0784 \cdot Q^2 - 1,8759 \cdot Q + 30,891$$

$$Lp = 4,72 \cdot y_1 \cdot Fr_1$$

$$V_1 = \frac{1}{0,06} \cdot \frac{Q}{y_1}$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$

Donde:

Q = Caudal, en (lt/s)

y_1 = Tirante conjugado inicial, en (cm)

y_2 = Tirante conjugado final, en (cm)

V_1 = Velocidad media, en (cm/s)

L_p = Longitud del Salto Hidráulico, en (cm)

g = Aceleración de la gravedad, 981 cm/s^2

Fr_1 = Número de Froude, adimensional

ESTANQUE TIPO I

CUADRO N° 11: Estanque Tipo I, análisis de tirante inicial y_1

ESTANQUE TIPO I				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_1 (cm)	Teórico y_1 (cm)	Medido y_1 (m)	Teórico y_1 (m)
18,62	4,62	4,83	0,69	0,73
23,83	5,45	5,67	0,82	0,85
25,67	5,68	5,91	0,85	0,89
28,53	6,31	6,21	0,95	0,93
33,04	6,47	6,53	0,97	0,98
39,46	6,65	6,66	1,00	1,00

CUADRO N° 12: Estanque Tipo I, análisis de tirante final y_2

ESTANQUE TIPO I				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_2 (cm)	Teórico y_2 (cm)	Medido y_2 (m)	Teórico y_2 (m)
18,62	5,40	5,45	0,81	0,82
23,83	6,24	6,55	0,94	0,98
25,67	7,02	7,09	1,05	1,06
28,53	7,57	7,94	1,14	1,19
33,04	8,90	8,97	1,33	1,35
39,46	8,85	8,72	1,33	1,31

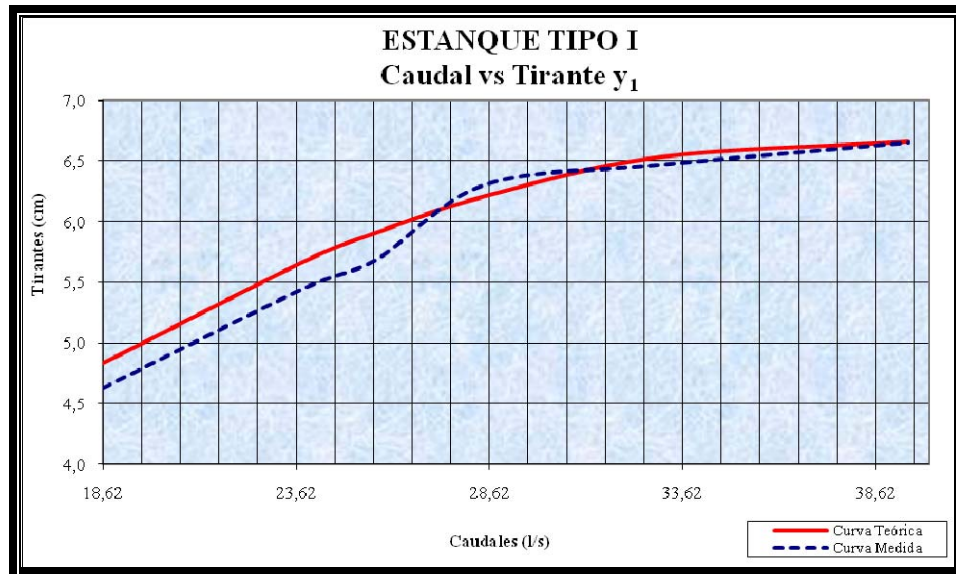


Figura 21: Estanque Tipo I, relación entre caudal y tirante inicial y_1 .
(Coeficiente de correlación = 0,98 %)

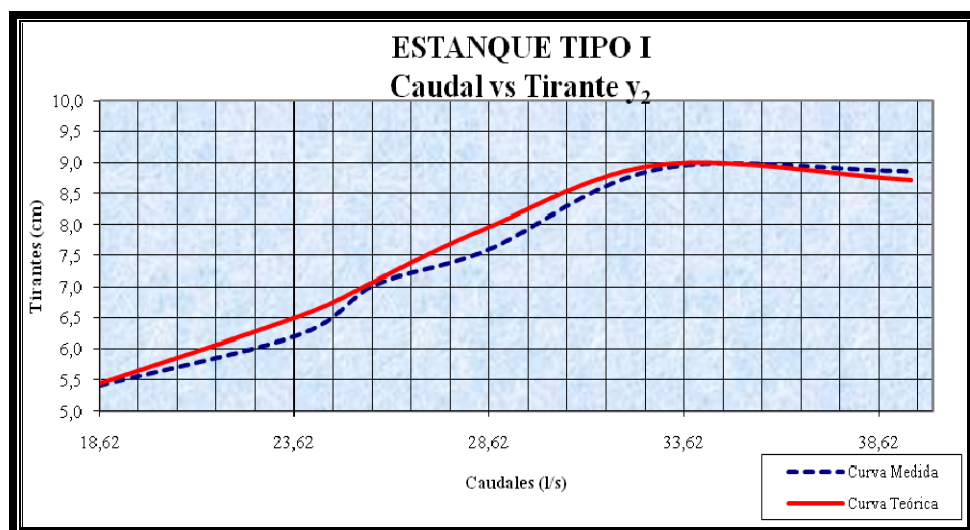


Figura 22: Estanque Tipo I, relación entre caudal y tirante final y_2 .
(Coeficiente de correlación = 0,98 %)

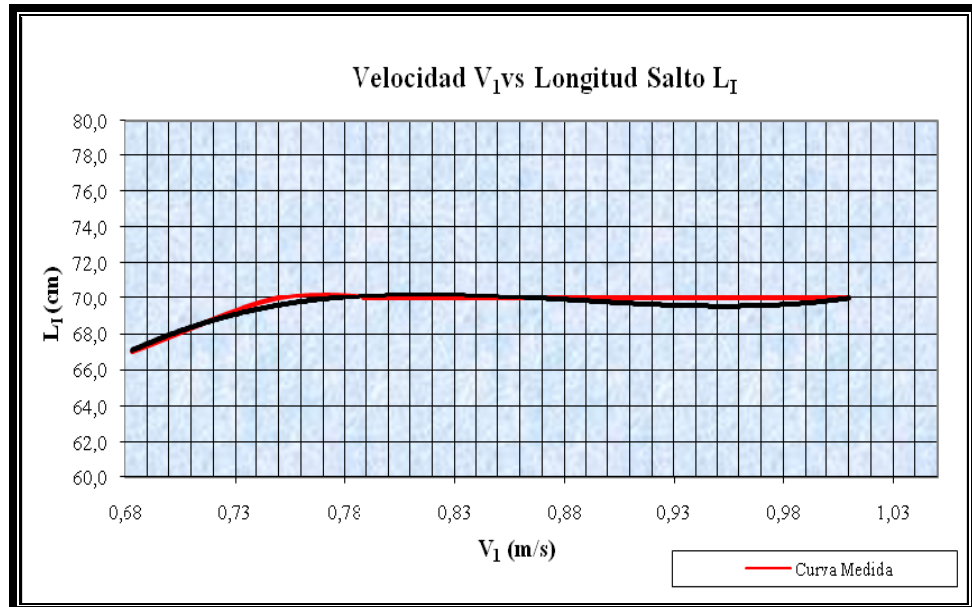


Figura 23: Estanque Tipo I, relación entre velocidad y longitud del salto L_1 .
(Coeficiente de correlación = 0,98 %)

ECUACIONES GENERADAS

Válida para caudales entre $16,22 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 34,39 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q \text{ (l/s)} = 0,001146211 \cdot Q \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$y_1 = -0,0047 \cdot Q^2 + 0,3607 \cdot Q - 0,2523$$

$$y_2 = -0,0011 \cdot Q^3 + 0,0866 \cdot Q^2 - 1,9703 \cdot Q + 19,209$$

$$L_1 = 534,71 \cdot V_1^3 - 1419,1 \cdot V_1^2 + 1247,9 \cdot V_1 - 293,62$$

$$V_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{Q}{y_1}$$

Donde:

Q = Caudal, en (lt/s)

y_1 = Tirante conjugado inicial, en (cm)

y_2 = Tirante conjugado final, en (cm)

V_1 = Velocidad media, en (m/s)

L_I = Longitud del Salto Hidráulico (cm)

ESTANQUE TIPO III

CUADRO N° 13: Estanque Tipo III, análisis de tirante inicial y_1

ESTANQUE TIPO III				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_1 (cm)	Teórico y_1 (cm)	Medido y_1 (m)	Teórico y_1 (m)
18,62	4,90	4,93	0,74	0,74
23,83	5,80	5,75	0,87	0,86
25,67	6,00	6,08	0,90	0,91
28,53	6,30	6,59	0,95	0,99
33,04	7,40	7,43	1,11	1,11
39,46	8,20	8,55	1,23	1,28

CUADRO N° 14: Estanque Tipo III, análisis de tirante final y_2

ESTANQUE TIPO III				
MODELO			PROTOTIPO	
Caudales (l/s)	Medido y_2 (cm)	Teórico y_2 (cm)	Medido y_2 (m)	Teórico y_2 (m)
18,62	6,13	6,30	0,92	0,94
23,83	7,93	7,75	1,19	1,16
25,67	7,25	8,06	1,09	1,21
28,53	8,67	8,40	1,30	1,26
33,04	8,59	8,81	1,29	1,32
39,46	9,68	9,70	1,45	1,46

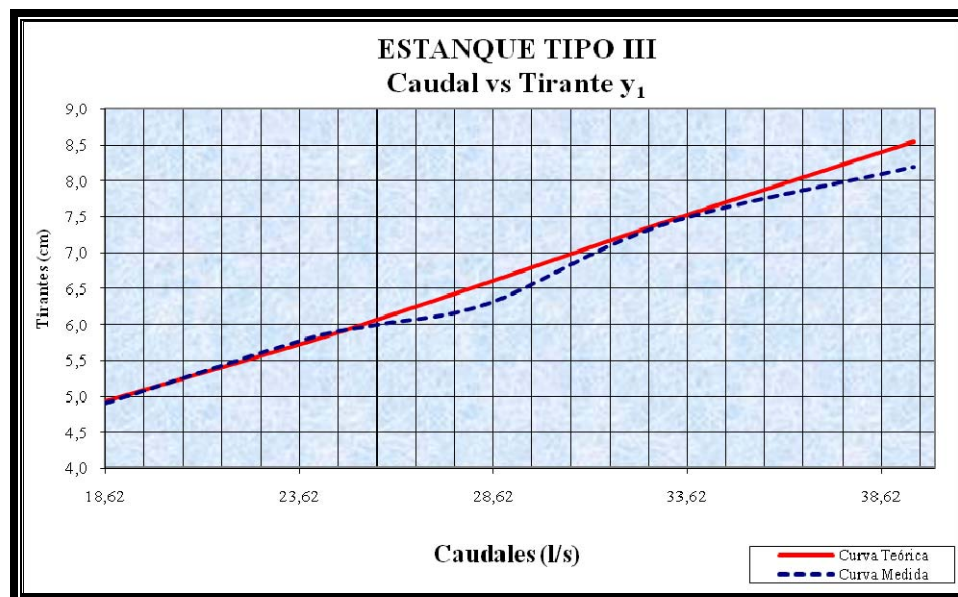


Figura 24: Estanque Tipo III, relación entre caudal y tirante inicial y_1 .
(Coeficiente de correlación = 0,98 %)

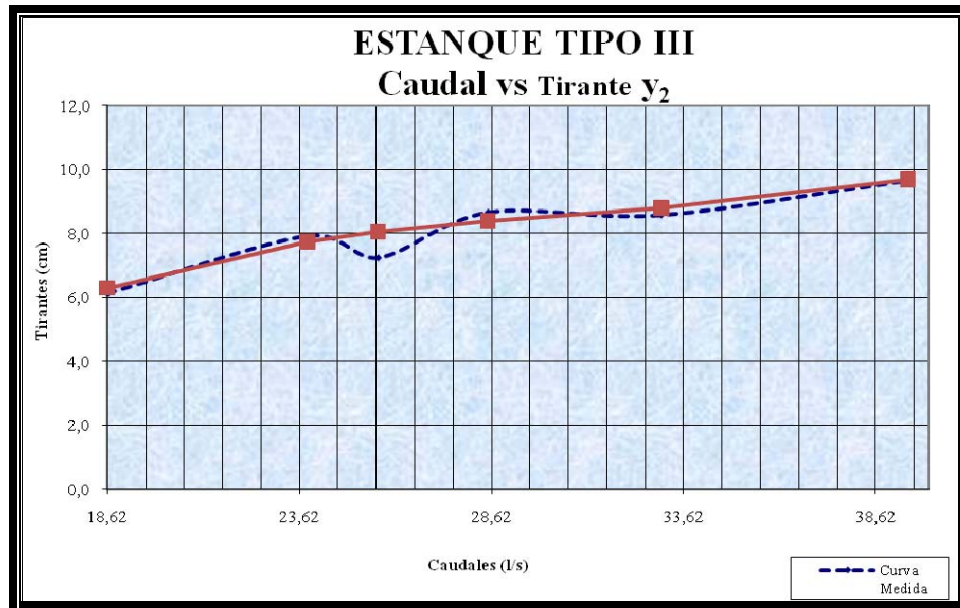


Figura 25: Estanque Tipo III, relación entre caudal y tirante final y_2 .
(Coeficiente de correlación = 0,95 %)

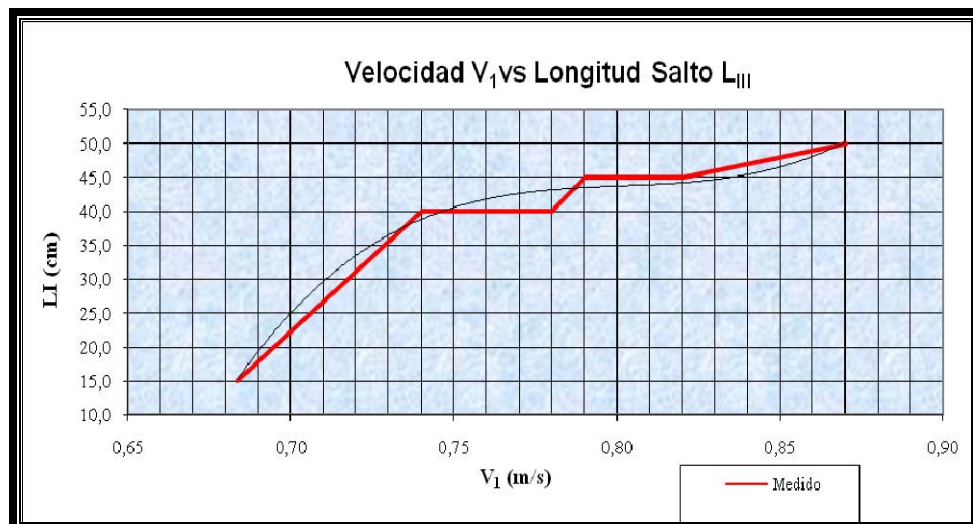


Figura 26: Estanque Tipo III, relación entre velocidad y longitud del salto L_{III} .
(Coeficiente de correlación = 0,98 %)

ECUACIONES GENERADAS

Válida para caudales entre $16,22 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 34,39 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q \text{ (l/s)} = 0,001146211 \cdot Q \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$y_1 = -0,000097 \cdot Q^3 + 0,008924 \cdot Q^2 - 0,088755 \cdot Q + 4,114546$$

$$y_2 = 0,000618 \cdot Q^3 - 0,057989 \cdot Q^2 + 1,900659 \cdot Q - 12,97594$$

$$L_{III} = 16301,64 \cdot V_1^3 - 39198,6 \cdot V_1^2 + 31437,42 \cdot V_1 - 8365,326$$

$$V_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{Q}{y_1}$$

Donde:

Q = Caudal, en (lt/s)

y_1 = Tirante conjugado inicial, en (cm)

y_2 = Tirante conjugado final, en (cm)

V_1 = Velocidad media, en (m/s)

L_{III} = Longitud del Salto Hidráulico, en (cm)

1º De los tres disipadores ensayados el que mejor comportamiento hidráulico fue el Estanque Tipo III, ya que se forma un resalto hidráulico ondular, es decir donde la superficie del agua muestra ondulaciones, al salir del estanque se encuentra el flujo en régimen subcrítico. El segundo de mejor comportamiento sería el Estanque Tipo I, en donde la superficie del agua muestra ondulaciones y según el número de Froude el salto como en el anterior también sería ondular. La diferencia más relevante entre el Estanque Tipo III y Estanque Tipo I viene a ser la pérdida de energía siendo mayor esta en el Estanque Tipo III.

En el Pozo Amortiguador no se logra formar ningún tipo de resalto ya que según las mediciones realizadas el tirante inicial al entrar al pozo se encuentra

en el régimen subcrítico y no así en el régimen supercrítico que debe cumplirse para que se forme un resalto hidráulico.

2° De los ensayos llevados a cabo para los tres disipadores de energía se evidencia que funcionan mejor para caudales bajos de ensayo, al subir de caudal se observa mayor perturbación en el flujo para los tres disipadores.

3° Altura de la pared del disipador.- Para el diseño de los disipadores este parámetro es muy importante, ya que se consigue una mayor seguridad al finalizar la obra hidráulica o para un mantenimiento futuro. Según el análisis de los datos se obtuvo ecuaciones para el cálculo de y_2 , el cual puede ser utilizado para determinar la altura de la pared según el disipador a construir, con la siguiente relación recomendada:

$$h_{muro} = y_{máx} + BL$$

h_{muro} = Altura de la pared del disipador, en m.

BL = Altura que varía entre (0,5 m a 1,0 m)

$y_{máx}$ = Altura máxima igual a y_2 , m

Un disipador de energía al pie de un vertedero escalonado de una presa, que viene a ser una obra hidráulica de protección de mucha importancia la cual se debe tenerse muy en cuenta al momento de construir una presa. En el presente trabajo de investigación luego de puesto en ensayo cada modelo físico de disipador de energía, llegamos a tener un mayor conocimiento del comportamiento del flujo que se hizo transitar a través de cada disipador.

Para la ayuda tanto en el funcionamiento en el laboratorio (modelo) como su diseño real (prototipo) de cada disipador puesto a prueba y concluido con el análisis de más de (10500) diez mil quinientos datos obtenidos de los ensayos, llegamos a obtener diferentes formulas para cada disipador las cuales están en función de los caudales ensayados y velocidad al inicio del salto

hidráulico base del diseño de cada disipador. Las diferentes formulas obtenidas nos determinan los siguientes parámetros:

y_1 = Tirante conjugado inicial

y_2 = Tirante conjugado al final del Salto Hidráulico

L_p , L_I y L_{III} = Longitud aproximado del Salto según el disipador

$h_{\text{pared.}}$ = Altura de la pared del Pozo Amortiguador

4.2 RECOMENDACIONES

Como recomendación podemos afirmar que para una investigación aplicada en un modelo físico hidráulico reducido, lo principal que se persigue como objetivo es mejorar las situaciones desfavorables existentes en el prototipo (la estructura hidráulica al tamaño natural) para antes o después de su construcción, o también ayudando en el diseño de obras hidráulicas para encontrar una solución más favorable, reduciendo al mínimo riesgos de fallas completas o parciales. Para lograr este fin se debe tener mucho cuidado en los ensayos realizados en el laboratorio para obtener datos lo más exactos posibles con lo cual poder extrapolar estos datos a prototipo, obteniendo mayor seguridad en el comportamiento del flujo.

Mayormente este tipo de estudios se lleva a cabo en obras hidráulicas complejas, en las que un cálculo hidráulico riguroso es muy complicado debido a las diferentes variables involucradas en el fenómeno hidráulico a tratar. Es conveniente para este tipo de obras hidráulicas de gran importancia las que se van a construir a futuro, realizar un estudio en modelo físico con lo cual se aseguraría una mejor operación, mantenimiento y economía de una obra hidráulica final.

Como una sugerencia y reflexión en la modelación física de una obra de ingeniería dirigida a una futura investigación podemos argumentar lo siguiente:

Los modelos físicos en la mayor parte son empleados para estudios de obras de ingeniería de gran impacto, como una referencia del siglo pasado tenemos el estudio para el diseño y construcción del Puente Colgante (Akashi-Kaikyo) de mayor longitud del mundo ubicado en Japón.

El Gran Puente Akashi Kaikyo se encuentra en la ruta de los tifones, al merced de vientos que alcanzan la increíble velocidad de 290 km/h, una potencia capaz de arrancar los tejados de las casas y desraizar los árboles. Además, atraviesa una de las rutas comerciales más concurridas y por lo tanto, más peligrosas del mundo debido a su tránsito naval, con el añadido de situarse en medio de una importante zona de terremotos. Se diseño un modelo físico a una escala de (1/100), donde se analizo lo que podría pasar en el puente si ocurriera un terremoto y también la influencia del viento sobre el puente, su deformación y muchas otras variables involucradas en el fenómeno, este estudio tardo aproximadamente 20 años y se construyo en 10 años. Se emplearon dos millones de trabajadores que estuvieron involucrados en la construcción de este puente, que tomó diez años construirlo y utilizó 181000 toneladas de acero y 1.4 millones de metros cúbicos de concreto, a un costo estimado total de 500 000 millones de yenes (5000 mil millones de dólares!).

La construcción de grandes presas puede durar más de siete años; la posibilidad de que se produzcan inundaciones durante este periodo constituye un serio problema.

Un aspecto muy importante de la construcción de presas es la desecación y preparación de los cimientos. La desecación se consigue normalmente mediante una o varias ataguías, diseñadas para eliminar el agua del terreno donde se va a construir la presa. Las ataguías pueden ser presas de tierra más

pequeñas o conjuntos de chapas de acero asentadas sobre pilotes y sujetas con tierra. Estas ataguías pueden ser un buen tema para futuras investigaciones dirigidas a la protección de presa en su construcción.

Por último, este trabajo de investigación puede ser empleado como una práctica mas en el Laboratorio de Hidráulica brindando un apoyo en el entendimiento del flujo a través de un dissipador de energía, también para la ayuda en el diseño, construcción y funcionamiento de un dissipador a nivel de un caso real en la práctica (prototipo), donde básicamente se busca aquel que sea técnicamente factible en su diseño y construcción, también que sea en lo posible lo más económico, aunque este último factor no es determinante.