



## RESUMEN

El presente trabajo titulado ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA DEL AZUD DEL PROYECTO HIDROSANBARTOLO ha sido desarrollado para la investigación de la disipación de energía aguas abajo del azud del proyecto mencionado, con el objeto de analizar los efectos que tiene la energía cinética de flujo proveniente del vertedor de la represa, además de observar los efectos de erosión y socavación del lecho del río con la finalidad de dar recomendaciones y sugerir soluciones a los problemas antes señalados.

Para la experimentación del presente estudio se planteó la construcción de dos modelos físicos a escala reducida. La construcción de los modelos y los ensayos han sido realizados en el laboratorio de hidráulica de PROMAS-Universidad de Cuenca y en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

La simulación en los modelos antes indicados permitió observar los efectos que tiene el flujo vertido sobre el cauce del río y el comportamiento del resalto hidráulico. La estructura de disipación para el diseño original consta de un enrocado, diseño que fue evaluado. Además de las experiencias en el modelo se sugieren alternativas para mejorar la disipación, entre ellas: disipador tipo SAF, cuencos disipadores y escalones.

Este estudio ha permitido predecir el comportamiento del prototipo a través de la experimentación para elegir la estructura más conveniente desde el punto de vista de eficiencia y que presente una adecuada disipación de energía.

**PALABRAS CLAVES:** Azud, Disipación de Energía, HIDROSANBARTOLO, Modelos Físicos, Resalto Hidráulico, SAF



## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>2</b>
<b>LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1 Antecedentes .....	13
1.2 Objetivo General .....	13
1.3 Objetivos Específicos .....	13
1.4 Alcance .....	13
1.5 Justificación.....	14
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>16</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
2.1 GENERALIDADES DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA.....	16
2.1.1 Procesos de disipación de energía y tipos de estructuras más utilizadas .....	16
2.1.2 Resalto hidráulico.....	17
2.1.3 Tipos de Resalto Hidráulico.....	20
2.1.4 Características del Resalto Hidráulico Clásico.....	21
2.1.5 Longitud del Resalto Hidráulico .....	23
2.1.6 El perfil superficial del Resalto .....	24
2.1.7 Posición del Resalto .....	24
2.2 ESTRUCTURAS NORMALIZADAS .....	26
2.2.1 Cuenco disipador SAF (San Anthony Falls).....	26
2.2.2 Otras estructuras normalizadas .....	28
2.3 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN FÍSICA .....	32
2.3.1 Introducción.....	32
2.3.2 Objetivos de la modelación física .....	32
2.3.3 Semejanza Hidráulica.....	32



- 2.3.4 Relación de escalas entre las magnitudes hidrodinámicas con similitud de Froude  
34

<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>36</b>
<b>3 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELECTRICO SAN BARTOLO .....	36
3.2 EQUIPAMIENTO .....	38
3.3 DIMENSIONES Y ESCALAMIENTO PARA EL MODELO .....	41
3.4 IDENTIFICACION DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN .....	42
3.5 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL SOBRE EL AZUD.....	43
3.6 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS HIDRÁULICOS Y VARIABLES RELACIONADAS AL ESTUDIO .....	43
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>45</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DEL DISEÑO DE AZUD ORIGINAL.....	45
4.1.1 Disipador original implementado en el modelo de lecho móvil para análisis cualitativo de su efecto sobre el río.....	45
4.1.2 Análisis de los parámetros hidráulicos referentes a la disipación de energía .....	48
4.2 DESCRIPCIÓN CUALITATIVA Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE LA OPERACIÓN DE LOS DISIPADORES PROPUESTOS.....	52
4.2.1 Cuenco disipador.....	52
4.2.2 Disipador tipo SAF .....	54
4.2.3 Disipador tipo SAF sin cuenco .....	57
4.2.4 Cuenco disipador.....	62
4.2.5 Disipador escalonado .....	69
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>74</b>
<b>5 RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>74</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	74
5.2 RECOMENDACIONES .....	77
<b>6 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>78</b>
<b>7 ANEXOS</b> .....	<b>79</b>
7.1 ANEXO 1:.....	80
7.2 ANEXO 2:.....	81



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Manuel Agustín Inga Sigcha, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

  
Manuel Agustín Inga Sigcha  
0105469068

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Manuel Agustín Inga Sigcha, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'M' and 'I' followed by 'S' and 'G'.

Manuel Agustín Inga Sigcha  
0105469068

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Vicente Pablo Narváz Correa, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Vicente Pablo Narváz Correa  
0103322848

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Vicente Pablo Narváz Correa, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

---

Vicente Pablo Narváz Correa  
0103322848

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
*Fundada en 1867*

*Facultad de Ingeniería*  
*Escuela de Ingeniería Civil*

***ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA DEL AZUD DEL  
PROYECTO 'HIDROSANBAROLO'***

---

*Director:*  
**Ing. Verónica Carrillo Serrano**

*Tesis de graduación  
previo a la obtención del grado  
de Ingeniero Civil*

*Tutor:*  
**Ing. MSc. Esteban A. Pacheco Tobar**

*Autores:*  
**Manuel Agustín Inga Sigcha**  
**Vicente Pablo Narváez Correa**

*Cuenca – Ecuador*  
*Octubre 2012*





## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Foto 3.1 Bomba eléctrica Brook Crompton .....	39
Foto 3.2 Tuberías para recirculación.....	39
Foto 3.3 Controles electrónicos.....	39
Foto 3.4 Canal y controles de la bomba.....	40
Foto 3.5 Micromolinete.....	40
Foto 3.6 Bomba NECO de 4 HP de potencia .....	40
Foto 4.1 Modelo de disipación de energía según el diseño original .....	45
Foto 4.2 Morfología del río antes de los ensayos.....	46
Foto 4.3 Comportamiento del flujo .....	46
Foto 4.4 Morfología del río luego de los ensayos.....	47
Foto 4.5 Ubicación del resalto para diferentes caudales.....	47
Foto 4.6 Modelo parcial sin disipadores a escala 1:40.....	48
Foto 4.7 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; calado río 1.5m .....	49
Foto 4.8 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; calado río 4m y 3m.....	49
Foto 4.9 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; resalto sumergido.....	49
Foto 4.10 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 1.5m .....	50
Foto 4.11 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 3m .....	50
Foto 4.12 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 4m .....	51
Foto 4.13 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; resalto sumergido: calado río 5.5m.....	51
Foto 4.14 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; sin resalto: y <sub>3</sub> =1m.....	51
Foto 4.15 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; calado río 5.4m .....	52
Foto 4.16 Piscina de disipación.....	53
Foto 4.17 Ensayo en piscina simple.....	53
Foto 4.18 Ensayo disipador tipo SAF en el modelo de lecho móvil.....	55
Foto 4.19 Disipador tipo SAF con cuenco; calado río 3m .....	56
Foto 4.20 Disipador tipo SAF con cuenco; calado río 4m .....	57
Foto 4.21 Disipador tipo SAF con cuenco; resalto sumergido.....	57
Foto 4.22 Disipador SAF sin cuenco .....	58
Foto 4.23 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; calado río 1.5m .....	58
Foto 4.24 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; calado río 3.5m .....	59
Foto 4.25 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 2m .....	59
Foto 4.26 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 3m .....	60
Foto 4.27 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado río 4.5m .....	60
Foto 4.28 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; calado del río 6m .....	61
Foto 4.29 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; calado río 3m .....	61
Foto 4.30 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; longitud disipación menor a 30m .....	62
Foto 4.31 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; resalto sumergido: y <sub>3</sub> = 6m .....	62
Foto 4.32 Ensayo con elevación del nivel del río sin disipador SAF .....	63
Foto 4.33 Cuenco disipador sin dados .....	64
Foto 4.34 Identificación de las variables en la experimentación: y <sub>1</sub> , y <sub>2</sub> y L <sub>r</sub> .....	64
Foto 4.35 Identificación de las variables en la experimentación: y <sub>3</sub> .....	65
Foto 4.36 Caudal 50m <sup>3</sup> /s; descarga libre: y <sub>3</sub> =1.4m .....	65
Foto 4.37 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; descarga libre: y <sub>3</sub> =1.6m .....	66



Foto 4.38 Caudal 75m <sup>3</sup> /s; resalto sumergido .....	66
Foto 4.39 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; descarga libre .....	67
Foto 4.40 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; calado río 3.4m .....	67
Foto 4.41 Caudal 180m <sup>3</sup> /s; resalto sumergido: y <sub>3</sub> =7.6m .....	67
Foto 4.42 Disipador escalonado.....	69
Foto 4.43 Disipador escalonado con Q=27m <sup>3</sup> /s .....	70
Foto 4.44 Disipador escalonado con Q=42m <sup>3</sup> /s .....	70
Foto 4.45 Disipador escalonado con Q=50m <sup>3</sup> /s .....	71
Foto 4.46 Azud escalonado con Q=100m <sup>3</sup> /s.....	71
Foto 4.47 Azud sin escalones con Q=100m <sup>3</sup> /s.....	71
Foto 4.48 Azud sin escalones con Q=75m <sup>3</sup> /s.....	72
Foto 4.49 Azud sin escalones con Q=50m <sup>3</sup> /s.....	72

### LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Resalto hidráulico.....	18
Figura 2.2 Tipos de resalto hidráulico .....	21
Figura 2.3 Caso 1: y' <sub>2</sub> = y <sub>2</sub> , resalto formado inmediatamente aguas abajo de y <sub>1</sub> .....	24
Figura 2.4 Caso 2: y' <sub>2</sub> < y <sub>2</sub> , resalto rechazado .....	25
Figura 2.5 Caso 3: y' <sub>2</sub> > y <sub>2</sub> , resalto sumergido .....	25
Figura 2.6 Cuenco disipador trapezoidal. Media alzada.....	27
Figura 2.7 Esquema de Estructura SAF .....	28
Figura 2.8 Dimensiones del cuenco II .....	29
Figura 2.9 Esquema del cuenco III.....	30
Figura 2.10 Esquema del cuenco tipo IV.....	31
Figura 3.1 Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo” .....	37
Figura 3.2 Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo” .....	38
Figura 3.3 Esquema y dimensiones del azud a escala 1:50 .....	42
Figura 3.4 Azud a escala 1:40.....	43
Figura 4.1 Dimensiones de los dados disipadores a escala 1:50.....	54
Figura 4.2 Ubicación de los dados del disipador SAF .....	54
Figura 4.3 Azud con cuenco disipador, escala 1:50 .....	55
Figura 4.4 Esquema del disipador SAF, escala 1:40 .....	56
Figura 4.5 Dimensiones de los bloques a escala 1:40 .....	58
Figura 4.6 Disipador escalonado escala 1:40 .....	69

### LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Relación entre F <sub>1</sub> y y <sub>2</sub> /y <sub>1</sub> para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal.....	19
Gráfico 2.2 Curvas características del Resalto Hidráulico Clásico.....	22
Gráfico 2.3 Longitud en términos de la profundidad conjugada y <sub>2</sub> de resaltos en canales horizontales.....	23
Gráfico 2.4 Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales horizontales.....	24



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores de las relaciones o escalas para las principales magnitudes con el criterio de similitud de Froude .....	34
Tabla 4.1 RESULTADO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA EL AZUD Y CUENCO DISIPADOR PARA EL PROYECTO HIDROSANBARTOLO .....	68
Tabla 4.2 Resumen de resultados .....	73



## **SIMBOLOGÍA**

$Y_r$ :	<i>Escala de peso específico</i>
$\Delta E$ :	<i>Diferencia de energías específicas</i>
$\sigma, \tau$ :	<i>Parámetros adimensionales para el cálculo de la longitud del resalto</i>
$A_r$ :	<i>Escala de área</i>
$B$ :	<i>Ancho de canal o vertedero</i>
$c$ :	<i>Altura del umbral de salida del dissipador SAF</i>
$C_d$ :	<i>Coefficiente de descarga del azud</i>
$E_i$ :	<i>Energía específica</i>
$F_i$ :	<i>Número de Froude</i>
$F_i d$ :	<i>Fuerza hidrodinámica en la sección <math>i</math></i>
$F_i h$ :	<i>Fuerza hidrostática en la sección <math>i</math></i>
$Fr$ :	<i>Número de Froude</i>
$Fu_i$ :	<i>Sumatoria de fuerzas en la sección <math>i</math></i>
$g$ :	<i>Aceleración gravitatoria</i>
$g_r$ :	<i>Escala de gravedad</i>
$H$ :	<i>Calado sobre la cresta del azud</i>
$H_d$ :	<i>Calado de diseño del azud</i>
$H_{max}$ :	<i>Calado máximo sobre el azud</i>
$h_i$ :	<i>Altura de la sección</i>
$i$ :	<i>Número de sección</i>
$l_r$ :	<i>Escala de longitud</i>
$L_B$ :	<i>Longitud del cuenco dissipador SAF</i>
$L_r$ :	<i>Longitud del resalto</i>
$M$ :	<i>Parámetro para la determinación del caudal sobre el azud</i>
$p_r$ :	<i>Escala de presión</i>
$Q$ :	<i>Caudal</i>
$Q_r$ :	<i>Escala de caudal</i>
$T$ :	<i>Altura entre la cresta del azud y el fondo del canal en el pie del resalto</i>
$t_r$ :	<i>Escala de tiempo</i>
$V$ :	<i>Velocidad de flujo</i>
$V_i$ :	<i>Velocidad de flujo en la sección <math>i</math></i>
$V_r$ :	<i>Escala de velocidad</i>
$y_1$ :	<i>Calado al pie del resalto</i>
$y_2$ :	<i>Calado conjugado del resalto</i>
$y_3$ :	<i>Calado aguas abajo del río</i>
$y'_2$ :	<i>Profundidad de salida aguas abajo por encima del piso del cuenco dissipador</i>
$z$ :	<i>Altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima del dissipador SAF</i>



## **CAPÍTULO I**

### **1 INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 ANTECEDENTES**

La zona amazónica del Ecuador se caracteriza por tener un clima cálido y húmedo, esto debido a que la cordillera de los Andes actúa como una barrera natural que retiene la humedad continental. Las precipitaciones en esta zona forman ríos con caudales considerables que bien podrían aprovecharse de distintas maneras, una de ellas es su utilización para la obtención de energía hidroeléctrica. Con este objetivo se planea la construcción del proyecto “HidroSanbartolo” que está a cargo de la empresa HIDROSANBARTOLO S.A. La bocatoma será construida en el Río Negro, ubicando en la Provincia de Morona Santiago, Cantón Méndez, y tendrá una capacidad de generación de 92MW de potencia.

Los estudios de consultoría en la parte referente a estudio en modelo físico estuvieron a cargo del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS - Universidad de Cuenca. De esta manera se ha llevado a cabo una modelización hidráulica en modelo físico de lecho móvil a escala reducida. El modelo físico propuesto reproduce el patrón de flujo tanto en las obras de entrada a la captación, a lo largo del cauce y en su paso por las estructuras de entrega y disipación de energía, permitiendo verificar aspectos relevantes a su dimensionamiento y operación.

#### **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la disipación de energía del azud del proyecto “HidroSanbartolo” en el diseño original y posteriormente con las alternativas propuestas mediante modelación física.

#### **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el desempeño hidráulico del diseño.
- Estudiar las alternativas de disipación.
- Implementar y evaluar el comportamiento de las alternativas propuestas para mejorar la disipación de energía y determinar la mejor opción.

#### **1.4 ALCANCE**

El presente trabajo ha sido realizado en modelo físico con fines investigativos, en función de determinar experimentalmente la mejor alternativa tanto funcional como



económica para la disipación de energía del azud en estudio. Habiéndose realizado ensayos en el mismo para determinar experimentalmente el comportamiento, y funcionamiento de las estructuras de disipación de energía planteadas. La modelación física nos proporciona un punto de vista más amplio (en tres dimensiones) de los procesos que se desarrollan en el flujo sobre el vertedor y de los efectos que podría tener sobre la morfología del río. La experimentación sobre el modelo a escala muestra el comportamiento tridimensional de las líneas de corriente que no se pueden ver en la modelación o formulación matemática. De los ensayos realizados en el modelo para azud se busca determinar:

- La erosión y los cambios de morfología del río que se producen con la implementación del diseño inicialmente propuesto.
- El comportamiento del flujo con las alternativas de disipación.
- Las variables que modifican el comportamiento del flujo en cada tipo de disipación.

El presente modelo físico brindará importantes conclusiones acerca de la teoría de la disipación de energía en un azud, por lo se espera que este manuscrito se convierta en un complemento de posteriores estudios para el desarrollo de una publicación científica dentro del programa de fortalecimiento de los Laboratorios de Hidráulica del Programa para el Manejo del agua y del Suelo de la Facultad de Ingeniería y de la Universidad de Cuenca.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Las estructuras hidráulicas son obras que permiten un mejor uso y aprovechamiento de los recursos hídricos y así como también ayudan a controlar su acción destructiva, pero generan un cambio en las condiciones normales de un cauce. En la presente investigación se expone de manera concreta y se justifica la necesidad de contar con un tipo de estructura capaz de disipar la energía generada por el cambio en dichas condiciones (embalse, reducción del caudal, etc.) de una manera eficiente.

Adicionalmente, la simulación matemática presenta soluciones, basadas en hipótesis casi siempre idealizadas, y simplificadas, obteniéndose aproximaciones de la realidad. Los modelos físicos proporcionan una perspectiva más integral de la problemática, permitiendo identificar situaciones y conflictos que no se evidencian a través de la aplicación de métodos matemáticos. Principalmente los inconvenientes que se podrían presentar en un estudio de modelos a escala reducida tienen que ver con efectos de escala, y la posibilidad de alcanzar la correspondencia entre los procesos que ocurren en el cauce natural y el cauce del modelo (calados de flujo, morfología del cauce, velocidades, etc.).

En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas de modelación física, las que, conjuntamente con el desarrollo de instrumentos de medición, permiten solventar los inconvenientes de la modelación física y lograr predecir con alto grado de certeza lo



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

que ocurre en el prototipo. La modelación física permite la comprensión y visualización de fenómenos complejos, permitiendo encontrar la solución más adecuada.

En resumen la modelación física es una herramienta muy útil para establecer el diseño óptimo de las estructuras, ya que permite la simulación de escenarios a los que podría estar expuesta la obra en la realidad, con el fin de determinar las condiciones de operación más desfavorables o críticas de las obras diseñadas.



## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 GENERALIDADES DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA

Uno de los aspectos que generalmente merece especial atención en el diseño de obras hidráulicas es la disipación de la energía cinética que adquiere un flujo en su descenso. Esta situación se presenta en vertederos de excedencias, estructuras de caída, desfuegos de fondo, bocatomas, salidas de alcantarillas, etc.

La estructura disipadora de energía es una parte importante de la obra de excedencia que tiene por objeto disipar la energía cinética que el agua adquiere en su caída desde el vaso hasta un sitio adecuado en el fondo del cauce, donde no genere problemas de erosión o socavación.

##### 2.1.1 Procesos de disipación de energía y tipos de estructuras más utilizadas

Las estructuras de disipación de energía tienen como objetivo evitar el riesgo de socavación de la estructura misma, minimizar la erosión del cauce e impedir el daño de las obras que se ubican hacia aguas abajo de la misma.

La energía es disipada mediante procesos de turbulencia en la difusión de la corriente entre las partículas de agua que entran con una energía cinética alta dentro de una masa de agua estática ó de menor velocidad. La turbulencia así desarrollada produce la fricción entre las moléculas de agua convirtiendo la energía cinética en energía térmica.

El proceso de disipación se logra habitualmente de dos maneras:

a) El choque de un chorro de agua de alta velocidad con una masa del mismo fluido de menor velocidad, proceso conocido como difusión. La disipación de energía corresponde a la consumida en la formación de vórtices producidos en las zonas de alto gradiente de velocidad. Por lo tanto para lograr altos niveles de disipación es importante generar zonas de alta turbulencia.

b) Chorros Libres.- La disipación de energía también aparece como resultado de la resistencia del aire ejercida durante la caída. Esta disipación es significativa si la altura de caída es pequeña y la diferencia de velocidades entre el chorro y el aire es considerable.

En ambos casos se logra una mayor disipación de energía si la perturbación provocada en la masa de fluido (agua ó aire) es alta, dentro de la cual se introduce el chorro de agua con alta energía cinética.





Dado que generalmente las estructuras de disipación de energía son costosas, se introducen frecuentemente accesorios adicionales como pantallas o superficies de impacto, ubicados dentro de la masa de agua, con el fin de elevar el grado de turbulencia y por tanto incrementar la eficiencia del disipador.

Una eficiente disipación de energía puede lograrse mediante varios métodos que se categorizan de la siguiente manera:

- Generación de fuertes gradientes de velocidad que incrementan el grado de turbulencia como por ejemplo el alcanzado en las siguientes estructuras:
  - Expansiones Bruscas,
  - Cambio bruscos de dirección del flujo,
  - Obturadores,
  - Umbrales,
  - Vigas y pilas deflectoras,
  - Flujos opuestos,
  - Contornos rugosos y
  - Cámaras de vórtice
- Generación de interfaces turbulentas agua – aire en:
  - Descarga de chorros libres y
  - Desintegración de chorros libres.

Se debe considerar también la inevitable generación de perturbaciones en el flujo que pueden tener graves consecuencias para la estabilidad de las obras, como:

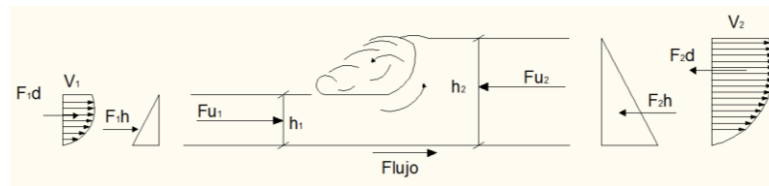
- Pulsaciones,
- Vibraciones,
- Erosión,
- Abrasión, y
- Cavitación.

Los disipadores deben ser diseñados para soportar todos estos efectos ineludibles desde el punto de vista dinámico. Con el tiempo cualquier tipo de material se volverá vulnerable ante estos efectos, por lo que se deben aplicar adecuadamente los parámetros de resistencia que imponen los materiales a emplearse.

### **2.1.2 Resalto hidráulico**

El resalto hidráulico es un fenómeno físico que ocurre cuando el flujo cambia de régimen de supercrítico a subcrítico. Durante esta transición se produce una gran turbulencia y disipación de energía.

Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio en el que tiene lugar el cambio violento de régimen de flujo como se muestra en la figura:



**Figura 2.1 Resalto hidráulico**

En la sección 1 se presentan dos fuerzas una hidrostática  $F_{1h}$  y un dinámica  $F_{1d}$ , y en forma similar pero en sentido contrario en la sección 2  $F_{2h}$  y  $F_{2d}$ , en ambos sitios la sumatoria de fuerzas da como resultado las fuerzas  $F_{u1}$  y  $F_{u2}$  respectivamente. En el estado de equilibrio, ambas fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección contraria (la fuerza  $F_{1h}$  es menor a  $F_{2h}$ , inversamente  $F_{1d}$  es mayor a  $F_{2d}$ ).

Debido a la posición de las fuerzas resultantes, ambas están espaciadas una distancia  $d$ , lo cual genera un par de fuerzas de la misma magnitud pero de sentido contrario. En razón a la condición de líquido, el flujo toma la dirección de las fuerzas predominantes, presentándose la mezcla del agua con líneas de flujo superficiales moviéndose en sentido contrario a la dirección de flujo y de manera inversa en la zona cercana a la solera formándose un remolino.

El repentino encuentro entre las masas de líquido y el inevitable choque entre partículas, provocan la generación de gran turbulencia en el medio líquido que da lugar a la absorción de aire de la atmósfera, dando como resultado una mezcla agua-aire. El calado antes y después del resalto hidráulico resulta función del Número de Froude del flujo de ingreso.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * y}}$$

**Ecuación 2-1**

Fr: Número de Froude

V: velocidad de ingreso

g: aceleración de la gravedad

y: calado en la sección de interés

Con ayuda de la expresión del número de Froude (número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad), se llega a la expresión adimensional de calados conjugados (Chow, 1982):

$$\frac{y_1 * V_1}{g} * \left( V_1 - \frac{y_1}{y_2} * V_1 \right) = \frac{1}{2} * (y_2 - y_1)$$

**Ecuación 2-2**

$y_1$ : calado al pie del resalto

$V_1$ : Velocidad de flujo en el pie del resalto



$y_2$ : calado a la salida del resalto  
 $g$ : aceleración de la gravedad

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales hasta valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. El lugar geométrico en el que se presenta el resalto se denomina colchón hidráulico.

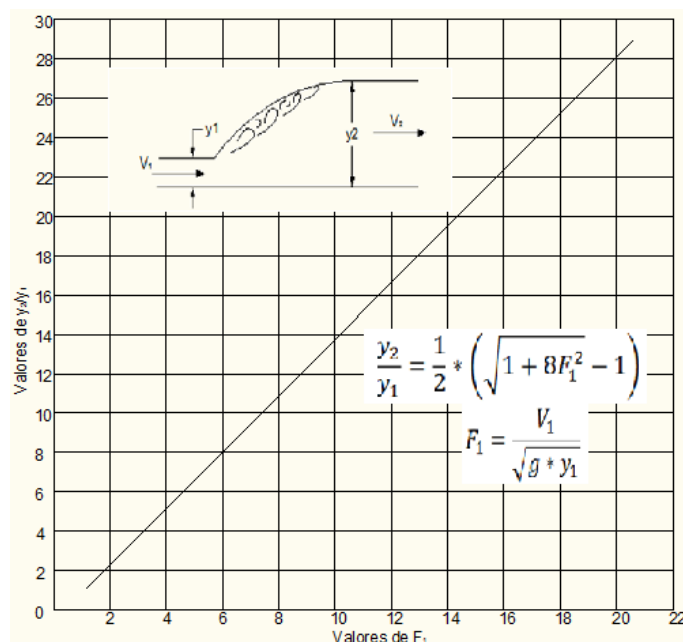
Un resalto hidráulico estable se formará en el canal si el número de Froude  $F_1$ , la profundidad de flujo  $y_1$  y la profundidad aguas abajo  $y_2$ , satisfacen la ecuación (Chow, 1982):

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

**Ecuación 2-3**

$y_1$ : calado al pie del resalto  
 $y_2$ : calado a la salida del resalto  
 $F_1$ : Número de Froude al pie del resalto

Esta ecuación fue determinada por medio de muchos datos experimentales y a su vez puede representarse en la siguiente curva.



**Gráfico 2.1 Relación entre  $F_1$  y  $y_2/y_1$  para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal.**

**Adaptado de HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chow, 1982).**



De la expresión:

$$V_1 = \sqrt{2g(T + 0.5 * H)}$$

**Ecuación 2-4**

Donde T es la altura entre la cresta del azud y el fondo del canal en el pie del resalto, y H es el calado sobre la cresta del azud, y conocido el caudal, se puede despejar y obteniéndose la ecuación (Chow, 1982):

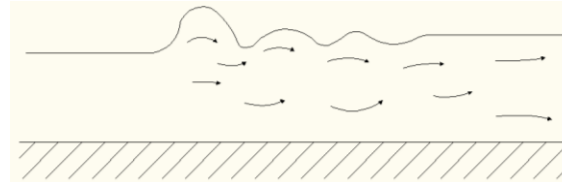
$$y_1 = \frac{Q}{B * \sqrt{2g(T + 0.5 * H)}}$$

**Ecuación 2-5**

Donde Q es el caudal y B es el ancho del canal al pie del resalto.

### 2.1.3 Tipos de Resalto Hidráulico

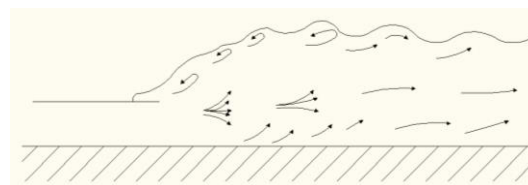
De acuerdo con los estudios realizados por el U.S. Bureau of Reclamation los resaltos pueden clasificarse convenientemente por el número de Froude del flujo entrante F1 de la siguiente manera:



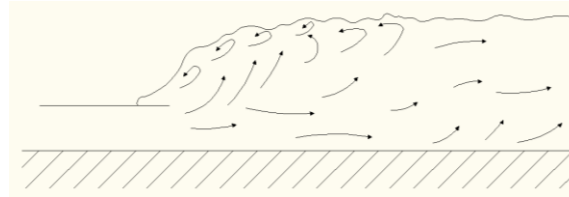
**F1= 1-1.7 Resalto ondulante**



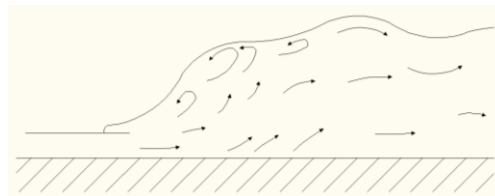
**F1= 1.7-2.5 Resalto débil**



**F1= 2.5-4.5 Resalto oscilante**



**F1= 4.5-9.0 Resalto estable**



**F1 > 9 Resalto fuerte**

**Figura 2.2 Tipos de resalto hidráulico**

**Adaptado de HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chow, 1982).**

$F1 = [1 ; 1.7]$ , la superficie de agua muestra ondulaciones y se presenta el resalto ondulante.

$F1 = [1.7 ; 2.5]$ , se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme, la pérdida de energía es relativamente baja y este se denomina *resalto débil*.

$F1 = [2.5 ; 4.5]$ , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hacia la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad, cada oscilación produce una ola grande que puede viajar mucha distancia causando daño, este se denomina *resalto oscilante*.

$F1 = [4.5 ; 9.0]$ , la extremidad aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor, disipa de 45% - 70% de la energía y se denomina *resalto estable*.

$F1 = 9.0$  o mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo y la superficie del agua podría mantenerse rugosa, este resalto es brusco pero efectivo, logrando una disipación de hasta un 85%, este se denomina como *resalto fuerte*.

#### **2.1.4 Características del Resalto Hidráulico Clásico**

En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de energías específicas entre las secciones antes y después del resalto de esta manera:



$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2}$$

**Ecuación 2-6**

La pérdida de energía relativa puede determinarse a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 3)^3}{8 * (2 + F_1^2) (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)}$$

**Ecuación 2-7**

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se denomina eficiencia:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(\sqrt{8F_1^2 + 1})^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)}$$

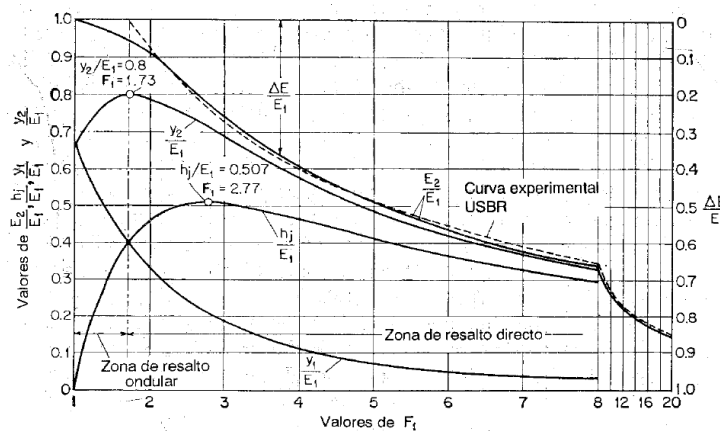
**Ecuación 2-8**

La altura del resalto será la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto  $h_j = y_2 - y_1$  y si se la expresa en relación con  $E_1$ , se obtiene la altura relativa:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1}$$

**Ecuación 2-9**

Con estas características dibujadas se obtiene las curvas características del Resalto Hidráulico Clásico:



**Gráfico 2.2 Curvas características del Resalto Hidráulico Clásico.**

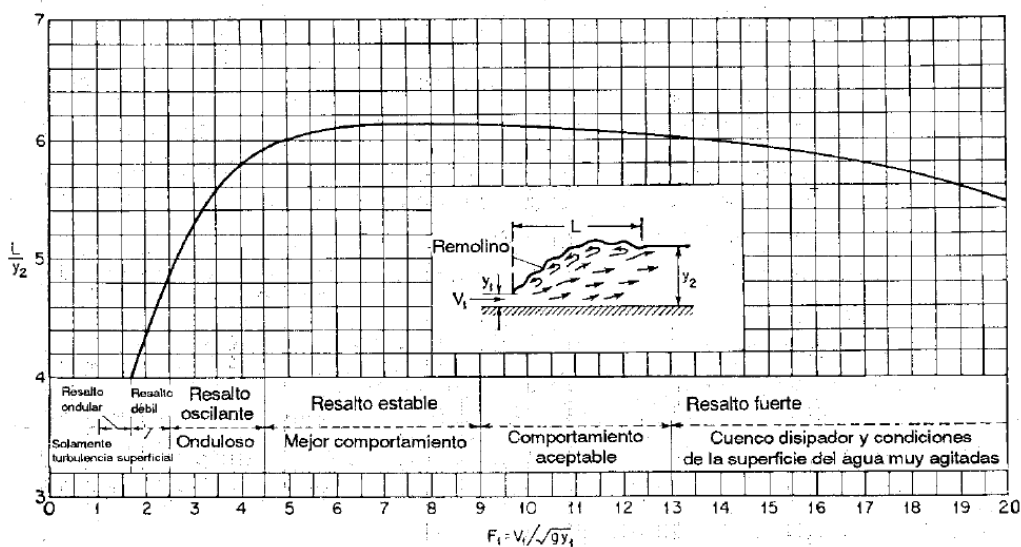
**Fuente HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chow, 1982).**

Estas curvas características darán al diseñador una idea clara del rango de condiciones en las cuales la estructura debe operar.

### 2.1.5 Longitud del Resalto Hidráulico

Esta puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino.

Esta longitud no puede ser determinada fácilmente por la teoría, pero ha sido investigada de manera experimental, dando como resultado la siguiente curva que relaciona la longitud del Resalto Hidráulico en función del número de Froude ( $F_1$ ).



**Gráfico 2.3 Longitud en términos de la profundidad conjugada  $y_2$  de resaltos en canales horizontales.**

**Fuente HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chow, 1982).**

La longitud del resalto no se puede determinar de manera teórica por ello se dan ecuaciones empíricas como la de Silvester entre otras:

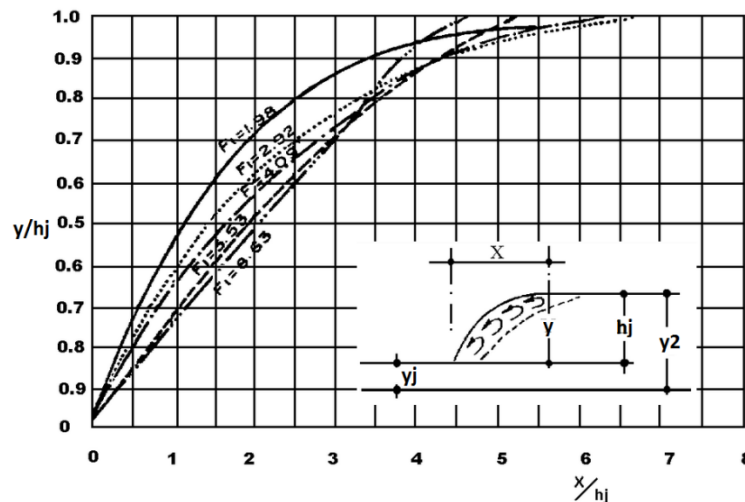
$$\frac{L_r}{y_1} = \sigma(F_1 - 1)^\tau$$

**Ecuación 2-10**

Donde los valores para  $\sigma$  y  $\tau$  dependen de la geometría de la sección del canal, para canales rectangulares tenemos  $\sigma=9.74$  y  $\tau=1.01$  (French, 1988)

### 2.1.6 El perfil superficial del Resalto

El conocimiento del perfil de la superficie libre de un resalto hidráulico es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco disipador donde se presenta el resalto. También es importante para determinar las presiones en el fondo del cuenco ya que estas son las que rigen el diseño estructural, experimentalmente se ha comprobado que la presión sobre el fondo del cuenco es prácticamente la misma que indica el perfil de la superficie libre de agua. El perfil superficial de un resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para varios valores de número de Froude ( $F_1$ ) como se muestra a continuación:



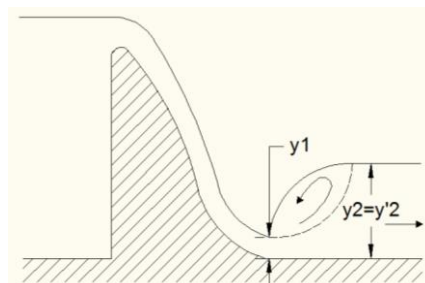
**Gráfico 2.4 Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales horizontales.**

**Fuente HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS (Chow, 1982).**

### 2.1.7 Posición del Resalto

La posición del resalto dependerá únicamente de la profundidad aguas abajo del resalto como se muestra a continuación:

Caso 1:

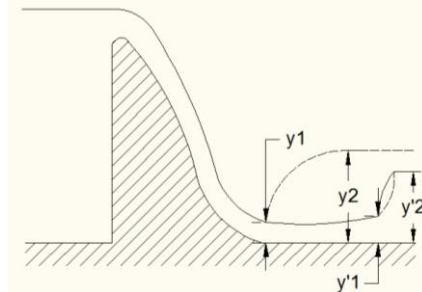


**Figura 2.3 Caso 1:  $y'2 = y2$ , resalto formado inmediatamente aguas abajo de  $y1$**   
**Adaptado de Ven Te Chow, 1982**



El resalto hidráulico se presentará únicamente cuando el calado aguas abajo  $y_2'$  es igual a la profundidad  $y_2$  conjugada a  $y_1$ . En este caso los valores de  $F_1$ ,  $y_1$ , y  $y_2$  cumplirán con la igualdad de la ecuación 2-3, y el resalto ocurrirá inmediatamente aguas abajo de la profundidad  $y_1$ .

Caso 2:

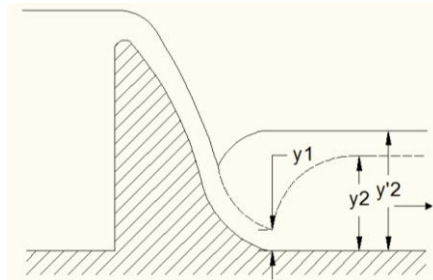


**Figura 2.4 Caso 2:  $y_2' < y_2$ , resalto rechazado**

**Adaptado de Ven Te Chow, 1982**

Este gráfico representa el caso en el que la profundidad aguas abajo  $y_2'$  es menor a la profundidad  $y_2$ , lo que significa que el resalto hidráulico se va a desplazar hacia aguas abajo hasta un punto donde otra vez se satisfaga la ecuación 2-3, se debe procurar evitar la ocurrencia de este caso ya que la consecuencia de un resalto rechazado es que este socavará fuera de la zona resistente y podría producirse en zonas sin protección, pudiendo resultar en una severa erosión.

Caso 3:



**Figura 2.5 Caso 3:  $y_2' > y_2$ , resalto sumergido**

**Adaptado de Ven Te Chow, 1982**

En este caso la profundidad aguas abajo  $y_2'$  es mayor a la profundidad  $y_2$ , lo cual significa que el resalto hidráulico se desplazará hacia aguas arriba hasta ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Esta es la forma más segura de mantener el resalto en la zona resistente, pero a su vez se pierde la eficiencia de la estructura ya que se disipará muy poca energía.



## 2.2 ESTRUCTURAS NORMALIZADAS

Estas estructuras muestran como característica principal que las dimensiones se fijan en función del número de Froude del flujo entrante y de los calados conjugados. La evaluación de estas estructuras mediante un modelo físico a escala reducida aporta importantes datos acerca de su comportamiento y eficiencia. En esta sección se explicarán las características más importantes de algunos de los disipadores que comúnmente se construyen para vertederos de descarga libre, además se describirán las condiciones que el flujo debe cumplir para la selección de uno u otro tipo de disipador.

### 2.2.1 Cuenco disipador SAF (San Anthony Falls)

Su uso está recomendado para pequeñas estructuras como vertederos, obras de salida y estructuras de canal que tengan como característica un número de Froude comprendido entre  $F_1=1.7$  a  $F_1=17$ . La reducción de la longitud es alrededor de 80%.

La longitud  $L_B$  para el cuenco disipador para números de Froude entre  $F_1=1.7$  a  $F_1=17$  se determina mediante:

$$L_B = \frac{4.5 * y_2}{F_1^{0.76}}$$

**Ecuación 2-11**

La altura de los bloques de entrada y los de piso es  $y_1$  y su ancho y espaciamiento es aproximadamente  $0.75y_1$ . La distancia desde el extremo de aguas arriba del cuenco disipador hasta los bloques de piso es  $L_B/3$ . No deben localizar bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que  $3y_1/8$ .

Los bloques de impacto deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques direccionadores. Los bloques de impacto deben ocupar entre el 40% y 55% del cuenco del disipador. Los anchos y espaciamentos de estos bloques para cuencos disipadores divergentes deben incrementarse en proporción al aumento del ancho del cuenco disipador en la sección donde se localizan los bloques.

La altura del umbral de salida está dada por  $c = 0.07y_2$ , donde  $y_2$  es la profundidad conjugada teórica correspondiente a  $y_1$ . La profundidad de salida aguas abajo por encima del piso del cuenco disipador está dada por:

$$y_2' = \left(1.1 - \frac{F_1^2}{120}\right) * y_2$$

**Ecuación 2-12**

Para  $F_1=[1.7 ; 5.5]$



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$y_2' = 0.85 * y_2$$

**Ecuación 2-13**

Para  $F_1 = [5.5 ; 11]$

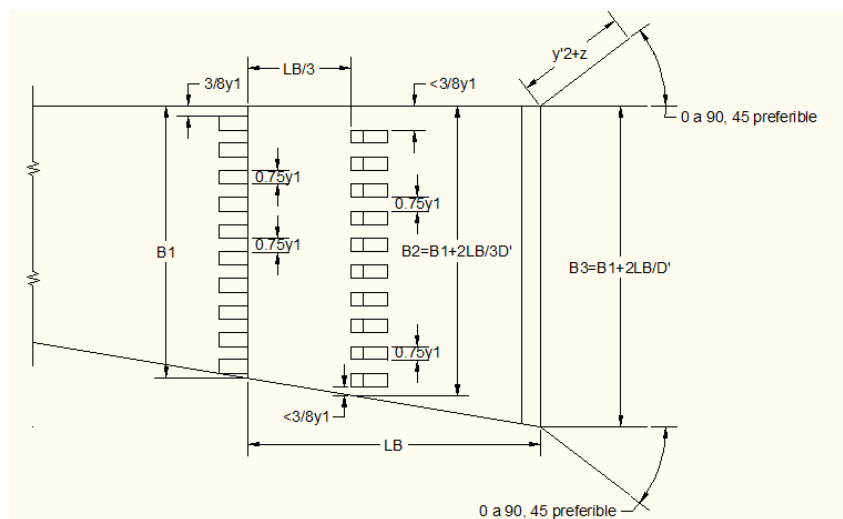
$$y_2' = \left(1 - \frac{F_1^2}{800}\right) * y_2$$

**Ecuación 2-14**

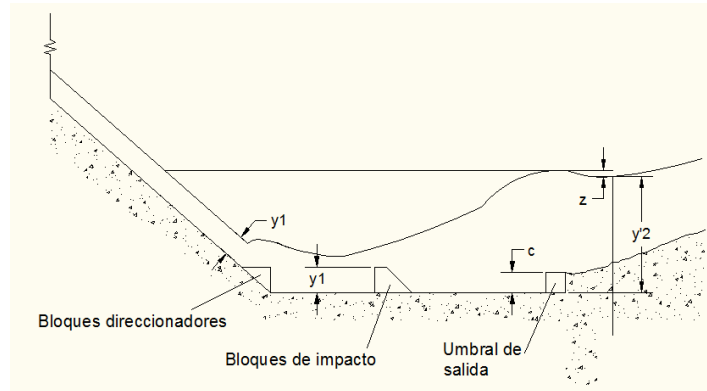
Para  $F_1 = [11 ; 17]$

La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura está dada por  $z = y_2'/3$ .

Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco disipador, y su parte superior debe tener una pendiente 1:1. El muro de salida debe localizarse con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje central de salida. Los muros laterales del cuenco disipador pueden ser paralelos (como en un cuenco disipador rectangular) o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición (como en un cuenco disipador trapezoidal).



**Figura 2.6 Cuenco disipador trapezoidal. Media alzada**



**Figura 2.7 Esquema de Estructura SAF**  
Adaptado de U.S. Bureau of Reclamation, 1984

## 2.2.2 Otras estructuras normalizadas

### 2.2.2.1 Cuenco I (Resalto Hidráulico en Plataformas Horizontales)

Este cuenco se ha diseñado para un resalto sobre un piso plano, corresponde a las condiciones de disipación del resalto hidráulico clásico. Su campo de aplicación viene dado para una altura de caída  $T > 60m$ , para caudales unitarios mayores  $q > 45 \text{ m}^2/\text{s}$ ,

para  $4.5 \leq F_1 \leq 9$ .

La longitud del cuenco disipador es aproximadamente  $L \approx 6 * y_2$ . Esta estructura no es muy práctica ya que su longitud es demasiado grande y por la falta de control que presenta.

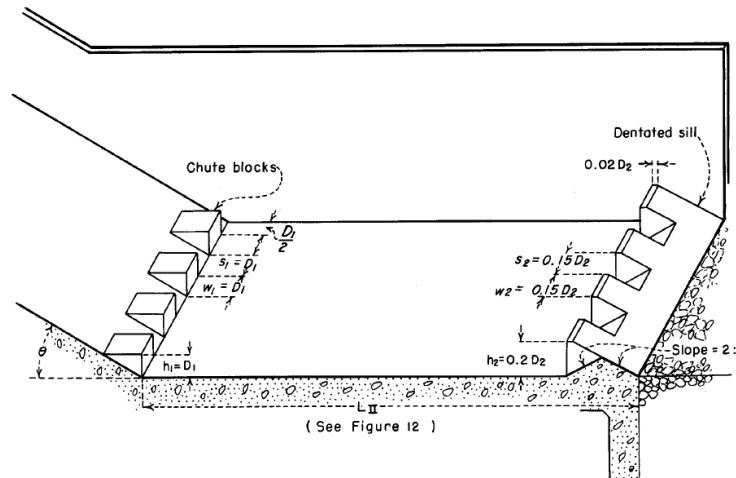
Las condiciones de este cuenco I, son las mismas que se expuso anteriormente en la teoría de resalto hidráulico.

### 2.2.2.2 Cuenco II (Para Vertederos de Presas Altas y grandes Estructuras de Canal)

Este es un cuenco provisto de dados en la rampa de aproximación y un umbral final dentado, no se usan bloques de impacto en la cubeta ya que las altas velocidades podrían causar cavitación.

El rango de aplicación para este cuenco es para números de Froude  $F_1 > 4.5$ , para un caudal unitario  $q > 46 \text{ m}^2/\text{s}$ , para alturas de caída  $T < 60m$  y velocidades de aproximación  $V_1 > 15 \text{ m/s}$ .

**Características del Cuenco:**



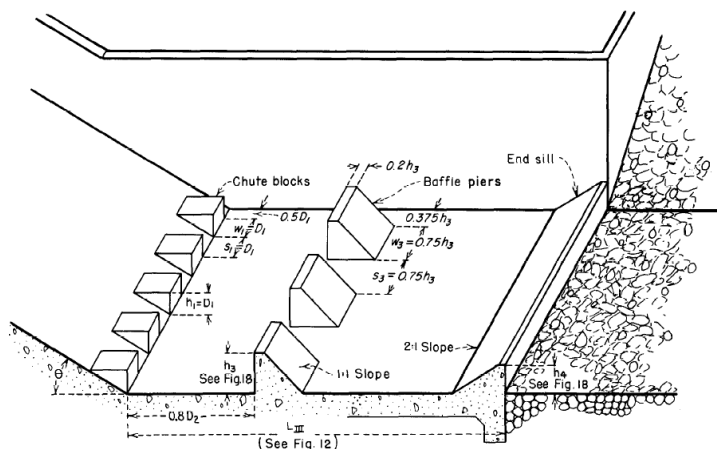
**Figura 2.8 Dimensiones del cuenco II**

**Adaptado de U.S. Bureau of Reclamation, 1984**

- La altura de los bloques de la rampa es igual a la profundidad de la entrada del flujo al cuenco,  $D_1$  ( $y_1$ ), el ancho y espaciado aproximadamente  $D_1$  ( $y_1$ ), pero puede variar para eliminar fracciones de bloques. Junto a cada muro de ala es mejor un bloque de  $D_1/2$ .
- La altura del diente del umbral es  $0.2 D_2$  ( $y_2$ ) y el ancho máximo recomendado es  $0.15 D_2$  ( $y_2$ ). Se recomienda que un diente sea colocado adyacente al muro de ala. La pendiente para la parte posterior del umbral es 2:1, para cuencos estrechos es recomendable reducir el ancho y espaciado de los dientes.
- No es necesario escalonar los dientes de la rampa con los del umbral.
- En el cuenco II, no hay cambios perceptibles en el funcionamiento del cuenco, es decir no hay cambios en el resalto hidráulico, cuando es variada la pendiente de la rampa de 0.6:1 a 2:1. Se recomienda que la unión de la rampa y la plataforma sea por medio de una curva de radio razonable ( $R \geq 4y_1$ ) cuando la pendiente de la rampa es 1:1 o mayor.
- La longitud del cuenco está dada aproximadamente por  $L \approx 4.2 * y_2$ .

En cuencos angostos es recomendable reducir el ancho y espaciado de los dentados, proporcionalmente, para aumentar el número de éstos y de esta manera mejorar el rendimiento del cuenco. No es necesario colocar en forma alternada los bloques de rampa y los umbrales dentados.

### 2.2.2.3 Cuenco III (Cuenco Corto para Estructuras en Canales, Pequeñas Descargas y Pequeños Vertederos)



**Figura 2.9 Esquema del cuenco III**

**Adaptado de U.S. Bureau of Reclamation, 1984**

Ha sido diseñado para un propósito similar al de la estructura SAF, pero considerando un factor de seguridad más alto ya que reduce la longitud del resalto en un 60%, está provisto de bloques de rampa, bloques de impacto en la cubeta y un umbral final continuo.

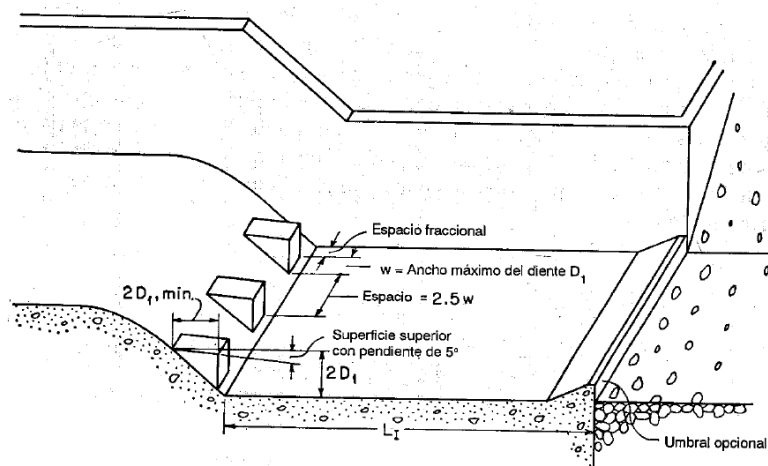
Esta estructura tiene como características principales las que se presentan a continuación:

- Las velocidades a la entrada del cuenco son moderadas o bajas, (hasta 15-18 m/s) y descargas unitarias de hasta  $19 \text{ m}^2/\text{s}$ .
- La forma más efectiva de obtener un cuenco pequeño es modificar el resalto por medio de accesorios, que deben ser autolimpiables.
- El cuenco opera mejor con la profundidad completa conjugada al final del resalto,  $D_2$  ( $y_2$ ), un factor de seguridad razonable debe ser inherente en la profundidad de agua para todos los números de Froude.
- La longitud del cuenco es menor que la mitad de la longitud de un resalto natural.
- El cuenco tipo III puede ser efectivo para números de Froude menores que 4, pero no es una certeza.
- La altura, ancho y espaciamiento de los bloques de la rampa, debe ser igual al promedio de la profundidad de entrada del flujo al cuenco,  $D_1$  ( $y_1$ ).
- La altura de los dientes deflectores varía con respecto al número de Froude.
- La cara aguas arriba del diente deflector debe fijarse a una distancia  $0.8 D_2$  ( $y_2$ ) de la cara aguas debajo de los bloques de la rampa.

- No es recomendable redondear ó aerodinamizar las esquinas de los bloques de la rampa, umbral del final o dientes deflectores, ya que podría resultar en la pérdida de la mitad de eficiencia.
- Es recomendable un radio de intersección  $R \geq 4D_1(y1)$  para la plataforma y rampa, cuando hay ángulos de  $45^\circ$  o más.
- La pendiente de la rampa tiene muy poco efecto en el resalto, a menos que largas pendientes planas estén involucradas.

#### 2.2.2.4 Cuenco IV (Cuencos disipadores para estructuras de canal y descargas)

- Concierno al resalto hidráulico para números de Froude entre 2.5 y 4.5 y el diseño de un cuenco adecuado.
- El mayor problema es causado por las ondas que producen que el resalto hidráulico no sea estable
- Los bloques largos fueron colocados en la rampa, con el objeto de dirigir el chorro dentro de la base del remolino en un intento de fortalecerlo y de este modo estabilizar el resalto. Los bloques con la parte superior curva mejoran el resalto.
- Es importante no colocar muchos accesorios ya que podría producirse un problema de remanso, requiriéndose así altos muros de ala.
- La superficie de los bloques debe tener una pendiente de  $5^\circ$  hacia abajo.
- Una profundidad de agua de 5% a 10% mayor que la profundidad conjugada es recomendada para Cuenco IV. El desarrollo del resalto es mucho mejor y la acción de las ondas se disminuye si la profundidad aguas abajo se incrementa en aproximadamente  $1.1 D_2$ .
- Un pequeño umbral al final de la plataforma es deseado para evitar la socavación.
- Los cuencos tipo IV son aplicables solo para secciones rectangulares.
- 



**Figura 2.10 Esquema del cuenco tipo IV**  
**Adaptado de U.S. Bureau of Reclamation, 1984**



## **2.3 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN FÍSICA**

### **2.3.1 Introducción**

Los métodos generalmente empleados en el estudio de problemas hidráulicos, plantean soluciones con modelos matemáticos simplificados debido a la complejidad de los fenómenos hidráulicos y su carácter tridimensional de flujo real, las relaciones funcionales establecidas en el marco teórico de la Hidrodinámica presentan muchas dificultades en el área de diseño, lo que obliga a hacer consideraciones en las hipótesis con las cuales se plantean las ecuaciones tentativas del fenómeno bajo análisis. La idealización y simplificación al plantear las hipótesis limita la validez de los resultados teóricos. A diferencia de los análisis teóricos, en los modelos físicos existe la posibilidad de evaluar varias soluciones técnicas posibles de ejecutarse, así como también permite la simulación de varios escenarios.

### **2.3.2 Objetivos de la modelación física**

La modelación física tiene como fin reproducir a escala los fenómenos, estados o procesos que se desean estudiar, para este caso en particular procesos referentes al flujo de agua. Se busca además que las magnitudes de los parámetros físicos o hidrodinámicas en el modelo hidráulico se puedan extrapolar a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas hipótesis.

La acertada selección de los parámetros más relevantes en la representación y experimentación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación más precisa de los resultados en la solución de los problemas en la escala natural, es decir, la del prototipo.

### **2.3.3 Semejanza Hidráulica**

Los parámetros adimensionales han facilitado el entendimiento de los fenómenos involucrados en los procesos hidráulicos, ellos permiten aplicar los resultados bajo ciertas condiciones a otros casos manteniendo ciertas variables sometidas a condiciones o propiedades equivalentes. La semejanza hidráulica combinada con una cuidadosa selección y uso de los parámetros adimensionales hacen posible la generalización de los resultados experimentales y la identificación de resultados imprevistos del fenómeno o proceso estudiado.

Los grupos adimensionales se representan como una relación entre las fuerzas que actúan sobre el fluido, por consiguiente, indican la importancia e influencia de cada una de las fuerzas que se consideran relevantes en el estudio de un problema específico. Cuando unas fuerzas son significativamente mayores a otras, dichas fuerzas menores





pueden ser despreciadas y tratar el fenómeno como si estuviese dominado únicamente por las fuerzas mayores, lo que se denomina similitud restringida.

Los análisis experimentales se desarrollan utilizando modelos geoméricamente similares, en los cuales la verdadera similitud dinámica se alcanza solo si cada parámetro adimensional tiene el mismo valor tanto en el modelo como en el prototipo. Los efectos de escala existirán cuando uno o más de los parámetros adimensionales tengan diferentes valores en el modelo y en el prototipo, por lo tanto los efectos de escala se definen como las distorsiones introducidas por diferentes fuerzas (viscosidad, tensión superficial) adicionales a las que predominan. En flujos de superficie libre, el efecto gravitacional es dominante.

Para la investigación experimental se trata de definir el modelo de manera que las magnitudes se correspondan con las del prototipo y a una escala apropiada. Desde un punto de vista hidráulico, es decir, fluido homogéneo en contorno fijo, las magnitudes son:

- Geométricas: Longitudes, áreas y volúmenes con su geometría.
- Cinemáticas: Tiempos, velocidades, aceleraciones, caudales.
- Dinámicas: Masas, fuerzas, presiones, pesos específicos, cantidades de movimiento, energías, tensiones superficiales, densidades, viscosidades.

El uso de modelos físicos hidráulicos implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas en ambos sistemas, en el prototipo y en el modelo.

**Similitud Geométrica:** Tanto en el modelo como en el prototipo, se definen formas y dimensiones homólogas que constituyen la similitud geométrica, misma que implica una relación constante, es decir que, para cualquier longitud  $L$  resulta ser  $L_p/L_m=L_r$  a lo que se denomina escala de longitudes.

**Similitud Cinemática:** Cuando la comparación de los sistemas  $A_p$  (prototipo) y  $A_m$  (modelo) es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática, y que se cumple cuando la forma de los patrones de flujo homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir hay similitud de movimientos en los dos sistemas; por lo que la relación de velocidades de puntos homólogos debe ser constante, es decir  $V_p/V_m=V_r$ , y generalizando  $V_r=L_r.t_r^{-1}$ , siendo  $V_r$  la escala de velocidades,  $L_r$  la escala de longitudes y  $t_p/t_m=t_r$  la escala de tiempos.

**Similitud Dinámica:** El movimiento del fluido en el modelo y en el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente que cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario que se cumpla con la similitud que considera las condiciones dinámicas de flujo, es decir, las fuerzas que actúan sobre puntos homólogos deben ser similares, lo que a su vez



manifiesta que la relación de parámetros homólogos en cada sistema sea constante, es decir, existe similitud dinámica.

**Similitud Restringida:** En caso de que algunas fuerzas son significativamente mayores a otras, las fuerzas menores pueden ser despreciadas y tratar el fenómeno como si estuviese dominado únicamente por las fuerzas representativas, que para esta investigación dichas fuerzas serán las gravitacionales y las inerciales.

En los flujos sujetos al efecto de la gravedad (corrientes con superficie libre) debe asegurarse que junto a la semejanza geométrica también el número de Froude sea igual en el modelo y en el prototipo.

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r \cdot L_r}} = 1$$

**Ecuación 2-15**

### 2.3.4 Relación de escalas entre las magnitudes hidrodinámicas con similitud de Froude

Considerando que tanto en el prototipo como en el modelo se trabaja con agua de tensión superficial constante, las escalas de las principales magnitudes se presentan en la Tabla No. 1, en donde:  $L_r$  es la escala de longitudes o la relación entre longitudes similares del prototipo respecto de la del modelo;  $g_r = 1$ , representa que la gravedad es idéntica en modelo y en prototipo;  $\sigma_r = 1$ , que el valor de la tensión superficial es idéntica en modelo y en prototipo;  $\gamma_r = 1$ , que el peso específico es igual en modelo y en prototipo porque se utiliza el mismo líquido (agua) en los ensayos en el laboratorio.

Magnitud	Similitud de Froude
Longitudes	$L_r = L_p / L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$ , con $g_r = 1$
Tiempos	$t_r = L_r / V_r = L_r^{1/2}$
Caudales	$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{5/2}$
Aceleración	$A_r = V_r / t_r = 1$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$

**Tabla 2.1 Valores de las relaciones o escalas para las principales magnitudes con el criterio de similitud de Froude**

**Velocidad:** En el movimiento de masas de agua los cambios en la magnitud y en la dirección del vector velocidad están controlados y gobernados por la



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

geometría de contorno. Por lo tanto las características geométricas de puntos homólogos en modelo y en prototipo deben ser semejantes.

**Viscosidad:** El efecto de la fricción interna o viscosidad sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es pequeña en comparación con la incidencia de la fuerza gravitacional, siempre y cuando en prototipo como en modelo se mantenga el flujo totalmente turbulento.

**Tensión Superficial:** La consecuencia de la tensión superficial en el movimiento del agua en el prototipo es prácticamente irrelevante. La literatura técnica brinda muchas recomendaciones que limitan o eliminan su efecto, de este modo, en el modelo, la escala de longitudes a ser seleccionada debe ser tal que garantice que las profundidades de agua minimicen el efecto de la tensión superficial.

**Presión:** Se asume que el flujo es permanente y la distribución de presiones a lo largo de la vertical es de tipo lineal, semejante a la distribución hidrostática, siempre que las líneas de corriente sean rectas.



### CAPÍTULO III

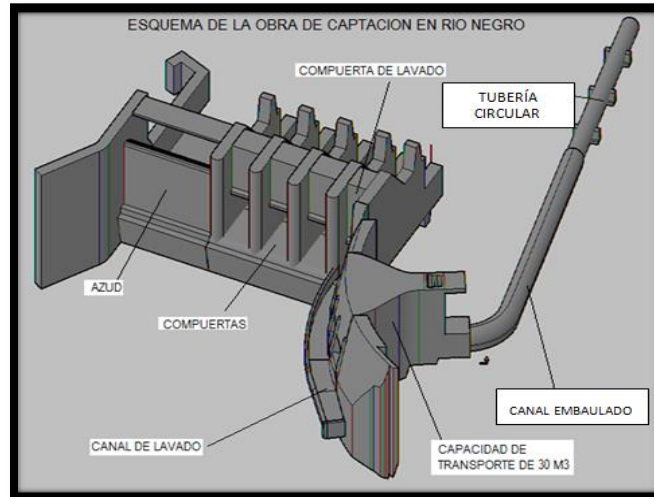
## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELECTRICO SAN BARTOLO

El proyecto “HidroSanBartolo” comprende una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de generación aproximada de 48,07 megavatios (MW), y que generará alrededor de 350 gigavatios (GW) por año, con un factor de planta del 83,25%. Los principales elementos del proyecto comprenden una presa de derivación de poca altura, la estructura de captación de agua, tuberías de acero, tubería de presión, una central eléctrica de superficie, una línea de transmisión y una subestación eléctrica. La longitud de la tubería de conducción es de 5.500 metros para mantener una cabeza neta de 183 metros.

**Obra de Toma:** La captación es del tipo convencional y captará un caudal de 30 m<sup>3</sup>/seg. Cuenta con un azud con un ancho de 19.5m y una altura de 12.8m, tres compuertas que serán utilizadas en eventos de crecida para la evacuación de caudal con una abertura de 7 m y un ancho de 6m, una compuerta de lavado de 4 m de ancho que está conectada a un canal para el desalojo de sedimentos con una pendiente del 4 % y una longitud total de 80 m que desemboca aguas abajo de la obra.

**Obra de conducción:** La conducción está formada por un tramo inicial constituido por un canal embaulado de 800m de longitud continuando con un tramo formado de una tubería circular hasta alcanzar la casa de máquinas.

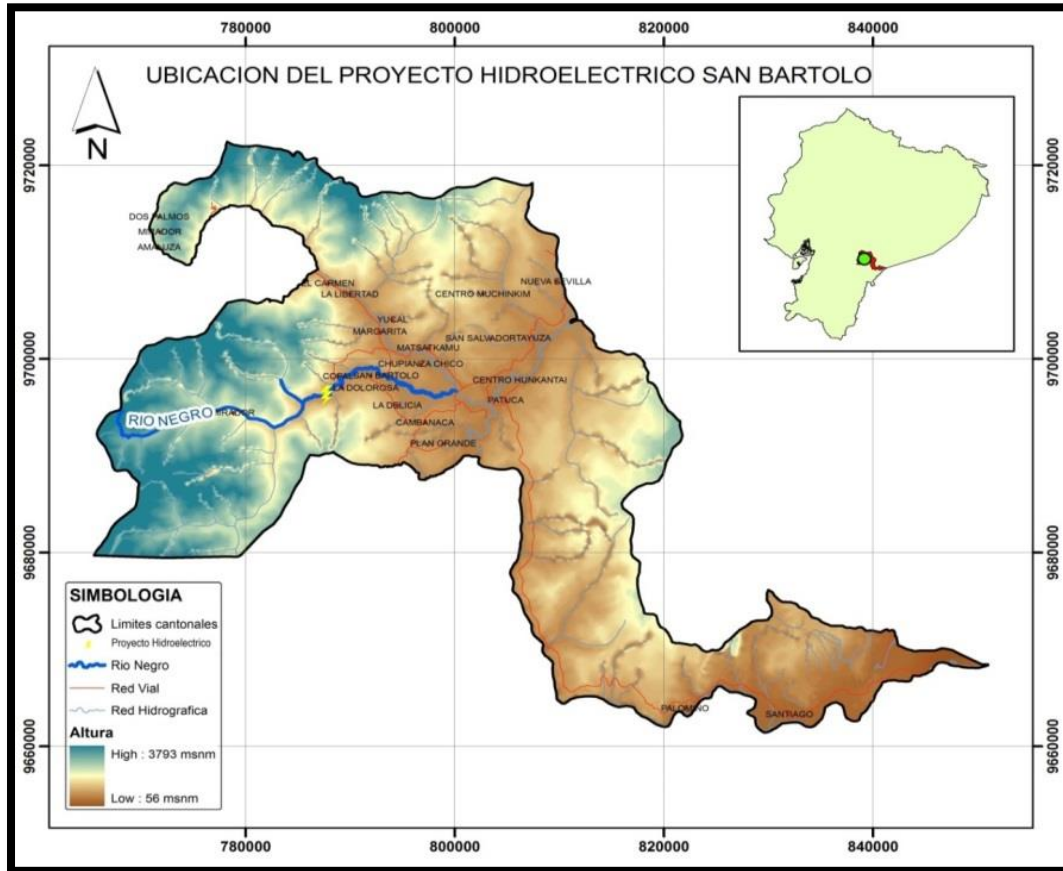


**Figura 3.1 Esquema de la obra de captación y conducción para el proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo”**

**Fuente: Estudio En Modelo Hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra De Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS. (Pacheco & Carrillo, 2012)**

### **UBICACIÓN DEL PROYECTO DE OBRA DE CAPTACIÓN**

El proyecto está ubicado en la provincia de Morona Santiago, en la zona poblada de San Bartolo, teniendo como centros poblados próximos a Copal, San Bartolo, La delicia, La dolorosa entre otros. Las coordenadas del proyecto son: 787741 – 9696202 (UTM WGS84 ZONA 17 S)



**Figura 3.2 Mapa de ubicación del proyecto hidroeléctrico “Hidro San Bartolo”**

**Fuente: Estudio En Modelo Hidráulico Para La Optimización Del Diseño De La Obra De Captación En El Río Negro Del Proyecto Hidroeléctrico Hidrosanbartolo, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS. (Pacheco & Carrillo, 2012)**

### 3.2 EQUIPAMIENTO

El Laboratorio de Dinámica de Fluidos del PROMAS cuenta con un canal de fibra de vidrio de 15 m de longitud por 5 m de ancho y 0.70 m de alto. En el extremo de este canal, un tanque del mismo material sirve de ingreso y almacenamiento del agua que circulará por el canal; un vertedero de 1.10m de ancho conecta el tanque con el canal. El agua que pasa por el modelo es vertida hacia un tanque en el otro extremo del canal a través de compuertas con vertedores cuya altura y apertura pueden modificarse.

Para la circulación del agua se utiliza una bomba eléctrica con una capacidad de suministrar 80L/s y cuyas especificaciones son las siguientes:

- **Marca:** Brook Crompton Parkinson Motors
- **Nº de Serie:** K826R
- **Potencia:** 15KW



- **Voltaje:** 220 V
- **RPM:** 1740
- **Amperaje:** 53 A



**Foto 3.1 Bomba eléctrica Brook Crompton**

El canal cuenta, en el sistema de recirculación, con una tubería de 6 pulgadas para la succión y otra de 4 pulgadas para la descarga controladas por un sistema de válvulas en paralelo.



**Foto 3.2 Tuberías para recirculación**

El funcionamiento de la bomba, y por ende el caudal, es regulado por un sistema de controles electrónicos calibrados para proporcionar la potencia requerida durante los ensayos.



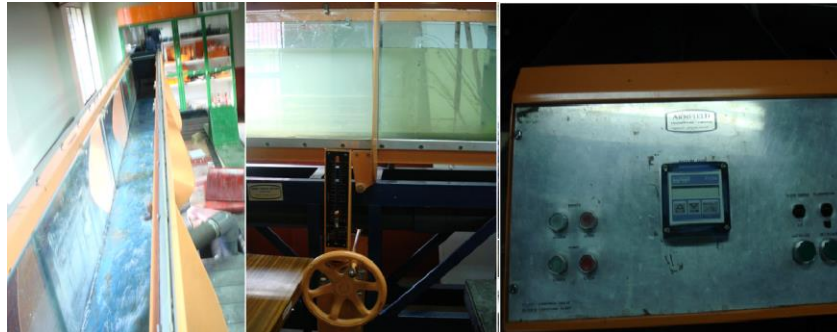
**Foto 3.3 Controles electrónicos**



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se ha empleado también del laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. En este laboratorio se disponen de los siguientes equipos:

- Canal marca ARMFIELD S6 Titilg Flume cuyas dimensiones son: longitud=12.5m, ancho=30cm, altura=45cm.



**Foto 3.4 Canal y controles de la bomba**

- Micromolinete marca Rickly Hydrological Tipo PYGMY, modelo 6205.



**Foto 3.5 Micromolinete**

- Bomba hidráulica marca NECO de 4 HP de potencia cuya máxima capacidad es de 22lt/s.



**Foto 3.6 Bomba NECO de 4 HP de potencia**

- Medidor de nivel: que consta de una varilla deslizante paralela a una regleta milimétrica.





### 3.3 DIMENSIONES Y ESCALAMIENTO PARA EL MODELO

El modelo físico de la obra de captación cuya construcción está proyectada sobre el Río Negro se planificó como un modelo de lecho móvil con el fin de identificar el comportamiento de los procesos hidráulicos de arrastre de fondo y azolvamiento en zonas críticas, con el caudal en el modelo proyectado para la frecuencia hidrológica anual del Río Negro.

La escala del modelo se ha definido tomando en cuenta las condiciones presentes para la implementación del mismo en el laboratorio tales como el espacio disponible, la capacidad de suministro de caudal de la bomba entre otras consideraciones derivadas del establecimiento de la escala.

El área sobre la cual se ha modelado la obra es de 250 x 700 m, que se considera suficiente para reproducir los efectos y fenómenos que se desean estudiar. De acuerdo al espacio disponible y a aspectos relacionados con el flujo, la escala apropiada para la bocatoma es de 1/50 ( $I_r$ ) no distorsionada. Además se construye por separado un azud a escala 1/40 ( $I_r$ ).

Con el valor de la escalas definido, se procedió a verificar el valor correspondiente de la relación de caudales entre modelo y prototipo.

Escala 1/50

$$\frac{Q_m}{Q_p} = I^{5/2} = \left(\frac{1}{50}\right)^{5/2} = 0,00005657$$

Escala 1/40

$$\frac{Q_m}{Q_p} = I_r^{5/2} = \left(\frac{1}{40}\right)^{5/2} = 0,00009882$$

Una vez establecido un caudal de interés como por ejemplo el establecido para los medios anuales del período húmedo (75 m<sup>3</sup>/s), se obtiene finalmente el caudal correspondiente para el modelo ( $Q_m$ ).

$$Q_p = 75 \text{ m}^3/\text{s}$$

Escala 1/50

$$Q_m = 0,00005657 * 75 = 0,00424 \text{ m}^3/\text{s} = 4,24 \text{ l/s}$$

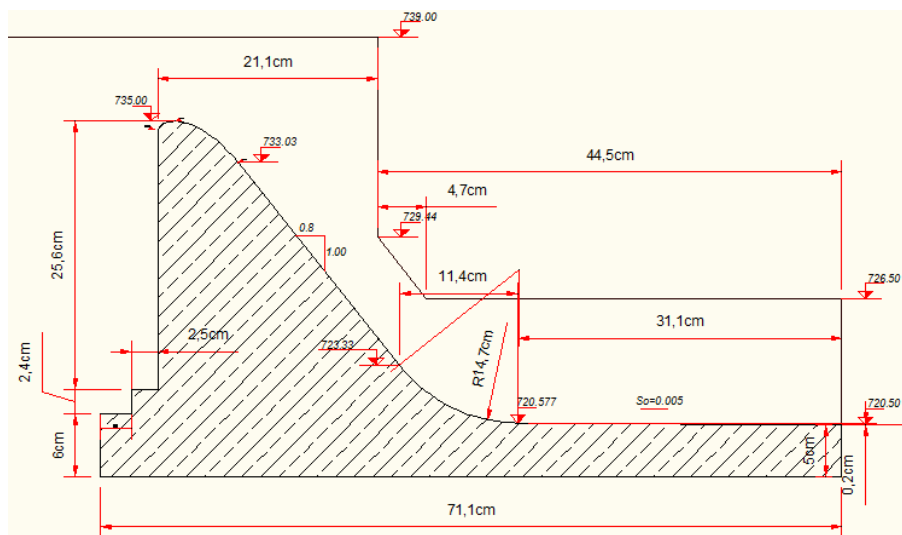
Escala 1/40

$$Q_m = 0,00009882 * 75 = 0,00741 \text{ m}^3/\text{s} = 7,41 \text{ l/s}$$

Como una iniciativa para apoyar los procesos de conceptualización, construcción y de calibración del modelo se ha establecido pertinente, en consideración del escalamiento antes descrito, la visualización del modelo del cauce del tramo de estudio, y de acuerdo a los componentes de diseño establecido que contemplan la obra de toma. La visualización planteada no solo permite apreciar aspectos relacionados al emplazamiento, sino que también permite prever criterios adicionales para la fase de emplazamiento del modelo físico de la obra en términos de la configuración morfológica involucrada.

### 3.4 IDENTIFICACION DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN

Entre los objetivos de esta fase de la experimentación están el de restringir el resalto a la zona del pie del azud o mantenerla dentro de un cuenco disipador cuya erosión producto del flujo pueda ser controlada para propósitos de cumplir con la vida útil de la obra. Además se busca con la variación de la estructura de disipación analizar el comportamiento experimental de cada una de las opciones, observando las líneas de corriente del flujo, sus repercusiones en la forma del cauce y el efecto que pudiera tener en la orilla del río.



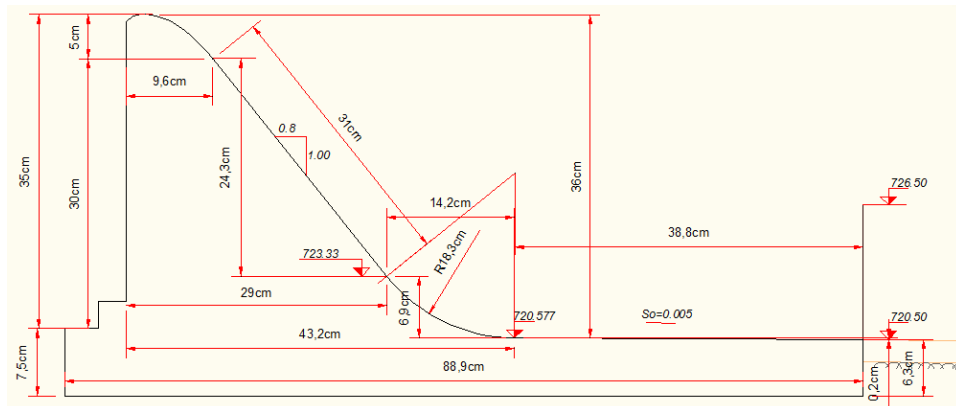
**Figura 3.3 Esquema y dimensiones del azud a escala 1:50**

En el laboratorio se implementa un modelo de azud a escala  $L_r = 1:40$  con el fin de evaluar el porcentaje de disipación de energía de los distintos tipos de disipadores.

En escala 1:40 el ancho del azud resultante es de 48.75cm y dado que el ancho disponible en el canal del laboratorio es de 30cm se aplica el siguiente factor para obtener los caudales en el prototipo:

$$Qp = Qm * 40^{\frac{5}{2}} * \frac{4.875}{3}$$

A continuación se presenta en detalle las dimensiones del modelo del azud en escala 1:40.



**Figura 3.4 Azud a escala 1:40**

### 3.5 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL SOBRE EL AZUD

Para la determinación del caudal que pasa sobre el azud se utilizó la ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} B C_d H^{3/2}$$

**Ecuación 3-1**

Se asumió un valor de  $C_d=0.745$  que ocurre cuando el calado real sobre el azud es igual al calado de diseño del azud, con esto se obtiene un valor de  $M=2.2$  para la ecuación:

$$Q = M B H^{3/2}$$

**Ecuación 3-2**

Se tomaron velocidades y calados aguas arriba del azud y se determinó que los valores adoptados para los coeficientes  $C_d$  y  $M$  eran los adecuados (ver Anexo 1).

### 3.6 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS HIDRÁULICOS Y VARIABLES RELACIONADAS AL ESTUDIO

En un análisis teórico previo y basado en la revisión bibliográfica pertinente se pudieron identificar algunas variables, que si bien no son todas las que intervienen en el flujo de la corriente de agua sobre el vertedero y su posterior impacto aguas abajo del azud, si se podrían considerar los parámetros más relevantes a tomar en cuenta y cuya



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

variabilidad tiene una importancia significativa en la modelación tanto física como matemática.

- Caudal que ingresa al modelo.
- Velocidad de aproximación del flujo hacia el azud.
- Dimensiones y características geométricas del azud.
- Calado sobre la cresta del azud.
- Calado del flujo al pie del azud ( $y_1$  del resalto).
- Longitud del resalto.
- Calado conjugado ( $y_2$ ).
- Calado del río aguas abajo.
- Dimensiones y características geométricas de los disipadores.
- Zonas del río aguas abajo afectadas por el flujo.

Con las variables de estudio bien identificadas se procedió a la toma de los datos procedentes de la experimentación, para este fin se emplearon hojas con el formato indicado en el Anexo 2.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DEL DISEÑO DE AZUD ORIGINAL

En el presente capítulo cabe señalar que la experimentación se llevó a cabo en dos modelos. El modelo hidráulico de lecho móvil sirvió para observar los efectos e influencia que tiene el flujo procedente del azud sobre el cauce del río, a partir de esto se desarrolla una descripción cualitativa y como ayuda y para reforzar el presente estudio se procedió a realizar ensayos en el modelo parcial para profundizar el estudio de las variables de interés.

Los disipadores evaluados fueron seleccionados acorde a las condiciones del flujo existentes en el modelo físico y fueron adaptados a las características físicas del azud.

##### 4.1.1 Disipador original implementado en el modelo de lecho móvil para análisis cualitativo de su efecto sobre el río

Este disipador consistía de un enrocado el cual fue construido sobre el cauce del río, a continuación del pie del azud y a la misma cota de éste. El enrocado se extendía a todo lo ancho de la estructura y se prolongaba una longitud de 20m (prototipo) aguas abajo. En el modelo el enrocado se construyó a escala  $L_r=1:50$  y en su construcción se empleó mortero y grava.



**Foto 4.1 Modelo de disipación de energía según el diseño original**

En la siguiente imagen se observa la morfología del río antes de los ensayos:



**Foto 4.2 Morfología del río antes de los ensayos**

De la simulación de esta condición de diseño inicial se puede decir que el flujo no sufre una disminución considerable de velocidad. El lecho enrocado se comporta como una continuación del azud prolongando el flujo dentro del río, como se observa en la imagen a continuación:



**Foto 4.3 Comportamiento del flujo**

Los efectos observados en el modelo se resumen a continuación:

- ✓ Efecto erosivo del flujo sobre el lecho del río. Se observó que la corriente acarrea el material con que estaba construido el lecho móvil del modelo.
- ✓ Debido a que el resalto no estaba confinado dentro de un cuenco, el flujo al chocar directamente con la masa de agua del río forma olas que llegaban hasta las orillas y que como se observa en la figura causan erosión.
- ✓ El arrastre del material erosionado por el flujo se depositó unos metros más abajo aumentando la cota del lecho en medio del cauce lo que modifica la morfología del río y por ende cambia las condiciones de la corriente empujando el flujo hacia las orillas, provocando la erosión de las mismas.
- ✓ Para caudales entre 50 y 75m<sup>3</sup>/s el calado del río no fue lo suficientemente alto como para establecer el resalto. Para caudales mayores el calado del río aumentó pero el resalto se formaba fuera del enrocado.
- ✓ Al abrir las compuertas de lavado el calado del río aumentaba y se formaba el resalto pero lo hacía fuera del enrocado.



**Foto 4.4 Morfología del río luego de los ensayos**

- ✓ Para caudales menores a los  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  el resalto se formó en la prolongación del pie del azud (zona dentro del rectángulo celeste Foto 4.5).
- ✓ Adicionalmente de la experimentación se tuvo que para caudales comprendidos entre los  $30$  y  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  el resalto se formó en donde se unen el enrocado y el pie del azud (ilustrado dentro del rectángulo rojo de la Foto 4.5).
- ✓ Para caudales cada vez mayores el resalto se aleja del borde, por ejemplo para un caudal de  $107 \text{ m}^3/\text{s}$  el resalto se forma a una distancia de  $3.5 \text{ m}$  medida desde el borde, para un caudal de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  la distancia medida fue de  $4.5 \text{ m}$  y para el caudal máximo que pasa por el azud de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  el resalto se daba lugar a  $7.5 \text{ m}$  del pie del mismo; las medidas anteriormente mencionadas están a escala del prototipo.



**Foto 4.5 Ubicación del resalto para diferentes caudales**



#### 4.1.2 Análisis de los parámetros hidráulicos referentes a la disipación de energía

A continuación se describen algunas características, las que posteriormente serán complementadas para los caudales de estudio. Para medir los parámetros hidráulicos referentes a la disipación de energía se procedió a realizar ensayos en el modelo específico, el mismo que sirvió de base para el análisis e interpretación de lo ocurrido en la experimentación.

- El diseño original no cuenta con disipadores que pudieran disipar el exceso de energía que proviene del vertedero para los caudales que se espera circulen por el azud.
- En este caso el resalto solo se formaba cuando el calado en el río era igual o mayor al calado conjugado  $y_2$  teórico para cada caudal. Para calados menores el resalto que se formó fue inestable.



**Foto 4.6 Modelo parcial sin disipadores a escala 1:40**

Se describen los ensayos realizados en el modelo parcial para caudales de estudio de  $50\text{m}^3/\text{s}$ ,  $75\text{m}^3/\text{s}$  y  $180\text{m}^3/\text{s}$  con la finalidad de evaluar el desempeño de los diseños originales y las posibles modificaciones.

Caudal:  $50\text{m}^3/\text{s}$

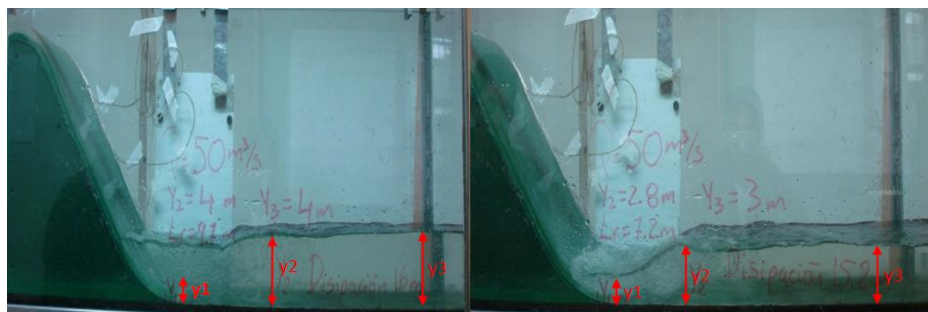
- Para pequeños calados (1.5m) como el mostrado en la Foto 4.7 se observó un significativo desplazamiento del resalto hacia aguas abajo, el resalto es débil por ello no es posible la medición de los parámetros hidráulicos del resalto.





**Foto 4.7 Caudal 50m<sup>3</sup>/s; calado río 1.5m**

- Cuando se tienen 4m y 3m de calado, el perfil del resalto se observa claramente (ver Foto 4.8), se tuvo una longitud máxima del resalto de 10m y para el mismo se requiere una longitud de disipación de 16m aproximadamente, a continuación de ésta se observó un flujo totalmente tranquilo. El calado  $y_3$  existente colabora a una adecuada disipación de energía.



**Foto 4.8 Caudal 50m<sup>3</sup>/s; calado río 4m y 3m**

- Para calados de 5m aguas abajo se obtuvo condiciones de resalto sumergido, para casos como éstos no se requiere estructuras de disipación ya que la disipación es controlada por el calado del río, además que el caudal es bajo y la velocidad del flujo procedente de la rápida no tiene mayor incidencia (Foto 4.9)



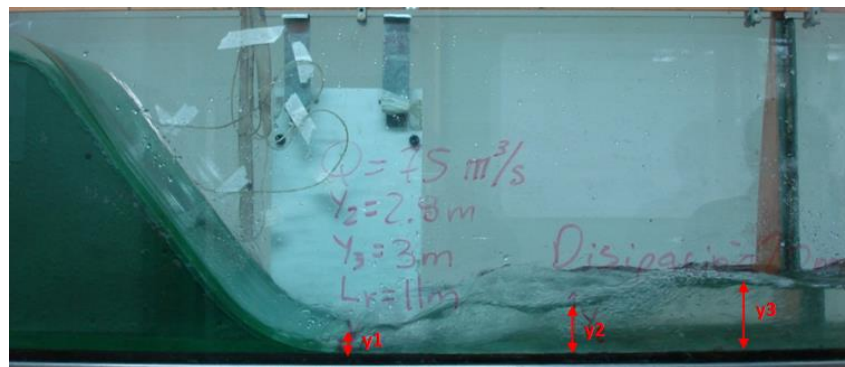
**Foto 4.9 Caudal 50m<sup>3</sup>/s; resalto sumergido**

**Caudal: 75m<sup>3</sup>/s**

- Como se aprecia en la Foto 4.10, el calado corresponde a 1.5m y al no existir estructuras de disipación el resalto se desplaza considerablemente aguas abajo. Se tiene un comportamiento similar al descrito para el caso de  $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ ,  $y_3=1.5\text{m}$

**Foto 4.10 Caudal 75m<sup>3</sup>/s; calado río 1.5m**

- El calado observado en las fotografías siguientes corresponde a 3m, 4m y 5.5m respectivamente, en todos los casos se desarrollaba adecuadamente el resalto, no se requiere de mayor inversión en la construcción de disipadores. La influencia del resalto alcanza una longitud de 20m desde la sección donde se mide  $y_1$ .

**Foto 4.11 Caudal 75m<sup>3</sup>/s; calado río 3m**

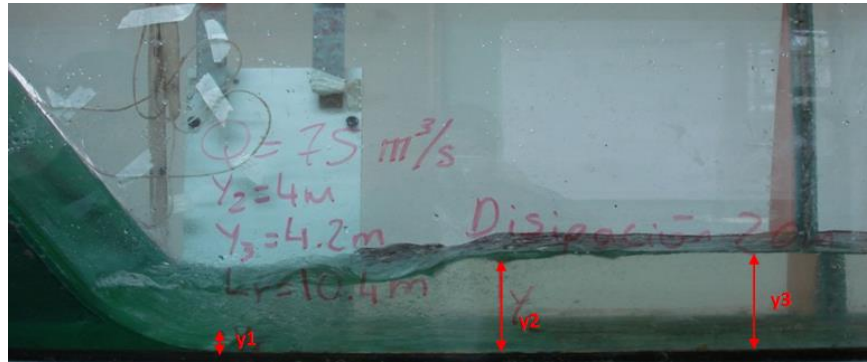


Foto 4.12 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 4m

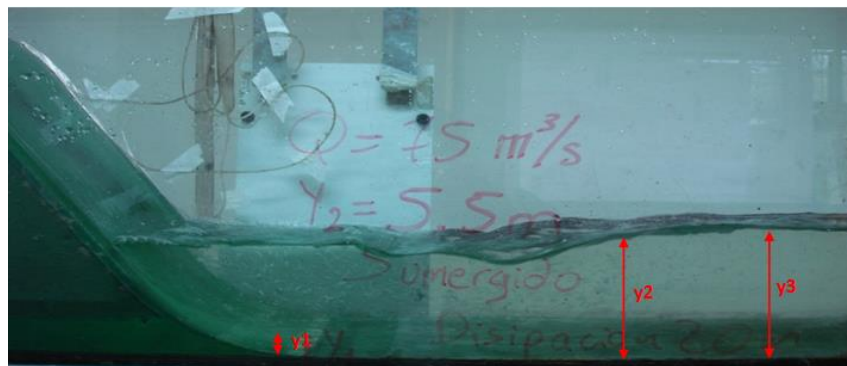


Foto 4.13 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; resalto sumergido: calado río 5.5m

Caudal:  $180\text{m}^3/\text{s}$

- Se observó que para 1m de calado no se formaba resalto, las velocidades son altas y esto favorece a la erosión del material y su consiguiente azolvamiento aguas abajo en donde el ensanchamiento del cauce reduce las velocidades, formando pequeñas islas de depósitos de material, alterando el cauce y el flujo normal del río.

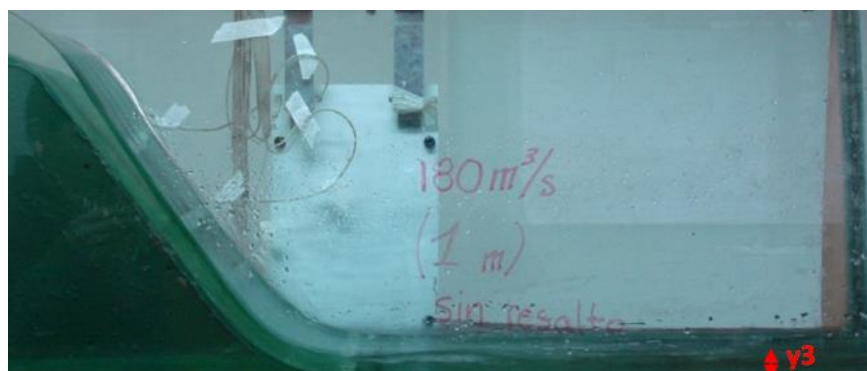


Foto 4.14 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; sin resalto:  $y_3=1\text{m}$

- Al tener un nivel de agua de 5.4m, se produjo un resalto de 18m de longitud, la disipación fue controlada por el mismo calado, necesitándose una longitud total de disipación de 35m; sin embargo esta es una condición con muy baja probabilidad de ocurrencia en el río porque el calado normal del río es mucho menor a los 5.4m.

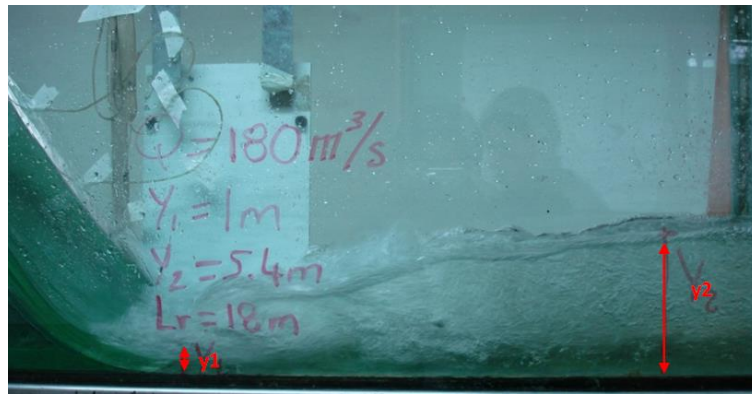


Foto 4.15 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 5.4m

## 4.2 DESCRIPCIÓN CUALITATIVA Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL SOBRE LA OPERACIÓN DE LOS DISIPADORES PROPUESTOS

Luego de realizados las pruebas para el diseño original, se han identificado algunos factores dinámicos del azud sobre los cuales se pueden realizar cambios estructurales que modifiquen el comportamiento de la corriente y que minimicen los efectos dañinos que el exceso de energía puede provocar en la obra de toma y en el río. A continuación se detallan las reestructuraciones hechas en el azud para conseguir que el resalto disipe la energía además se exponen los resultados obtenidos en los experimentos realizados con cada tipo de dissipador.

### 4.2.1 Cuenco dissipador

Como primera opción se planteó la construcción de un cuenco dissipador construido a continuación del azud. Este cuenco se diseñó con el fin de recibir en la masa estática de agua el flujo que llega con alta velocidad y provocar la turbulencia necesaria para que se produzca el esfuerzo cortante entre las moléculas de agua o el entrampamiento de aire que favorezca la disipación la energía.

### Dimensionamiento y construcción

El cuenco de disipación se extendió en todo el ancho de la estructura de 51.5m, teniendo una profundidad de 2.5m y una longitud de 50m (dimensiones para el prototipo). Los bordes del cuenco se construyeron con mortero, como se observa en la Foto 4.16.

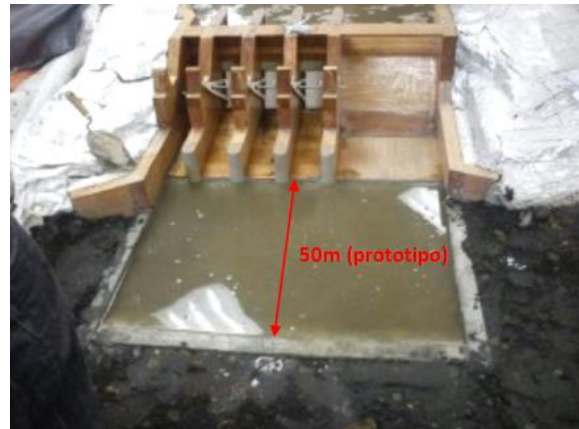


Foto 4.16 Piscina de disipación

#### 4.2.1.1 Análisis cualitativo en el modelo de lecho móvil



Foto 4.17 Ensayo en piscina simple

Al colocar el cuenco de disipación de energía se observaron los siguientes fenómenos:

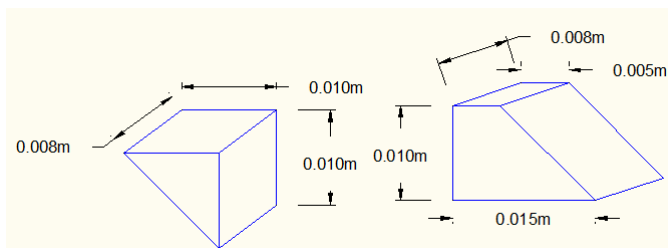
- ✓ El resalto se formaba dentro del cuenco incluso para los caudales más altos.
- ✓ El flujo al pasar por el borde del cuenco formaba olas que golpeaban contra la orilla del río provocando socavación.
- ✓ Al no existir material dentro del cuenco, susceptible de ser erosionado y transportado hacia aguas abajo se dejó de observar el azolvamiento de material que daba lugar a la formación de islas en el cauce del río, al contrario de lo que ocurrió con el enrocado original.
- ✓ En el cuenco se forma una corriente que gira en sentido horario en la zona de descarga de las compuertas.

## 4.2.2 Disipador tipo SAF

Vistos los fenómenos antes mencionados en 4.2.1.1, se vio la necesidad de controlar estos efectos negativos mediante la colocación de un disipador más eficiente, uno que se acomode a las características físicas así como de flujo presente en el azud, para esto se seleccionó el disipador tipo SAF, el cual se adapta a nuestro estudio pues una característica fundamental es que este disipador se diseña para números de Froude comprendidos entre 1.7 y 17 como los presentes en esta experimentación.

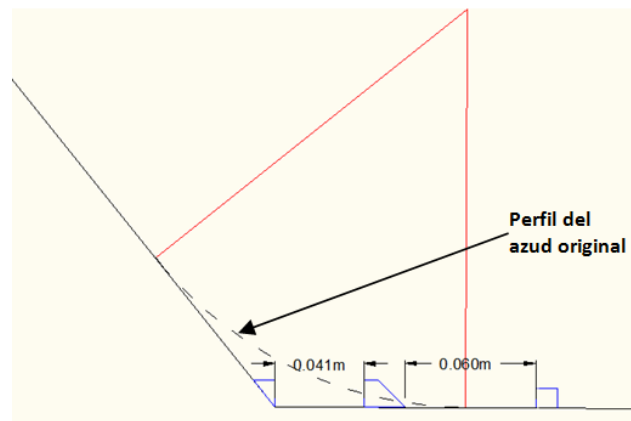
### 4.2.2.1 Estudio cualitativo en el modelo de lecho móvil

Las dimensiones de los bloques a escala 1:50 se detallan en la Figura 4.1.



**Figura 4.1 Dimensiones de los dados disipadores a escala 1:50**

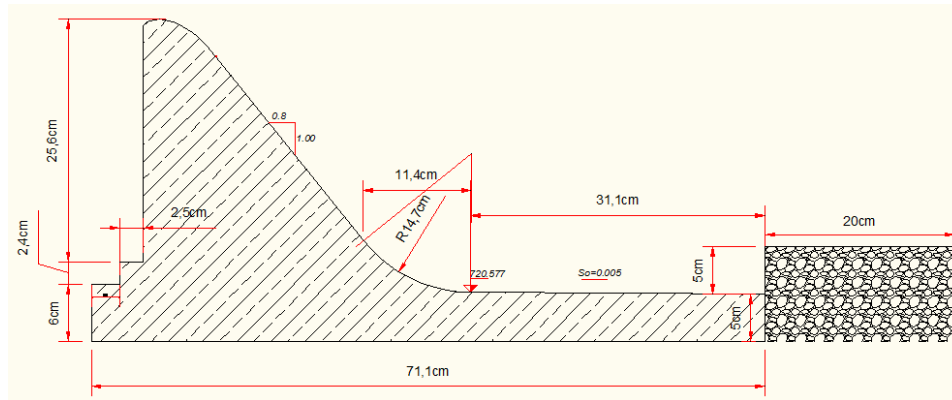
El siguiente esquema muestra cómo se colocan los deflectores en la estructura.



**Figura 4.2 Ubicación de los dados del disipador SAF**

### Dimensionamiento y construcción

Para la experimentación con este disipador se colocó un bloque de 2,5 m (escala del prototipo) de altura para crear un cuenco al pie del azud y elevar el calado del río favoreciendo la formación del resalto.



**Figura 4.3 Azud con cuenco disipador, escala 1:50**



**Foto 4.18 Ensayo disipador tipo SAF en el modelo de lecho móvil**

Las características que se observaron en el comportamiento del flujo (Foto 4.18) con esta nueva estructura son las siguientes:

- El resalto se localizaba dentro del cuenco disipador al igual que la turbulencia.
- El flujo al salir del cuenco por encima de su borde y descargarse en el río provocaba ondulaciones y olas pero de menor magnitud que las observadas con los disipadores anteriores, con lo que se infiere que se produciría menor daño erosivo en las orillas del río.
- La cresta del resalto se formaba a 18 m del borde de la estructura, esta zona es en la cual ocurre la mayor turbulencia, a partir de esta zona el flujo es uniforme.

#### 4.2.2.2 Análisis de parámetros hidráulicos para la disipación de energía

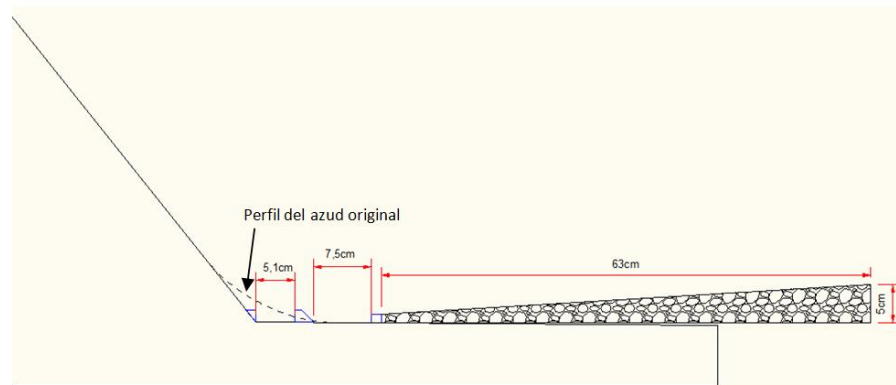


Figura 4.4 Esquema del disipador SAF, escala 1:40

El análisis de los efectos del flujo sobre este tipo de disipador se lo realizó para el caudal máximo de  $180\text{m}^3/\text{s}$  y tres calados distintos del río.

- En la Foto 4.19 se indica un caudal de  $180\text{m}^3/\text{s}$  y un calado del río de 3m medido sobre el enrocado, para esta condición el resalto se identifica claramente, es estable y se desarrolla por sobre el enrocado, no tiene mayor efecto sobre el mismo. La ventaja del cuenco es que provoca la elevación del calado hasta la magnitud necesaria para la formación del resalto.



Foto 4.19 Disipador tipo SAF con cuenco; calado río 3m

- Para el mismo caudal pero con un calado de 4m la longitud del resalto aumenta y se extiende sobre el enrocado, de igual manera no hubo mayores efectos sobre el enrocado, las rocas no son arrastradas, además de existir menor turbulencia que en el caso anterior. La longitud de disipación no excedía el largo del enrocado (25 m).





Foto 4.20 Disipador tipo SAF con cuenco; calado río 4m

- Para calados mayores los bloques disipadores (direccionadores y de impacto) no funcionan, ya que el resalto es de tipo sumergido, y el trabajo de disipación lo realiza el calado del río y el cuenco formado entre el pie del azud y el enrocado además de que se reduce la altura de caída.



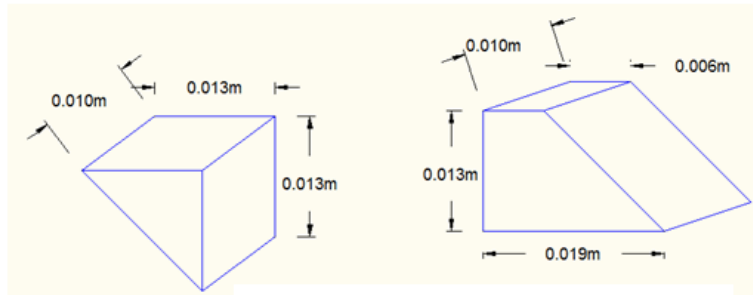
Foto 4.21 Disipador tipo SAF con cuenco; resalto sumergido

### 4.2.3 Disipador tipo SAF sin cuenco

Para tener una mejor conceptualización de la necesidad o no de un cuenco disipador trabajando en conjunto con el disipador SAF, se procedió a experimentar la alternativa anterior pero sin la utilización de un cuenco.

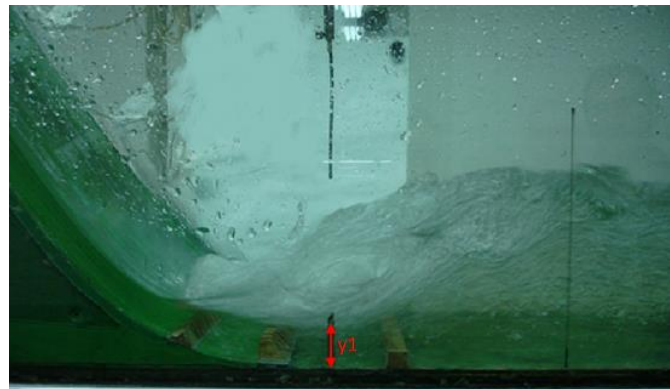
#### 4.2.3.1 Análisis de parámetros hidráulicos

Las dimensiones de los deflectores usados en este tipo de disipador se muestran a continuación:



**Figura 4.5 Dimensiones de los bloques a escala 1:40**

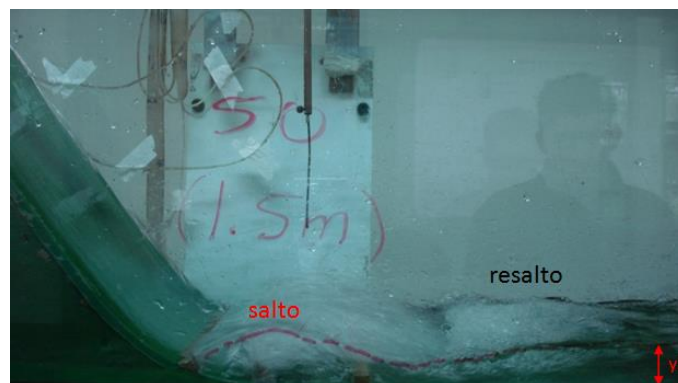
De la misma manera que ocurre en el caso en el que no se tienen dados ni cuenco, el resalto se formaba dadas las condiciones de calado del río aguas abajo.



**Foto 4.22 Disipador SAF sin cuenco**

Caudal  $50\text{m}^3/\text{s}$

- Para el caudal de  $50\text{m}^3/\text{s}$  y un calado de 1.5m el resalto se forma por detrás de los dados disipadores; no sin antes crearse un efecto de ola, producido por el impacto del flujo de agua (direccionado por los primeros bloques), con los bloques propuestos para este efecto. Como se puede observar claramente en la Foto 4.23



**Foto 4.23 Caudal  $50\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 1.5m**

- Para un nivel de agua de 3.5m, aguas debajo de la estructura, la disipación fue eficiente, no se presentaron inconvenientes, situación que se replica para calados mayores. Efecto que se produce por la efectividad de los bloques disipadores sumado al calado existente aguas abajo, resultando en una adecuada disipación.



**Foto 4.24 Caudal  $50\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 3.5m**

### Caudal $75\text{m}^3/\text{s}$

- Para un calado aguas abajo de la estructura de 2m, que se ha establecido como el nivel normal en el río para el caudal de  $75\text{m}^3/\text{s}$  se presentaba un resalto que se formaba por detrás de la última fila de bloques disipadores. El resalto que se forma es un resalto débil que sin embargo prolonga su efecto hasta una longitud de 40m, efecto que no tendría mayor incidencia en cuanto a erosión y/o socavación dada las características del resalto. De igual manera que el caso anteriormente descrito, al trabajar sumergidos los dados, estos no funcionan efectivamente.



**Foto 4.25 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 2m**

- Con caudal de  $75\text{m}^3/\text{s}$  y calado de 3m aguas abajo, el resalto se forma algo por detrás de los bloques de impacto, el resalto es estable y se observaba una adecuada disipación de energía, no se requiere mayor longitud de disipación.

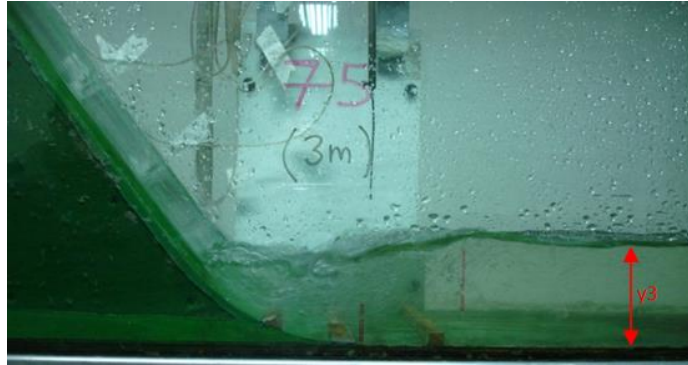


Foto 4.26 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 3m

- Para un calado de 4.5m aguas abajo de la estructura, como se observa en la Foto 4.27, se presenta un resalto bien definido, de igual manera que en el caso anterior la energía es correctamente disipada a lo largo de los dados.

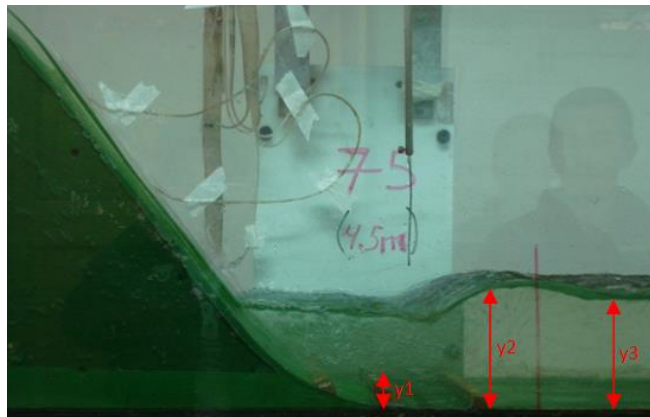


Foto 4.27 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 4.5m

- Para un nivel de 6m se tiene un resalto sumergido que presenta su altura conjugada por detrás del último bloque de dados disipadores, la disipación se produjo de forma adecuada. Prácticamente la disipación ocurrió en la zona ocupada por los dados disipadores.

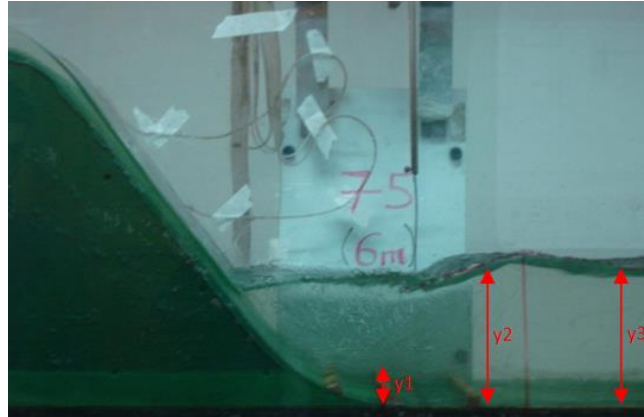


Foto 4.28 Caudal  $75\text{m}^3/\text{s}$ ; calado del río 6m

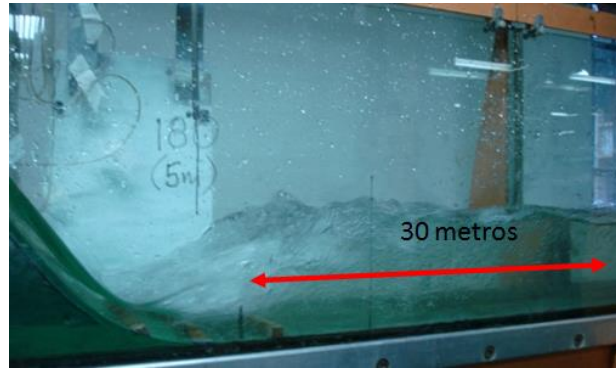
### Caudal $180\text{m}^3/\text{s}$

- Para el caudal de  $180\text{m}^3/\text{s}$ , con un calado de 3m aguas abajo no se origina resalto. Debido a las altas velocidades con que el agua es descargada desde el azud, el flujo choca con los dados disipadores de solera creándose un salto que al caer metros más adelante podría provocar socavación en el lecho del río por causa del impacto, hecho que no se pudo comprobar dado que el fondo de este canal es rígido. En este caso se observa un efecto negativo de los dados deflectores ya que al no estar sumergidos ocasionan el fenómeno antes descrito.



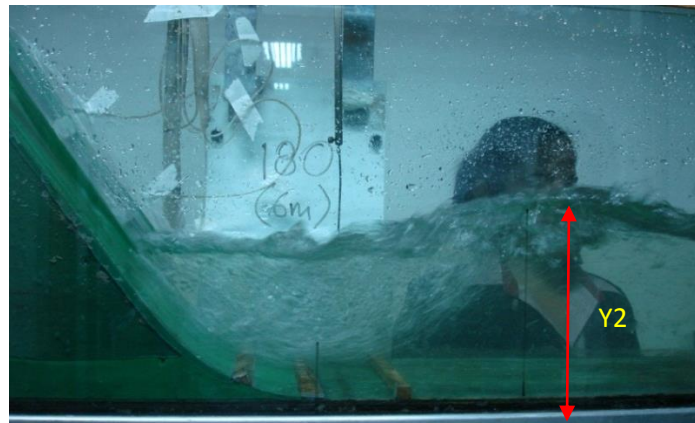
Foto 4.29 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 3m

- Para un calado de 5m como se observa en la Foto 4.30 el resalto hidráulico es estable y se origina entre los bloques de impacto y el umbral a la, el resalto no es sumergido y los dados trabajan efectivamente, necesitándose una longitud no mayor a 30 metros para que se desarrolle el fenómeno de turbulencia y permita la disipación de la energía.



**Foto 4.30 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; longitud disipación menor a 30m**

- Para 6m de calado aguas abajo se tiene un resalto estable que empieza a formarse donde se encuentra el umbral de salida y se prolonga 10m aguas abajo, además se observó la formación de olas en la sección del calado conjugado debido al encuentro del agua procedente del azud que forma el resalto y el agua acumulada debido al calado existente. La turbulencia que se observa en la Foto 4.31 se produce debido al impacto y la difusión del flujo que incide en los bloques, esto ayuda a la estabilización del resalto, produciendo un acortamiento de la longitud del mismo.



**Foto 4.31 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; resalto sumergido:  $y_3= 6\text{m}$**

#### 4.2.4 Cuenco disipador

Con el objetivo de verificar la pertinencia de la utilización de bloques disipadores como herramienta para la disipación de la energía, se han realizado simulaciones de un cuenco disipador sin este tipo de elementos. Simulándose en el modelo un cuenco de 2,5 m de profundidad.

#### **4.2.4.1 Experimentación en el modelo de lecho móvil**

Esta nueva configuración consistía de un colchón de agua, el mismo que estaba formado por la prolongación del azud teniendo una longitud de 20m (prototipo) y una profundidad de 2m (prototipo).



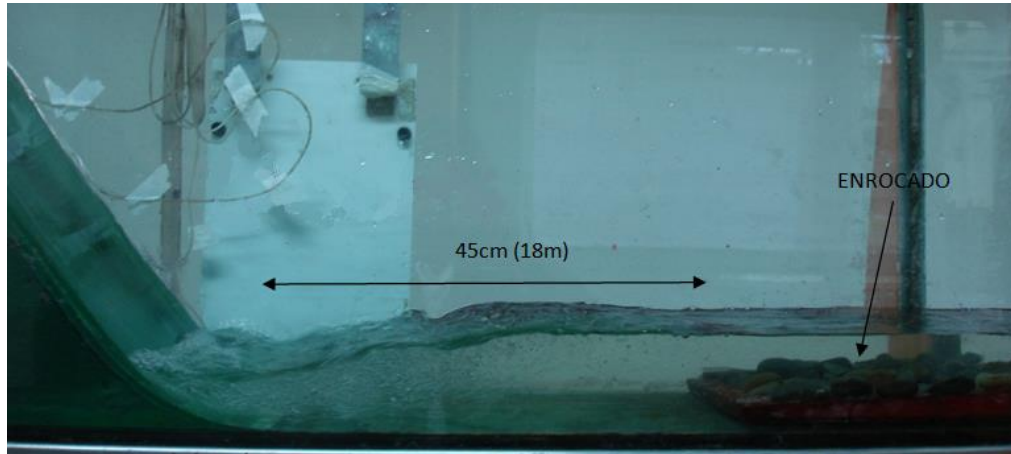
**Foto 4.32 Ensayo con elevación del nivel del río sin dissipador SAF**

Con esta nueva configuración de la estructura se observaron las siguientes características:

- Se presentó un oleaje más fuerte comparado con el modelo en el que se incluían los bloques, esto puede provocar considerables daños erosivos en el lecho del río.
- Se presenta una erosión de 20cm en el modelo que representan 10m en el prototipo.
- La turbulencia se presenta a lo largo de todo el cuenco, la altura conjugada del resalto se forma en el borde de salida del cuenco, teniéndose como resultado que la zona de turbulencia se extiende aguas abajo del cuenco dissipador.

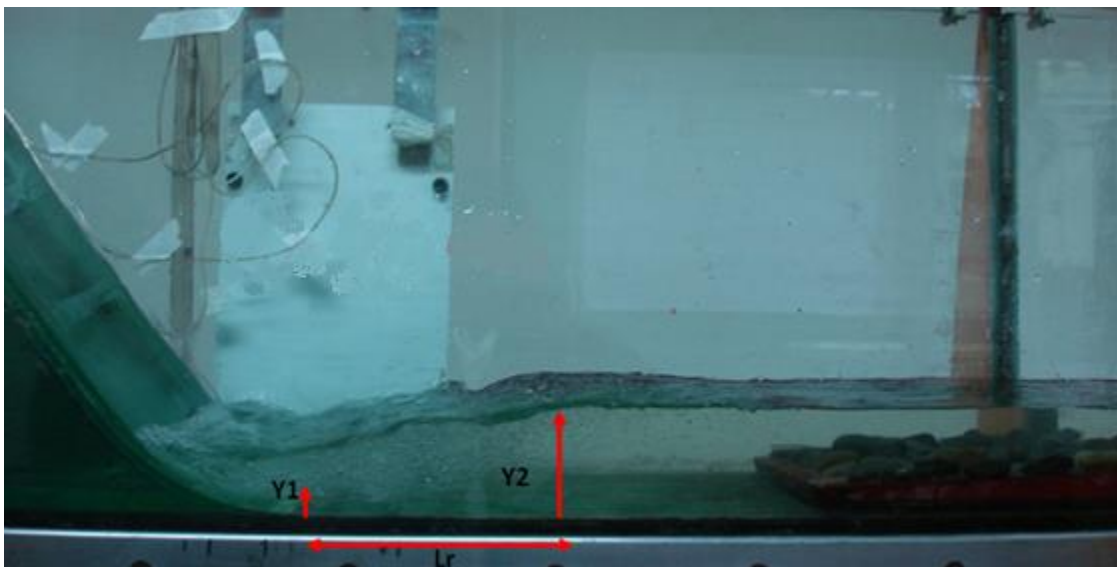
#### **4.2.4.2 Estudio de los parámetros hidráulicos referentes a la disipación de energía**

En este caso se construyó el enrocado a 18 m del pie del azud para formar un cuenco dissipador y se retiraron los bloques direccionadores tipo SAF.



**Foto 4.33 Cuenco disipador sin dados**

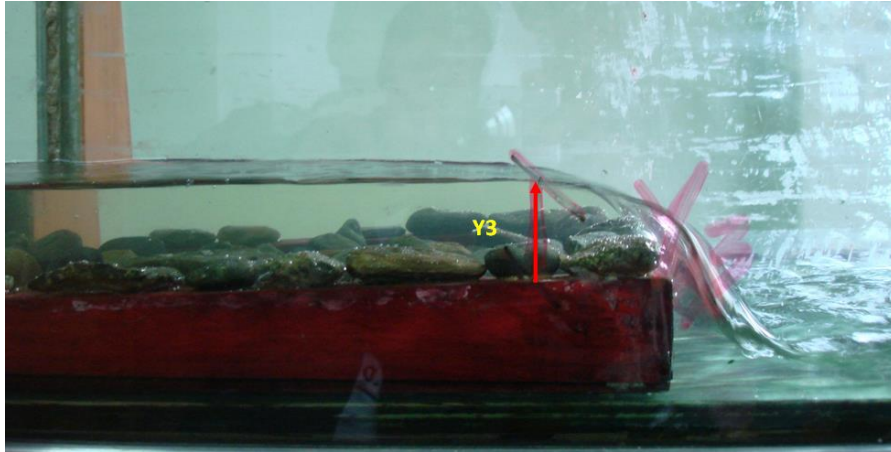
En la Foto 4.34 , se ilustra la metodología de los ensayos realizados y se indica de manera gráfica que variables y la forma en que se midieron, para ejemplo ilustrativo, en este caso se cuenta con un caudal de  $50\text{m}^3/\text{s}$ , el material del enrocado tiene un diámetro de 1m. Se pueden observar las variables medidas:  $y_1$ ,  $y_2$  y  $L_r$ .



**Foto 4.34 Identificación de las variables en la experimentación:  $y_1$ ,  $y_2$  y  $L_r$**

En la Foto 4.35, se observa la variable  $y_3$ , que en este ejemplo corresponde a un calado de río de 2m a condición de descarga libre.

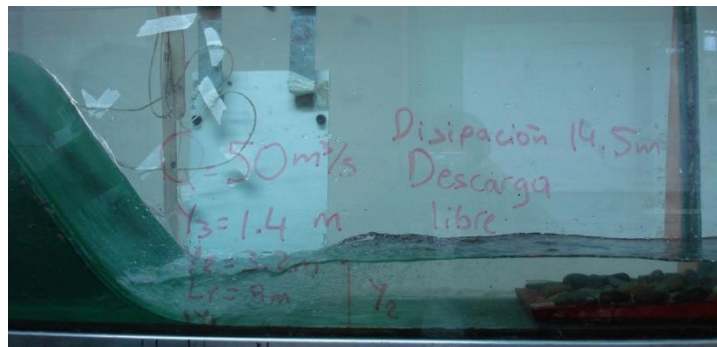




**Foto 4.35 Identificación de las variables en la experimentación:  $y_3$**

CAUDAL  $50 \text{ m}^3/\text{s}$

- Para un caudal de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  y un calado del río de  $1.4 \text{ m}$  (medido desde el borde más alto del enrocado) a condiciones de descarga libre el resalto fue estable y llegó a tener una longitud de  $8 \text{ m}$  pudiendo observarse en la Foto 4.36 que la energía hidráulica procedente del azud fue adecuadamente disipada en la longitud de  $18 \text{ m}$  del cuenco. A pesar de que el calado  $y_3$  era bajo, la altura conjugada del resalto fue  $3.2 \text{ m}$ , altura que se obtuvo debido al cuenco existente y que ayuda a amortiguar el flujo que llega de la rápida.



**Foto 4.36 Caudal  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ; descarga libre:  $y_3=1.4 \text{ m}$**

- Para el mismo caudal se elevó la altura de la compuerta para obtener un calado mayor del río, hasta obtener un resalto sumergido, el resultado en términos generales fue  $2.5 \text{ m}$  de calado en el río y un resalto que es controlado por el calado aguas abajo del río.

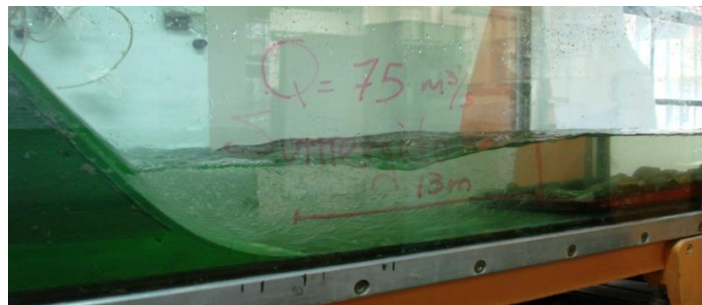
### CAUDAL 75 m<sup>3</sup>/s

- Al representar un caudal de 75m<sup>3</sup>/s pasando por el azud, el calado aguas abajo subió a 1.6m, la longitud del resalto se incrementó a 11 m y la influencia del resalto formado necesitaba una longitud de 18.5m para disiparse adecuadamente. Esto descrito para condiciones de descarga libre en el borde aguas abajo del enrocado.



**Foto 4.37 Caudal 75m<sup>3</sup>/s; descarga libre: y<sub>3</sub>=1.6m**

- Para el mismo caudal pero con un calado aguas abajo de 3.2m el resalto se sumergía, este calado colaboraba para que la longitud del resalto disminuya, necesiéndose ahora solo 13m de longitud efectiva de piscina. La efectividad de este cuenco mejora para resaltos sumergidos.



**Foto 4.38 Caudal 75m<sup>3</sup>/s; resalto sumergido**

### CAUDAL 180 m<sup>3</sup>/s

- Cuando se incrementó el caudal al máximo de 180m<sup>3</sup>/s a descarga libre, el agua procedente del azud impactaba contra el enrocado originando una gran ola que causaba la desestabilización del enrocado (ver Foto 4.39), en este caso en particular este dissipador resultó ineficiente dada la alta velocidad que llevaba el flujo, el mismo que al encontrarse con un obstáculo cercano golpeaba fuertemente con él, para que no ocurra esto una solución sería llevar el enrocado metros más abajo o es necesario que el flujo descargado sea controlado por el nivel del río aguas abajo haciendo que este nivel suba a 3.4m,

en esta situación la longitud del resalto llega a 16m (Foto 4.40). Como se observa en la foto mencionada la energía se extiende sobre el enrocado y es disipada a lo largo del mismo.

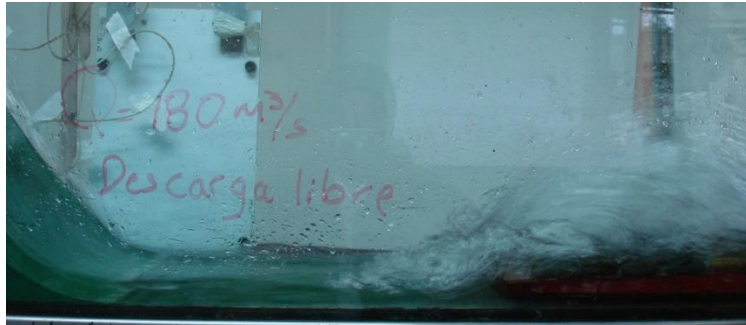


Foto 4.39 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; descarga libre



Foto 4.40 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; calado río 3.4m

- Para un hipotético caso y solo por razones de estudio se ha sumergido este resalto, para ello se requirió un calado no menor a 7.6m. Se observó una superficie turbulenta controlada por el nivel aguas abajo (Foto 4.41).



Foto 4.41 Caudal  $180\text{m}^3/\text{s}$ ; resalto sumergido:  $y_3=7.6\text{m}$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ENSAYOS EN AZUD	Q m3/s	y2 (m)	y3 (m)	Longitud resalto (m)	Longitud necesaria para disipación (m)
Disipador SAF sin cuenco	50	1.5	1.5	6	No resalto - desplazamiento del resalto aguas abajo
	50	3.5	3.5		8
	50	5.5	5.5		8
	50	7	7		Resalto Sumergido
	75	2	2	3.5	*
	75	3	3		8
	75	4.5	4.5		7.2
	75	6	6		8
	75	7.5	7.5		Resalto Sumergido
	180	3	3	18	*
180	5	5	30		
180	6	6	20		
Disipador SAF con cuenco	180	3			*
	180	4			*
	180	> 4			Resalto Sumergido
Diseño original: Sin estructuras de disipación	50	1.5	1.5	7.2	No resalto - desplazamiento del resalto aguas abajo
	50	2.8	3		15.2
	50	4	4		16
	50	5	5		17
	75		1.5	11	No resalto - desplazamiento del resalto aguas abajo
	75	2.8	3		*
	75	4	4.2		10.4
	75	5.5	5.5		11
	75	7.5	7.5		28.8
	75	9	9		14.5
	180	1	1	18	
	180	5.4	6		34
Cuenco disipador sin deflectores	50	3.2	1.4	8	14.5
	50	4	2.5		*
	75	3.6	1.6	11	18.5
	75	4.5	3.2		13
	180		1.5		*
	180	4	3	7	*
	180	4	3.4	16	30
	180	9.5	7.6		18

\* Mediciones no realizadas, solo observadas y descritas en el capítulo 4

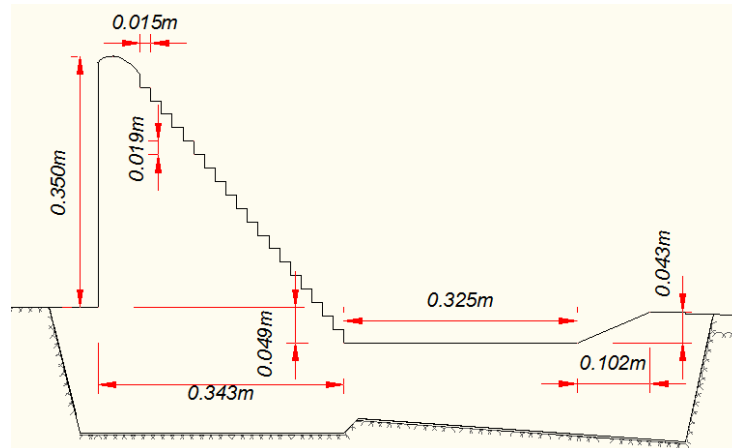
**Tabla 4.1 RESULTADO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA EL AZUD Y CUENCO DISIPADOR PARA EL PROYECTO HIDROSANBARTOLO**

En la Tabla 4.1 se realiza una descripción de los diferentes fenómenos observados durante la experimentación para cada ensayo con diferentes condiciones de flujo y diferentes estructuras de disipación de energía.

#### 4.2.5 Disipador escalonado

Otra alternativa implementada y dada por el diseño de la empresa encargada de la construcción de la Hidroeléctrica SAN BARTOLO consistió en la construcción de escalones en la rápida del azud y un cuenco al pie del mismo con un enrocado aguas abajo.

Las dimensiones del azud con escalones a escala 1:40 se muestran a continuación:



**Figura 4.6 Disipador escalonado escala 1:40**

Este diseño fue implementado para trabajar con caudales pequeños, teniéndose en cuenta que para caudales mayores a los  $50\text{m}^3/\text{s}$  la construcción de este tipo de azud no es viable. Para caudales mayores y de crecida se debe abrir las compuertas de la obra.



**Foto 4.42 Disipador escalonado**

Al experimentar en este azud se observó lo siguiente:

- Para caudales de  $18\text{m}^3/\text{s}$  y menores no se presentó un resalto claramente formado, el calado del agua en el cuenco fue de 2.5m.

- Para un caudal de  $27\text{m}^3/\text{s}$  se tuvo 3.6m de longitud de resalto y a medida que disminuía el caudal se presentaban menores longitudes del resalto, por lo tanto es requerido un menor tamaño de cuenco dissipador.

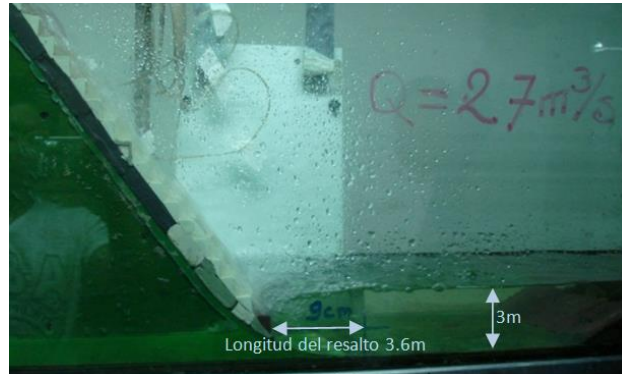


Foto 4.43 Disipador escalonado con  $Q=27\text{m}^3/\text{s}$

- Para caudal de  $42\text{m}^3/\text{s}$  mejoró el funcionamiento del azud, la disipación de energía se dio a partir del tercer escalón. Al pie del azud, la longitud del resalto fue de 6m el calado en el cuenco fue de 3m.



Foto 4.44 Disipador escalonado con  $Q=42\text{m}^3/\text{s}$

- Los primeros siete escalones del azud no trabajaban como es debido para el caudal de  $50\text{m}^3/\text{s}$  (ver Foto 4.45), el flujo no recorría el perfil de los gradas sino que éste se vertía linealmente siguiendo una sola pendiente como si no existieran escalones, la disipación comenzaba a partir del séptimo escalón. La longitud del resalto medida a partir del pie del azud fue de 8.5m. Se tuvo un calado del río  $y_3=1.6\text{m}$  medida sobre el enrocado.



**Foto 4.45 Disipador escalonado con  $Q=50\text{m}^3/\text{s}$**

- Como observación se experimentó para un caudal de  $100\text{m}^3/\text{s}$  (ver Foto 4.46), en donde se observó que los escalones no cumplían adecuadamente la disipación, no trabajaban sino hasta cuando el flujo llegó a los últimos escalones del azud. La longitud del resalto en este caso se dio en los 16m del cuenco.



**Foto 4.46 Azud escalonado con  $Q=100\text{m}^3/\text{s}$**

- Para el caudal de  $100\text{m}^3/\text{s}$  y sin escalones en el azud se tuvo el mismo comportamiento del flujo anterior. Se infiere que para caudales mayores la presencia de escalones no contribuye efectivamente a la disipación de energía, haciéndolos innecesarios.



**Foto 4.47 Azud sin escalones con  $Q=100\text{m}^3/\text{s}$**

- Con  $75\text{m}^3/\text{s}$  de caudal y sin escalones el resalto tuvo 11m de largo y la disipación es controlada dentro de la longitud del cuenco.

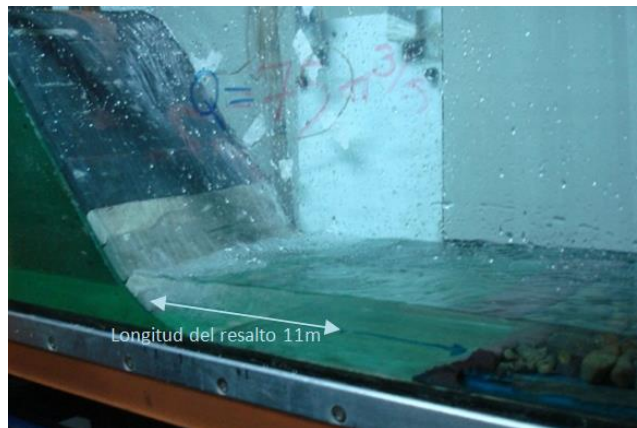


Foto 4.48 Azud sin escalones con  $Q=75\text{m}^3/\text{s}$

- Para el caudal de  $50\text{m}^3/\text{s}$  se observó que sin escalones el resalto formado requería de un cuenco de aproximadamente de 6m de longitud, se observó que el resalto fue controlado por el calado existente en el cuenco.

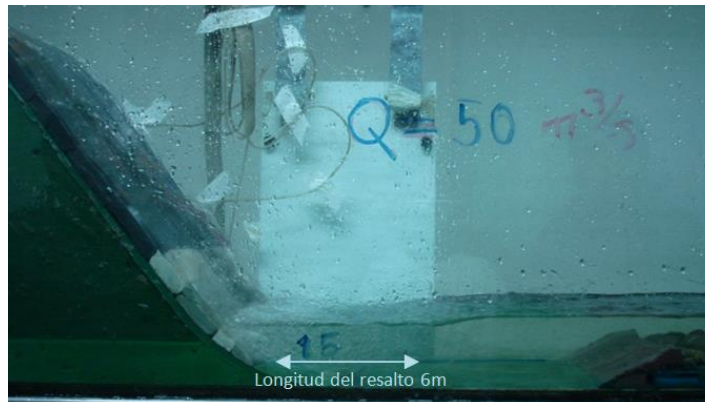


Foto 4.49 Azud sin escalones con  $Q=50\text{m}^3/\text{s}$



ENSAYOS EN AZUD	Q m <sup>3</sup> /s	y2 (m)	y3 (m)	Longitud resalto (m)	Observaciones	Prototipo											
						Valores teóricos						Valores medidos					
						F1	y2 (m)	Lr (m)	E1 (m)	E2 (m)	EFICIENCIA	F1	y2 (m)	Lr (m)	E1 (m)	E2 (m)	EFICIENCIA
Diseño original:	50	2.8	3	7.2	Con calados mayores a 2m el resalto se desplaza un poco río abajo, por consiguiente al existir ese desplazamiento se necesita de cuencos más largos.	14.22	2.903	19.555	15.181	2.943	81%	14.22	2.903	19.555	15.181	2.943	81%
	75	2.8	3	11		11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%	11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%
	180	1	1		menores a 2m el resalto se desliza considerablemente se necesita calados más altos para controlar este desplazamiento o construir cuencos profundizados.	7.8	5.524	35.377	16.319	5.667	65%	7.8	5.524	35.377	16.319	5.667	65%
	50	3.2	1.4	8	Los efectos del resalto para los caudales de 50m <sup>3</sup> /s y 75m <sup>3</sup> /s son efectivamente controlados en la longitud de disipación de 18m que tiene el cuenco.	14.22	2.903	19.555	15.181	2.943	81%	14.22	2.903	19.555	15.181	2.943	81%
Cuenco disipador sin dados disipadores	75	3.6	1.6	11		11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%	11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%
	75	4.5	3.2		Para el caudal de 180m <sup>3</sup> /s se requiere incrementar el tamaño del cuenco disipador; sobre todo para calados muy bajos (menores a 3m)	11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%	11.7	3.596	23.905	15.429	3.654	76%
	180	4	3.4	16		7.8	5.524	35.377	16.319	5.667	65%	7.8	5.524	35.377	16.319	5.667	65%
	50	3.5	3.5	6	Disipa adecuadamente la energía para caudales menores y un poco mayores a los 75m <sup>3</sup> /s	14.220	2.903	19.555	15.180	2.943	81%	14.220	2.903	19.555	15.180	2.943	81%
Disipador SAF sin cuenco	75	3	3	3.5	Para caudales grandes cercanos a los 180m <sup>3</sup> /s este disipador no funciona eficientemente, pues la longitud necesaria de disipación es similar a la que necesitamos cuando no tenemos estructuras de disipación.	11.700	3.596	23.905	15.428	3.654	76%	11.700	3.596	23.905	15.428	3.654	76%
	75	4.5	4.5	5.5	Se observa un cuenco pequeño para los caudales estudiados, la disipación se da dentro del cuenco extendiéndose sobre el enrocado, sin mayores efectos negativos sobre el mismo.	7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%	7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%
	180	3	3			7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%	7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%
	180	4				7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%	7.800	5.524	35.377	16.319	5.667	65%

Tabla 4.2 Resumen de resultados



## CAPÍTULO V

### 5 RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Para los casos de resaltos sumergidos, la disipación de la energía hidráulica es adecuadamente controlada por el calado del río, no se requieren en estos casos mayores estructuras de disipación o en su defecto se requiere de cuencos disipadores de menores tamaños. Para el estudio presente, para los caudales comprendidos entre los  $50\text{m}^3/\text{s}$  y  $180\text{m}^3/\text{s}$  las mejores condiciones para la efectiva disipación se dan cuando tenemos calados del río entre los 3m y 4m.

Cuando tenemos calados mayores a los 4m el trabajo de disipación es mayormente realizado por el calado del río. Y para calados menores a los 3m el resalto es rechazado, mientras menor es el calado, mayor es el desplazamiento del resalto hacia aguas abajo.

Al analizar el funcionamiento del **cuenco disipador sin deflectores**, el mismo que cuenta con un enrocado que está ubicado a 18 metros del azud se concluye que los efectos del resalto para los caudales de 50 y  $75\text{m}^3/\text{s}$  son efectivamente controlados en la longitud de disipación de 18m.

En tanto que para el caudal de  $180\text{m}^3/\text{s}$  se requiere incrementar el tamaño del cuenco disipador; sobre todo para calados muy bajos (menores a 3m) ya que el flujo procedente del azud baja a gran velocidad y choca directamente con el enrocado, desestabilizándolo, pudiendo provocar erosión y arrastre del material del mismo.

El **disipación tipo SAF sin cuenco**, disipa adecuadamente la energía para caudales menores a  $75\text{m}^3/\text{s}$ , pero para caudales grandes cercanos a los  $180\text{m}^3/\text{s}$  este disipador no funciona eficientemente pues la longitud necesaria de disipación es similar a la que necesitamos cuando no tenemos estructuras de disipación, razón por la cual el calado  $y_3$  es muy importante porque preside la aparición del resalto.

En el **disipador tipo SAF con cuenco**, se observa un cuenco pequeño para los caudales estudiados, la disipación se da dentro del cuenco extendiéndose sobre el enrocado, sin arrastre del material. Para el caudal máximo de  $180\text{m}^3/\text{s}$  y al tener grandes calados los dados no realizan un adecuado trabajo porque se hallan demasiado sumergidos, todo el trabajo de disipación es realizado por el calado del cuenco y del río.

La forma de la cresta del **azud escalonado**, tal como fuera concebido en la modificación al diseño, ocasiona que el flujo descargado por el mismo para un caudal



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

de  $50\text{m}^3/\text{s}$  no recorra efectivamente los primeros escalones resultando en una inadecuada disipación.

Para caudales menores a  $50\text{m}^3/\text{s}$  la disipación es producida en cada escalón y los resaltos al pie del azud son de menos de 10m de longitud.

El resalto hidráulico para este azud y para estos caudales se encontraba siempre dentro del cuenco.

De la experimentación se observó que para el azud escalonado, si se toma en consideración que se va a dejar pasar el mismo caudales iguales o menores a  $50\text{m}^3/\text{s}$  es posible reducir la longitud del cuenco hasta un 50% siendo 20 metros la longitud máxima necesaria.

La eficiencia en la disipación de la energía en todos los tipos de disipadores viene determinada por el calado aguas abajo. Sin embargo la implementación de disipadores reduce considerablemente la longitud del resalto y el volumen dentro del cual se desarrolla la turbulencia. Por lo tanto la eficiencia no proporciona datos relevantes para la selección del disipador idóneo.

En el cuadro siguiente se observa que la eficiencia alcanza su máximo de 89%, cuando tenemos el caudal de estudio correspondiente a  $50\text{ m}^3/\text{s}$  con calados de río menor e iguales a los 2m. Mientras que el valor mínimo de eficiencia corresponde al 41% y se presenta para caudales mayores a los  $75\text{m}^3/\text{s}$  y que a su vez presentan calados de río mayores a los 7.5m. Se puede decir que para los ensayos realizados un valor medio de eficiencia de disipación corresponde al 70%.



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

ENSAYOS EN AZUD	Q m <sup>3</sup> /s	y <sub>2</sub> (m)	y <sub>3</sub> (m)	Valores medidos (prototipo)	
				EFICIENCIA	V <sub>2</sub> (m/s)
Disipador SAF sin cuenco	50	1,5	1,5	89%	1,71
	50	3,5	3,5	77%	0,73
	50	5,5	5,5	64%	0,47
	50	7	7	54%	0,37
	75	2	2	86%	1,92
	75	3	3	80%	1,28
	75	4,5	4,5	71%	0,85
	75	6	6	61%	0,64
	75	7,5	7,5	51%	0,51
	180	3	3	79%	3,08
Disipador SAF con cuenco	180	5	5	68%	1,85
	180	6	6	62%	1,54
	180	3		79%	3,08
Diseño original: Sin estructuras de disipación	180	4		74%	2,31
	50	1,5	1,5	89%	1,71
	50	2,8	3	81%	0,92
	50	4	4	74%	0,64
	50	5	5	67%	0,51
	75		1,5		
	75	2,8	3	81%	1,37
	75	4	4,2	74%	0,96
	75	5,5	5,5	64%	0,70
	75	7,5	7,5	51%	0,51
	75	9	9	42%	0,43
	180	1	1	67%	9,23
	180	5,4	6	66%	1,71
Cuenco disipador sin deflectores	50	3,2	1,4	79%	2,10
	50	4	2,5	74%	0,80
	75	3,6	1,6	76%	0,64
	75	4,5	3,2	71%	1,07
	180		1,5		0,85
	180	4	3	74%	
	180	4	3,4	74%	2,31
	180	9,5	7,6	41%	2,31

Para el diseño original, se presenta la mayor velocidad de 9.23m/s la misma que se alcanza con el mayor caudal y el calado mas bajo experimentado de 1m aguas abajo, y su menor velocidad es de 0.43m/s. Para las restantes alternativas siempre y cuando se forma el resalto la velocidad del flujo es menor a 3.1m/s.

Para los ensayos el máximo valor máximo del número de Froude calculado para la experimentación fue de 14.22 y el para todos los casos el número de Froude no fue menor a 7 por lo que el resalto que se forma es estable ó fuerte, lo cual corresponde a una eficiencia mayor a 65 % en la disipación. Dado que el número de Froude para los ensayos no es mayor a 17 ni menor a 1.7 la alternativa de disipador tipo SAF resulta la adecuada para ser implementada en la fase de construcción de la obra.

CAUDALES	Prototipo
	Valores teóricos
	F1
50	14,220
75	11,700
180	7,800



## 5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda diseñar cuencos disipadores en combinación con dados disipadores tipo SAF, ya que presentan los mejores resultados: cuencos más cortos y velocidades más bajas.

Se recomienda que el cuenco sea revestido con concreto de buena calidad para prevenir los posibles daños causados por la erosión. No se pueden permitir irregularidades en el piso o en las paredes laterales del mismo.

Cabe anotar que los calados muy bajos o muy altos, no permiten un trabajo adecuado de los dados deflectores del disipador SAF ya que estos no están o se encuentran demasiado sumergidos, se recomienda tener calados entre los 3 y 4m para un funcionamiento óptimo.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos* (Primera., p. 560). México: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1982). *Hidráulica de los Canales Abiertos* (Primera., p. 633) México: Editorial Diana.
- French, R. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos* (Primera., p. 724) México: McGraw-Hill.
- Novak, P., Moffat, A. I. B., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (Segunda., p. 593). Colombia: McGraw-Hill.
- Pacheco, E. & Carrillo. V. (2012a). *Estudio en modelo hidráulico para la optimización del diseño de la obra de captación en el río Negro del Proyecto Hidroeléctrico San Bartolo. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador* (p. 33).
- Streeter, V., Wylie B. y Bedford, K. (2000). *Mecánica de Fluidos*, (Novena., p. 741) Colombia: McGraw-Hill.
- United States Department of the Interior Bureau of Reclamation (1955), *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, Engineering Monograph No. 25, A Water Resources Technical Publication.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

## 7 ANEXOS



7.1 ANEXO 1:

MEDIDO					TEÓRICO CON M=2.2		
DISTANCIA (cm)	CALADO (cm)	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (cm/s)	CAUDAL (l/s)	CAUDAL (l/s)	ERROR	
80	43	53.4	1.498	1.933	1.867	4%	
80	44.2	30.2	2.649	3.513	3.778	7%	
80	46.1	15.1	5.298	7.327	7.601	4%	
80	47.5	11.2	7.143	10.179	10.937	7%	
80	48	9.7	8.247	11.876	12.223	3%	

**Anexo 1 Resultados de la comprobación del coeficiente de descarga**





**7.2 ANEXO 2:**

H (cm)	y1.calc (cm)	y2.calc (cm)	y3.med (cm)	y2.med (cm)	y3.med (cm)	I <sub>r</sub> med (cm)	Medición de subpresiones			Observaciones
							# 5	# 6	# 7	

**Anexo 2 Formato para la toma de datos**