

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA:

INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

TEMA:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA
HIDRÁULICA AGUAS ABAJO DE LOS DESAGÜES ANEXOS A PRESAS PEQUEÑAS Y
MEDIANAS**

AUTOR:

PABLO ARTURO CHACHA VILLENA

TUTOR:

JORGE IVÁN CALERO HIDALGO

Quito, agosto del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo PABLO ARTURO CHACHA VILLENA con documento de identificación N° 171913456 9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA AGUAS ABAJO DE LOS DESAGÜES ANEXOS A PRESAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO CIVIL, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Pablo Arturo Chacha Villena
1719134569
Agosto del 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA AGUAS ABAJO DE LOS DESAGÜES ANEXOS A PRESAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS realizado por PABLO ARTURO CHACHA VILLENA, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Agosto del 2019



JORGE IVÁN CALERO HIDALGO
1800480434

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA AGUAS ABAJO DE LOS DESAGÜES ANEXOS A PRESAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS

CHACHA VILLENA PABLO ARTURO

*Carrera De Ingeniería Civil, Facultad De Ciencia Y Tecnología, Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
pchachav@est.ups.edu.ec*

Abstract— The theoretical research object of this work includes the technical-economic comparison of the alternatives with well or dissipation chamber and with the final wall of dissipation.

The technical component of the analysis corresponds to simulating the operation of the two alternative schemes, for different combinations of the fundamental variables of the problem; the economic component refers to determining the work volumes of the construction elements not common to the alternative schemes compared to identify the lowest cost in each proposed scenario.

Key words— dissipation, energy, sub critical, supercritical, well, wall.

Resumen— La investigación teórica objeto de este trabajo abarca la comparación técnico- económica de las alternativas con pozo o cámara de disipación y con muro final de disipación.

El componente técnico del análisis corresponde a simular la operación de los dos esquemas alternativos, para diferentes combinaciones de las variables fundamentales del problema; el componente económico se refiere a determinar los volúmenes de obra de los elementos constructivos no comunes a los esquemas alternativos comparados para identificar el de menor costo en cada escenario planteado.

Palabras clave— disipación, energía, subcrítico, supercrítico, pozo, muro.

I. INTRODUCCIÓN

La disipación de la energía hidráulica es el más importante proceso hidrodinámico en la operación de los sistemas hidráulicos fluviales que incluyen presa con vertido incorporado (presa vertedero). Su análisis constituye un componente fundamental de la factibilidad y diseño de los sistemas de derivación y su costo representa, con frecuencia, más del 30% del presupuesto total del sistema. El objetivo principal de las estructuras que forman parte del modo de disipación de energía aguas abajo de una presa vertedero es permitir un proceso de disipación seguro, confiable y de menor costo, precautelando la integridad del entorno constructivo y del cauce natural en el que está

implantado el sistema de derivación. En este contexto, el análisis de los procesos de disipación debe llevar a seleccionar la mejor. Por lo indicado, la investigación tanto teórica como en modelo físico de los procesos de disipación de energía, constituye tema actual.

A. Justificación

La optimización constructiva del tramo aguas abajo en el que tiene lugar la transición del flujo supercrítico a subcrítico y se produce la disipación de la energía cinética excedente del flujo, constituye el objetivo fundamental que se enfrenta en el diseño de las estructuras involucradas.

Al respecto se han desarrollado un sin número de investigaciones teóricas y en modelos físicos [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]; buena parte de estas investigaciones se basan en la propuesta de elementos disipadores de hormigón de diferente geometría; sin embargo, el problema fundamental en estos casos no radica propiamente en la eficiencia hidráulica o disipadora de la construcción sino en su resistencia a la erosión por cavitación, particularmente en casos de altas velocidades de flujo. En este ámbito la práctica evidencia que los disipadores más versátiles y seguros, al pie de las presas de hormigón con vertido incorporado, continúan siendo el pozo o cámara de disipación y el muro de disipación o su combinación.

Precisamente, el presente trabajo de investigación ha sido desarrollado con la finalidad de identificar criterios y relaciones paramétricas que permitan adoptar una de las dos alternativas, por razones técnico- económicas.

B. Objetivo general

Comparar dos alternativas de disipación de energía aguas abajo de una presa vertedero, con pozo de disipación y con muro de disipación y determinar los ámbitos en los que cada una de ellas es elegible por consideraciones técnicas y económicas.

II. MARCO TEÓRICO

La dispersión de la energía del flujo evacuado por una presa vertedero, en estructuras especiales de disipación se adopta aguas abajo de presas de diferente altura: aproximadamente en la mitad de

las de hormigón a gravedad y en el 20-25% de las presas de arco y de las de material del lugar. La práctica ha demostrado que la operación eficaz de estas construcciones se logra con el desarrollo en ellas del resalto hidráulico, lo que es posible cuando la profundidad del agua en la estructura de disipación corresponde a la segunda profundidad conjugada (h'') que tiene como primera conjugada a la profundidad contraída; esta profundidad puede ser determinada para esquemas planos con ayuda de la siguiente expresión:

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{hc}{h'} \right)^3} - 1 \right] = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right] \quad (1) [2].$$

Donde:

h' = Primera profundidad conjugada

v_1 y F_{r1} , velocidad media y número de Froude en dicha sección

$$(F_{r1} = \frac{v_1^2}{gh'}, v_1 = \frac{q}{h'})$$

hc = profundidad crítica

g = aceleración de la fuerza de gravedad.

q = Caudal unitario

Por lo general la profundidad en el cauce aguas abajo no es suficiente para la formación del resalto hidráulico al pie del aliviadero; en este caso, una profundidad igual a la segunda conjugada, o algo mayor, se logra con ayuda de diferentes estructuras de disipación. [9]

En los casos de enlace de tramos con régimen de fondo, aguas abajo de una presa con vertido incorporado, generalmente se adoptan las siguientes opciones de los esquemas o estructuras de disipación de la energía hidráulica:

- 1) Con profundización local del fondo del cauce, denominada pozo o cámara de disipación figura.1, donde el nivel de agua siempre es algo mayor que en el cauce (en la magnitud Z);
- 2) Con muro de disipación, antes del cual, sobre la losa de disipación, se establece la profundidad necesaria para el desarrollo del resalto hidráulico no desplazado o ligeramente sumergido (estructura de disipación con muro final, figura. 2)
- 3) Combinado con profundización local del fondo del cauce y con muro final (figura.3).
- 4) Con instalación sobre la losa de disipación o sobre el pozo de elementos disipadores, cuya reacción es suficiente para compensar la insuficiencia de la profundidad aguas abajo (figura.3).

A. Principales tipos de construcciones disipadoras

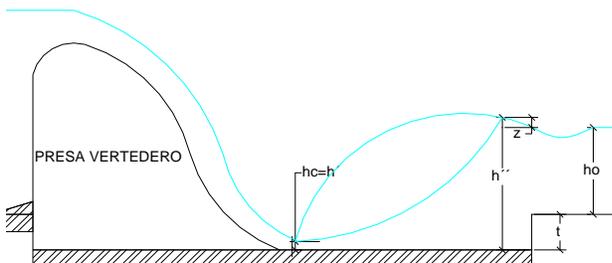


Figura. 1 Pozo o cámara de disipación; hc : profundidad contraída; t : profundidad del pozo. [10], [9], [11].

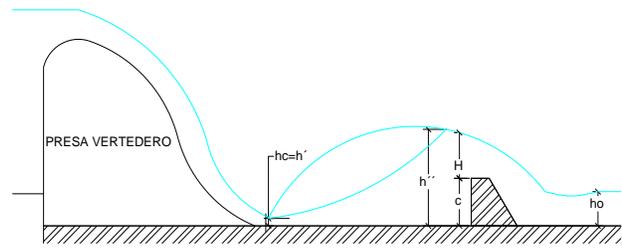


Figura. 2 Disipador con muro final. c : alto del muro final. [10], [9], [11].

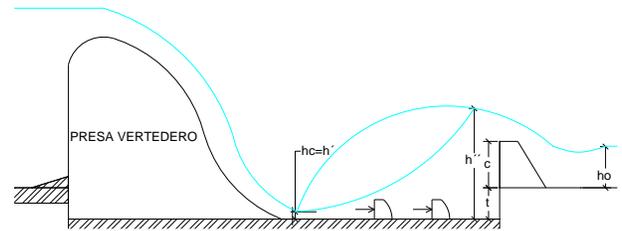


Figura. 3 Disipador combinado con otros elementos de disipación. [10], [9], [11].

En la gran mayoría de casos la losa de disipación, la construcción pos-resalto y la subsiguiente protección de piedra son implantadas bajo el nivel del fondo del cauce natural. En algunos casos la losa de disipación se ubica sobre el fondo del cauce y, por consiguiente, la profundidad de agua en el cauce natural no es utilizada para formar la profundidad h'' . [2], [9], [11].

La investigación objeto de este trabajo está referida a los dos primeros esquemas: figura.1 esquema con pozo o cámara de disipación; y figura.2 esquema con muro final que puede ser continuo o ranurado.

El esquema combinado que incluye pozo y muro de disipación en la práctica tiene el mismo grado de aplicación que los dos esquemas investigados y conjuntamente con ellos son las alternativas con bases teóricas desarrolladas con grado de detalle y profundidad, útiles para obtener diseños relativamente confiables. [2], [9], [11].

Respecto al esquema que incluye elementos de disipación local Figura. 3, cabe anotar lo siguiente:

1) La energía hidráulica aguas abajo de las presas se dispersa en la interacción del agua evacuada, tanto con el volumen de ella ubicada en el pozo o cámara de disipación, como también con la losa de disipación que, en consecuencia, son propiamente disipadores de dicha energía; por tanto, los otros elementos de disipación no podrían ser tales sin el volumen de agua que los rodea; sin embargo, con alguna frecuencia se les denomina precisamente disipadores.

2) La práctica evidencia que utilizar elementos disipadores dispersos puede ser recomendable en sistemas de carga baja. En caso de flujos con velocidades mayores a 15 m/s, es preciso proteger dichos elementos de la erosión por cavitación; en cambio, ubicarlos en zonas de velocidades relativamente no altas, substancialmente disminuye el efecto para el que son adoptados. En la actualidad, a pesar de la considerable cantidad de la geometría propuesta, para estos elementos, no se disponen de recomendaciones confiables para determinar su

reacción y para lograr condiciones de contacto con el agua, exentas de cavitación; por tanto, para justificar su adopción en proyectos de importancia son imprescindibles investigaciones específicas en modelos físicos. [9].

B. Marco teórico específico

1) Presa vertedero

Este tipo de presas aseguran la estabilidad al deslizamiento gracias a su propio peso, además que, por su peso y configuración eliminan la posibilidad de esfuerzos de tracción en su interior, son de amplia difusión particularmente en casos de presas pequeñas cimentadas sobre suelo.

Desde el punto de vista geológico y geotécnico las presas (contrafuertes o arco); sin embargo son más exigentes que las presas de materiales del lugar. [9].

Criterios de diseño para una presa vertedero

- 1) La estabilidad al deslizamiento, significa que el factor de seguridad al deslizamiento tanto para combinación básica como combinaciones especiales de fuerza no debe ser menor al correspondiente factor permisible.

$$F.S.D \geq F.S.D_{permisible}$$

Donde.

F.S.D= Factor de seguridad al deslizamiento

F.S.Dpermisible= Factor de seguridad permisible al deslizamiento que depende del nivel de importancia de la presa.

- 2) Ausencia de esfuerzos de tracción en el cuerpo de la presa, significa que el esfuerzo mínimo (σ_{MIN}) en cualquier punto no debe de ser negativo.

$$\sigma_{MIN} \geq 0$$

- 3) Resistencia del hormigón a la compresión esto significa que el esfuerzo máximo (σ_{MAX}) no debe ser mayor a la resistencia del hormigón y a la capacidad portante del macizo de cimentación.

$$\sigma_{MAX} \leq \sigma_{per}$$

- 4) El área del perfil triangular ω debe ser la mínima ($\omega = \omega_{min}$).

Las condiciones 1, 2 y 3 son técnicas, en tanto que la condición 4, es económica, la práctica de diseño evidencia que para presas pequeñas y medianas son suficientes las condiciones 1 y 2, el cumplimiento de estas condiciones también hace automático el cumplimiento de la condición 4. [9].

Metodología general para diseñar una presa de hormigón con vertedero incorporado, cimentado sobre suelo

- 1) Se determina el valor de la crecida máxima probable para un periodo de retorno misma que corresponde al nivel de importancia de la obra.

- 2) En concordancia con los estudios geológicos, geotécnicos y la evaluación geo-mecánica de la base de cimentación, se define el nivel de cimentación de la presa.

- 3) Para el suelo del nivel de cimentación determinado se define la velocidad máxima permisible del flujo uniforme.

- 4) Se adopta el caudal unitario “q” a partir de una evaluación técnico - económica en la que intervienen, por una parte, el costo de la presa y, por otra, el costo de la construcción de disipación.

- 5) Se decide si la presa incluirá o no compuertas, en el caso afirmativo se define el número de secciones, para lo cual se deberá tener en cuenta la siguiente información.

-Longitud máxima de vegetación arrastrada por el cauce durante las crecidas.

- Dimensiones de la compuerta disponibles en el mercado.

- 6) Con la ecuación de vertedero se determina la carga dinámica de diseño preliminar de un vertedero tipo Creager.

$$q = m * \epsilon * \sqrt{2g} * (Ho)^{3/2} \quad [12].$$

Donde:

q = Caudal unitario

m= Coeficiente de descarga

ϵ = Coeficiente de contracción

g = Coeficiente de aceleración gravitatoria

Ho = Carga dinámica

- 7) a partir de la carga de diseño obtenida se determina las coordenadas (abscisas, ordenadas) del perfil Creager-Ofsyron, y de esta manera se define el perfil hidráulico preliminar.

- 8) A partir del ángulo de fricción del suelo de cimentación y del factor de seguridad permisible al deslizamiento, conociendo la altura de la presa “h”, se determina el perfil teórico triangular.

- 9) Se sobrepone el perfil hidráulico preliminar y teórico triangular, para obtener un nuevo perfil que satisfaga condiciones hidráulicas, de estabilidad y resistencia.

- 10) Al perfil obtenido se agrega los elementos horizontales y verticales del contorno subterráneo que enlaza la presa con el suelo de cimentación, de esta manera se obtiene el perfil constructivo preliminar.

- 11) El vertedero de perfil práctico preliminar obtenido se somete a análisis con el fin de dimensionar la obra de disipación, este análisis con frecuencia requiere reubicar la cota de cimentación de la presa.

- 12) El perfil constructivo obtenido se somete a la verificación de estabilidad al deslizamiento y resistencia que incluye la condición de ausencia de esfuerzos de tracción.

- 13) En caso de que la estabilidad al deslizamiento no se cumpla; se requiere incrementar el volumen de la presa.
- 14) En el caso de que el análisis de resistencia no sea satisfactorio será necesario incrementar el ancho de perfil transversal de la presa o la superficie de contacto de la estructura con el suelo de cimentación y ó modificar la configuración de contorno subterráneo.

Verificación de la estabilidad al deslizamiento de la presa vertedero.

Una vez definido el perfil teórico preliminar, se requiere obtener el perfil teórico constructivo, para lo cual se deberá tomar en cuenta la siguiente condición hidráulica, el ancho de la cresta debe trabajar como pared delgada para esto debe estar en rango de (0.5 - 2 Ho). [3]. Finalmente debe ser sometido a análisis de estabilidad al deslizamiento y cumplimiento de resistencia para lo cual es necesario tomar en cuenta todas las fuerzas que actúan, en nuestro caso se utilizaran las fuerzas actuantes en un escenario de condición básica, para simplificaciones análisis se utiliza el perfil constructivo, más en la etapa de diseño definitivo se deberá analizar el perfil hidráulico tipo Creager obtenido. [9].

Fuerzas que actúan sobre una presa vertedero para combinación básica.

- 1) Fuerzas de horizontales:

Fuerza de presión hidrostática aguas arriba (PH1)

Fuerza de presión hidrostática aguas abajo (PH2)

Fuerza de presión de sedimentos (Ps)

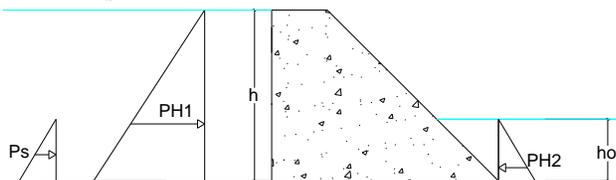


Figura. 4 Esquema fuerzas horizontales que actúan sobre una presa vertedero. [3].

- 2) Fuerzas de verticales:

Fuerzas de gravedad (G1, G2)

Fuerza de presión hidrostática vertical aguas abajo (PHV)

Fuerza de sub-presión (W1, W2)

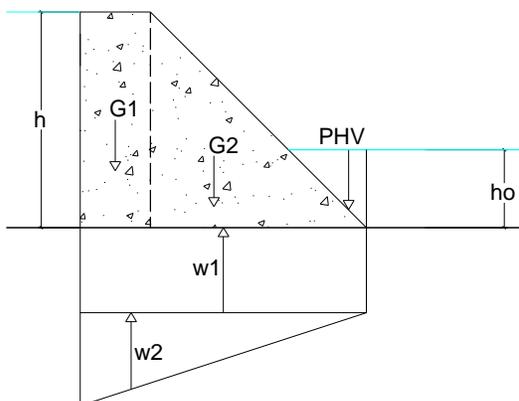


Figura. 5 Esquema fuerzas verticales que actúan sobre una presa vertedero. [3].

La verificación al deslizamiento se la realiza en base al factor de seguridad al deslizamiento y a través de la ecuación:

$$F.S.D \geq F.S.D_{\text{permisible}}$$

$$F.S.D = \frac{\sum_{i=1}^n N * f + C * B}{\sum_{i=0}^n T} \quad [3].$$

Donde:

F.S.D= Factor de seguridad al deslizamiento

N= fuerzas verticales

f= $\text{tg}(\phi)$

C= cohesión del suelo de cimentación

B= ancho de la base la presa

T= fuerzas horizontales

Verificación de las resistencias de una presa vertedero

Como se ha dicho anteriormente esta verificación involucra dos aspectos:

1. Verificación de ausencia de esfuerzos de tracción.
2. Verificación que el esfuerzo máximo de compresión no supere el esfuerzo permisible del hormigón del que está construido la presa.

La primera verificación se lo hace considerando el esfuerzo principal (σ_{min}) al pie del paramento aguas arriba

La segunda verificación se lo realiza con el esfuerzo principal (σ_{max}) al pie del paramento aguas abajo.

$$\sigma_{max} = \frac{N}{b} \left(1 + \frac{6 * e}{b}\right) \quad [3].$$

$$\sigma_{min} = \frac{N}{b} \left(1 - \frac{6 * e}{b}\right) \quad [3].$$

Donde:

σ_{min} =Esfuerzo máximo

σ_{max} =Esfuerzo mínimo

$$e = \text{excentricidad} = \frac{\sum_{i=1}^n M}{\sum_{i=1}^n N} \quad [3].$$

$\sum_{i=1}^n M$ = sumatoria de momentos con respecto al centro de la base de la presa vertedero

$\sum_{i=1}^n N$ =Sumatoria de fuerzas verticales

b= ancho de la presa vertedero

Si el $\sigma_{min} \geq 0$; la presa vertedero cumple con la verificación de resistencia.

Si el $\sigma_{max} \leq \sigma_{\text{permisible}}$; la presa vertedero cumple con la verificación de resistencia

$$\sigma_{\text{permisible}} = \frac{\text{resistencia a la compresion del hormigon}}{F.S_{\text{res}}} \quad [3].$$

F.S_{res} = Factor de seguridad de resistencia a la compresion

Para el caso de presa con nivel importancia III, con una combinación básica tenemos:

$$F.S_{\text{res}} = 2.1 \quad [9].$$

2) Pozo o cámara de disipación

Es el tipo de estructura hidráulica mayormente utilizado para disipar la energía, evitando el desplazamiento del resalto hidráulico

que transforma el flujo supercrítico aguas abajo del vertedero en un flujo subcrítico compatible con el régimen aguas abajo del río [1].

El dimensionamiento del pozo de disipación se realiza por un proceso iterativo en el cual intervienen los siguientes parámetros:

- h_c : profundidad contraída al pie de la presa, variable como función de la profundidad del pozo que es la incógnita iterada;
- q : caudal unitario a través de la presa;
- t : profundidad del pozo, es la variable iterada;
- E_o : Energía específica total del flujo aguas arriba de la presa, en relación al fondo del pozo, es variable que depende de la profundidad del pozo;
- h'' : segunda profundidad conjugada del resalto en el pozo de disipación;
- h_{cr} : profundidad crítica en el pozo de disipación;
- h_o : profundidad normal en el pozo de disipación;
- ϕ : coeficiente de velocidad en el perfil de la presa vertedero, depende de su altura; para presas pequeñas $\phi=0,95$. [13].

El proceso de iteración de la profundidad de flujo se realiza con las ecuaciones A, B, C, ver Figura. 6

$$E_o = H + \frac{v_o^2}{2g} + C_2 + t \quad (A) \quad [10], [11].$$

$$E_o = h_c + \frac{q^2}{2g\phi^2 h_c^2} \quad (B) \quad [10], [11].$$

$$h'' = 0,5h_c \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{cr}}{h_c} \right)^3} - 1 \right] \quad (C) \quad [10], [11].$$

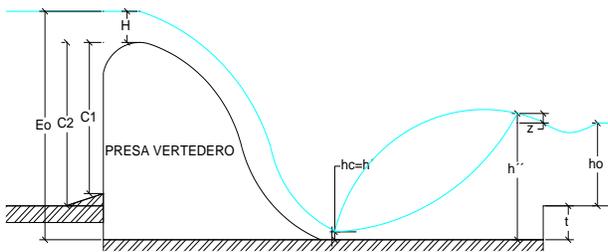


Figura. 6 Pozo o cámara de disipación; h_c : profundidad contraída; t : profundidad del pozo o cámara. [10], [9], [11].

Una vez conocida la profundidad del pozo se determina su longitud, a través de la longitud del resalto:

$$L_R = 2,5(1,9h'' - h') \quad [10].$$

$$L_R = 5(h'' - h') \quad [10].$$

$$L_R = 4,5h'' \quad [10].$$

3) Disipador con muro final

Es una alternativa también de uso frecuente para disipar la energía hidráulica, cuyo objetivo es lograr la profundidad necesaria aguas abajo de la presa para que el resalto sea sumergido, con ayuda de un muro transversal ubicado al final del resalto hidráulico que tiene como

primera profundidad conjugada a la profundidad contraída. Cumple las funciones de elemento de retención y de vertedero (generalmente de perfil práctico rectangular) [4].

A diferencia del pozo de disipación que se dimensiona por iteraciones, en este caso el alto del muro "c" se determina directamente, a partir de la segunda profundidad conjugada:

$$c = h'' - H$$

La carga geométrica H es:

$$H = H_o - \frac{v_o^2}{2g} \quad [11].$$

La carga total del muro vertedero es:

$$H_o = \left(\frac{q}{m \cdot \epsilon \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3} \quad [11].$$

Donde:

q = caudal unitario

m = coeficiente de descarga = 0.43 (para vertedero de perfil práctico rectangular). [13].

ϵ = coeficiente de contracción lateral

g = aceleración de la fuerza de gravedad

La velocidad de acercamiento v_o es:

$$v_o = \frac{q}{h'} \quad [10].$$

A continuación, se verifica el resalto hidráulico aguas abajo del muro de disipación; en caso de ser desplazado se requiere un segundo muro, pudiendo a continuación requerirse un siguiente muro. En teoría la alternativa con muro de disipación puede requerir varios muros.

C. Metodología

Premisas de la investigación

Las presas con vertido incorporado que operan en los sistemas de derivación a más de la función de retención cumplen la de aliviadero de excedentes, puesto que a través de su perfil se evacuan los volúmenes de las crecidas que con diferente probabilidad de ocurrencia se forman periódicamente en el sitio de derivación hasta el límite de la crecida de diseño. [2], [3], [9].

En los casos de cauces estables, sus características físicas y morfológicas configuradas en el transcurso de los años permiten el tránsito de las crecidas periódicas sin que se vea afectada su integridad. Este supuesto es válido también para los cauces donde han sido implantadas estructuras de disipación, siempre que el diseño de éstas no modifique negativamente las condiciones hidrodinámicas en el cauce natural, particularmente en el tramo pos- resalto. [2], [3], [9].

Como información fundamental necesitamos las características mecánicas básicas de tipo de suelo a cimentarse la presa, debido a que el comportamiento mecánico de los suelos es muy importante para mejorar y optimizar los costos de cimentación. [14].

El escenario menos favorable para disipar la energía hidráulica al pie de una presa vertedero cimentada en suelo será aquel que corresponda a la situación cuando la velocidad media de flujo de la crecida de diseño sea la máxima permisible para el material del cauce, puesto que, en este caso, la profundidad de flujo será la mínima posible y, por consiguiente, las condiciones de disipación de la energía en el resalto hidráulico serán las más adversas; en consecuencia, a este escenario se lo puede considerar crítico y, por consiguiente, de diseño. [9].

La investigación se refiere a presas de hormigón cimentadas en suelo y que, por tanto, difícilmente superan la altura de 30 metros.

Los caudales unitarios superiores a $50 \text{ m}^3/\text{s.m}$, generalmente corresponden a presas de mediana y gran altura, cimentadas en roca.

El análisis corresponde al modelo plano y, por consiguiente, se considera un metro de longitud de las estructuras (perpendicular a la dirección del flujo).

El estudio se ha cumplido para presas sin compuertas.

D. Metodología para el análisis y la comparación de los esquemas alternativos de disipación de energía.

1) Variables principales del problema.

Las variables utilizadas para configurar los escenarios de análisis de cada uno de los esquemas alternativos fueron:

El caudal unitario, q , con un dominio entre $10 \text{ m}^3/\text{s.m}$ y $45 \text{ m}^3/\text{s.m}$.

Altura de la presa h , con un dominio entre 5 m y 30 m.

Velocidad media de flujo en el cauce natural, con un dominio entre 1 m/s y 4 m/s.

Se ha realizado la simulación de la disipación de la energía hidráulica, aguas debajo de una presa vertedero con los métodos convencionales de mayor aplicación práctica, consignando diferentes valores de las principales variables identificadas, para el efecto se estructura una hoja de cálculo en el programa Excel.

2) Parámetros requeridos.

Pozo de disipación.

Con ayuda de las ecuaciones formuladas en el marco teórico específico se determinan los siguientes parámetros, que aseguren un resalto hidráulico no desplazado y la estabilidad de la losa de disipación:

Profundidad contraída y primera conjugada $h_c = h'$;
Segunda profundidad conjugada h'' ;
Velocidad media en la sección contraída, v_c ;
Altura del resalto a ;
Energía del resalto E_R ;
Longitud del resalto L_R ;
Profundidad del pozo, t ;
Longitud del pozo, L_P ;
Volumen de excavación bajo la losa de disipación V/m ;
Volumen adicional de excavación bajo la presa vertedero ΔV_P ;

Volúmenes y costos referenciales no comunes

Muro de disipación.

Con ayuda de las ecuaciones formuladas en el marco teórico específico se determinan los siguientes parámetros, que aseguren un resalto hidráulico no desplazado y la estabilidad de la losa de disipación:

Profundidad contraída y primera conjugada $h_c = h'$;
Segunda profundidad conjugada h'' ;
Velocidad media en la sección contraída, v_c ;
Altura del resalto a ;
Energía del resalto E_R ;
Longitud del resalto L_R ;
Altura del muro de disipación, c ;
Distancia desde la sección contraída hasta el muro de disipación L_m ;
Volúmenes y costos referenciales no comunes

Procedimiento

Las variantes consideradas se han estructurado como se detalla en los siguientes puntos.

Para cada uno de los dos esquemas alternativos se ha analizado el proceso de disipación para un grupo caudales unitarios “ q ” dentro de un rango de variación compatible con presas vertedero cimentadas en suelo.

Para cada caudal unitario se han considerado varias alturas de presa “ h ” dentro de un rango de 5 metros a 30 metros de altura, frecuente para cimentaciones en suelo.

Para cada caudal unitario se ha considera un modelo de presa vertedero que cumpla con las condiciones de estabilidad y resistencia mecánica.

Se ha asumido que son comunes a las alternativas los costos de los elementos constructivos que aseguran la resistencia a la filtración del suelo de cimentación y, por consiguiente, no han sido considerados en el análisis comparativo.

Para cada combinación “ $q - h$ ” se han considerado varias velocidades medias de flujo “ v ”, dentro del rango de 1 m/s a 4 m/s, que involucra prácticamente las velocidades máximas permisibles de todos los tipos posibles de suelos que teóricamente pueden construir el macizo de cimentación.

En cada variante la profundidad contraída al pie de la presa se ha determinado a partir de la energía específica total, aguas arriba de la presa E , constituida por la suma de la altura de la presa, la carga del vertedero tipo Creager para evacuar el caudal unitario dado y la carga de la velocidad de acercamiento.

En cada variante la profundidad en el cauce ha sido determinada a partir de los valores dados del caudal unitario y de la velocidad media.

En cada variante el caudal unitario se ha incrementado, dentro del rango establecido, hasta que se produzca la sumersión del resalto, en caso de que esta situación haya tenido lugar.

III. RESULTADOS

De conformidad con las premisas establecidas anteriormente, las velocidades máximas permisibles consideradas en las diferentes combinaciones, razonablemente configuran el escenario de diseño y, por consiguiente, los resultados obtenidos permiten formular criterios para la adopción de una de las dos alternativas de disipación para las diferentes combinaciones del caudal unitario y la altura de presa, como se desprende del siguiente análisis:

- 1) Para presas de hasta $h=10$ metros de altura, con caudales unitarios de $5 \text{ m}^3/\text{s.m}$ hasta $20 \text{ m}^3/\text{s.m}$ y con velocidades máximas permisibles correspondiente a suelos aluviales de la Tabla I, es más económica la alternativa pozo o cámara de disipación como se desprende de las Tablas 6, 7, 8, 10, 11, 12,13.
- 2) Para presas de $h=5$ metros hasta 30 metros, con caudales unitarios mayores al límite superior indicado en la tabla 2 y con velocidades máximas permisibles correspondiente a suelos aluviales de la tabla 9, no se necesita obra de disipación, debido a que sobre este valor de caudal unitario el resalto es sumergido, y solo es necesario analizar losa de disipación.
- 3) En presas con altura de $h= 5$ metros hasta $h= 30$ metros, con caudales unitarios variables entre los límites indicados en la tabla 3, para las velocidades máximas permisibles dadas para suelos tipo aluvial indicados en la tabla 9, es más económico la alternativa de muro final, como se indica en las tablas 6,7,8,10,11,12,13,14.

TABLA I

VELOCIDADES MÁXIMAS PERMISIBLES PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELOS ALUVIALES DADOS PARA ALTURAS HASTA $H=10 \text{ M}$.

Velocidad máxima permisible (m/s)	Tipo de suelo aluvial
1,7	Limo con arena
1,6	Arcilla con arena
1,53	Arena gruesa con mezcla de grava y arena media con arcilla
1,5	Arena media con mezcla de arena gruesa y arena fina con arcilla
1,83	Grava con piedra y arena
1,5	Grava fina con mezcla de grava media
1,53	Grava media con arena y grava gruesa

TABLA II

LÍMITE DE CAUDALES UNITARIOS MÁXIMOS, DONDE EL RESALTO SE SUMERGE.

Altura de presa h (m)	Límite superior de caudal unitario $\text{m}^3/\text{s.m}$	Velocidades máximas permisibles dadas, para un tipo de suelo aluvial tipo
5	15	A,B,C,D,E,F,G,H
10	20	A,B,C,D,E,F,G,H
15	25	A,C,D,F
	30	B,E,G,H
20	23	E
	30	A,B,C,F,G,H
	35	D
25	24	E
	35	A,B,C,D,F,G,H
	30	B
30	35	D,F
	40	A,C,G,H
	45	E

TABLA III

ALTURA DE PRESA CON RANGOS DE CAUDALES, DONDE ES MÁS ECONÓMICO LA ALTERNATIVA MURO FINAL.

Altura de presa h (m)	Límite inferior de caudal unitario $\text{m}^3/\text{s.m}$	Límite superior de caudal unitario $\text{m}^3/\text{s.m}$	Velocidades máximas permisibles dadas, para un tipo de suelo aluvial tipo
15	5	12	D,E,F,G
	5	13	C
	5	15	A,B
	5	17	H
20	5	12	G,E
	5	15	A,B,D
	5	16	C,F
	5	17	H
25	5	13	C
	5	15	B
	5	22	E,G
	5	23	A
	5	25	H
	5	23	D,F
30	5	24	C
	5	26	B
	5	27	A
	5	32	E
5	40	H	

- 4) En presas con altura de $h= 5$ metros hasta $h= 30$ metros, con caudales unitarios variables entre los límites indicados en la tabla 4, para las velocidades máximas permisibles dadas para suelos tipo aluvial indicados en la tabla 9, es más económico la alternativa de pozo o cámara de disipación, como se desprende en las tablas 6,7,8,10,11,12,13,14.

TABLA IV

ALTURA DE PRESA CON RANGOS DE CAUDALES, DONDE ES MÁS ECONÓMICO LA ALTERNATIVA POZO O CÁMARA DE DISIPACIÓN.

Altura de presa h (m)	Límite inferior de caudal unitario m ³ /s.m	Límite superior de caudal unitario m ³ /s.m	Velocidades máximas permisibles dadas, para un tipo de suelo aluvial tipo
15	12	25	D,F
	13	25	C
	14	30	E,G
	15	25	A
	15	30	B
	17	30	H
20	17	23	E
	18	30	D,F
	19	30	C
	20	30	A,B
	23	30	G
	25	30	H
25	20	35	F
	22	35	G
	23	25	B
	23	35	B,C,D
	25	35	H
	23	35	F
30	25	35	D
	26	40	C
	27	40	A,G
	28	30	B
	32	45	E

TABLA V

RANGOS DE TRANSICIÓN ENTRE POZO Y MURO DE DISIPACIÓN, PARA DIFERENTES ALTURAS DE PRESA.

Altura de presa h (m)	Límite inferior de caudal unitario m ³ /s.m	Límite superior de caudal unitario m ³ /s.m	Velocidades máximas permisibles dadas, para un tipo de suelo aluvial tipo
15	12	14	E,G
	15	20	A,B
20	15	18	D
	16	19	C
	16	18	F
	18	23	G
25	20	23	D
	21	23	C
	22	23	B
30	23	25	D
	24	26	C
	26	28	B

TABLA VI

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.7 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO LIMO CON ARENA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 15	Muros de disipación
	15 a 25	Pozo de disipación
20	5 a 15	Muros de disipación
	15 a 20	Pozo de disipación o Muro de disipación
	20 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 23	Muros de disipación
	23 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 27	Muros de disipación
	27 a 40	Pozo de disipación

- 5) En presas con altura desde h=15 metros hasta una altura de h=30 metros, existe un rango de transición entre los caudales máximos señalados en la tabla 3 y caudales mínimos señalados en la tabla 4, en este rango y dentro de los límites señalados en la tabla 5, la variación económica entre las alternativas con pozo y con muro, es relativamente pequeña en consecuencia, la decisión final respecto a la mejor alternativa dependerá de un análisis más detallado con modelos físicos, lo se desprende en el análisis de las tablas 6, 7, 8, 10, 11, 12,13.

TABLA VII

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.6 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO ARCILLA CON ARENA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 15	Muros de disipación
	15 a 30	Pozo de disipación
20	5 a 15	Muros de disipación
	15 a 20	Pozo de disipación o Muro de disipación
	20 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 22	Muros de disipación
	22 a 23	Pozo de disipación o Muro de disipación
	23 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 26	Muros de disipación
	26 a 28	Pozo de disipación o Muro de disipación
	28 a 30	Pozo de disipación

TABLA VIII

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.53 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO ARENA GRUESA CON MEZCLA DE GRAVA Y ARENA MEDIA CON ARCILLA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 13	Muros de disipación
	13 a 25	Pozo de disipación
20	5 a 16	Muros de disipación
	16 a 19	Pozo de disipación o Muro de disipación
	19 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 21	Muros de disipación
	21 a 23	Pozo de disipación o Muro de disipación
	23 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 24	Muros de disipación
	24 a 26	Pozo de disipación o Muro de disipación
	26 a 40	Pozo de disipación

TABLA IX

VELOCIDADES MÁXIMAS PERMISIBLES PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELOS ALUVIALES DADOS PARA H= 5 M HASTA H= 30 M.

Designación	Velocidad máxima permisible (m/s)	Tipo de suelo aluvial
A	1,7	Limo con arena
B	1,6	Arcilla con arena
C	1,53	Arena gruesa con mezcla de grava y arena media con arcilla
D	1,5	Arena media con mezcla de arena gruesa y arena fina con arcilla
E	1,83	Grava con piedra y arena
F	1,5	Grava fina con mezcla de grava media
G	1,53	Grava media con arena y grava gruesa
H	2,3	Piedra grande con mezcla de grava

TABLA X

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.5 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO ARENA MEDIA CON MEZCLA DE ARENA GRUESA Y ARENA FINA CON ARCILLA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 12	Muros de disipación
	12 a 25	Pozo de disipación
20	5 a 15	Muros de disipación
	15 a 18	Pozo de disipación o Muro de disipación
	18 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 20	Muros de disipación
	20 a 23	Pozo de disipación o Muro de disipación
	23 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 23	Muros de disipación
	23 a 25	Pozo de disipación o Muro de disipación
	25 a 35	Pozo de disipación

TABLA XI

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.83 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO GRAVA CON PIEDRA Y ARENA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 12	Muros de disipación
	12 a 14	Pozo de disipación o Muro de disipación
20	14 a 30	Pozo de disipación
	5 a 17	Muros de disipación
25	17 a 23	Pozo de disipación o Muro de disipación
	5 a 22	Muros de disipación
	22 a 24	Pozo de disipación o Muro de disipación
30	5 a 32	Muros de disipación
	32 a 45	Pozo de disipación

TABLA XII

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.5 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO GRAVA FINA CON MEZCLA DE GRAVA MEDIA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 12	Muros de disipación
	12 a 25	Pozo de disipación
20	5 a 16	Muros de disipación
	16 a 18	Pozo de disipación o Muro de disipación
	18 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 20	Muros de disipación
	20 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 23	Muros de disipación
	23 a 35	Pozo de disipación

TABLA XIII

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 1.53 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO GRAVA MEDIA CON ARENA Y GRAVA GRUESA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) l/s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	
15	5 a 12	Muros de disipación
	12 a 14	Pozo de disipación o Muro de disipación
20	14 a 30	Pozo de disipación
	5 a 18	Muros de disipación
	18 a 23	Pozo de disipación o Muro de disipación
25	23 a 30	Pozo de disipación
	5 a 22	Muros de disipación
30	22 a 35	Pozo de disipación
	5 a 27	Muros de disipación
	27 a 40	Pozo de disipación

TABLA XIV

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 2.3 M/S, CORRESPONDIENTE A UN SUELO ALUVIAL TIPO PIEDRA GRANDE CON MEZCLA DE GRAVA.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) l/s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 12	Muros de disipación
	12 a 20	Pozo de disipación
15	5 a 17	Muros de disipación
	17 a 30	Pozo de disipación
20	5 a 25	Muros de disipación
	25 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 25	Muros de disipación
	25 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 40	Muros de disipación

- 6) Cuando existen velocidades mayores a 2.3 m/s en presas vertedero que varían de h=5 metros hasta h=30 metros la alternativa óptima económicamente es pozo o cámara disipación, debido a que para la alternativa muro de disipación, el número de muros necesario para que el resalto sea sumergido es mayor a 2-3, lo que resulta económicamente inviable. así se evidencia en la tabla 15, a su vez la alternativa planteada no deja de ser una alternativa costosa, debido a que, con el aumento de la velocidad, se produce un incremento en la profundidad del pozo o cámara de disipación, como se en la figura 7 y figura 8 respectivamente.

TABLA XV

RESULTADOS DE TIPO DE OBRA ÓPTIMA PARA VMAX 3-4 M/S

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) l/s/m	Tipo de disipador
5	5 a 15	Pozo de disipación
10	5 a 20	Pozo de disipación
15	5 a 25	Pozo de disipación
20	5 a 30	Pozo de disipación
25	5 a 35	Pozo de disipación
30	5 a 40	Pozo de disipación

- 7) Para velocidades > 2.3 m/s y ≤ 4 m/s el resalto es sumergido para los valores superiores a los indicados en la tabla 16, mismos que se ven reflejados en las figuras 7 y figura 8, como se ha dicho anteriormente para valores superiores a estos, solo será necesario analizar la losa de disipación.

TABLA XVI

VALORES LÍMITES PARA VELOCIDADES 3- 4 M/S, DONDE EL RESALTO ES DESPLAZADO.

Altura de la presa (m)	Caudal unitario (q) m ³ /s/m
5	15
10	20
15	25
20	30
25	35
30	40

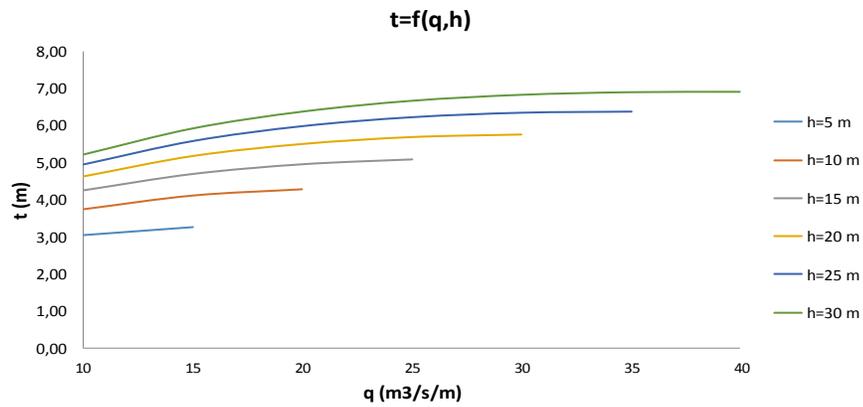


Figura. 7 Incremento de profundidad de pozo de disipación en función de caudal unitario y altura de presa vertedero con velocidad de 3 m/s.

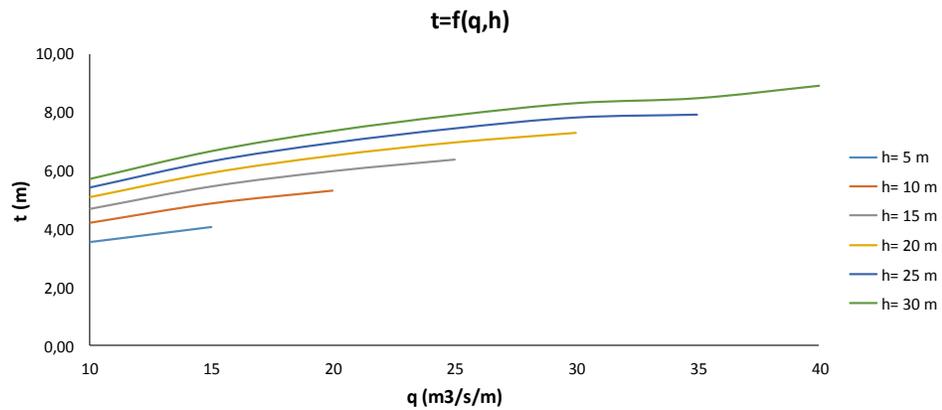


Figura. 8 Incremento de profundidad de pozo de disipación en función de caudal unitario y altura de presa vertedero con velocidad de 4 m/s.

IV. CONCLUSIONES

1. En las variantes con pozo o cámara de disipación profunda, se producen incrementos importantes de los volúmenes de excavación para la presa, del hormigón de la presa lo que a más de encarecer el costo desmejora las condiciones estabilidad y resistencia la presa y del suelo de cimentación.
2. Cuando el caudal aumenta en presas vertedero de baja altura el resalto es sumergido por lo cual es necesario analizar solamente losa de disipación y de esta forma evitar que se erosione el fondo del cauce, esto quiere decir que no es necesario una obra de disipación de energía.
3. En las variantes con la profundidad aguas abajo pequeña, resulta necesario el pozo de disipación.
4. En los casos donde se presentan velocidades bajas con presas a partir de $h=15$ metros hasta $h=30$ metros y con caudales unitarios bajos la alternativa económicamente viable es muro de disipación, mientras que si el caudal aumenta la alternativa más económica es pozo o cámara de disipación.
5. Para caudales unitarios de hasta $q=20$ $m^3/s.m$ y altura de presa de hasta $h=15$ metros es más económico el esquema con pozo o cámara de disipación.
6. Dados el caudal unitario y la altura de presa, el costo de disipación en los dos esquemas alternativos aumenta con el incremento de la velocidad media de flujo en el cauce; esto significa que en los tramos del cauce con mayor pendiente el costo de disipación de un proyecto dado es más alto.
7. En las variantes donde no resulta evidente la mejor alternativa, se requiere un análisis técnico-económico específico y, en algunos casos, la investigación en modelo físico.

RECONOCIMIENTOS

A dios por ayudarme a en cada momento de vida, a mis padres por darme la vida, a mi esposa Mercy por estar junto a mí en las buenas y las malas, y principalmente a mis hijos que con su presencia alegran todos los días de mi vida.

Un agradeciendo especial a mi tutor Ing. Iván Calero Hidalgo.

REFERENCIAS

- [1] S. C. Villamarin Paredes, Manual Básico De Diseño De Estructuras De Disipación De Energía Hidráulica, Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército, 2013.
- [2] V. T. Chow, Hidráulica De Canales Abiertos, Santa Fe de Bogota: McGraw-Hill, 1994.
- [3] E. Martínez Marín, P. Batanero Akerman, I. Martínez Gonzáles, E. Martínez Olmos y E. Gonzáles Ordóñez, BUREAU OF

RECLAMATION , DISEÑO DE PEQUEÑAS PRESAS, Madrid: Bellisco Ediciones Tecnicas y Cientificas, 2007.

- [4] E. Naudascher, Hidráulica De Canales, México: Limusa, 2001.
- [5] P. Novak, A. Moffat, C. Nalluri y R. Narayanan, Estructuras Hidráulicas, Bogota: Mc-Graw-Hill Interamericana S.A., 2001.
- [6] B. F. Ortega Novillo, Análisis experimental para la optimización de la disipación de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto hidroeléctrico sopladora, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [7] P. A. Paredes Santamaría, Modelo físico de la disipación de energía en la captación pilotón, proyecto hidroeléctrico toachi pilotón, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [8] D. Fernández Reynoso, M. Martínez Menes, H. García Martínez , A. Medina Martínez y R. Salas Martínez, «Disipadores de Energía.» Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación, Mexico.
- [9] J. I. Calero Hidalgo, Construcciones Hidráulicas, Quito: Abya- Yala, 2018.
- [10] P. Kiselev, Manual de Cálculos Hidráulicos, Moscú: Energia, 1984.
- [11] R. Chgaev, Estructuras Hidráulicas, Moscú: Energia, 1992.
- [12] F. S. Merrit, Manual del Ingeniero Civil, México: McGraw-Hill de México, S. A., 1985.
- [13] R. O. Flores, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Bogotá: Ediciones de la U, 2002.
- [14] T. DRANICHNIKOV DRANICHNIKOVA, «Nuevas Tendencias en la Mecánica de Suelos,» *INGENIUS*, vol. 1, nº 3, pp. 28-33, 2008.