



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

INVESTIGACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA DEL SEGUNDO ALIVIADERO DE EXCEDENCIA-PRESA SABANA YEGUA

Roger Paredes-Salazar

Piura, diciembre de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Paredes, R. (2014). *Investigación de la disipación de energía del segundo aliviadero de excedencia-Presa Sabana Yegua*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERIA



“INVESTIGACION DE LA DISIPACION DE ENERGIA DEL SEGUNDO
ALIVIADERO DE EXCEDENCIA - PRESA SABANA YEGUA”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Roger Raul Rafael Paredes Salazar

Asesor: Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar

Piura, Diciembre 2014

Con mucho amor y cariño a toda mi familia y seres queridos, que con su apoyo incondicional y con su aliento han impulsado el logro de la presente tesis; en especial, para aquellas personas que han formado e instruido mis pasos, a ellos que con su lucha y esfuerzo me han permitido el día de hoy, estar yo aquí presente, mis padres.

Prólogo

República Dominicana se encuentra en una zona de emergencia ante la elevada exposición a fenómenos naturales intensos; esto se debe a su ubicación, características geográficas, topográficas y orográficas.

La presencia de huracanes es muy continua, y sus consecuencias son catastróficas, provocando fuertes lluvias, vientos, deslizamientos e inundaciones. Uno de los más recientes ha sido el huracán Georges, en el año 1998, el cual dejó como consecuencia grandes pérdidas humanas, la destrucción de viviendas, carreteras, además desbordamientos de ríos y de varias represas. Esto implicó la necesidad de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua, para ello se vienen realizando trabajos de rehabilitación y complementación de la Presa Sabana Yegua, el cual ha sido construida y puesta en funcionamiento desde 1979. Uno de los componentes de estos trabajos, es la construcción de un segundo aliviadero de excedencia, llamado también vertedero de servicio, para una capacidad máxima de descarga de $3342 \text{ m}^3/\text{s}$; así mismo, se complementa con la construcción de una poza disipadora de energía, el cual para efectos del presente documento la llamaremos “poza disipadora original”.

La disipación de energía es importante porque permite que la entrega del flujo al cauce sea en condiciones normales y tranquilas, lo cual se logra con la disminución de velocidad, evitando la socavación de estructuras hidráulicas y las erosiones aguas abajo del cauce. Los fenómenos que se presentan en la disipación de energía, son efectos tridimensionales, los cuales deben ser investigados y medidos con precisión mediante la modelación física. Estos fenómenos no pueden ser descritos por fórmulas y métodos convencionales bidimensionales. Para ello, se le encargo al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, la investigación y modelación física de los componentes de la Presa Sabana Yegua.

Mi agradecimiento hacia el Instituto de Hidráulica que me permitió poder trabajar, ensayar y desenvolverme en sus instalaciones. Un agradecimiento especial a mi asesor Dr. Jorge Reyes Salazar por su atención y ayuda técnica brindada durante el desarrollo de mi tesis. Asimismo, quiero agradecer a todas las personas que ofrecieron su tiempo de buena fe, para ayudarme en los trabajos físicos que demandó la realización de la presente tesis.

Índice general

Introducción.....	1
Capítulo 1: Antecedentes.....	3
1.1. Descripción	3
1.2. Huracanes	4
1.3. Huracanes en República Dominicana	5
1.4. Problemática del Proyecto	7
1.5. Modelación física.....	7
1.6. Modelo físico Sabana Yegua	8
Capítulo 2: Fundamentos teóricos de pozas disipadoras y modelación física.....	9
2.1. Conceptos previos	9
2.1.1. Efectos de la gravedad.....	9
2.1.2. Energía específica.....	10
2.1.3. Fenómenos locales.....	10
2.2. Resalto hidráulico	10
2.2.1. Tipos de resalto.....	11
2.2.2. Características básicas del resalto hidráulico	12
2.2.3. Longitud del resalto hidráulico	13
2.3. Resalto hidráulico como disipador de energía.....	14
2.4. Vertederos de caída libre	16
2.4.1. Generalidades	16
2.4.2. Elementos de una caída vertical	16
2.4.3. Estanques para resalto hidráulico	17
2.4.3.1. Estanque tipo I	18
2.4.3.2. Estanque tipo II.....	18
2.4.3.3. Estanque tipo III.....	18
2.4.4. Caídas verticales sin obstáculos.....	19
2.5. Condiciones de similitud entre modelo y prototipo.....	19

Capítulo 3: Información básica	21
3.1. Ubicación	21
3.2. Planos proyectados y construcción	22
3.3. Perfil geológico en la zona de la poza disipadora original – Intertechne.....	27
3.4. Caudales de estudio	29
3.5. Secciones de control.....	29
3.6. Resultados de los ensayos realizados en el modelo – Diseño original.....	31
3.6.1. Características.....	31
3.6.2. Estudios realizados	32
3.6.2.1. Niveles de agua en el vertedero de servicio	33
3.6.2.2. Velocidades en el vertedero de servicio	33
3.6.2.3. Salto de ski.....	34
Capítulo 4: Investigación adicional y complementaria: Alternativas propuestas	39
Primera etapa.....	40
4.1. Alternativa 1: Poza profunda con dados disipadores	40
4.1.1. Análisis de diseño – cálculos	40
4.1.2. Resultados	43
4.1.2.1. Caudal 3342 m ³ /s	43
4.2. Alternativa 2: Poza profunda escalonada sin dados disipadores.....	45
4.2.1. Análisis de diseño – cálculos.....	45
4.2.2. Resultados.....	49
4.2.2.1. Caudal 220 m ³ /s.....	49
4.2.2.2. Caudal 500 m ³ /s.....	50
4.2.2.3. Caudal 1144 m ³ /s.....	52
4.2.2.4. Caudal 2318 m ³ /s.....	53
4.2.2.5. Caudal 3342 m ³ /s.....	54
4.3. Alternativa 3: Poza escalonada y reducida con dados disipadores	56
4.3.1. Análisis de diseño – cálculos.....	56
4.3.2. Resultados.....	60
4.3.2.1. Caudal 1144 m ³ /s.....	60
4.3.2.2. Caudal 2318 m ³ /s.....	61
4.3.2.3. Caudal 3342 m ³ /s.....	62

4.4.	Alternativa 4: Vertedero con obstáculos y poza disipadora original con dados disipadores	64
4.4.1.	Análisis de diseño – cálculos	64
4.4.1.1.	Vertedero	64
4.4.1.2.	Poza disipadora	68
4.4.2.	Resultados	70
4.4.2.1.	Caudal 220 m ³ /s	70
4.4.2.2.	Caudal 500 m ³ /s	72
4.4.2.3.	Caudal 1144 m ³ /s	74
4.4.2.4.	Caudal 2318 m ³ /s	76
4.4.2.5.	Caudal 3342 m ³ /s	79
	Segunda etapa	82
4.5.	Alternativa 5: Poza proporcional	82
4.5.1.	Análisis de diseño – cálculos	82
4.5.2.	Resultados	88
4.5.2.1.	Caudal 342.31 m ³ /s (1144 m ³ /s)	88
4.5.2.2.	Caudal 693.60 m ³ /s (2318 m ³ /s)	90
4.5.2.3.	Caudal 1000.0 m ³ /s (3342 m ³ /s)	91
4.6.	Resumen general	93
	Capítulo 5: Análisis general y conclusiones	109
5.1.	Análisis general	109
5.2.	Conclusiones	110
5.2.1.	Conclusiones específicas	110
5.2.2.	Conclusiones generales	111
	Referencias Bibliográficas	113
	ANEXOS	115

Resumen

La presente tesis tuvo como objetivos principales realizar investigaciones adicionales de disipación de energía en el vertedero de servicio de la presa Sabana Yegua, así mismo, encontrar la solución al problema inicial de disipación de energía en la poza disipadora, con el fin de obtener una mejor, adecuada y correcta disipación. Estas investigaciones se realizaron teniendo en cuenta dos etapas; la primera, que consiste en la disipación de energía sin tener en cuenta los niveles de restitución del cauce; y la segunda, la correcta y adecuada disipación de energía teniendo en cuenta los niveles de restitución del cauce y el desarrollo normal de un resalto hidráulico. Estas alternativas han sido producto de una elaboración inicial de diseños, basados en las referencias bibliográficas y en la finalización de los mismos mediante su construcción y ensayos en campo. En todas las alternativas propuestas se obtuvo una mejor disipación.

Durante el desarrollo en campo y en gabinete, se determinó que la solución al problema inicial de disipación de energía, es ampliar el ancho del vertedero de servicio y la poza disipadora, pues existe un excesivo caudal unitario y los niveles de restitución en el cauce son bajos.

Introducción

La Presa Sabana Yegua cuenta con un aliviadero de excedencias, el cual no es capaz de evacuar los caudales extraordinarios generados por los huracanes. Para ampliar su capacidad de evacuación de excedencias, existe proyectado un segundo aliviadero, además de una “poza disipadora original” mediante un perfilamiento a nivel del suelo, es decir una excavación del suelo teniendo como material resistente el mismo suelo sin revestimiento de concreto ni obras adicionales a la poza, como colocación de dados disipadores. Los ensayos realizados en el modelo físico muestran que en la “poza disipadora original”, la disipación de energía es muy baja.

En el presente documento se realiza una investigación adicional de alternativas que permiten una mejor disipación de energía al pie del aliviadero de la Presa Sabana Yegua y a su vez que el flujo pueda desarrollarse bajo características y condiciones normales.

El primer capítulo, se enfoca en entender la situación en la que se encuentra República Dominicana, con respecto a la seguridad y control de riesgos ante la aparición de fenómenos naturales; y la importancia de la modelación física.

El segundo capítulo, se centra en entender el desarrollo y comportamiento del flujo, las distintas formas de disipación de energía, así como las relaciones de similitud entre el modelo físico y la realidad.

El tercer capítulo se explica en que consiste la modelación física de la Presa Sabana Yegua. Así mismo se muestra los datos y resultados obtenidos de los ensayos a la modelación física. Esta información comprende las mediciones correspondientes al segundo aliviadero de excedencias y la “poza disipadora inicial”.

El cuarto capítulo, parte fundamental del cuerpo de tesis, se enfoca en las investigaciones adicionales de alternativas de disipación de energía. Con estas alternativas propuestas de diseño se deberá lograr una mejor y adecuada disipación de energía y que estas a su vez se desarrolle bajo condiciones normales.

El quinto capítulo, resume el análisis general de las investigaciones adicionales realizadas en el modelo físico, así como las conclusiones a las que amerita este análisis.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Descripción

República Dominicana está expuesta a severos peligros especialmente tormentas tropicales, inundaciones, deslizamientos de tierra, incendios forestales y terremotos.

Un 60 % del territorio de República Dominicana es vulnerable a los huracanes y a sus consecuencias y de ese porcentaje, entre el 60 y el 70% está también en situación de riesgo ante posibles deslizamientos de tierra (*Comisión Nacional de Emergencias de República Dominicana [CNE], 2012*).

El Proyecto tiene propósitos múltiples, conjugándose en su aprovechamiento el consumo humano, la agricultura bajo riego, la generación de energía, el control de inundaciones y otros usos del embalse como son la pesca y el turismo ecológico.

La rehabilitación y complemento de la presa Sabana Yegua, conjuntamente con la construcción de la Presa Monte Grande, forman el complejo de obras hidroeléctricas dirigidas al desarrollo del suroeste del país. En cuanto al abastecimiento de agua para consumo humano, la altura de la presa Monte Grande permitirá el suministro de agua por gravedad a todas las comunidades que en la actualidad son abastecidas por bombeo con el acueducto de la región Suroeste.

Los propósitos principales del Proyecto son el control de inundaciones, el riego y el agua potable; lo relacionado con la generación de energía es promisorio. El Proyecto, en su componente de control de inundaciones, ofrece importantes beneficios en cuanto a la reducción del riesgo por la capacidad del embalse para amortiguar las crecidas del río, cuyo historial y precedentes de caudales extremos es significativo.

En República Dominicana existen alrededor de 400 ríos y 60 cuencas hidrográficas a lo largo del país, haciendo a la mayor parte del país vulnerable a las inundaciones. Este tipo de riesgo natural es también el más frecuente, debido a su ubicación geográfica que está expuesta a la presencia de tormentas tropicales y huracanes (*Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo de República Dominicana [PNUD], 2006*).

1.2. Huracanes

El huracán es el más severo de los fenómenos meteorológicos conocidos como ciclones tropicales. Es un movimiento de masa de aire a gran velocidad que se origina en regiones tropicales. Básicamente es un conjunto de tormentas que giran en torno a un centro de baja presión causando vientos y lluvia. En el hemisferio norte, este giro es en sentido anti horario, mientras que en el hemisferio sur el giro es en sentido horario. Estos fenómenos pueden extender su duración por hasta dos semanas y tienen vientos que superan los cien kilómetros por hora. Un ciclón tropical con vientos menores o iguales a 62 km/h es llamado depresión tropical. Cuando los vientos alcanzan velocidades de 63 a 117 km/h se llama tormenta tropical y, al exceder los 118 km/h, la tormenta tropical se convierte en huracán (*Universidad de Salamanca, 2012*).

El huracán comienza a formarse a partir de la humedad producida por la evaporación y el calor del agua, cuando una masa de aire comienza a ascender en forma de espiral. El ojo del huracán se mantiene cálido provocando la condensación del agua; a sus costados giran bandas de tormentas. Pasado un tiempo, los huracanes comienzan a disiparse paulatinamente.

Esto puede deberse a distintas circunstancias. Una de ellas puede ser el hecho de internarse en tierra y perder contacto con el agua cálida que le proporciona sustento; otra puede ser el permanecer por mucho tiempo en el océano, quitando el calor del agua que le permite continuarse; también es posible que sea deglutido por otra zona de bajas presiones; o entrar en aguas frías es otra posibilidad. Los huracanes, como la mayoría de los demás fenómenos naturales, pueden ser medidos en relación a su intensidad, y a la magnitud con la cual se manifieste. Para esto se utiliza una escala llamada de Saffir-Simpson. Según esta escala, se clasifican en categorías del 1 al 5, los correspondientes a la densidad más baja son los de categoría 1 y 2, mientras que los de categoría 3, 4 y 5 son los de intensidad elevada.

Tabla 1. Escala Saffir-Simpson

Escala Saffir-Simpson	
Categoría	Rango de velocidad de los vientos (Km/h)
1	119-153
2	154-177
3	178-209
4	210-250
5	mayor de 250

Fuente: National Weather Service, 2012

Las consecuencias del paso del huracán son catastróficas. Los riesgos asociados con los ciclones tropicales, especialmente con los huracanes son: marejada, vientos fuertes, intensas precipitaciones, deslizamientos e inundaciones. La intensidad de un huracán es un indicador que generalmente refleja el potencial destructor del mismo.

La marejada es un domo de agua de 80 a 160 kilómetros de ancho, que choca con la costa debido a que es impulsada por la fuerza de los vientos generados por la tormenta. La marejada combinada con la marea crea lo que se llama la **marea de tormenta**. Ésta puede incrementar el nivel normal del agua en 4.5 metros o más (*National Weather Service, 2012*).

Los efectos de la marejada en las costas dependen de la forma de la placa continental. Si la costa es muy plana y extendida los efectos suelen ser devastadores; por el contrario, si la placa continental es alta la marejada encuentra la resistencia suficiente como para no afectar severamente la parte costera, tierra. En las zonas costeras la marejada es la principal amenaza asociada con un huracán, la cual, históricamente de cada 10 personas fallecidas, 9 murieron a causa de esto.

Los vientos fuertes asociados con un huracán suelen causar efectos devastadores en grandes zonas, especialmente en aquellas en las que el fenómeno afecta directamente. Un huracán categoría 1 tiene vientos de 119 km/h y, el huracán categoría cinco iguala o sobrepasa los 250 km/h.

Las fuertes lluvias; un huracán genera, en promedio, entre 150 y 300 mm de lluvia o más, el cual causa severas inundaciones, deslizamientos y derrumbes. Las lluvias más fuertes se relacionan, generalmente, con las tormentas tropicales o huracanes que se desplazan más lentamente (menos de 16 kilómetros por hora). Las lluvias intensas y continuas generadas por un huracán pueden provocar inundaciones severas. Grandes cantidades de lluvia pueden ocurrir hasta 160 kilómetros sobre tierra adentro donde las inundaciones repentinas y los deslizamientos son típicamente las mayores amenazas.

Registros máximos: en 12 horas el ciclón tropical Denise (1966) acumuló 1144 mm; en 24 horas la misma tormenta acumuló 1825 mm; en 48 horas el ciclón tropical Ella (1958) acumuló 2467 mm; y en 1980 el ciclón tropical Hyacinthe acumuló 5678 mm en 72 horas (*National Weather Service, 2012*). Como referencia, podemos mencionar que durante todo el Fenómeno del Niño en Piura (periodo Octubre 1997 – Mayo 1998), se acumuló 2000 mm (*Instituto Nacional de Defensa Civil, 1998*).

Los tornados; ocurren generalmente en el cuadrante frontal derecho del huracán. Sin embargo, pueden ocurrir en cualquier parte las bandas de lluvia asociadas al mismo. Típicamente, mientras más intenso es un huracán más intenso es el tornado que se genera; la mayoría de los tornados ocurren dentro de un radio de 240 kilómetros a partir de la costa. Los tornados causan destrozos materiales de gran magnitud.

1.3. Huracanes en República Dominicana

Durante un largo período de tiempo y dentro de la llamada temporada de huracanes del Atlántico Norte, Republica Dominicana ha estado bajo la influencia de tormentas tropicales y huracanes en unas 76 oportunidades, de esa cantidad 32 han sido tormentas tropicales y el resto huracanes, de las cinco diferentes categorías, de manera que Republica Dominicana ha sido afectada por más huracanes que tormentas tropicales.

De esos huracanes se ha considerado su intensidad al momento de entrar a territorio dominicano o pasar a la distancia más corta y nos encontramos que 14 de ellos han sido de la categoría 1, 13 de la categoría 2, 9 de la categoría 3, 3 de la categoría 4 y 5 de la categoría 5, es decir se han registrado 17 casos de Huracanes intensos de las categorías 3, 4 y 5 (*Cocco Quezada & Gutiérrez Pérez, 1999*).

La temporada de huracanes se inicia el 1 de junio y concluye el 31 de noviembre. Según la Oficina Nacional de Meteorología de República Dominicana, el período crítico en cuanto a la posibilidad de impacto de un fenómeno natural en el país se encuentra entre el 15 de agosto y el 15 de septiembre.

Los registros de cien años indican que el país ha sufrido en ese periodo el impacto de al menos 20 huracanes, de los cuales cinco han sido los más desastrosos por los daños provocados en todo el territorio nacional. La lista la componen el ciclón Lilis (1894), San Zenón (1930), Inés (1966), David (1979) y el huracán George (1998).

El 31 de agosto de 1978, el huracán David de categoría 5, provocó el peor desastre de toda la historia de República Dominicana, causando la muerte de más de 3000 personas y la desaparición de cientos de personas; era el caos. No hubo cauce que no se desbordara ni represa que no se viera amenazada por el colapso. A 6 días del paso del huracán David, la tormenta tropical Frederick, causó serias precipitaciones e inundaciones en la región Sur del país.

El 22 de septiembre de 1998 el huracán Georges causó uno de los peores desastres naturales en la historia de la República Dominicana. Con vientos de hasta 200 km/h, lluvias intensas y prolongadas causantes de crecidas y desbordamientos de ríos y represas en las regiones Este y Sur, afectó directa o indirectamente en las provincias orientales y el distrito Nacional a cientos de miles de personas de una población Dominicana total estimada en 8,2 millones. Como referencia, en la zona del tablazo de Paita, las velocidades del viento oscilan entre 25 km/h y 30 km/h.

Como saldo final del paso del huracán se cuentan 283 muertes, daños a miles de viviendas, acueductos, escuelas, puentes, carreteras, redes de energía, comunicaciones, así como al comercio, la industria y el ambiente. En términos globales, se estima en unos 33.000 millones de pesos (US\$ 2193,4 millones) los daños totales causados por el Georges (*Organización Panamericana de la Salud, 1999*).

La mayor parte de los daños se debió a las enormes presiones ejercidas por el viento sobre las estructuras de las provincias orientales y a las lluvias registradas sobre la cordillera central (provincias de Azúa y San Juan), que hicieron desbordar los ríos y varias represas, con numerosa pérdida de vidas, gran cantidad de refugiados, destrucción de viviendas, puentes, carreteras, caminos vecinales, sistema eléctrico, redes de agua potable, plantaciones agrícolas, y averías en los sistemas de comunicaciones, de salud y las instalaciones aeroportuarias, además de abatir a miles de árboles, entre otros graves perjuicios.

En la presente tesis es muy importante conocer los fenómenos naturales al cual están sometidas las estructuras hidráulicas, tomando en consideración sus riesgos y consecuencias de la misma, no sólo los posibles daños materiales, sino también valorar la importancia del riesgo de no hacer algo por controlar las avenidas que causarían la pérdida catastrófica de vidas humanas.

1.4. Problemática del proyecto

El embalse Sabana Yegua cuenta con un aliviadero de excedencias, el cual no es capaz de evacuar los caudales extraordinarios generados por los huracanes. Como consecuencia de la falta de capacidad, originaría problemas críticos en zonas aledañas como serían las inundaciones y grandes velocidades en la restitución del agua en el cauce del río Yaque del Sur, es por eso que es necesario el diseño y construcción de un segundo aliviadero de excedencias que permita complementar al aliviadero existente y una poza disipadora que permita que el flujo de descarga de aguas de excedencias no genere la erosión masiva al pie del segundo aliviadero, así mismo disipe la energía cinética del flujo, mejorando el comportamiento del mismo y cooperando en evitar el riesgo de formaciones de obstáculos de mismo material que es ocasionado por la fuerza erosiva del flujo, que mueve el material de un punto aguas arriba y lo deposita en el mismo cauce natural aguas abajo, a manera de paredes, desviando la dirección del flujo.

1.5. Modelación física

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

Actualmente, se han desarrollado métodos por los cuales, como resultado de experimentos realizados en sistemas a escala reducida (modelo), es posible predecir la conducta de una estructura en la realidad (prototipo).

Un criterio a tenerse en cuenta para tomar la decisión de realizar estudios en modelos físicos es la importancia de la estructura que se está estudiando. Si se trata de una estructura de gran costo y complejidad, cuya falla acarrearía graves consecuencias debemos pensar necesariamente en una investigación en modelo. Pero, si se tratase de una estructura pequeña, fácilmente reparable y cuya destrucción o colapso no tuviese consecuencias graves, podría no requerirse un estudio en modelo físico.

Otra circunstancia en la que debe recurrirse a una investigación en modelo se presenta cuando la teoría requerida para el diseño es incompleta, inaplicable o inexistente. Este es un caso muy frecuente, ya que las fórmulas en hidráulica corresponden en su mayor parte a situaciones idealizadas en un mundo bidimensional.

Pero, hay también consideraciones de otro tipo como la posibilidad de introducir un ahorro importante en el costo de las obras. La experiencia demuestra que determinadas estructuras pueden ser igualmente eficientes y seguras, a un menor costo. El modelo permite la comprobación, o, a veces, el descubrimiento de este hecho. Así mismo, eleva el grado de seguridad de la estructura. En el modelo físico, la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones permite observar e intuir problemas que no habían sido imaginados durante el diseño en el gabinete.

En la actualidad, se diseñan y construyen pocas o ninguna estructura hidráulica importante, sin estudios preliminares de modelos, más o menos extensos. En definitiva, la

modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo en mayor o menor medida, para luego describirlo y cuantificarlo. Por ello, la magnitud del proyecto impulsó la realización de un modelo físico que permita aproximarse a la realidad, poder observar más de cerca el desarrollo y posterior estudio del flujo en la estructura en forma tridimensional.

En las instalaciones del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (IHHS) se realizó la modelación física del embalse Sabana Yegua y de sus componentes.

1.6. Modelo físico Sabana Yegua

La empresa de consultoría Intertechne realizó el diseño del segundo aliviadero de excedencia y de la poza disipadora, proponiendo un diseño de poza de sección trapezoidal al pie del segundo aliviadero de excedencia, el cual ha sido estudiado en la modelación física encargada al IHHS.

La modelación física consistió en la construcción a escala del embalse Sabana Yegua, el canal de ingreso al segundo aliviadero de excedencia, el segundo aliviadero de excedencia llamado también “vertedero de servicio”, además de la poza disipadora, al que llamaremos en adelante como “poza disipadora original” y el cauce natural del río Yaque del Sur. En el capítulo 3 de la presente tesis, se describen los resultados de los ensayos realizados en el modelo físico, correspondiente a lo propuesto por Intertechne.

De acuerdo a los ensayos y estudios realizados en el modelo físico, se determina que la energía del flujo que sale del vertedero de servicio en el punto de salida es de gran magnitud, así mismo la poza disipadora original no logra una adecuada disipación de energía para caudales mayores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, motivo por el cual se hizo estudios adicionales, que permitan obtener una mejor y adecuada disipación de energía.

Por ello, la presente tesis tiene por objeto la investigación adicional y complementaria, con alternativas propuestas de disipación de energía, las cuales permitirán el buen funcionamiento de la poza disipadora, así como la reducción de la energía cinética del flujo con la consiguiente disminución de erosión aguas abajo en el cauce del río. Esto se logra con la elaboración previa de diseños, para luego construirlos y finalmente ensayarlos.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos de pozas disipadoras y modelación física

2.1. Conceptos previos

En el control de flujos hidráulicos es frecuente el diseño de estructuras disipadoras de energía. Los cuencos disipadores de energía tienen aplicaciones prácticas e importantes en el diseño de obras hidráulicas entre otras, un cuenco disipa la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas para que de esta manera se prevenga la socavación aguas abajo de las estructuras.

Se comenta el principio del resalto hidráulico con las características a tener en cuenta para el diseño de cuencos disipadores y los tipos de resalto, se trata el resalto hidráulico como disipador de energía de forma detalla donde se describen las estructuras controladoras y tipos de cuencos disipadores más comunes.

2.1.1. Efecto de la gravedad

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F \propto \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Donde, “v” es la velocidad de flujo, “g” es la aceleración de gravedad y “D” es la profundidad hidráulica, $D = A/T$, donde, “A” es el área mojada y “T” es el ancho de la superficie (*Ven te Chow, 2004*).

Clasificación del flujo respecto al régimen de velocidad:

- ☐ Flujo Supercrítico: en este estado el papel jugado por las fuerzas inerciales es más pronunciado presenta una velocidad de flujo muy alta, una profundidad de flujo baja y se genera en condiciones de pendiente alta.
- ☐ Flujo Crítico: régimen de flujo intermedio, se caracteriza por generar alta inestabilidad en el flujo, no es recomendable para el diseño.

- Flujo Subcrítico: en este estado el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado por lo tanto se presenta una velocidad de flujo baja, tiene una profundidad de flujo alta y se genera en condiciones de baja pendiente.

Para $F = 1$ el flujo es crítico, cuando $F < 1$ el flujo es subcrítico, y si $F > 1$ el flujo es supercrítico.

2.1.2. Energía específica

Es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de la velocidad en una sección de canal ($E = y + v^2/2g$). Cuando la profundidad de flujo se grafica en correlación con la energía específica para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una curva de energía específica; para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades: la profundidad baja y_1 y la profundidad alta y_2 . La profundidad alta es la profundidad alterna de la profundidad baja y viceversa. En el estado crítico la profundidad alterna se convierten en profundidad crítica y_c . Para un mejor detalle revisar la Figura G-1 del Anexo G.

2.1.3. Fenómenos Locales

En los canales abiertos a menudo ocurren cambios en el estado de flujo subcrítico a supercrítico o viceversa. Tales cambios se manifiestan con un correspondiente cambio en la profundidad de flujo de una profundidad alta a una profundidad baja, o viceversa. Si el cambio ocurre con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta, el flujo es rápidamente variado y se conoce como fenómeno local.

2.2. Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico.

Este involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo.

La profundidad antes del resalto se conoce como profundidad baja y_1 , y después del resalto se conoce como profundidad alta y_2 . Entonces, la energía específica E_1 correspondiente a la profundidad baja y_1 es mayor que la energía específica E_2 correspondiente a la profundidad alta y_2 en una cantidad igual a la pérdida de energía ΔE . Para un mejor detalle revisar la Figura G-2 del Anexo G.

Al establecer una relación entre las profundidades baja y alta de un resalto hidráulico en un fondo horizontal de un canal rectangular, partiendo de las fuerzas específicas en las secciones 1 y 2, antes y después del resalto se obtiene:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} + 1 \right] \quad \text{Ecuación del resalto en canales rectangulares horizontales}$$

Para flujo supercrítico en un canal horizontal, la energía de flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo (Ven te Chow, 2004).

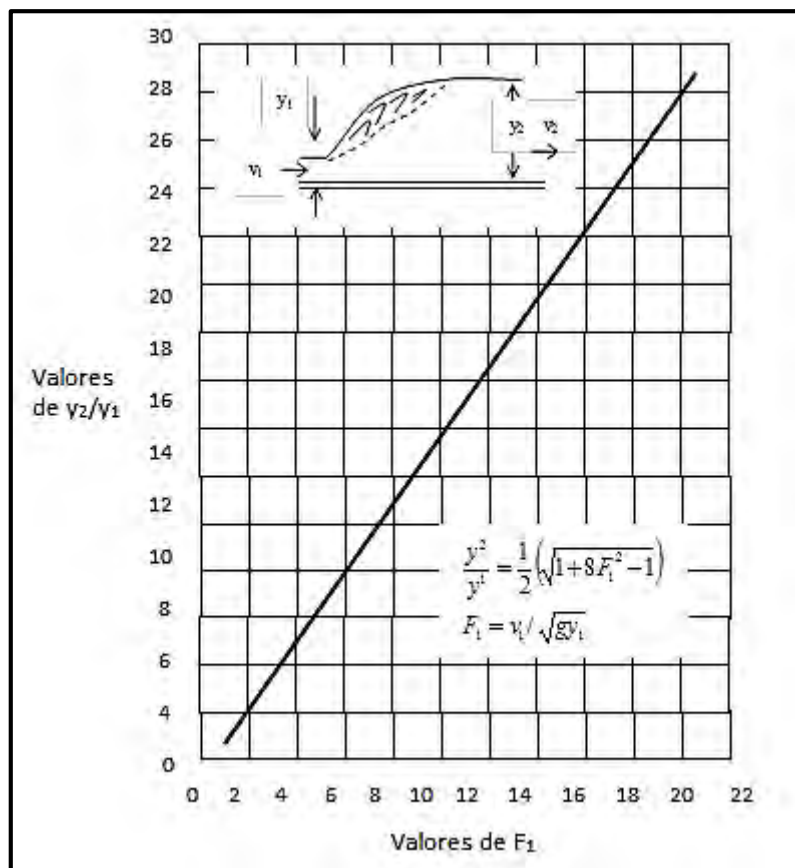


Figura 1. Relación entre F_1 y y_2/y_1 para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal

F_1 : Numero de Froude

y_1 : Profundidad baja

y_2 : Profundidad alta

Fuente: Ven te Chow, 2004

2.2.1. Tipos de resalto

El Bureau of Reclamation (1987) investigó diferentes tipos de resalto hidráulico en canales horizontales, cuya base de clasificación es el número de froude F_1 del flujo entrante:

$F_1 = 1$, el flujo es crítico, por lo que no se forma resalto.

$F_1 = 1$ a 1.7, la superficie de agua muestra ondulaciones ligeras y se presenta el resalto hidráulico ondulante. Al aproximarse el número de froude al valor de 1.7 se comienza a formar en la superficie una serie de pequeñas ondulaciones.

$F_1 = 1.7$ a 2.5, el ondulamiento de la superficie en el tramo de mezcla es mayor, se presenta una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta el resalto hidráulico débil.

$F_1 = 2.5$ a 4.5 , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a gran distancia causando daños ilimitados a banquetas de tierra y a enrocados de protección. Se produce el resalto hidráulico oscilante.

$F_1 = 4.5$ a 9.0 , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado, con mayor estabilidad y el rendimiento es mejor. La disipación de energía varía de 45 % a 70 %. Se presenta resalto hidráulico permanente o estable.

$F_1 \geq 9$, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes e irregular que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo. Existe gran ondulación de la superficie con tendencia de traslado de la zona de régimen supercrítico hacia aguas abajo. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce el resalto hidráulico fuerte.

En la práctica se recomienda mantener el resalto hidráulico en la condición de resalto oscilante, por cuanto se trata de un resalto bien formado y accesible en las condiciones de flujo reales, si bien la disipación que se logra no alcanza los mejores niveles. En los casos de resaltos permanente y fuerte, las condiciones hidráulicas aguas abajo son muy exigentes y difíciles de cumplir en la práctica.

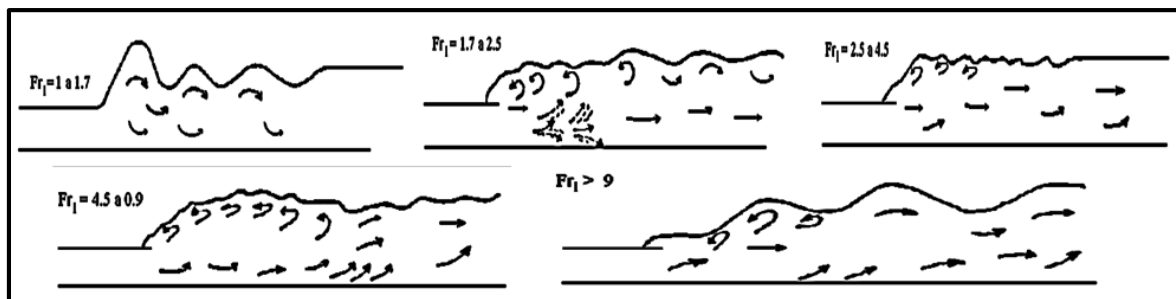


Figura 2. Tipos de Resalto Hidráulico
Fuente: Venete Chow, 2004

2.2.2. Características básicas del resalto hidráulico

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales a valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. El lugar geométrico en el que se presenta el resalto se denomina colchón hidráulico (*Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008*).

Se han investigado diferentes formas de colchones hidráulicos con el objeto de lograr una mejor disipación de energía en una menor longitud. Para el diseño de colchones hidráulicos se consideran los siguientes aspectos.

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

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

Eficiencia. Es la relación entre la energía específica antes y después del resalto, es una función adimensional y depende sólo del número de Froude del flujo de aproximación.

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

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

$$h_j = y_2 - y_1$$

2.2.3. Longitud del resalto hidráulico

Un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas es la longitud del resalto, que definirá la necesidad de incorporar obras complementarias para reducir esta longitud y/o aplicar medidas de protección de la superficie para incrementar su resistencia a las tensiones de corte (*Bureau of Reclamation, 1987*).

La longitud del resalto puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto y_1 hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino y_2 . Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante el número de Froude F_1 contra la relación adimensional $L/(y_2 - y_1)$, L/y_1 o L/y_2 . La curva resultante de la gráfica F_1 versus L/y_2 muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos. (Ver Figura 3)

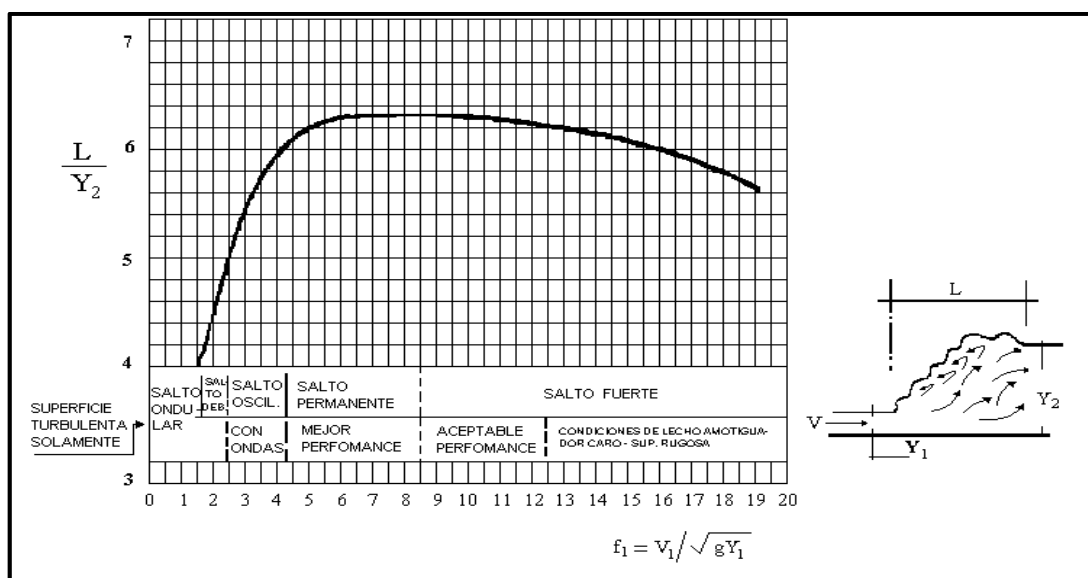


Figura 3. Relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico
Fuente: Bureau of Reclamation, 1987

2.3. Resalto hidráulico como disipador de energía

El resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico debido a que previene la posible erosión aguas debajo de vertederos de rebose, rápidas y compuertas deslizantes, pues reduce rápidamente la capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico son:

- ☐ Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.
- ☐ Recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas.
- ☐ Incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo.
- ☐ Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto.

En el diseño de un cuenco disipador, se deben considerar los siguientes aspectos:

Posición del resalto:

Existen tres modelos alternativos que permiten que un resalto se forme aguas abajo de una fuente: vertedero de rebose, una rápida o una compuerta deslizante (*Bureau of Reclamation, 1987*).

Caso 1: $y'_2 = y_2$. Este caso representa un modelo para el cual la profundidad de aguas abajo y'_2 es igual a la profundidad y_2 seciente a y_1 . En este caso se satisface la ecuación y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente delante de la profundidad y_1 . Es ideal para propósitos de protección contra la socavación.

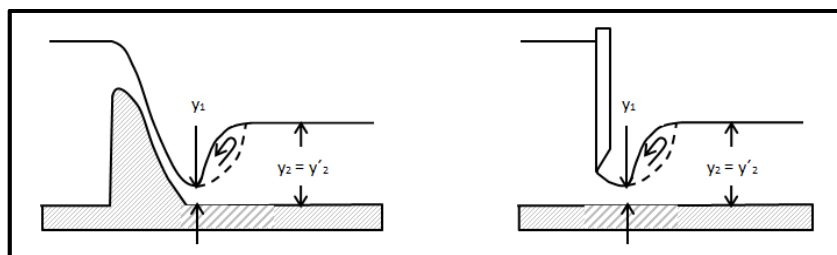


Figura 4. Efecto de la profundidad de salida, cuando $y'_2 = y_2$

Fuente: Bureau of Reclamation, 1987

Caso 2: $y'_2 < y_2$. Representa el patrón para el cual la profundidad de salida y'_2 es menor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida del caso 1 disminuye y el resalto se desplazará hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga la ecuación. Este caso debe evitarse en el diseño, debido a que el resalto rechazado fuera de la zona resistente a la socavación ocurriría en un lecho de cantos rodados sueltos o en un canal desprotegido ocasionando erosión severa. La solución para el diseño es utilizar cierto control en fondo del canal, el cual incrementaría la profundidad de agua y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

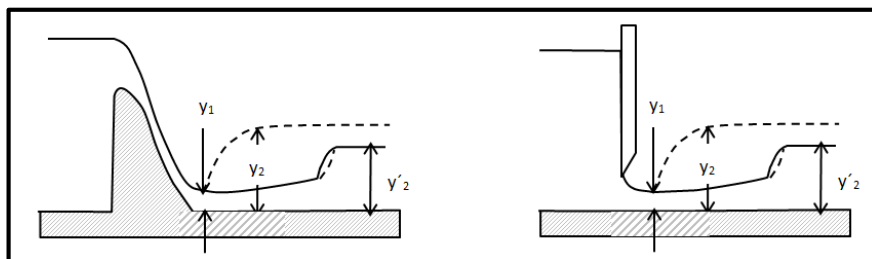


Figura 5. Efecto de la profundidad de salida, cuando $y'_2 < y_2$
Fuente: Bureau of Reclamation, 1987

Caso 3: $y'_2 > y_2$. Este caso representa un modelo en el cual la profundidad de salida y'_2 es mayor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. El resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Éste es el caso más seguro para el diseño, debido a que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez, sin embargo el diseño no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.

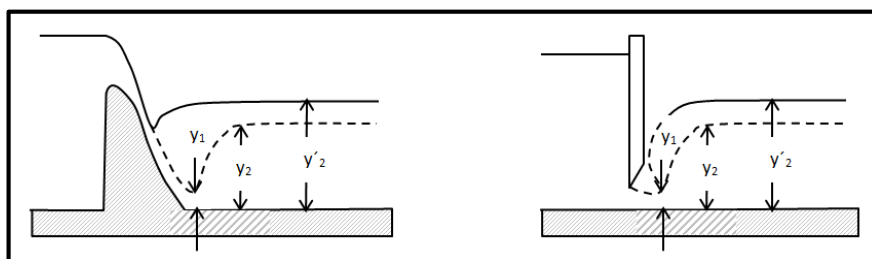


Figura 6. Efecto de la profundidad de salida, cuando $y'_2 > y_2$
Fuente: Bureau of Reclamation, 1987

Recomendaciones para los tipos de resalto:

Al considerar los diferentes tipos de resalto hidráulico, el U.S Bureau of Reclamation da las siguientes recomendaciones prácticas:

- ☐ Todos los tipos de resalto se encuentran en el diseño de cuencos disipadores.
- ☐ El resalto débil no requiere de bloques o consideraciones especiales. Lo único que se necesita es dar la longitud apropiada al cuenco, la cual es relativamente corta. Ésta puede determinarse mediante el gráfico donde se presenta la relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico.

- El resalto oscilante, encontrado a menudo en el diseño de estructuras de canales, presas de derivación y obras de descarga es difícil de manejar. En lo posible deben evitarse los resaltos con número de Froude dentro del rango 2.5 a 4.5. En muchos casos no puede evitarse el uso de este resalto, pero en otros casos, alterando la dimensiones puede llevarse al rango deseable. Los bloques deflectores o accesorios tienen muy poco valor, las ondas son la principal fuente de dificultad, por consiguiente pueden utilizarse supresores de onda diseñados para manejarlas.
- No se encuentra una dificultad particular para el resalto estacionario. Los deflectores y bloques son útiles para acortar la longitud del cuenco disipador.
- A medida que el número de Froude aumenta, el resalto se vuelve más sensible a la profundidad de salida. Para números de Froude tan bajos como 8, se recomienda una profundidad de salida mayor que la seciente para asegurar que el resalto permanecerá en la zona protegida.
- Cuando el número de Froude es mayor que 10, un cuenco disipador de resalto puede no ser lo más económico. En este caso, la diferencia entre las profundidades, inicial y seciente es alta y, por lo general se requiere un cuenco muy profundo con muros de retención muy altos. El costo del cuenco disipador no compensa los resultados obtenidos. Un disipador del tipo cubeta deflectorá dará resultados similares a menor costo.

2.4. Vertederos de caída libre

2.4.1. Generalidades

Los problemas hidráulicos de los vertederos de caída libre se refieren a las características de control y a la disipación de energía en el estanque de aguas abajo. El escurrimiento sobre la estructura de control ordinariamente es de descarga libre; se introduce aire debajo de la lámina vertiente para evitar su abatimiento por la reducción de la presión debajo de ella. La disipación de la energía del estanque de aguas abajo puede obtenerse con un resalto hidráulico, por impacto y turbulencia producidos en un estanque con bloques, o con un disipador de rejilla instalado inmediatamente aguas debajo del control (*Instituto Tecnológico de Costa Rica, 1995*).

2.4.2. Elementos de una caída vertical

En el diseño de una caída, se pueden distinguir los siguientes elementos:

Transición de entrada: Une por medio de un estrechamiento progresivo la sección del canal superior con la sección de control.

Sección de control: Es la sección correspondiente al punto donde se inicia la caída, cercano a este punto se presentan las condiciones críticas.

Caída en sí: La cual es de sección rectangular y puede ser vertical o inclinada.

Poza o colchón amortiguador: Es de sección rectangular, siendo su función la de absorber la energía cinética del agua al pie de la caída.

Transición de salida: Une la poza de disipación con el canal aguas abajo.

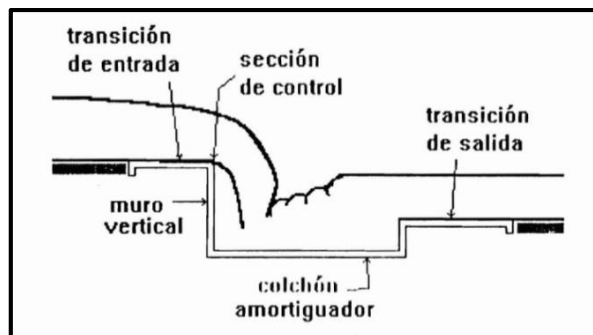


Figura 7. Elementos de una caída
Fuente: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 1995

El control puede estar constituido por un vertedero en pared delgada para que produzca un chorro vertical con contracción completa, por una pared gruesa para producir una o sin ninguna contracción, o de la forma para aumentar la eficiencia de la cresta. Los costados del control generalmente están dispuestos en forma de obtener una contracción lateral completa, para poder disponer de espacio lateral para el acceso del aire debajo de la lámina vertiente.

Las dimensiones del estanque amortiguador para el vertedor de caída libre se pueden relacionar a dos variables independientes, a saber, la distancia de caída “Y” y la descarga unitaria “q”. Estas variables, que son términos dimensionales, se pueden expresar como una relación adimensional expresando a “q” en forma lineal por medio de la ecuación para el tirante crítico, $d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ como sigue:

$$\frac{d_c}{Y} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{gY^3}}$$

En esta expresión se puede ver que “ $\frac{q^2}{gY^3}$ ” es una relación adimensional, que se puede usar como variable independiente a la que se pueden relacionar las dimensiones individuales. A esta relación se le llama “numero de la caída” y se designa por “D”. Se puede demostrar que D de F_1^2 y $(\frac{d_1}{Y})^3$ en donde F_1 es el numero de froude $\frac{v_1}{\sqrt{d_1 g}}$ en el punto donde la lámina vertiente encuentra el piso del estanque (*Bureau of Reclamation, 1987*).

2.4.3. Estanque para resalto hidráulico

Las características del resalto para el estanque de caída recta son básicamente las mismas, que las de otros estanques de resalto, excepto que la posición del principio del resalto no se puede determinar con tanta facilidad como en los otros estanques. En la Figura G-3 del Anexo G, el punto donde principia el resalto (punto “X”) variará con la distancia de la caída vertical y depende del tirante que haya en el estanque debajo de la lámina vertiente, d_f . El proyecto del estanque aguas abajo del punto “X” se hará de acuerdo a la teoría base de estanques según sea el número de Froude, una vez que se ha determinado la distancia “ L_d ”. En la Figura G-3 del Anexo G, se dan valores del tirante d_1

y del número de Froude, F_1 , al principio del resalto con relación al número de la caída, “D”. Estas relaciones se pueden usar para determinar las dimensiones del estanque.

Cuando los tirantes en la descarga son mayores que el tirante conjugado d_2 , el resalto se moverá hacia atrás sobre la lámina vertiente de caída libre, elevando el tirante d_f del tirante bajo la misma. Con tirantes mayores en el estanque bajo la lámina, ésta no se sumergirá inmediatamente hasta el piso del estanque, sino que será desviada hacia arriba a lo largo de la parte superior del estanque inferior, de manera que encontrará el piso a la derecha del punto X. La distancia al principio del resalto, L_d , será progresivamente más larga al aumentar el tirante de la descarga.

Los valores medios de L_d , en relación a h_d/H_e , obtenidos de las pruebas, están dibujados en la Figura G-3 del Anexo G. Los tipos de estanques según sea el número de Froude se aprecian a continuación:

2.4.3.1. Estanques tipo I

Cuando los factores de corriente de llegada tienen números de Froude que varían de 2.5 a 4.5 se designan como régimen de transición, porque no se forma un verdadero resalto hidráulico, el estanque tipo I ha demostrado ser relativamente efectivo para disipar la mayor parte de la energía de la corriente, sin embargo, el oleaje producido por el flujo oscilante no puede amortiguarse completamente. Algunas veces tienen que emplearse amortiguadores auxiliares de las ondas, o supresores para que la circulación aguas abajo sea tranquila.

Debido a la tendencia del resalto de cambiar de lugar, y como un medio para suprimir el oleaje, los tirantes en el estanque deben ser aproximadamente 10% mayores que el tirante conjugado. Para un mejor detalle, revisar la Figura G-4 del Anexo G.

2.4.3.2. Estanque tipo II

Estanques para números de Froude mayores de 4.5, en donde se forma un verdadero resalto hidráulico. Este tipo de estanque se puede adoptar cuando las velocidades de llegada no exceden los 50 pies/s, utilizando bloques amortiguadores un umbral terminal para acortar la longitud del resalto y para disipar la elevada velocidad de circulación dentro del estanque acortado. Para un mejor detalle, revisar la Figura G-5 del Anexo G.

2.4.3.3. Estanque tipo III

Este tipo de estanque se adopta cuando las velocidades de llegada pasan de 50 pies/s, o cuando no se emplean bloques amortiguadores. Debido a que la disipación se debe principalmente al efecto del resalto hidráulico, la longitud del estanque será mayor que la del estanque Tipo II. Para que no se corra el resalto, el tirante del agua en el estanque debe ser aproximadamente 5% mayor que el tirante conjugado. Para un mejor detalle, revisar la Figura G-6 del Anexo G.

2.4.4. Caídas verticales sin obstáculos

Según el Instituto Tecnológico de Costa Rica – Departamento de Ingeniería Agrícola, para caídas verticales sin obstáculos se presentan las siguientes relaciones:

$$\text{El número de caída: } D = \left(\frac{y_c^3}{h} \right) = \frac{q^2}{h^3 g}$$

Los parámetros que se muestran en la figura a continuación, se calculan con las siguientes ecuaciones:

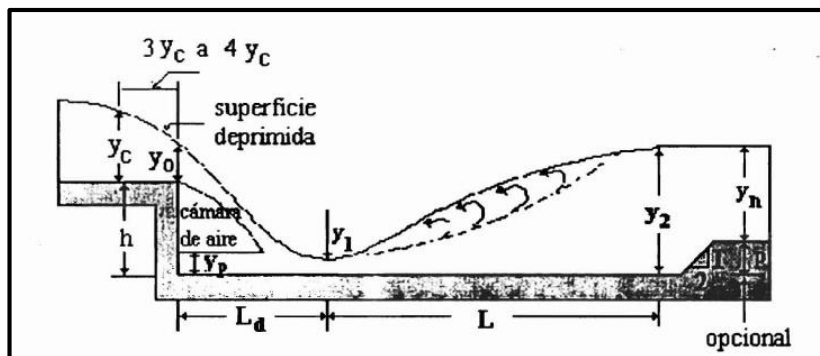


Figura 8. Caída vertical sin obstáculos
Fuente: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 1995

$$\begin{aligned} L_d &= 4.3hD^{0.27} \\ y_1 &= 0.54hD^{0.425} \\ y_2 &= 1.66hD^{0.27} \\ y_p &= hD^{0.22} \end{aligned}$$

La longitud del resalto, se puede calcular con la fórmula de Sienchin:

$$L = 5(y_2 - y_1)$$

La longitud total del colchón será:

$$L_t = L_d + L$$

Debe evitarse que en la cámara de aire se produzca vacío, porque esto produce una succión que puede destruir la estructura, para evitar esto se puede hacer agujeros en las paredes laterales o incrementar el ancho de la poza.

Para las filtraciones que se produce en la pared vertical, se recomienda hacer lloraderos (drenes de desagüe).

2.5. Condiciones de similitud entre modelo y prototipo

En el caso del modelo del vertedero de servicio de la Presa Sabana Yegua el flujo se encuentra a superficie libre por lo tanto el número adimensional que relaciona la realidad con el modelo es el de Froude. Este valor es una relación de las fuerzas inerciales con respecto a las gravitacionales, cuyo valor, puede ser menor o mayor a 1, dependiendo si el flujo es subcrítico o supercrítico (*Universidad de Piura, 2011*).

Definiendo la escala geométrica como “ L_r ” las demás variables serán:

Velocidad: $V = (L_r)^{0.5}$

El valor de la velocidad se deriva directamente de la identidad de los números de Froude del prototipo y del modelo.

Caudal: $Q = V \times A = (L_r)^{0.5} \times (L_r)^2 = L_r^{2.5}$

Presión: $P = \frac{F}{A} = \rho \dot{V} g / L_r^2 = L_r^3 / L_r^2 = L_r$

Tiempo: $t = \frac{L_r}{V} = L_r / L_r^{0.5} = L_r^{0.5}$

Rugosidad: $\eta = \frac{R^{2/3} i}{V} = L_r^{2/3} / L_r^{0.5} = L_r^{1/6}$

Los valores de densidad (ρ) y de la gravedad (g) son iguales a uno, esto se asume porque en el prototipo y en el modelo, el fluido es el mismo, en este caso agua, y además se tienen las mismas condiciones de gravedad.

Según los términos de referencia, la escala geométrica del modelo físico del vertedero de servicio de la Presa Sabana yegua, es de 1:60. Por lo tanto los valores de las variables medidas en el modelo se verían afectados de la siguiente manera:

Velocidad: $V = (L_r)^{0.5} = 60^{0.5} = 7.746$

Caudal: $Q = L_r^{2.5} = 60^{2.5} = 27885.480$

Presión: $P = L_r = 60$

Tiempo: $t = L_r^{0.5} = 60^{0.5} = 7.746$

Para la fase de estudio se tiene que ingresar el caudal requerido en el modelo físico, esto se realiza mediante el tanque de aquietamiento.

Tanque de aquietamiento:

Esta estructura servirá para regular los caudales de ingreso para el modelo. El ingreso de caudal tanto para el vertedero de la Presa Sabana Yegua como para el río Yaque del Sur, se hará mediante el tanque de Aquietamiento, el cual existe instalado un vertedero de pared delgada que suministrará el caudal requerido a escala para el vertedero de servicio y un orificio de pared delgada que suministrará el caudal constante del río a escala.

La fórmula del caudal de vertedero rectangular con contracciones permitirá suministrar en el modelo físico, los caudales de ensayo en el vertedero de servicio (segundo aliviadero de excedencia) de la presa Sabana Yegua: $Q = 1.84 (L - 0.1 nh) h^{3/2}$,

La fórmula del caudal de un orificio de pared delgada permite suministrar en el modelo físico, el caudal constante del río Yaque del Sur: $Q = C_a A_0 \sqrt{2gH}$

Capítulo 3

Información básica

3.1. Ubicación

La presa Sabana Yegua está ubicada en las cercanías del poblado de Sabana Yegua, en la provincia de Azua, en el país de República Dominicana. Está situada sobre el río Yaque del Sur, a unos 65 km aguas arriba de su desembocadura en el mar Caribe y a unos 53 km al noroeste de la ciudad de Azua y 160 km al oeste de Santo Domingo (Figura 9). La presa Sabana Yegua regula una cuenca con una extensión de 1,675 km², lo que la hace la mayor cuenca de todas las presas del país (*Fundación Gilberto Montero, 2009*).

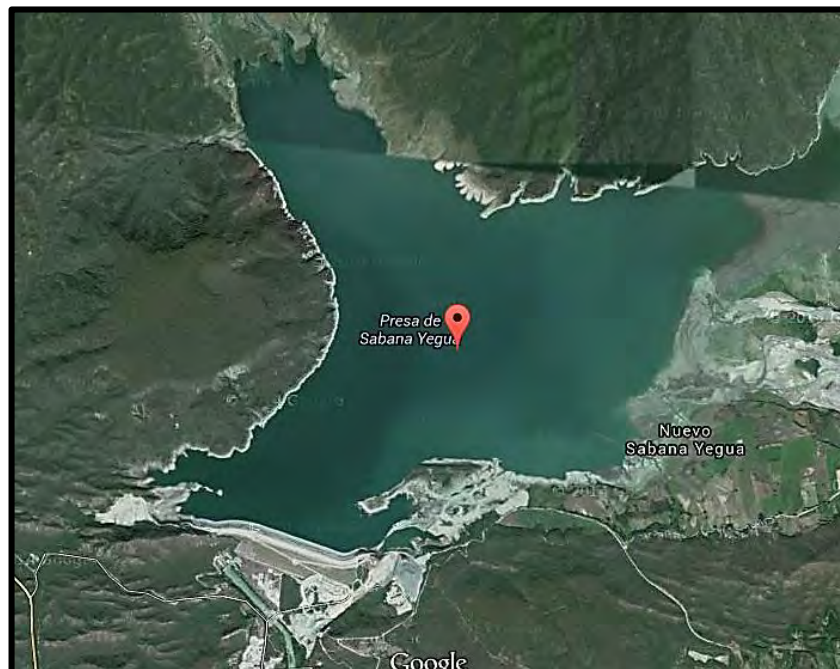
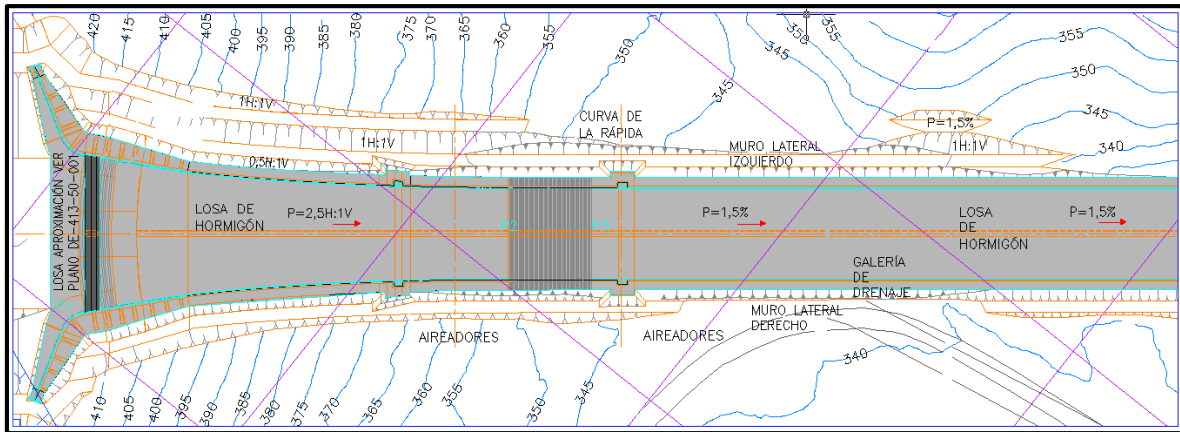


Figura 9. Embalse Sabana Yegua - Vista Google Earth
Fuente: Google Earth

3.2. Planos proyectados y construcción

A continuación se muestra información correspondiente a planos, construcción y modelación física de la presa Sabana Yegua y de sus componentes. El modelo físico de la presa Sabana Yegua se hizo a escala reducida a 1:60.



Esquema 1. Vista de planta - vertedero de servicio de la Presa Sabana Yegua

Fuente: Universidad de Piura, 2011

El canal de ingreso al vertedero, el vertedero de servicio y la poza disipadora se construyen en la margen izquierda de la presa Sabana Yegua (Foto 1).



Foto 1. Construcción del vertedero de servicio de la Presa Sabana Yegua

Fuente: Integral Ingeniería de Supervisión S.A.

El canal de ingreso conecta el embalse con el vertedero, permitiendo una mejora en las características de las líneas de corriente, es decir disminuyendo las ondas cruzadas en el vertedero (Foto 2).



Foto 2. Modelo física del vertedero de servicio de la Presa Sabana Yegua
Fuente: Universidad de Piura, 2011

Luego del canal de ingreso, continúa el vertedero de servicio. El vertedero consiste en dos tramos; el primero, con una pendiente fuerte de 40 %, cuyo ancho varía entre el rango de 60 y 30 m (Foto 3); y el segundo; con una pendiente suave de 1.5%, el cual su ancho es uniforme e igual a 30 m (Foto 4).



Foto 3. Vista del vertedero de servicio hacia aguas abajo
Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Republica Dominicana, 2012

En la construcción del segundo tramo del vertedero de servicio se observa la casi horizontalidad del mismo, en la vista de fondo se observa la zona donde será construida la poza disipadora original (Foto 4). Se realizó su modelación física (Foto 5).



Foto 4. Construcción del vertedero de servicio - vista hacia aguas abajo
Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, República Dominicana, 2012



Foto 5. Vertedero de servicio y poza disipadora original – Modelo físico
Fuente: Universidad de Piura, 2011

Se muestra el plano de la vista de planta de la poza disipadora original de la presa Sabana Yegua (Esquema 2), la construcción de la misma (Foto 6) y su representación en el modelo físico (Foto 7).

Seguidamente se muestra un panorama general de la zona donde será construido el canal de ingreso, el vertedero de servicio, la poza disipadora, el canal de salida y el cauce del río Yaque del Sur (Foto 8). Así mismo la vista hacia aguas abajo del modelo físico del cauce del río Yaque del Sur (Foto 9).

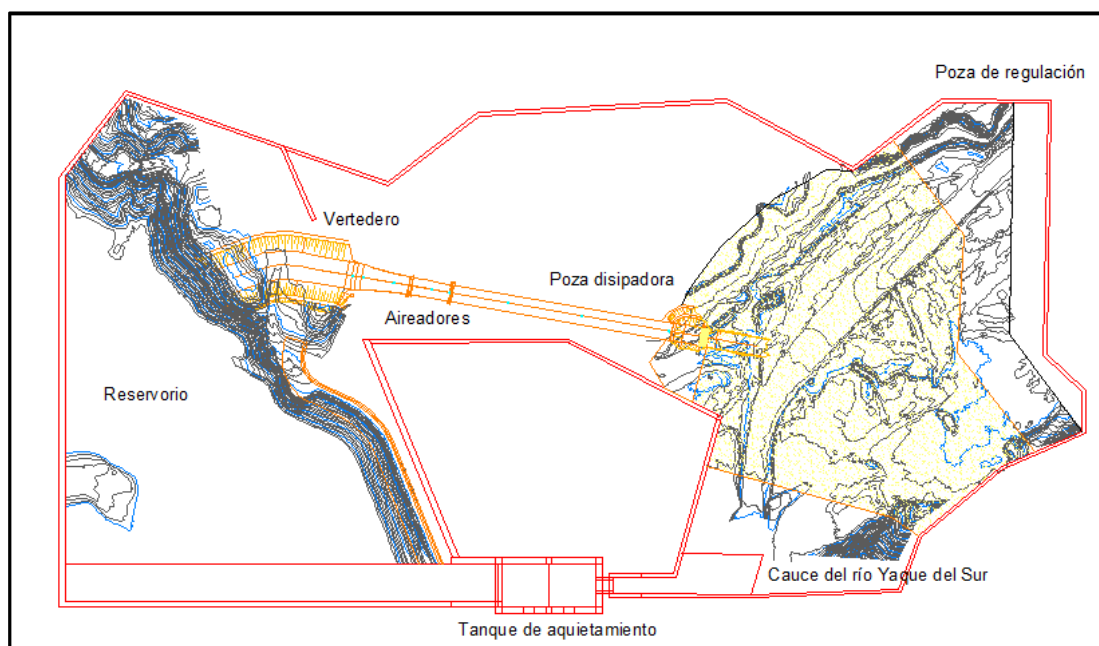


Foto 8. Vertedero de servicio y poza disipadora original de la Presa Sabana Yegua
Fuente: Integral Ingeniería de Supervisión S.A.



Foto 9. Cauce río Yaque del Sur - Modelo físico
Fuente: Universidad de Piura, 2011

Se muestran los límites del modelo físico, espacio en el cuál se construirán las estructuras hidráulicas a la escala reducida 1:60 (Esquema 3). Las estructuras representadas en el modelo físico son: el reservorio, canal de ingreso, vertedero de servicio, poza disipadora y una parte del cauce del río Yaque del Sur.

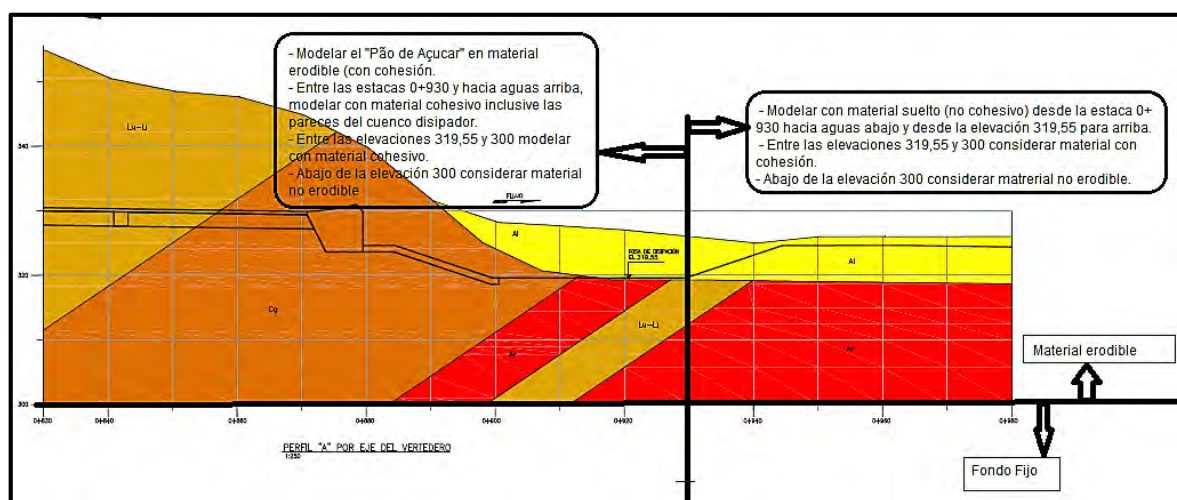


Esquema 3. Límites del Modelo físico
Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.3. Perfil geológico en la zona de la poza disipadora original - Intertechne

Es muy importante tener en cuenta las condiciones geológicas a las que están sujetas la construcción del vertedero de servicio, de la poza disipadora y del cauce del río Yaque del Sur. Los estudios geológicos es un factor condicionante muy fuerte en la toma de decisiones. En el prototipo, la poza disipadora estará construida sobre un perfilamiento del suelo mismo, esta a su vez está ubicada sobre un macizo rocoso de mala calidad.

El macizo rocoso empieza a partir de la cota 320 m.s.n.m. hasta la cota 300 m.s.n.m., por debajo de la cota 300 m.s.n.m. es fondo fijo, de material no erosionable, roca de muy buena calidad. Por encima del macizo rocoso descansa una capa de aproximadamente 6 m de material suelto no cohesivo. Este material suelto no cohesivo conforma todo el cauce del río Yaque del Sur (Universidad de Piura, 2011).

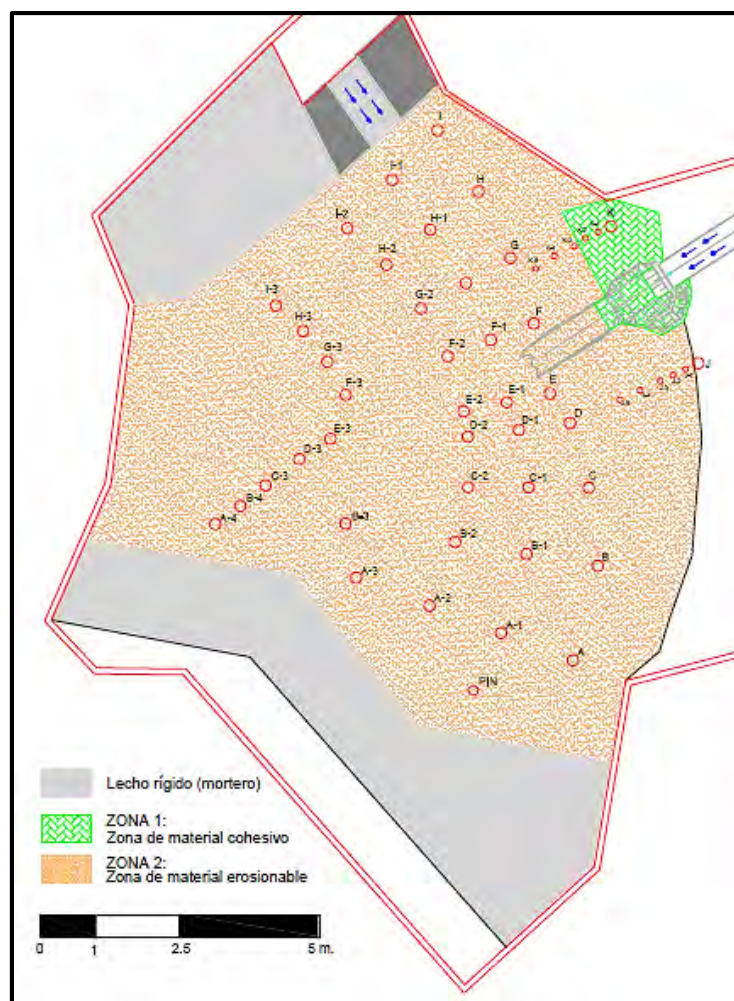


Esquema 4. Perfil geológico donde se ubica la poza disipadora original
Fuente: Universidad de Piura, 2011

En el prototipo, el cauce está conformado por material aluvial y por material suelto. Así mismo, la poza disipadora estará construida sobre un perfilamiento del suelo mismo, esta a su vez estaría ubicada sobre un macizo rocoso de mala calidad.

En la modelación física, las estructuras hidráulicas y el suelo, en su interacción con el agua deberán reflejarse representando fielmente las características de la realidad. En la presa Sabana Yegua y sus componentes es muy importante encontrar relaciones de similitud en cuanto al estudio del tipo de geomorfología. Para la conformación del cauce en el modelo físico, se ha tenido que representar a escala con un material no cohesivo y granular con ciertas características granulométricas muy parecidas al prototipo. Estas características conllevan a que el instituto de hidráulica investigue similitudes que represente exactamente la realidad. Es por ello que la conformación de la poza disipadora se representó en el modelo físico con un material que no sea suelto como el material usado en el cauce, ni resistente como el mortero. Se utilizó una mezcla yeso-arena en proporción 1:4, de esta manera se representa en el modelo la resistencia y el grado de cohesión del macizo rocoso.

En el Esquema 5, se presenta las zonas en las que se sitúa la poza disipadora y el cauce del río Yaque del Sur. La zona de material cohesivo corresponde al área de color verde, así mismo la zona de material erosionable corresponde al área de color naranja.



Esquema 5. Zonas del cauce del río Yaque del Sur y de la poza disipadora original

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.4. Caudales de estudio

La ampliación del embalse de Sabana Yegua implica la construcción de un vertedero de servicio, el cual será modelado a escala reducida y estudiado para evaluar su capacidad de evacuación. Las estructuras están diseñadas para soportar el caudal máximo probable (CMP) de 3 342 m³/s. No obstante, la finalidad del modelo no solamente es comprobar la capacidad máxima sino estudiar un conjunto de caudales representativos para poder evaluar las estructuras durante su operación normal, estos caudales son de 85, 220, 500, 1144 y 2318 m³/s (*Universidad de Piura, 2011*).

La presa Sabana Yegua contempla en su diseño una salida de fondo que proviene del desfogue de las estructuras de casa de máquinas, de las válvulas de descarga y de los desagües de fondo, el cual evacuará en conjunto 640 m³/s hacia el río Yaque del Sur.

Por lo tanto, todos los caudales de evacuación del vertedero de servicio, se estudiarán en paralelo con el caudal de la salida de fondo de la presa (caudal hacia el río Yaque del Sur). A continuación se muestra un cuadro resumen de lo que sería los caudales de estudio en general (Tabla 2).

Tabla 2. Caudales de estudio

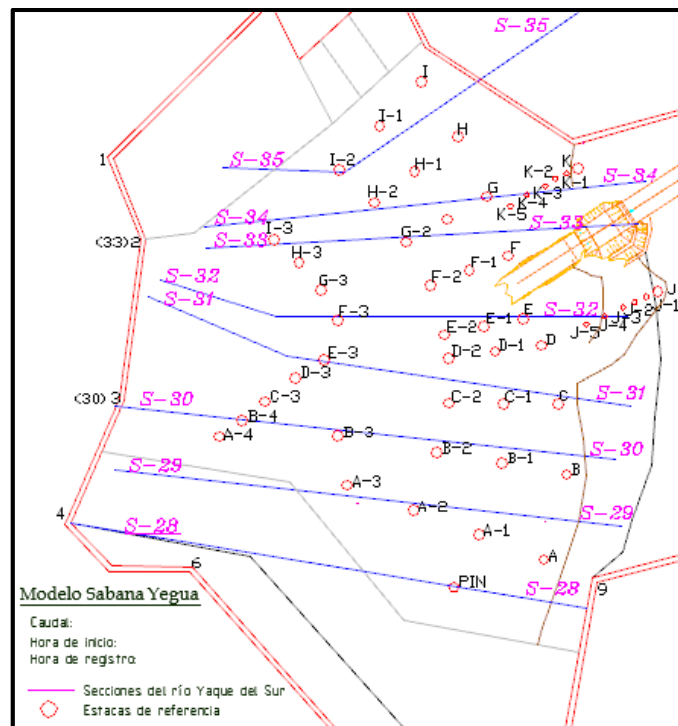
Caudal total (m ³ /s)	Caudal vertedero Presa Sabana Yegua	Caudal río Yaque del Sur (m ³ /s)
725	85	640
860	220	640
1140	500	640
1784	1144	640
2958	2318	640
3982	3342	640

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.5. Secciones de control

En la zona del cauce del río, se establecieron secciones para el control del nivel de restitución del agua para los caudales de estudio totales, tanto del vertedero de servicio como del río. Así mismo la elevación del cauce aguas abajo del vertedero.

En el Esquema 6, se puede observar las secciones de control del cauce del río Yaque del Sur. En efecto, para el desarrollo de la presente Tesis se ha tomado la sección S-33 para el control de los niveles de restitución en el cauce. Por ello, La Tabla 3 muestra las cotas de restitución en el cauce para distintos caudales en la Sección 33.



Esquema 6. Secciones de control en el cauce
 Fuente: Universidad de Piura, 2011



Foto 10. Vista desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce del río Yaque del Sur
 Fuente: Universidad de Piura, 2011

Tabla 3. Cota de restitución en la Sección 33

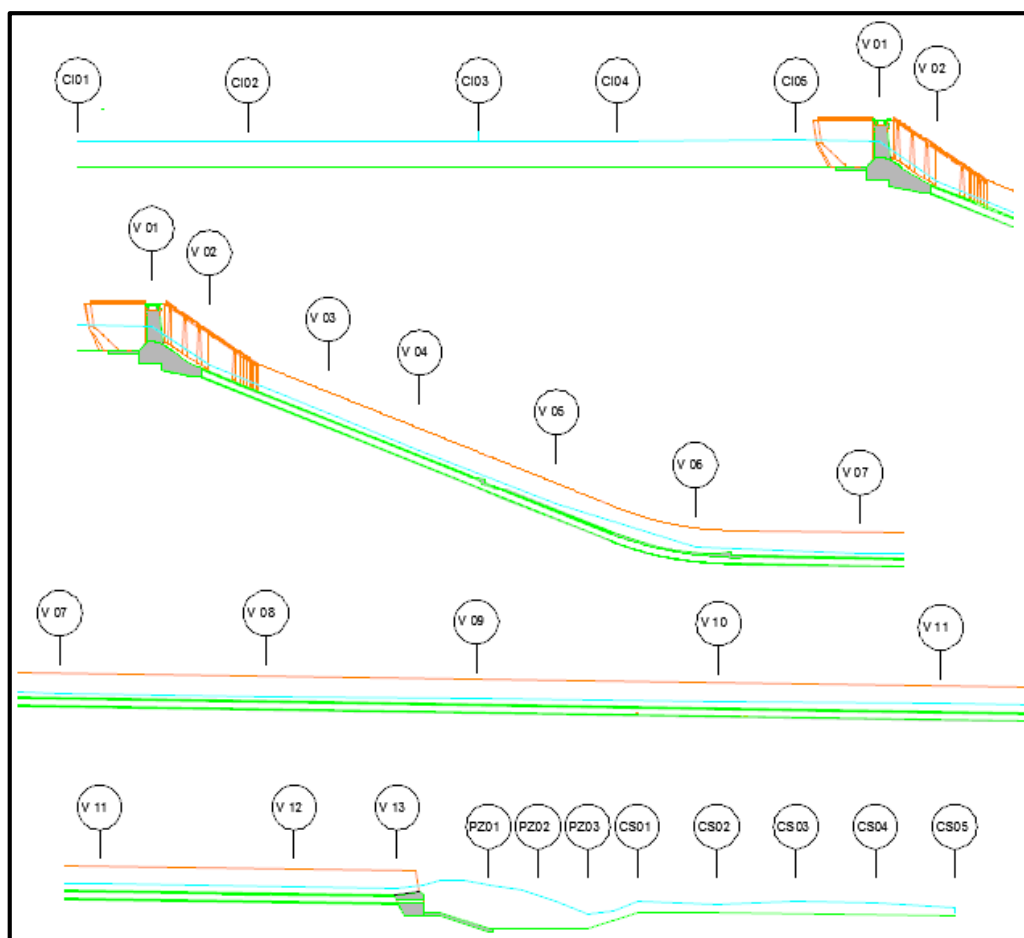
Curva de gasto - elevación aguas abajo - Sección 33			
Caudal (m ³ /s)	Elevación (m.s.n.m)	Caudal (m ³ /s)	Elevación (m.s.n.m)
12	322.67	1144	327.04
21	322.88	1200	327.11
25	322.95	1500	327.45
60	323.98	1800	327.83
85	323.61	2100	328.17
100	323.73	2284	328.43
220	324.47	2318	328.46
300	324.85	2400	328.53
500	325.82	2700	328.74
600	326.1	3000	328.9
900	326.67	3300	329.06
1100	326.99	3342	329.08

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.6. Resultados de los ensayos realizados en el modelo – Diseño original

3.6.1. Características

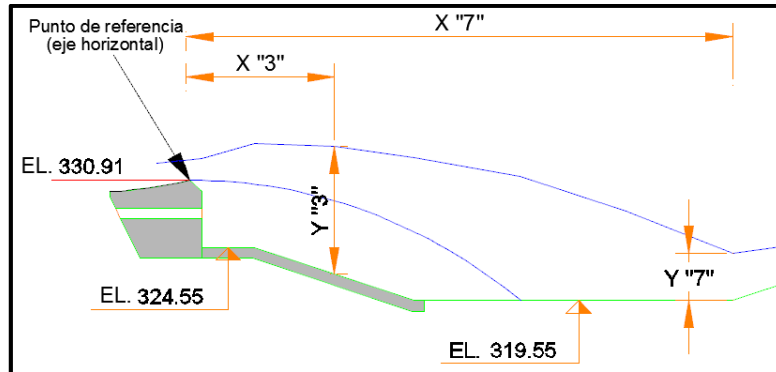
Actualmente el vertedero tiene el perfil longitudinal mostrado en el Esquema 7, el cual para su estudio más detallado se ha dividido en secciones de la siguiente manera: 5 secciones denominadas “CI” en el canal de ingreso, 13 secciones denominadas “V” a partir del eje del vertedero de servicio hasta el salto de ski, 3 secciones denominadas “PZ” en la poza disipadora original y 5 secciones en el canal de salida cuya denominación es “CS”.



Esquema 7. Ubicación de las secciones de medición en el vertedero

Fuente: Universidad de Piura, 2011

Para poder estudiar la trayectoria del chorro, es decir, longitud y altura, se identificó un punto de referencia tanto en el eje horizontal y vertical. Por ello, el Esquema 8 muestra el punto de referencia del eje horizontal, que es el punto más elevado del salto de ski y el vertical, que es donde coinciden las divisiones hechas en el eje horizontal con la estructura de disipación.



Esquema 8. Ejes de referencia para representar el comportamiento del chorro – poza disipadora original

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.6.2. Estudios realizados

En el modelo físico, se representó la poza disipadora original perfilada a nivel de suelo y el canal de salida (Foto 11). Luego, conforme se ensayaba en forma progresiva los caudales de estudio: 85, 220, 500, 1144, 2318 y 3342 m³/s, se podía observar que la poza no funcionaba para caudales superiores a 1000 m³/s, ya que el flujo destruyó el talud final de la misma, no permitía la retención de agua en la poza y por ende una disipación baja de energía (Foto 12). Asimismo el canal de salida se erosionó profunda y lateralmente.

Por ello, es importante conocer las características del flujo a la salida del vertedero de servicio porque de acuerdo a su comportamiento se ubicará el lugar de máxima erosión y permitirá identificar las posibles zonas de socavación en las estructuras. Para un mejor detalle de los ensayos realizados, revisar el Anexo A y el Plano H-1 del Anexo H.



Foto 11. Vertedero de servicio y poza disipadora original de la Presa Sabana Yegua – Modelo físico

Fuente: Universidad de Piura, 2011



Foto 12. Salto de ski a la salida del vertedero de servicio – poza disipadora

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.6.2.1. Niveles de agua en el vertedero de servicio

Se muestra un cuadro resumen de los niveles promedio de agua en el vertedero de servicio de todos los caudales de estudios, el cual para efectos de interés de la presente tesis se ha tomado información desde la sección 11 (V - 11) del vertedero de servicio y las secciones a la salida de la poza de salida (Tabla 4).

Tabla 4. Niveles de agua-caudal 220 m³/s, 500 m³/s, 1144 m³/s, 2318 m³/s y 3342 m³/s

Proyecto Sabana Yegua	Niveles de agua promedio en prototipo (m)							
	Salida del vertedero de servicio			Salida de la poza disipadora original				
	Sección			Sección				
Caudal - prototipo	V - 11	V - 12	V - 13	CS - 1	CS - 2	CS - 3	CS - 4	CS - 5
220 m ³ /s	1.27	1.20	1.38	2.11	1.72	1.91	2.41	2.88
500 m ³ /s	1.34	1.58	1.78	3.51	2.74	2.78	2.75	2.74
1144 m ³ /s	1.93	2.00	2.11	4.56	3.42	3.16	3.40	3.13
2318 m ³ /s	3.10	3.24	3.40	7.92	8.88	4.44	3.36	3.72
3342 m ³ /s	4.38	4.25	4.70	7.80	4.20	4.20	3.90	3.60

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.6.2.2. Velocidades en el vertedero de servicio

Se muestra un cuadro resumen de las velocidades promedio del flujo a la salida del vertedero de servicio de todos los caudales de estudios, el cual para efectos de interés de la presente tesis se ha tomado información desde la sección 11 (V - 11) del vertedero de servicio y las secciones a la salida de la poza de salida (Tabla 5).

Tabla 5. Velocidades promedios-caudal 220 m³/s, 500 m³/s, 1144 m³/s, 2318 m³/s y 3342 m³/s

Proyecto Sabana Yegua	Velocidad promedio en prototipo (m/s)							
	Salida del vertedero de servicio			Salida de la poza disipadora original				
	Sección			Sección				
Caudal - prototipo	V - 11	V - 12	V - 13	CS - 1	CS - 2	CS - 3	CS - 4	CS - 5
220 m ³ /s	5.77	6.11	5.52	2.96	3.71	3.31	2.56	2.10
500 m ³ /s	12.40	10.52	9.79	3.83	5.05	5.00	5.02	5.06
1144 m ³ /s	19.74	19.03	18.06	5.64	8.69	9.64	9.12	9.95
2318 m ³ /s	25.01	23.85	22.84	6.76	5.94	13.50	18.83	16.79
3342 m ³ /s	25.43	26.22	23.90	9.80	20.78	20.78	22.64	24.82

Fuente: Universidad de Piura, 2011

3.6.2.3. Salto de ski

Para determinar la forma y trayectoria del chorro a la salida del vertedero de servicio, salto de ski, se ha ubicado 5 puntos de medición a lo ancho del vertedero de servicio (Tabla 6).

Tabla 6. Longitud externa del chorro-caudal 220 m³/s, 500 m³/s, 1144 m³/s, 2318 m³/s y 3342 m³/s

Proyecto Sabana Yegua		Longitud de chorro (modelo)					Longitud de chorro (prototipo)				
		MD (cm)		Eje (cm)	MI (cm)		MD (m)		Eje (m)	MI (m)	
Caudal (prototipo)	Zona	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
220 m ³ /s	Externa	-	-	18.00	-	-	-	-	10.80	-	-
500 m ³ /s	Externa	16.00	35.00	55.00	42.00	24.00	9.60	21.00	33.00	25.20	14.40
	Interna	8.00	-	-	-	11.00	4.80	-	-	-	6.60
1144 m ³ /s	Externa	63.00	71.00	85.00	71.00	56.00	37.80	42.60	51.00	42.60	33.60
	Interna	30.00	50.00	52.00	50.00	38.00	18.00	30.00	31.20	30.00	22.80
2318 m ³ /s	Externa	72.00	85.00	80.00	85.00	70.00	43.20	51.00	48.00	51.00	42.00
	Interna	58.00	80.00	89.00	80.00	58.00	34.80	48.00	53.40	48.00	34.80
3342 m ³ /s	Externa	100.00	115.00	138.00	124.00	100.00	60.00	69.00	82.80	74.40	60.00
	Interna	53.00	-	80.00	-	63.00	31.80	-	48.00	-	37.80

Fuente: Universidad de Piura, 2011

De los estudios realizados en la modelación física del proyecto Sabana Yegua, se ha extraído información gráfica referida al comportamiento y trayectoria del chorro a la salida del vertedero de servicio para todos los caudales de estudio, tales como:

- Caudal 220 m³/s

El chorro impacta dentro la poza disipadora original formando un resalto hidráulico; sin embargo, el talud de salida de la poza y el canal de salida se ven afectados por la erosión (Foto 13).

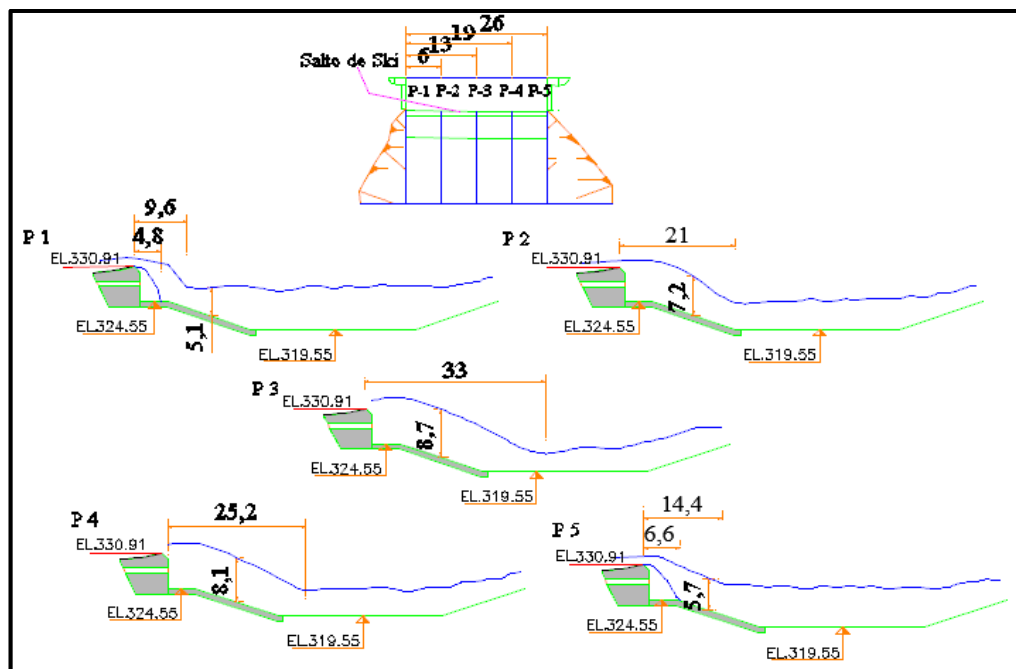


Foto 13. Modelo físico - comportamiento del chorro para caudal 220 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

- Caudal 500 m³/s

El chorro impacta sobre la poza disipadora original, pero no puede ser retenida en la misma, por lo tanto no se forma un resalto hidráulico (Esquema 9). Esto ocasiona una baja disipación de la energía. Así mismo se ha registrado vórtices a la salida de la poza disipadora, ocasionado erosiones (Foto 14).



Esquema 9. Comportamiento del chorro para caudal 500 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

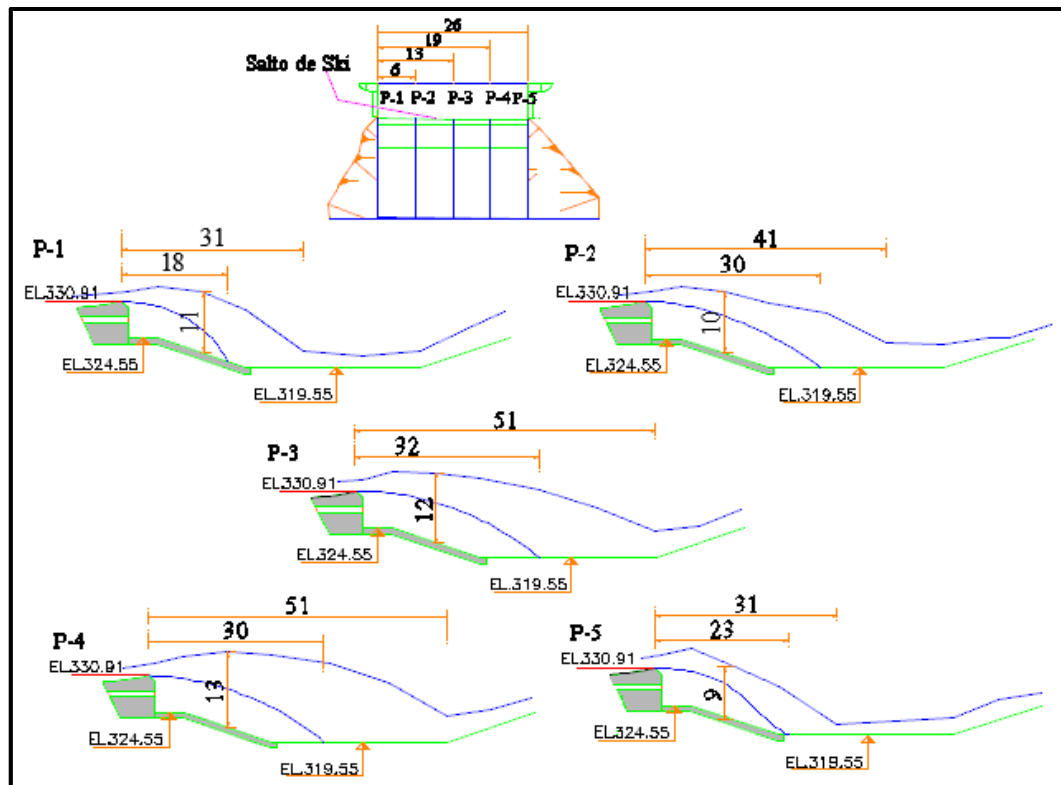


Foto 14. Modelo físico - comportamiento del chorro para caudal 500 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

- Caudal 1144 m³/s

El chorro impactaba totalmente en la base de la poza disipadora y por lo tanto no se disipaba totalmente la energía, destruyendo el talud y el canal de salida de la misma (Foto 15).



Esquema 10. Comportamiento del chorro para caudal 1144 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

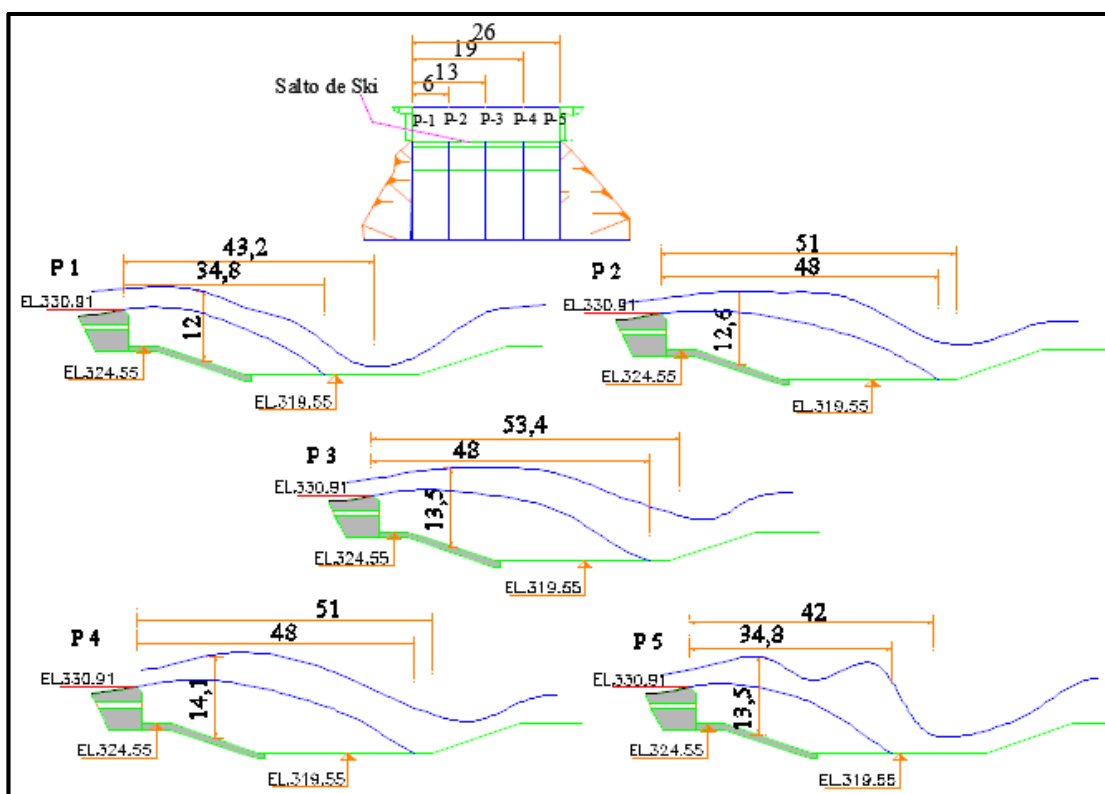


Foto 15. Modelo físico - comportamiento del chorro para caudal 1144 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

- Caudal 2318 m³/s

Se describe el comportamiento del flujo en el modelo físico, para el caudal 2318 m³/s a la salida del vertedero de servicio (Esquema 11). La fuerza y velocidad del chorro imposibilita la funcionalidad de la poza disipadora (Foto 16).



Esquema 11. Comportamiento del chorro para caudal 2318 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

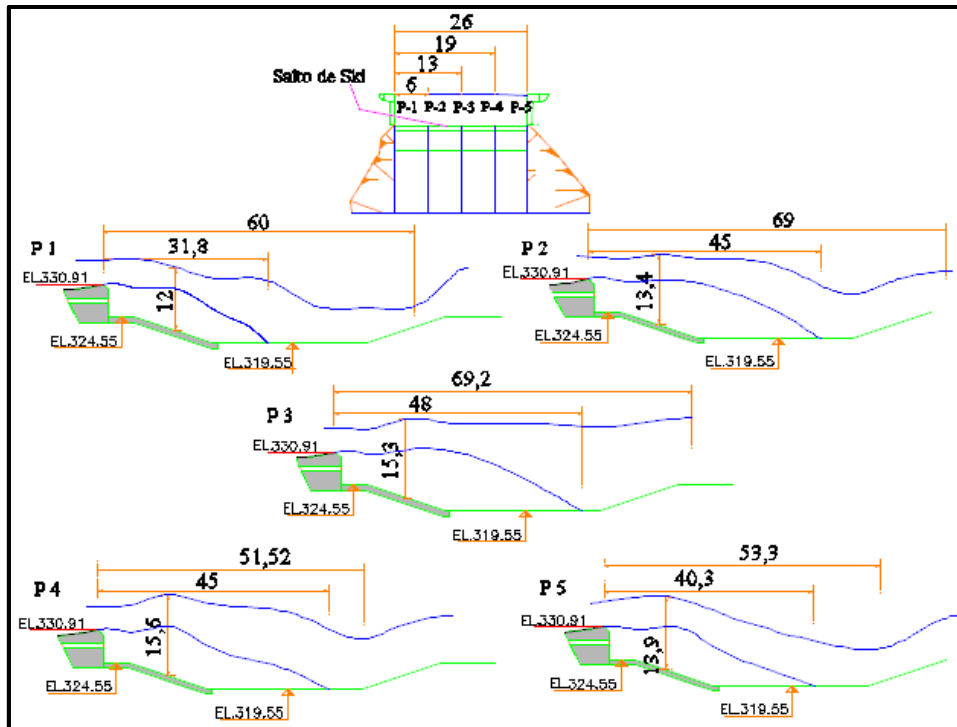


Foto 16. Modelo físico - comportamiento del chorro para caudal 2318 m³/s

Fuente: Universidad de Piura, 2011

- Caudal 3342 m³/s

Se observa las características y el comportamiento del flujo en el modelo físico (Esquema12). Se puede apreciar la gran erosión generada por el impacto del chorro en la zona del lecho del río (Foto17).



Esquema 12. Comportamiento del chorro para caudal 3342 m³/s
Fuente: Universidad de Piura, 2011



Foto 17. Modelo físico-comportamiento del chorro para caudal 3342 m³/s
Fuente: Universidad de Piura, 2011

Capítulo 4

Investigación adicional y complementaria: Alternativas propuestas

Para disipar la energía cinética del flujo se ha realizado una investigación adicional que consiste en la propuesta de 5 alternativas de diseño, los cuales se centran en los caudales comprendidos entre 1000 m³/s y 3342 m³/s ya que la poza disipadora original no funcionaba bien para esos caudales.

Para el planteamiento y diseño de las alternativas, se utilizó bibliografía, del cual la deducción, condición, metodología y planteamiento de sus fórmulas no se ajustaba 100% a lo que se quería diseñar, sin embargo sirvió como base de información para plantear las alternativas propuestas.

La investigación se planificó en 2 grandes etapas:

Primera etapa

Probar diseños alternativos tomando como referencia la bibliografía que permitan disipar la energía cinética del vertedero de servicio, sin necesariamente respetar las cotas de restitución del cauce.

Las alternativas propuestas en esta etapa están enfocadas solo en la disipación de energía como materia principal de enfoque, sin tomar en cuenta la importancia de considerar las cotas de restitución del cauce, lo que ocasionaría problemas muy severos de erosiones a la salida de la poza disipadora y aguas abajo en el cauce. Esto se debe a que la conjugada de salida del resalto hidráulico es mayor a la cota de restitución del cauce.

Segunda etapa

Una correcta y acertada alternativa de diseño de disipación de energía se logra cuando éste permite una disipación óptima, respetando las cotas de restitución, en donde la conjugada de salida del resalto hidráulico coincida con la cota de restitución del cauce.

Esta etapa tiene como objetivo buscar la solución correcta y acertada al problema real de disipación de energía de la Presa Sabana Yegua, además de solucionar el problema de funcionalidad de la poza disipadora.

Primera etapa

4.1. Alternativa 1: Poza profunda con dados disipadores.

Esta alternativa se centró en la disipación de energía para el caudal de 3342 m³/s. Consiste en profundizar la poza disipadora a una altura que propone el diseño, a su vez amortiguar la velocidad del flujo mediante dados disipadores y uniformizar la salida del flujo por medio del umbral terminal. Para un mejor detalle, revisar el Plano I-1, Anexo I.

4.1.1. Análisis de diseño – cálculos

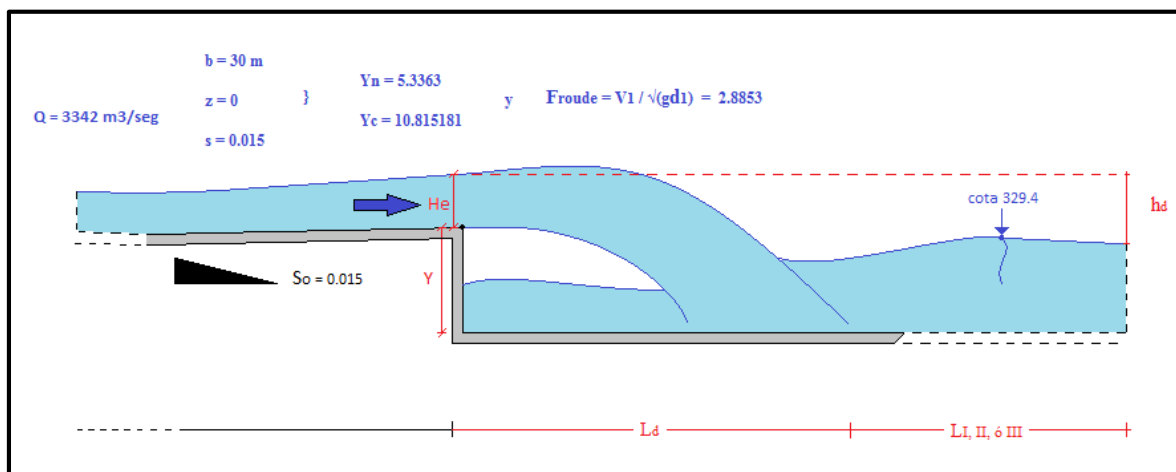


Figura 10. Poza disipadora – Alternativa 1
Fuente: Elaboración propia

En el tramo final del vertedero:

Para $Q = 3342 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 30\text{m}$, $z = 0$, $s = 0.015$

$$Y_n = 5.34, \quad Y_c = 10.82, \quad \text{Froude} = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1}} = 2.89$$

$$q = 111.4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$$

$$H_e = 5.34$$

$$(\text{cota } 330.91 + 5.34) - (\text{cota } 329.42) = 6.83 \dots \dots \dots \text{caída del nivel de descarga.}$$

$$\text{Por lo tanto, } H_t = 6.83 \text{ m}$$

Como asumimos que no habrá pérdida de energía (rozamiento) entre la salida del vertedero y el punto donde el chorro choca con el piso del estanque, entonces $\alpha = 0$.

$$H_t = \frac{2 \cdot q^2}{(1-\alpha)gd_2^2 \left(\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gd_2^3}} - 1 \right)^2} + \frac{d_2}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gd_2^3}} - 1 \right) - d_2$$

Del cual diferimos que: para “ $q = 111.4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ y $H_t = 6.83$ ” $\rightarrow d_2 \approx 9.39 \text{ m}$.

Esto hace que coloquemos el piso de la poza a una cota $329.42 - 9.39 = \text{cota } 320.03$

$$Y = \text{cota } 330.91 - \text{cota } 320.03$$

$$Y = 10.88 \text{ m, el cual su número de caída será: } D = \frac{q^2}{gY^3} = 0.98$$

$$\text{Para } D = 0.98 \text{ y según la Figura G-3, del Anexo G: } \frac{d_2}{Y} \approx 1.66$$

$$\text{Como } \frac{d_2}{Y} \approx 1.66 \rightarrow d_2 = 10.88 (1.66) \rightarrow d_2 = 18.05 \text{ m}$$

$$\rightarrow \text{Por lo tanto la cota de la poza disipadora será: } \text{cota } 329.42 - 18.05 \approx \text{cota } 311.37$$

Para el 2º tanteo, el valor ajustado de Y:

$$\text{Cota } 330.91 - \text{cota } 311.37 \rightarrow Y = 19.54 \text{ y } D = \frac{111.4^2}{9.81 \cdot 19.54^3} = 0.17$$

$$\text{Luego para } D = 0.17 \text{ y } \frac{h_d}{H_e} = \frac{6.83}{5.34} = 1.28$$

$$\text{De la Figura G-3, del Anexo G: } \frac{L_d}{Y} \approx 2.79 \rightarrow L_d \approx 54.59 \text{ m}$$

Según las pruebas en campo para un caudal “3342 m³/s”, la longitud del chorro en promedio es: $L = 75.4 \text{ m}$, por lo tanto “ $L_d = 75 \text{ m}$ ”.

$$d_1 \approx 5.85$$

$$Fr_1 \approx 2.51$$

$$\text{Además } d_2 \approx 18.05$$



Según el número de Froud, se utilizaría el estanque tipo I, en el cual haremos uso de bloques amortiguadores y umbrales.

De la Figura G-4, del Anexo G:

$$\frac{L_l}{d_2} \approx 4.8 \rightarrow L_l \approx 86.64 \text{ m} \rightarrow “L_l = 85 \text{ m}”$$

Dados disipadores (Figura 11):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y_1	$d_1 = 1.2y_1$	$ls_1 = 0.3y_1$	$li_1 = 1.5y_1$	$a_1 = y_1$	$s_1 = a_1$
3342 m³/s	5.85 m	7 m	1.8 m	8.78 m	6 m	6 m

Umbral terminal (Figura 12):

Umbral terminal						
Caudal	Profundidad inicial	Profundidad secante	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho
	y_1	y_2	$u_1 = y_1$	$ls_1 = 0.06y_2$	$li_1 = 2y_1$	$a_1 = \text{ancho de poza}$
3342 m³/s	5.85 m	18.1 m	5.85 m	1.1 m	11.7 m	30 m

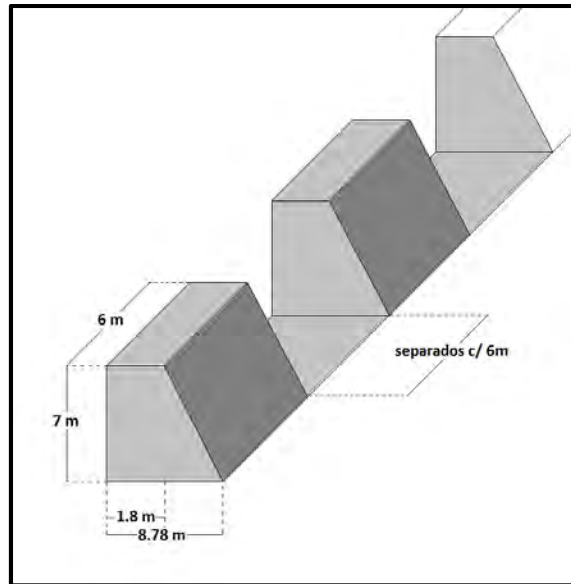


Figura 11. Dados disipadores – Alternativa 1
Fuente: Elaboración propia

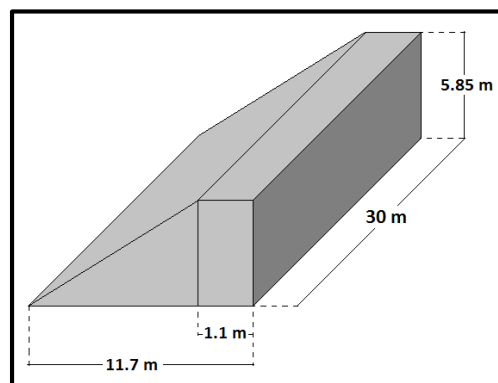
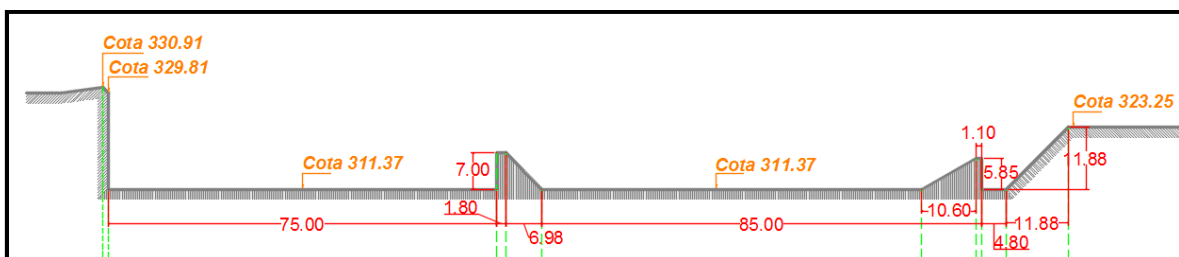
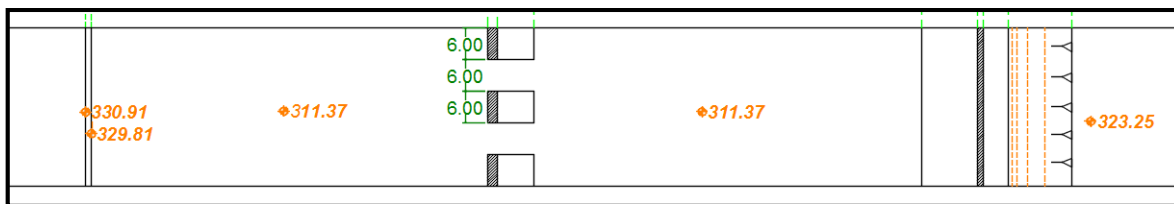


Figura 12. Umbral terminal – Alternativa 1
Fuente: Elaboración propia

Se muestra el diseño y geometría, tanto de la vista de perfil (Esquema 13) como la vista de planta de la Alternativa 1 (Esquema 14), en el cuál se observa la ubicación de los dados disipadores y el umbral terminal, así mismo para un mejor detalle de las dimensiones de la poza disipadora revisar el Esquema 15 y Esquema 16.

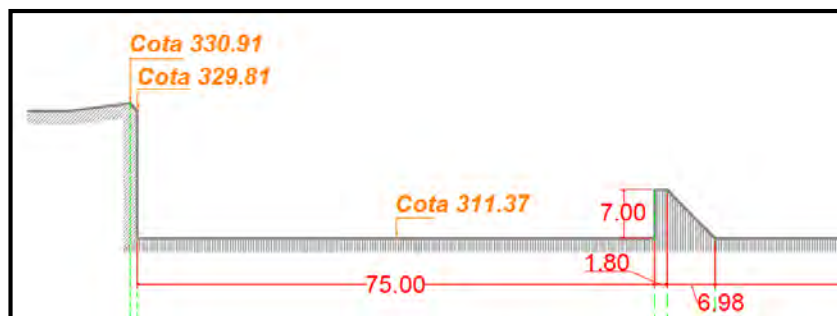


Esquema 13. Vista perfil poza disipadora – Alternativa 1
Fuente: Elaboración propia



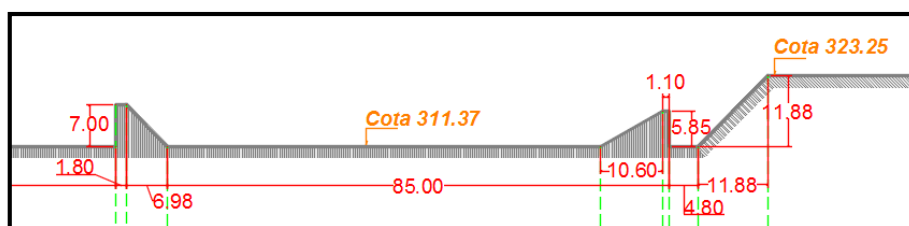
Esquema 14. Vista de planta poza disipadora – Alternativa 1

Fuente: Elaboración propia



Esquema 15. Detalles de la parte inicial de la poza disipadora – Alternativa 1

Fuente: Elaboración propia



Esquema 16. Detalles de la parte final de la poza disipadora – Alternativa 1

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Resultados

4.1.2.1. Caudal 3342 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 7). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 8).

Según los resultados, se ha obtenido velocidades menores con el diseño de la Alternativa 1, pues en su recorrido sobre la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al resalto hidráulico que se forma dentro de la misma (Anexo B). En el interior de la poza se observa el cambio brusco de velocidades del flujo, esto debido a que la disipación de energía se realiza a consecuencia de la turbulencia generada por los dados disipadores y al colchón amortiguador de agua (Esquema 17). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza e impacta en los dados, generando la turbulencia esperada (Esquema 18). Sin embargo, el nivel del tirante de salida de la poza disipadora es superior al nivel de restitución en el cauce.

Tabla 7. Velocidades del correntómetro, caudal 3342m³/s – Alternativa 1

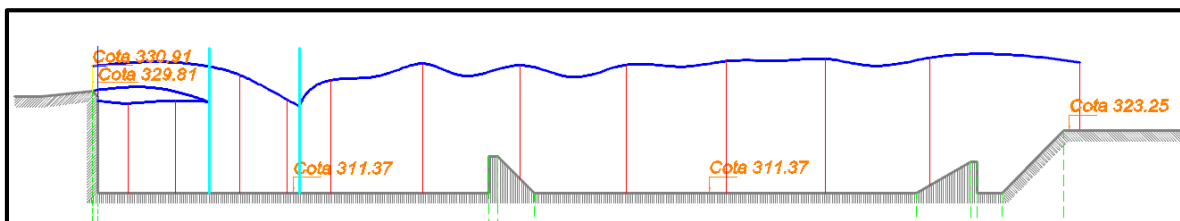
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
18.5 cm	7.93	8.18
14 cm	9.02	
7 cm	7.58	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	7.98	8.18
Centro	8.14	
Margen derecha	8.42	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Longitud del chorro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 1

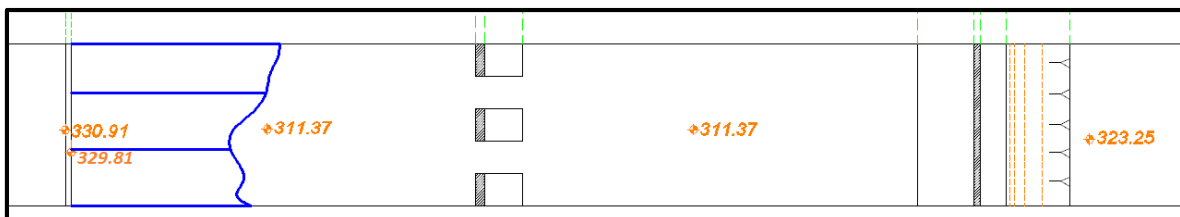
Longitud del chorro			
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	9	19.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
38.7	36.18	29.58	33.36

Fuente: Elaboración propia



Esquema 17. Desarrollo del flujo en la poza disipadora – Alternativa 1

Fuente: Elaboración propia



Esquema 18. Longitud del chorro en la poza disipadora – Alternativa 1

Fuente: Elaboración propia

4.2. Alternativa 2: Poza profunda escalonada sin dados disipadores

Esta alternativa se ha diseñado para la disipación de energía de los caudales 220, 500, 1144, 2318 y 3342 m³/s. Consiste en profundizar la poza disipadora a las alturas que propone el diseño para cada uno de sus caudales de estudio. Esta alternativa propone un diseño unificado para todos los caudales de estudio, a manera de un diseño de poza disipadora escalonada sin dados disipadores. Para un mejor detalle, revisar el Plano J-01 del Anexo J.

4.2.1. Análisis de diseño – cálculos

Para el diseño de la poza disipadora, es necesario tener en cuenta la longitud promedio del chorro (Tabla 9) y las condiciones de salida del cauce para cada caudal de estudio (Tabla 10).

Características del flujo en el punto de salida del vertedero:

Tabla 9. Longitud chorro promedio – Diseño original

Longitud promedio del chorro - salida del vertedero - Diseño original	
Caudal (m ³ /s)	X máximo (m)
85	7.8
220	10.8
500	26.4
1144	41.5
2318	53.4
3342	75.4

Fuente: Universidad de Piura, 2011

Cotas de restitución en el cauce Sección - 33:

Tabla 10. Cota de restitución – Sección 33

Caudal río (m ³ /s)	Caudal vertedero (m ³ /s)	Caudal río+ vertedero (m ³ /s)	Cota de restitución Sec - 33 (m.s.n.m.)
640	220	860	326.6
640	500	1140	327.03
640	1144	1784	327.81
640	2318	2958	328.88
640	3342	3982	329.42

Fuente: Universidad de Piura, 2011

Caudal 220 m³/s, caída “h” = 8.23 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 326.6 m.s.n.m.

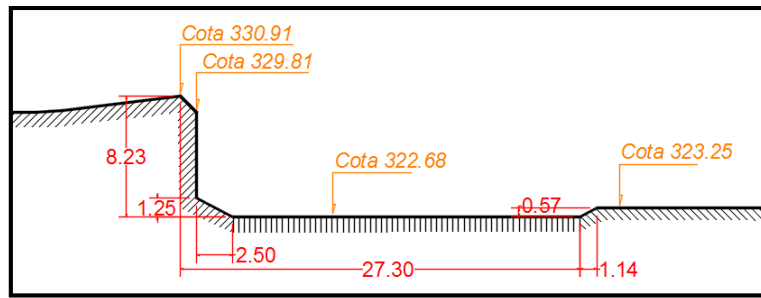
Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 322.68 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 0.57 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"L"	"L _{total} "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	5(y ₂ - y ₁)	L _d + L
7.33 m ³ /s*m	0.0098	0.62 m	3.92 m	10.8 m	16.5 m	27.3 m



Esquema 19. Poza disipadora, caudal 220 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Caudal 500 m³/s, caída “h” = 10.25 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 327.03 m.s.n.m.

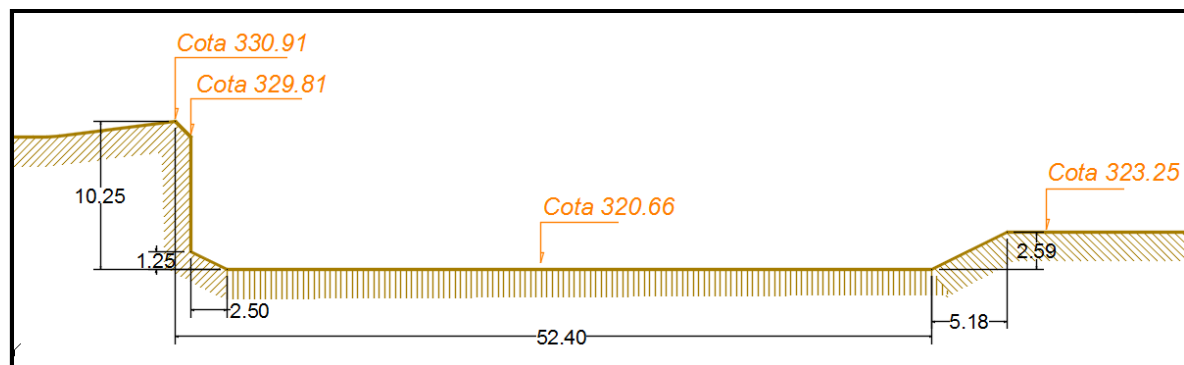
Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 320.66 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 2.59 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"L"	"L _{total} "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	5(y ₂ - y ₁)	L _d + L
16.67 m ³ /s*m	0.026	1.18 m	6.37 m	26.4 m	26 m	52.4 m



Esquema 20. Poza disipadora, caudal 500 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Caudal 1144 m³/s, caída “h” = 13.62 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 327.81 m.s.n.m.

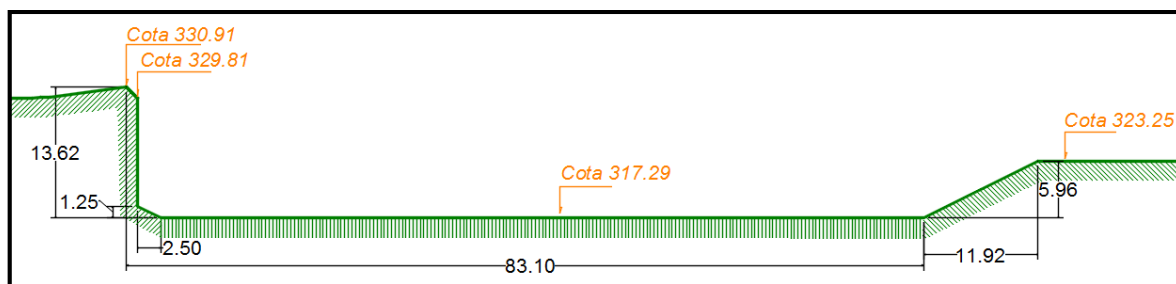
Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 317.29 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 5.96 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"L"	"L _{total} "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	5(y ₂ - y ₁)	L _d + L
38.13 m ³ /s*m	0.059	2.2 m	10.51 m	41.5 m	41.6 m	83.1 m



Esquema 21. Poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Caudal 2318 m³/s, caída “h” = 18.31 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 328.88 m.s.n.m.

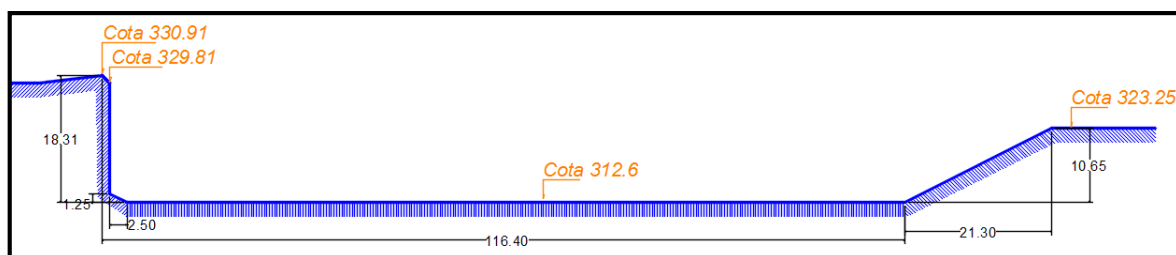
Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 312.6 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 10.65 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"L"	"L _{total} "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	5(y ₂ - y ₁)	L _d + L
77.27 m ³ /s*m	0.099	3.7 m	16.29 m	53.4 m	63 m	116.4 m



Esquema 22. Poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Caudal 3342 m³/s, caída “h” = 22.04 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 329.42 m.s.n.m.

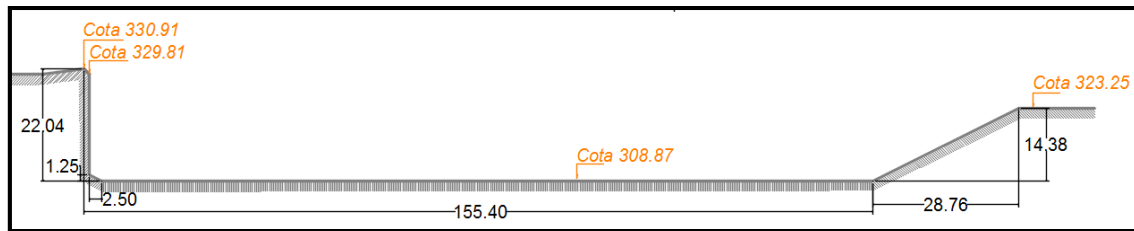
Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 308.87 m.s.n.m.

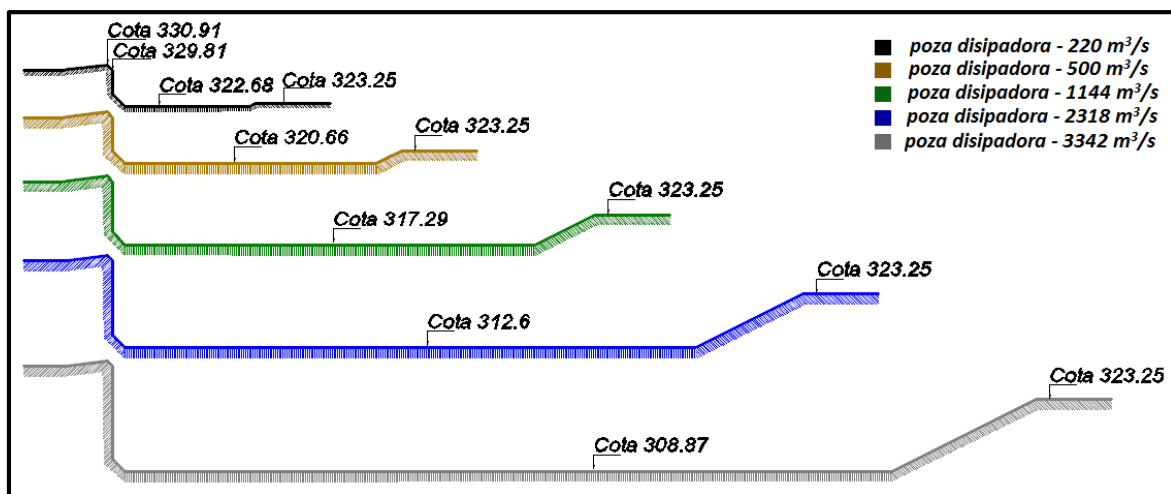
Profundidad de poza disipadora = 14.38 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"L"	"L _{total} "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	5(y ₂ - y ₁)	L _d + L
111.4 m ³ /s*m	0.1182	4.8 m	20.55 m	75.4 m	80 m	155.4 m



Esquema 23. Poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 2
Fuente: Elaboración propia

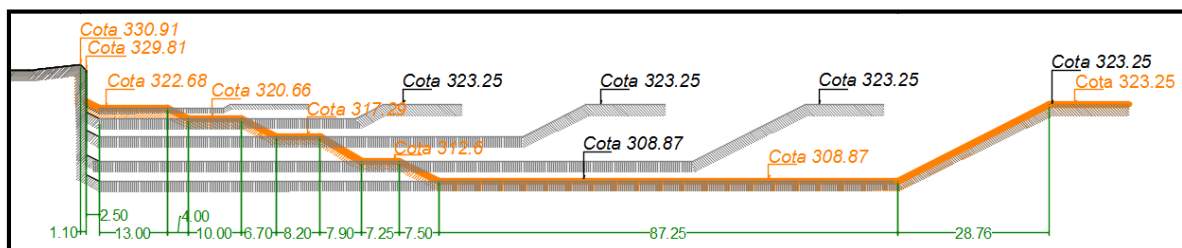
Según sea para cada caudal “ $Q = 3342, 2318, 1144, 500$ y $220 \text{ m}^3/\text{s}$ ”, se ha determinado su diseño correspondiente (Esquema 24).



Esquema 24. Poza disipadora, todos los caudales – Alternativa 2
Fuente: Elaboración propia

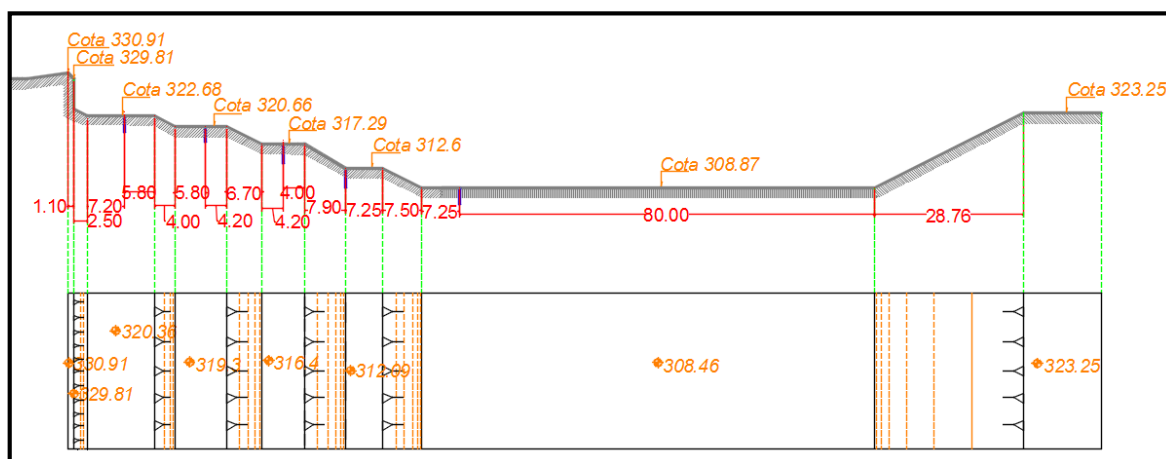
Las dimensiones del diseño de la poza disipadora y el “ L_d ” del chorro para el caudal de 3342 m³/s, envuelven las dimensiones de las pozas y las longitudes del chorro de los caudales menores. Es necesario resaltar que para el caudal de 3342 m³/s, la formación del resalto hidráulico se efectuará en las progresivas posteriores a “ L_d ”; las progresivas anteriores, es solo una dimensión complementaria de poca importancia (Figura 8). Por lo tanto, se aprovechará estas dimensiones complementarias para acoplar los diseños de pozas disipadoras de los caudales menores, lo cual generará ahorros en costos de excavación comparado al diseño de la poza para el caudal de 3342 m³/s.

Se unificará todos los diseños de pozas disipadoras de todos los caudales en un solo diseño (Esquema 25), de la siguiente forma:



Esquema 25. Unificación de poza disipadora, todos los caudales – Alternativa 2
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el diseño final de la Alternativa 2, por su geometría, tendrá un aspecto escalonado tanto en la vista de perfil como en la vista de planta (Esquema 26).



Esquema 26. Vista general del diseño final de poza disipadora, todos los caudales – Alternativa 2
Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Resultados

4.2.2.1. Caudal 220 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 11). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 12).

Según los resultados, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo C). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma (Esquema 27). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 28). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano J-02 del Anexo J.

Tabla 11. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 220 m³/s – Alternativa 2

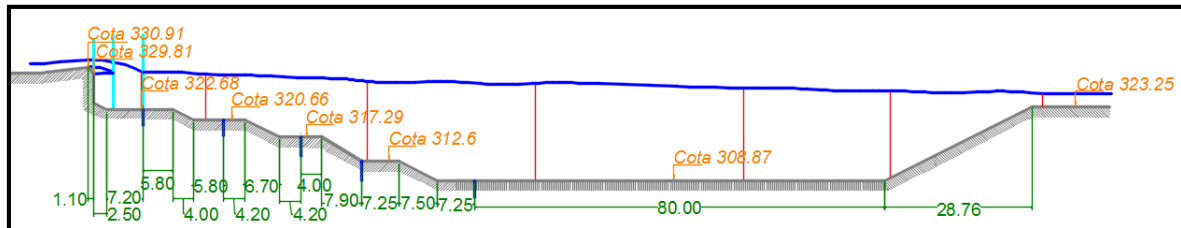
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
3 cm	3.02	3.02
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	2.85	3.02
Centro	3.17	
Margen derecha	3.03	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Longitud del chorro, caudal 220 m³/s – Alternativa 2

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	10.8	21.6	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
4.02	9.6	6.9	4.2

Fuente: Elaboración propia

Esquema 27. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 220 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

Esquema 28. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 220 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. Caudal 500 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 13). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 14).

Según los resultados, para el caudal de 500 m³/s, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo C). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma (Esquema 29). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 30). El desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora es tranquilo, esto debido a que la poza de disipación es de gran dimensión. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano J-02 del Anexo J.

Tabla 13. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Alternativa 2

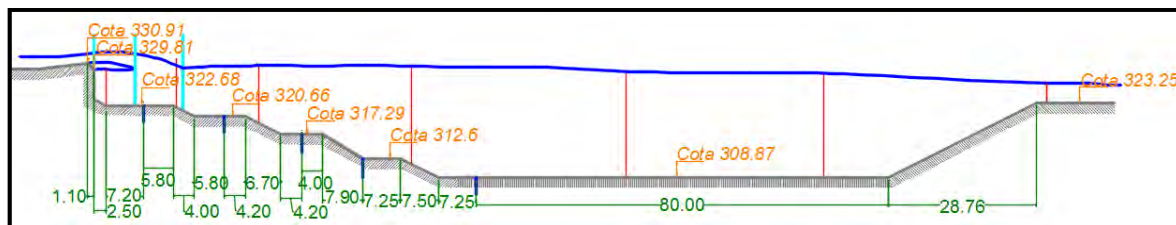
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
4.5 cm	4.57	4.57
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	4.06	4.57
Centro	4.47	
Margen derecha	5.18	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Longitud del chorro, caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Alternativa 2

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	12	24	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
11.4	17.4	13.2	10.2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 29. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 30. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. Caudal 1144 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 15). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 16).

Según los resultados, para el caudal de 1144 m³/s, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo C). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma (Esquema 31). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 32). Se aprecia que el desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora es ligeramente turbulento, esto debido a la formación del resalto hidráulico. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano J-03 del Anexo J.

Tabla 15. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 2

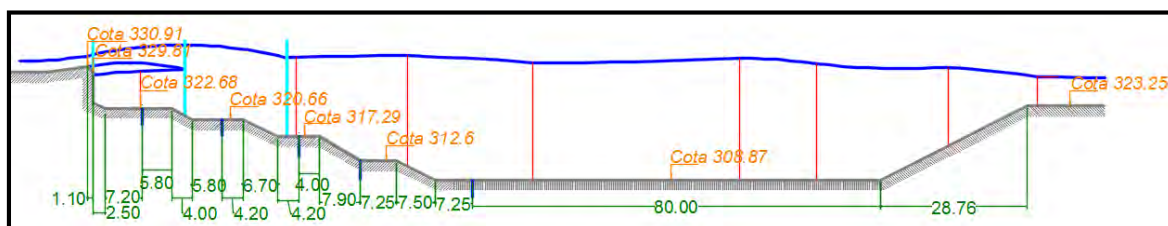
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
10 cm	6.53	
4.5 cm	4.57	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	6.50	6.76
Centro	6.84	
Margen derecha	6.93	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Longitud del chorro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 2

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	8.4	18	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
30	37.98	31.2	24.6

Fuente: Elaboración propia



Esquema 31. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 32. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.4. Caudal 2318 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 17). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 18).

Según los resultados, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo C). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma (Esquema 33). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 34). El desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora es turbulento, esto debido a la formación del resalto hidráulico. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano J-03 del Anexo J.

Tabla 17. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 2

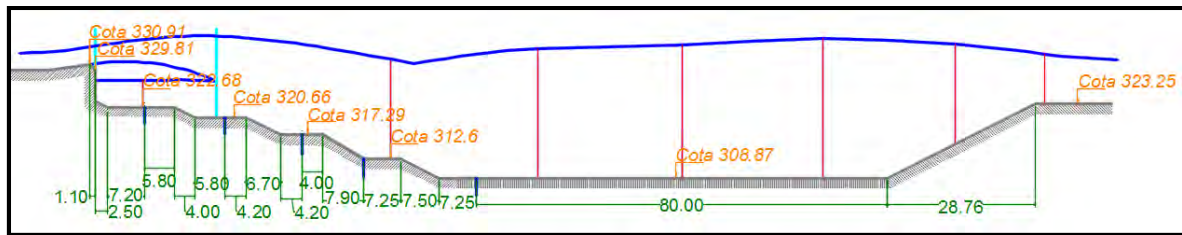
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
16 cm	7.76	8.06
11 cm	7.96	
5 cm	8.45	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	8.43	8.06
Centro	8.32	
Margen derecha	7.42	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Longitud del chorro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 2

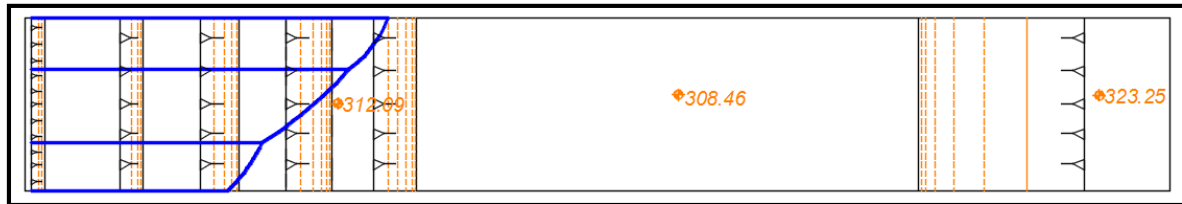
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	9	21.6	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
62.16	55.2	40.2	34.2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 33. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 34. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.5. Caudal 3342 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 19). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 20).

Según los resultados, para el caudal de 1144 m³/s, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo C). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma (Esquema 35). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 36). Se aprecia que el desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora es muy turbulento, esto debido a que la formación del resalto hidráulico es bien balanceada y brusca pero efectiva. Existe una gran ondulación de la superficie del agua. Sin embargo, el nivel del tirante de salida de la poza disipadora es superior al nivel de restitución en el cauce. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano J-03 del Anexo J.

Tabla 19. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 2

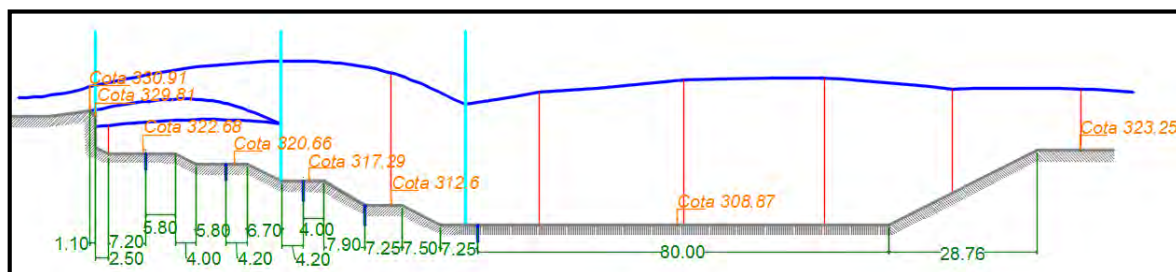
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s) 9.48
18.5 cm	9.19	
14 cm	9.88	
7 cm	9.38	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s) 9.48
Margen izquierda	9.41	
Centro	9.88	
Margen derecha	9.16	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Longitud del chorro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 2

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	9	21.6	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
66	71.88	69.12	63.42

Fuente: Elaboración propia



Esquema 35. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia



Esquema 36. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 2

Fuente: Elaboración propia

4.3. Alternativa 3: Poza escalonada y reducida con dados disipadores

Esta alternativa consiste en la reducción del largo de la poza disipadora de la Alternativa 2. En este diseño, la poza disipadora se ha reforzado con dados disipadores, el cual generará la turbulencia y acortará la longitud del resalto hidráulico. Para un mejor detalle, revisar el Plano K-01 del Anexo K.

4.3.1. Análisis de diseño – cálculos

De acuerdo a las características del diseño anterior, se toma en cuenta lo siguiente:

Cotas de restitución en el cauce Sección - 33:

Tabla 21. Cota de restitución – Sección 33

Caudal río (m³/s)	Caudal vertedero (m³/s)	Caudal río + vertedero (m³/s)	Cota de restitución Sec - 33 (m.s.n.m.)
640	220	860	326.6
640	500	1140	327.03
640	1144	1784	327.81
640	2318	2958	328.88
640	3342	3982	329.42

Fuente: Universidad de Piura, 2011

Básicamente se he hizo modificaciones al diseño de la Alternativa 2. Las modificaciones hechas, se basan en la implementación de dados disipadores además de la reducción de la longitud de la poza disipadora, esto se debe a la presencia de los dados disipadores que reducen la longitud del resalto hidráulico.

Según los estudios realizados en las pruebas del diseño anterior, se deduce que:

Para el caudal “ $Q = 3342 \text{ m}^3/\text{s}$ ”, la longitud del resalto hidráulico es 70.8 m, por ende, de la longitud total de la poza disipadora (114.1 m) se le acorta la longitud del resalto hidráulico (70.8 m), esto debido a la posterior presencia de dados disipadores que acortan la longitud del resalto hidráulico.

Por lo tanto: $L = 114.1 - 70.8 = 43.3 \text{ m}$,

Caudal $1144 \text{ m}^3/\text{s}$, caída “ h ” = 13.62 m, ancho vertedero “ b ” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 327.81 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 317.29 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 5.96 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "
Q/b	q^2/gh^3	$0.54hD^{0.425}$	$1.66hD^{0.27}$	Según ensayos en el modelo físico
$38.13 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$	0.059	2.2 m	10.51 m	41.5 m

Según los estudios realizados en el modelo Intertechne: $L_d \approx 41.5 \text{ m}$. Por lo tanto, a una longitud de chorro $L_d = 41.5 \text{ m}$, se colocará dados disipadores en todo el ancho de la poza disipadora.

Dados disipadores (Figura 13):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y_1	$d_1 = 1.3y_1$	$ls_1 = 0.5y_1$	$li_1 = 1.3y_1$	$a_1 = y_1$	$s_1 = a_1$
1144 m ³ /s	2.2 m	2.8 m	1.1 m	2.8 m	2.2 m	2.2 m

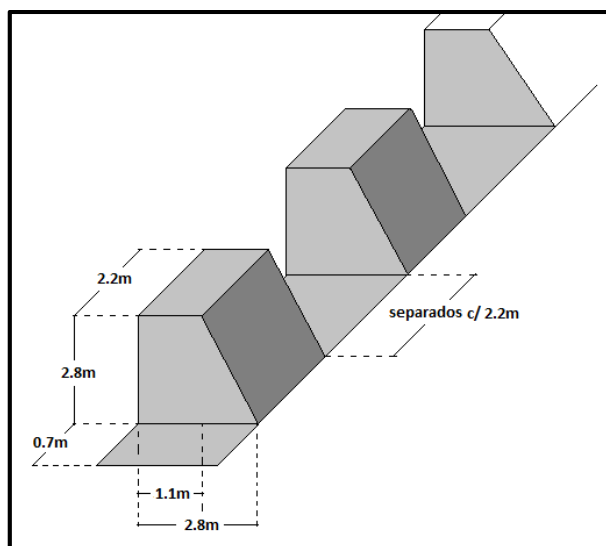


Figura 13. Datos disipadores, caudal 1144 m³/s–Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia

Caudal 2318 m³/s, caída “h” = 18.31 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 328.88 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 312.6 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 10.65 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "
Q/b	q^2/gh^3	$0.54hD^{0.425}$	$1.66hD^{0.27}$	Según ensayos en el modelo físico
77.27 m ³ /s*m	0.099	3.7 m	16.29 m	53.4 m

Según los estudios realizados en el modelo Intertechne: $L_d \approx 53.4$ m. Por lo tanto, a una longitud de chorro $L_d = 53.4$ m, se colocará dados disipadores en todo el ancho de la poza disipadora.

Dados disipadores (Figura 14):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y_1	$d_1 = 1.3y_1$	$ls_1 = 0.5y_1$	$li_1 = 1.3y_1$	$a_1 = y_1$	$s_1 = a_1$
2318 m ³ /s	3.7 m	4.8 m	1.8 m	4.8 m	3.75 m	3.75 m

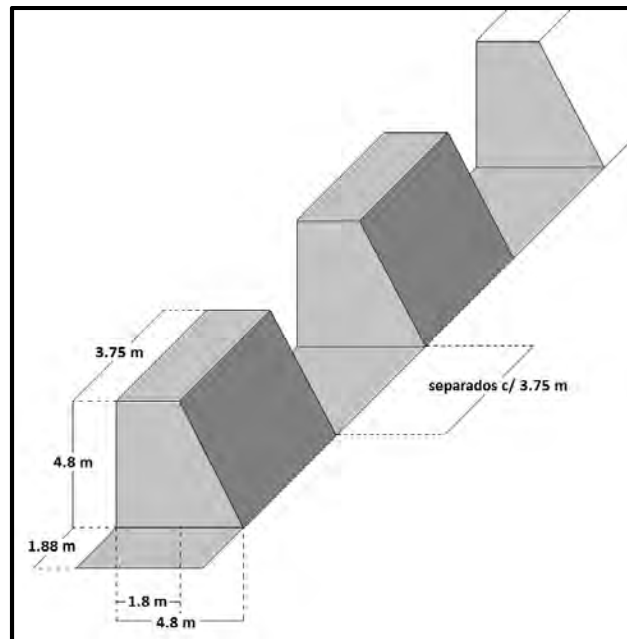


Figura 14. Datos disipadores, caudal 2318 m³/s – Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia

Caudal 3342 m³/s, caída “h” = 22.04 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 329.42 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 308.87 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 14.38 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos en el modelo físico
111.4 m ³ /s*m	0.1182	4.8 m	20.55 m	75.4 m

Según los estudios realizados en el modelo Intertechne: $L_d \approx 75.4$ m. Por lo tanto, a una longitud de chorro $L_d = 75.4$ m, se colocará dados disipadores en todo el ancho de la poza disipadora.

Dados disipadores (Figura 15):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y ₁	d ₁ = 1.3*y ₁	ls ₁ = 0.5y ₁	li ₁ = 1.3*y ₁	a ₁ = 1.0*y ₁	s ₁ = 1.0*a ₁
3342 m ³ /s	4.8 m	6.2 m	2.4 m	6.2 m	5 m	5 m

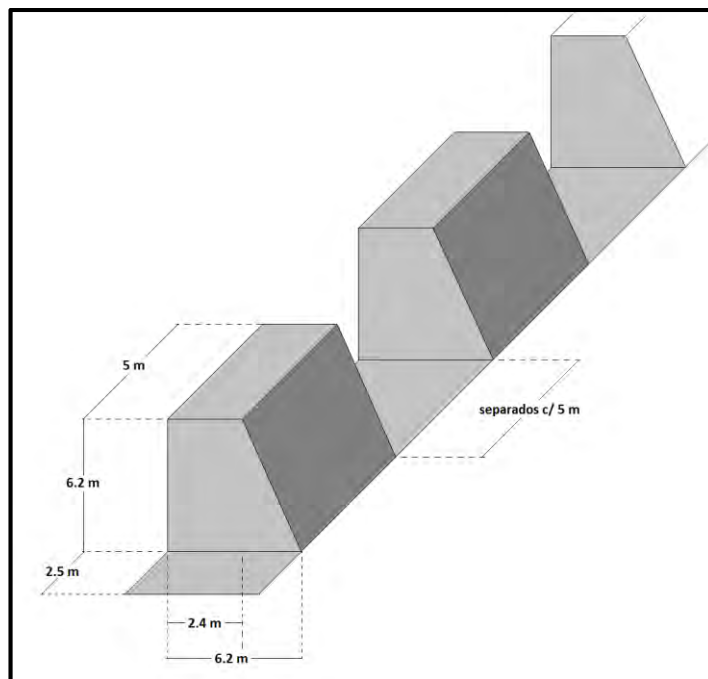
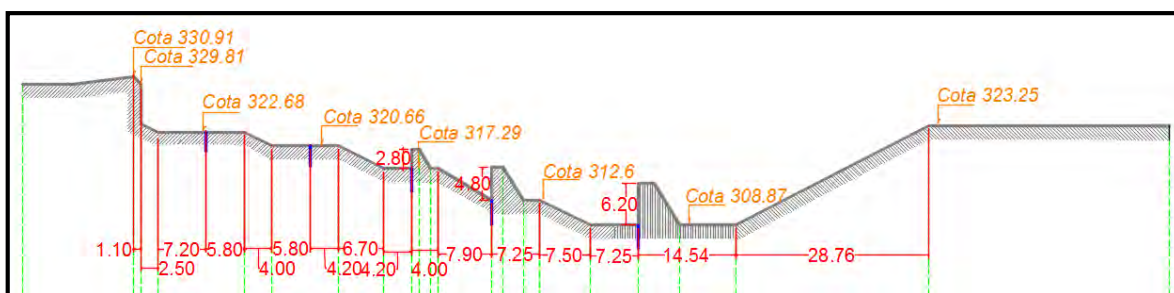
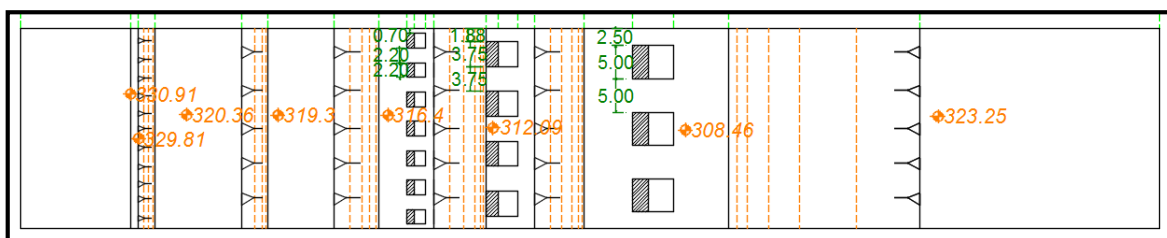


Figura 15. Datos disipadores, caudal 3342 m³/s – Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el diseño final de la Alternativa 3, por su geometría, tendrá un aspecto escalonado con dados disipadores, tanto en la vista de perfil (Esquema 37), como en la vista de planta (Esquema 37).



Esquema 37. Diseño final de poza disipadora, todos los caudales – Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia



Esquema 38. Vista de planta de la poza disipadora, todos los caudales – Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Resultados

4.3.2.1. Caudal 1144 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 22). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 23).

Según los resultados, para el caudal de 1144 m³/s, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo D). En el interior de la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma y a los dados disipadores (Esquema 39). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza e impacta en los dados, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 40). Se aprecia que el desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora es turbulento, esto debido a la formación del resalto hidráulico. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano K-01 del Anexo K.

Tabla 22. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 3

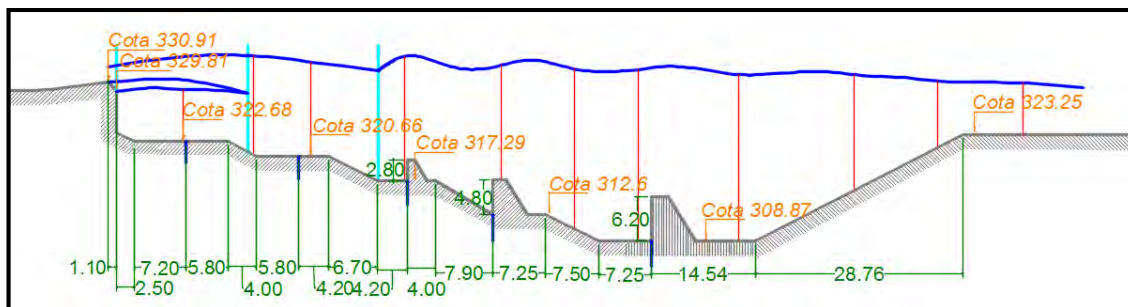
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
8 cm	5.48	5.41
4 cm	5.33	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	5.27	5.41
Centro	5.47	
Margen derecha	5.47	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Longitud del chorro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 3

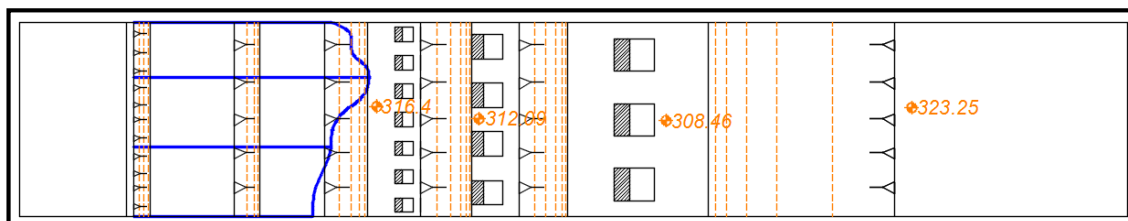
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda		→	Margen derecha
P1	P2	P3	P4
0	8.52	19.26	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
30.42	36.36	30.48	27.6

Fuente: Elaboración propia



Esquema 39. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 3

Fuente: Elaboración propia



Esquema 40. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 3

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2. Caudal 2318 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 24). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 25).

Según los resultados, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo D). En el interior de la poza disipadora, se aprecia la formación del resalto hidráulico muy turbulento, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma y a los dados disipadores (Esquema 41). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza e impacta en los dados, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 42). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano K-01 del Anexo K.

Tabla 24. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 3

2518 m/s – Alternativa 3

Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
15 cm	6.71	7.39
10 cm	7.63	
5 cm	7.82	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	8.68	7.39
Centro	7.38	
Margen derecha	6.09	

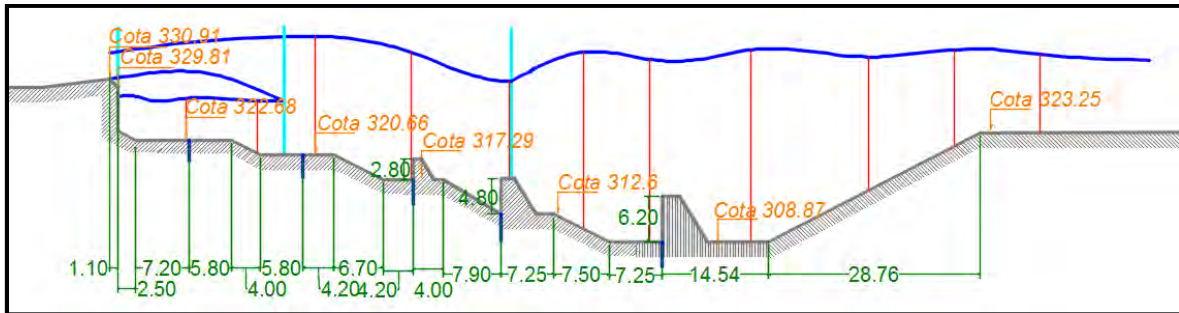
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Longitud del chorro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 3

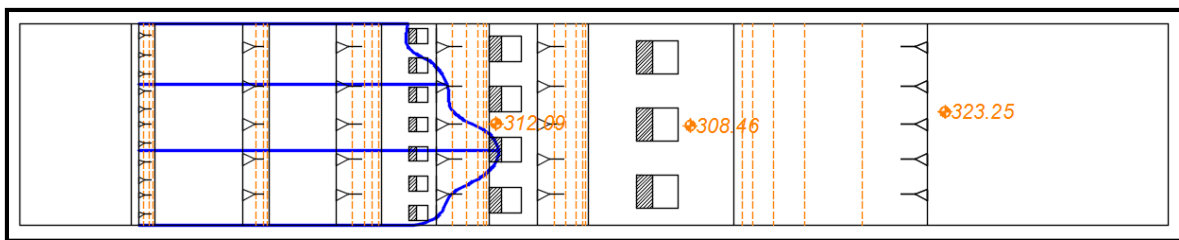
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	9	18.84	30

Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
40.2	46.02	53.7	41.1

Fuente: Elaboración propia

Esquema 41. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 3

Fuente: Elaboración propia

Esquema 42. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 3

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3. Caudal 3342 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 26). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 27).

Según los resultados, se ha obtenido velocidades menores a la salida de la poza disipadora, comparado con el diseño original (Anexo D). En el interior de la poza disipadora, se aprecia la formación del resalto hidráulico muy turbulento, debido al colchón de agua que se forma dentro de la misma y a los dados disipadores (Esquema 43). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza e impacta en los dados, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 44). Sin embargo, el resalto hidráulico es muy inestable, presenta una serie de remolinos sobre la superficie del mismo y el nivel del tirante de salida de la poza disipadora es superior al nivel de restitución en el cauce. Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano K-01 del Anexo K.

Tabla 26. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 3

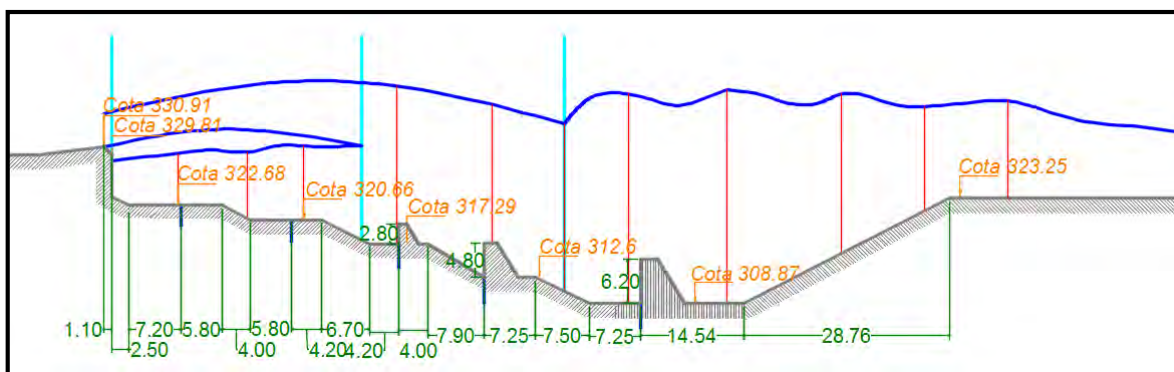
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
19.5 cm	6.61	8.30
14 cm	9.13	
7.5 cm	9.17	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	7.50	8.30
Centro	8.98	
Margen derecha	8.43	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Longitud del chorro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 3

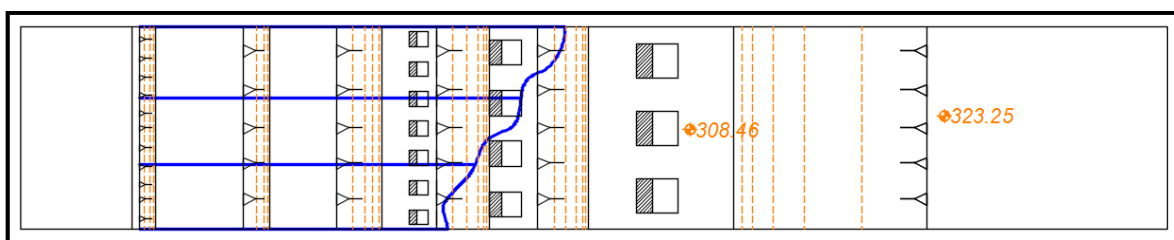
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)			
Margen izquierda →		Margen derecha	
P1	P2	P3	P4
0	10.5	20.4	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)			
P1	P2	P3	P4
63.6	57	50.22	46.08

Fuente: Elaboración propia



Esquema 43. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 3

Fuente: Elaboración propia



Esquema 44. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 3

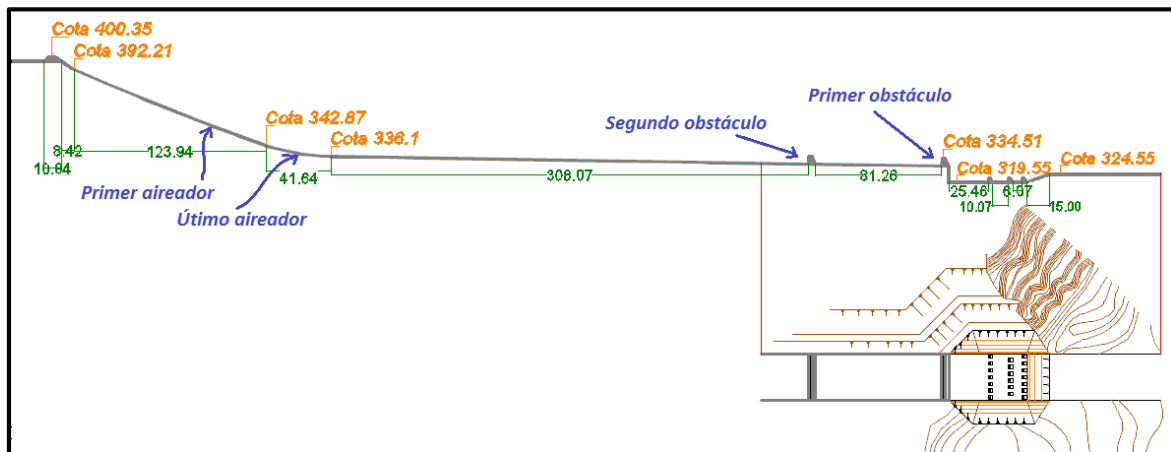
Fuente: Elaboración propia

4.4. Alternativa 4: Vertedero con obstáculos y poza disipadora original con dados disipadores

4.4.1. Análisis de diseño – cálculos

Esta alternativa está basada en la producción de resaltos hidráulicos sobre el vertedero, antes de la entrega del flujo del vertedero a la poza disipadora, con el fin de reducir la velocidad del flujo. Se complementa la reducción de la energía cinética mediante la colocación de dados disipadores dentro de la poza disipadora (Esquema 45).

La poza disipadora se basa en el diseño original propuesto por Intertechne, con modificaciones en la geometría inicial de la poza disipadora. La ubicación de los dados disipadores se distribuye en forma lineal, de acuerdo a la longitud del chorro para solo los caudales mayores “ $Q = 3342, 2318$ y $1144 \text{ m}^3/\text{s}$ ”. Para los caudales menores “ $Q = 500$ y $220 \text{ m}^3/\text{s}$ ” no hay necesidad de colocar dados disipadores, ya que solo basta la presencia de la poza disipadora y de los dados disipadores anteriormente mencionados. Para un mejor detalle, revisar el Plano L-01 del Anexo L.



Esquema 45. Perfil longitudinal de vertedero y poza disipadora – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1. Vertedero

Se coloca dos filas de obstáculos lineales en todo el ancho del vertedero a manera de dados disipadores distanciados por una longitud “L”.

Al diseñar con estos obstáculos lineales se generan dos pozas disipadoras de agua; la primera, que se forma entre el último aireador y el segundo obstáculo, que servirá como un colchón de agua inicial para los caudales de estudio; y el segundo, que se forma entre los obstáculos, el cuál funcionará como un colchón amortiguador complementario.

Se diseña con el caudal máximo $Q = 3342 \text{ m}^3/\text{s}$, con el fin de envolver a los caudales menores y a su vez reducir la energía cinética de una forma más eficiente. Tirante promedio en el punto de salida del vertedero, según estudios realizados: 4.70 m.

Entonces, para:

Caudal "Q"	Ancho vertedero "b"	Tirante prom. según ensayos en el modelo "y ₁ "	"V ₁ "	"Fr ₁ "	"Y ₂ "
			$Q/(bY_1)$	$V_1/\sqrt{gY_1}$	$0.5Y_1(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1)$
3342 m ³ /s	30 m	4.7 m	23.68 m/s	3.49	20.96 m

Obstáculos lineales				
Caudal	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho (ancho del vertedero)
Q	Y ₁	0.5Y ₁	Y ₁	b
3342 m ³ /s	4.7 m	2.35 m	4.7 m	30 m

1° obstáculo - de aguas abajo hacia aguas arriba (Figura 16):

El primer obstáculo se ubicará en el punto de salida del vertedero de servicio. La cota en punto de salida del vertedero es 329.81 m.s.n.m. Por lo tanto:

Cota superior = 329.81+4.7 = 334.51 m.s.n.m.

Cota inferior = 329.81 m.s.n.m.

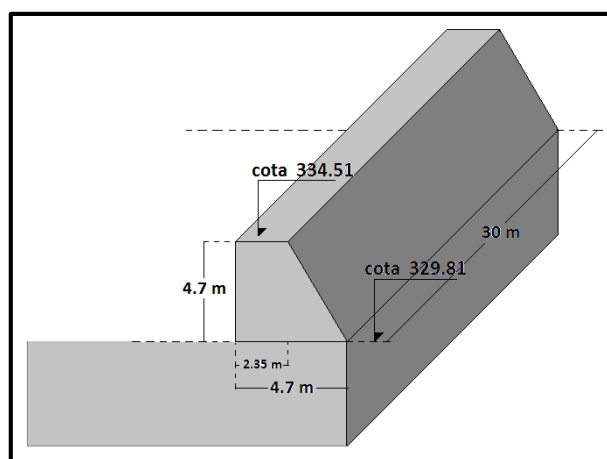


Figura 16. Primer obstáculo en el vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

Para determinar la ubicación del 2° obstáculo en el vertedero de servicio, es necesario saber lo siguiente:

Último aireador:

Cota superior = 336.63 m.s.n.m.

Cota inferior = 335.83 m.s.n.m.

Ventana del aireador – muro lateral:

Cota superior = 336.63 m.s.n.m.

Altura de la ventana = 0.8m

Cota inferior = 335.83 m.s.n.m.

Por lo tanto, la cota inferior de la ventana del aireador será la cota superior del 2° obstáculo. De esta forma, el colchón de agua inicial que se forma entre el último aireador y el 2° obstáculo, no quitará la función hidráulica del aireador, ya que la cota del espejo de agua del colchón amortiguador inicial será 335.8 m.s.n.m. y la cota superior de la ventana del aireador es 336.63 m.s.n.m.

Ahora, teniendo en cuenta que el vertedero de servicio tiene una pendiente de 1.5%, entonces la ubicación del 2° obstáculo a partir del punto de salida del vertedero de servicio, se deducirá de la siguiente forma (Figura 17):

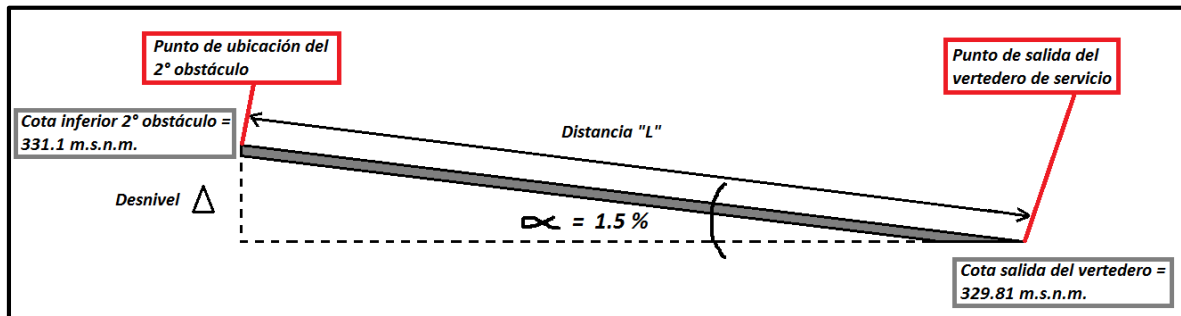


Figura 17. Ubicación del segundo obstáculo en el vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

$$\frac{\Delta}{L} = \tan \alpha$$

Cota inferior 2° obstáculo – Cota salida del vertedero = 331.1 m.s.n.m. – 329.81 m.s.n.m.
 $\Delta = 1.29 \text{ m}$, $\tan \alpha = 1.5 \% = 0.015$

Por lo tanto, la ubicación del 2° obstáculo y la distancia de separación entre los obstáculos lineales será: $L = 86 \text{ m}$

2° obstáculo - de aguas abajo hacia aguas arriba (Figura 18):

Cota superior = 335.8 m.s.n.m.

Cota inferior = $335.8 - 4.7 = 331.1 \text{ m.s.n.m.}$

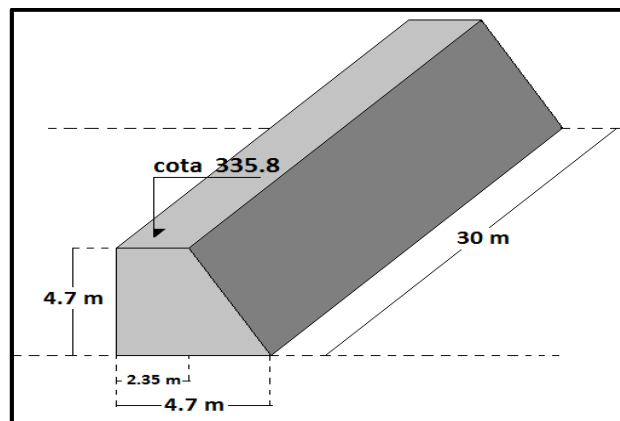
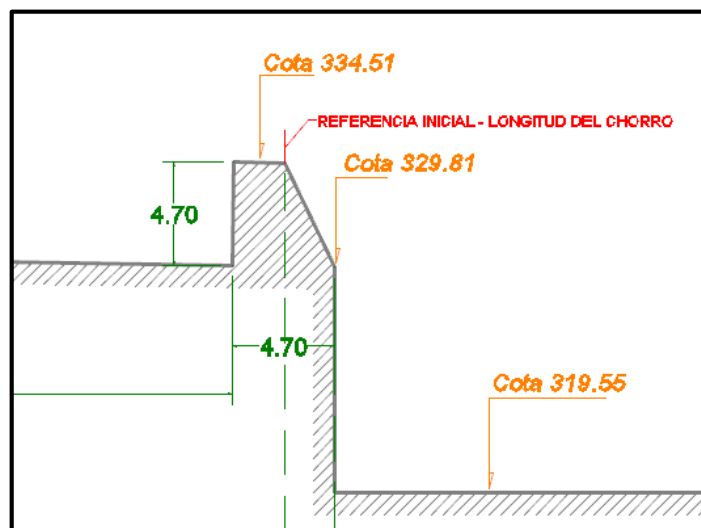
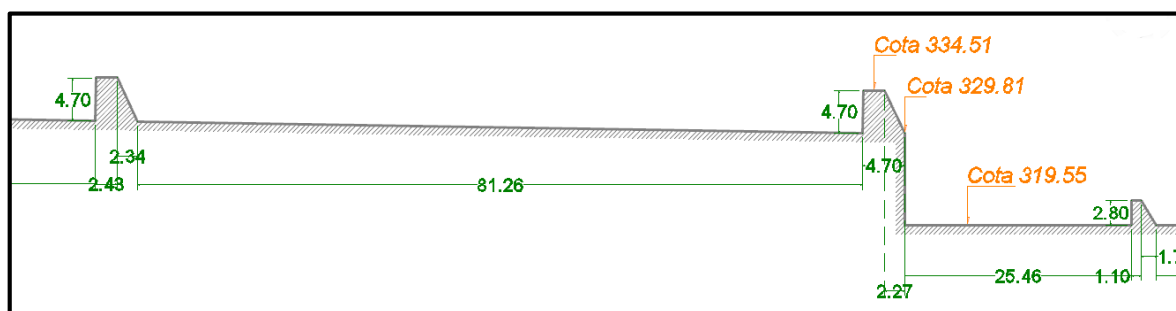


Figura 18. Segundo obstáculo en el vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

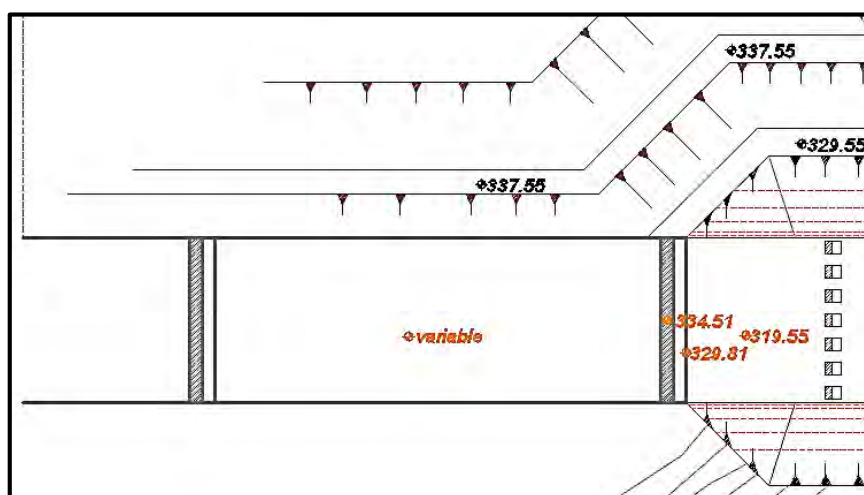
Se muestra el detalle de la geometría y ubicación del segundo obstáculo en la salida del vertedero de servicio (Esquema 46). El diseño final del vertedero de servicio de la Alternativa 4, por su geometría, es similar a la Diseño original, tanto en la vista de perfil (Esquema 47) como en la vista de planta (Esquema 48).



Esquema 46. Detalle de obstáculo a la salida del vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia



Esquema 47. Vista de perfil de los obstáculos en el vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia



Esquema 48. Vista de planta de los obstáculos en el vertedero – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2. Poza disipadora

Se modifica la geometría inicial de la poza disipadora original, manteniendo la esencia geométrica del diseño propuesto por Intertechne. Esta alternativa plantea que el inicio de la poza disipadora sea de caída recta, a diferencia de la poza disipadora original que su caída es inclinada. Además se propone la colocación de dados disipadores posicionados estratégicamente según sea la longitud del flujo para los caudales mayores: “3342, 2318 y 1144 m³/s”.

Para la disipación de energía de los caudales menores de ensayos: “500 y 220 m³/s”, será suficiente los obstáculos en el vertedero, la poza que se genera entre los mismos, además de la poza disipadora con los respectivos dados aguas abajo del vertedero.

Ubicación de los dados disipadores según sea el caudal de ensayo:

Caudal "Q" = 1144 m ³ /s	Caída "h" = 14.97 m	Ancho vertedero "b" = 30m	
Cota salida vertedero (329.81 + 4.7)	334.52 m.s.n.m	Cota salida poza disipadora	324.55 m.s.n.m.
Cota fondo poza disipadora	319.55 m.s.n.m.	Profundidad de poza "P"	5 m
Caudal unitario "q"	"D"	"L _d "	
(Q/b)	q ² /gh ³	4.3hD ^{0.27}	
38.13 m ³ /s*m	0.044	27.73 m	

Caudal "Q" = 2318 m ³ /s	Caída "h" = 14.97 m	Ancho vertedero "b" = 30m	
Cota salida vertedero (329.81 + 4.7)	334.52 m.s.n.m	Cota salida poza disipadora	324.55 m.s.n.m.
Cota fondo poza disipadora	319.55 m.s.n.m.	Profundidad de poza "P"	5 m
Caudal unitario "q"	"D"	"L _d "	
(Q/b)	q ² /gh ³	4.3hD ^{0.27}	
77.27 m ³ /s*m	0.182	40.6 m	

Caudal "Q" = 3342 m ³ /s	Caída "h" = 14.97 m	Ancho vertedero "b" = 30m	
Cota salida vertedero (329.81 + 4.7)	334.52 m.s.n.m	Cota salida poza disipadora	324.55 m.s.n.m.
Cota fondo poza disipadora	319.55 m.s.n.m.	Profundidad de poza "P"	5 m
Caudal unitario "q"	"D"	"L _d "	
(Q/b)	q ² /gh ³	4.3hD ^{0.27}	
111.4 m ³ /s*m	0.378	49.47 m	

Por lo tanto la longitud del chorro, para:

$$Q = 1144 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow L_d = 27.73 \text{ m}$$

$$Q = 2318 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow L_d = 40.6 \text{ m}$$

$$Q = 3342 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow L_d = 49.47 \text{ m}$$

La disipación de energía en la poza se complementará con dados disipadores distribuidos en filas y ubicados de acuerdo a la longitud del chorro para los caudales mayores respectivos.

Se realizó el ensayo con dados disipadores de las siguientes características:

Altura del dado disipador " d_1 " = 2.8 m.
 Largo superior del dado disipador " l_{s1} " = 1.1 m.
 Largo inferior del dado disipador " l_{i1} " = 2.8 m.
 Ancho del dado disipador " a_1 " = 2.2 m
 Separación entre dados " s_1 " = a_1 = 2.2 m

Se distribuyó 3 filas de dados disipadores (Figura 19), intercalando la posición entre filas:

1° fila ubicada a "27.73 m" de la referencia de salida del chorro.
 2° fila ubicada a "40.6 m" de la referencia de salida del chorro.
 3° fila ubicada a "49.47 m" de la referencia de salida del chorro.

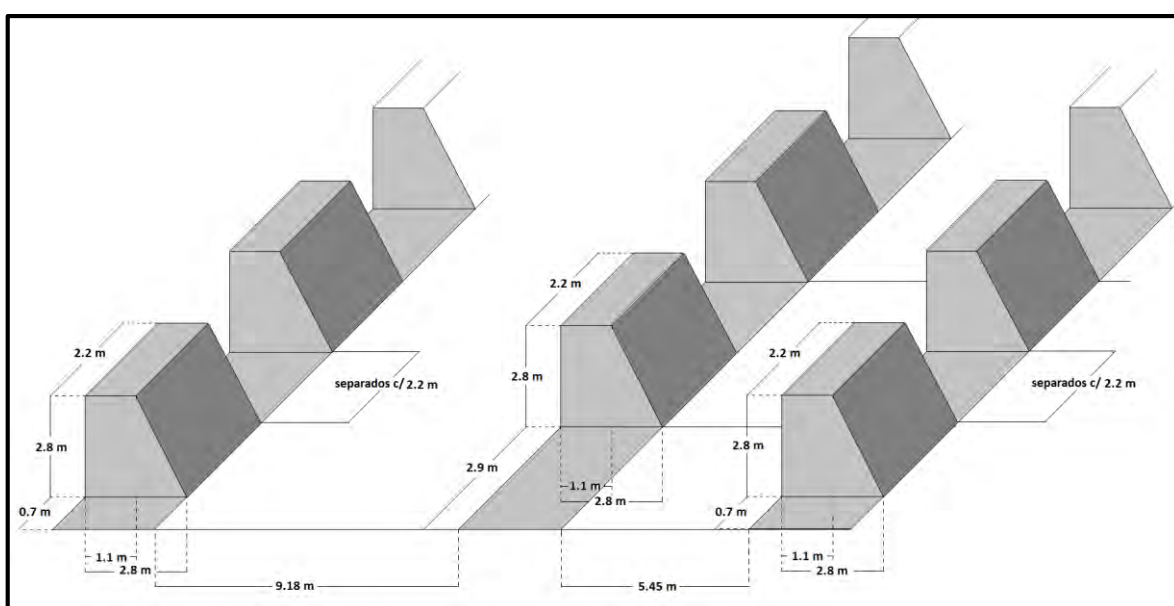
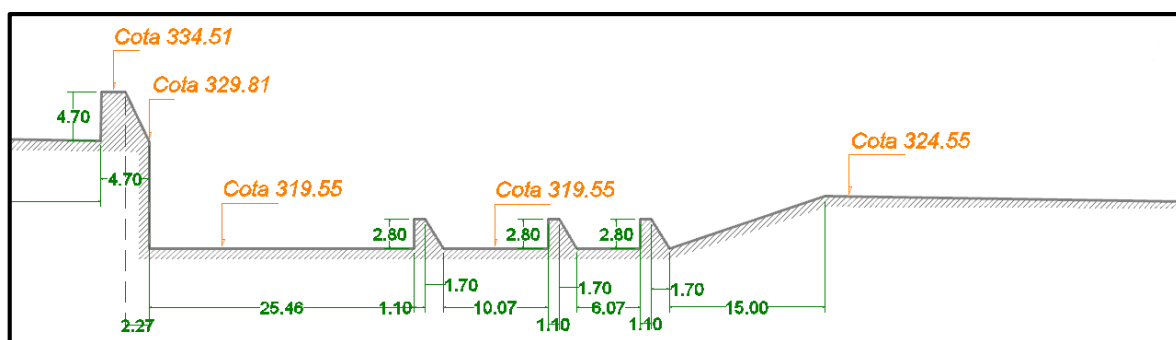


Figura 19. Dados disipadores en la poza disipadora – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Se muestra el detalle de la geometría y ubicación de los dados en la poza disipadora. El diseño final poza disipadora de la Alternativa 4, por su geometría, es similar a la Diseño original, tanto en la vista de perfil (Esquema 49) como en la vista de planta (Esquema 50).



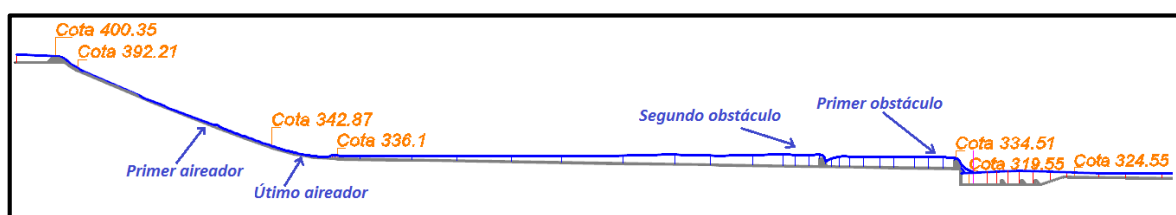
Esquema 49. Vista perfil de la poza disipadora – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

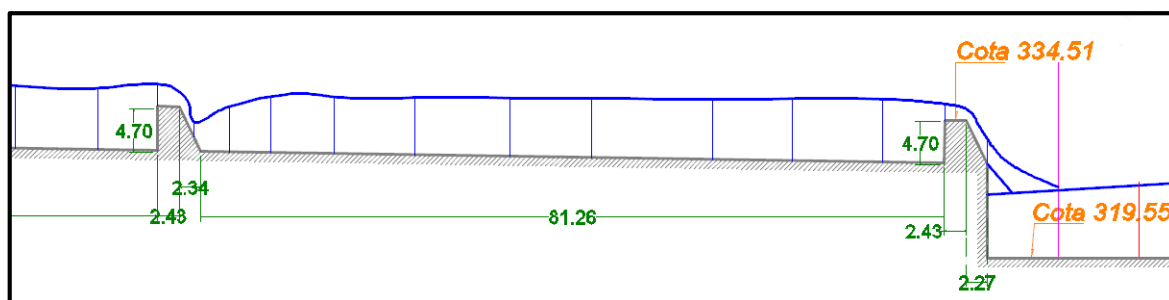
Tabla 29. Longitud del chorro, caudal 220 m³/s – Alternativa 4

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda →			Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
3.6	4.8	7.8	7.5	4.5

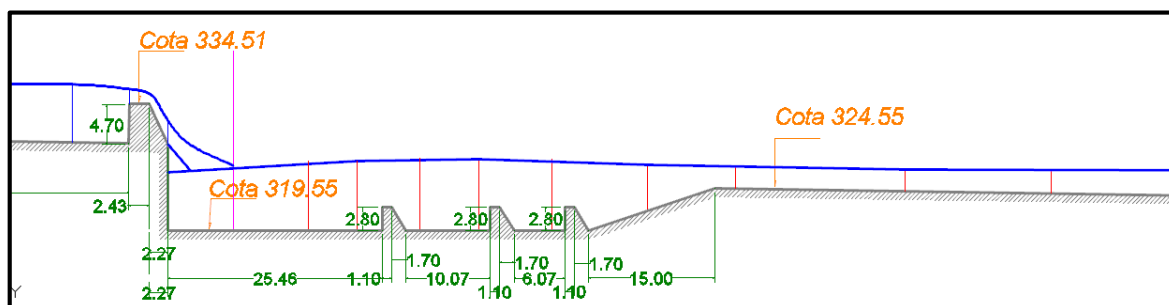
Fuente: Elaboración propia

Esquema 51. Desarrollo del flujo en el vertedero, caudal 220 m³/s – Alternativa 4

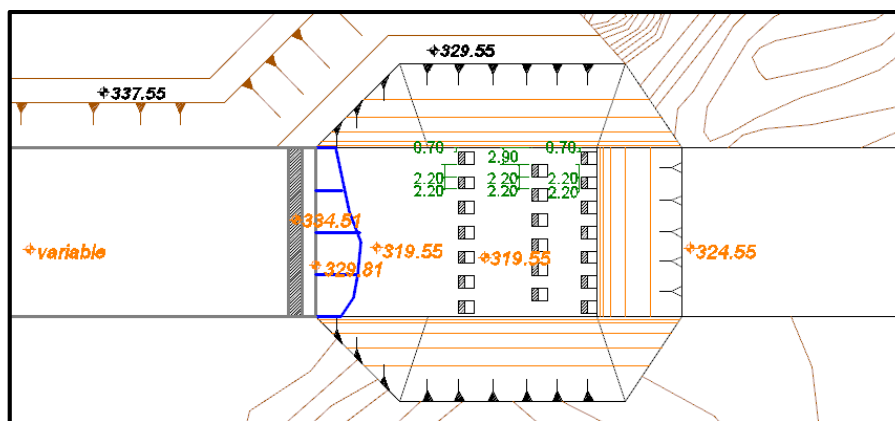
Fuente: Elaboración propia

Esquema 52. Detalle del desarrollo del flujo entre obstáculos del vertedero, caudal 220 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Esquema 53. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 220 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia



Esquema 54. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 220 m³/s – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

4.4.2.2. Caudal 500 m³/s

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 30). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 4 puntos de medición (Tabla 31).

En el vertedero de servicio se desarrolla un resalto hidráulico tranquilo con ligeras ondulaciones en la superficie del flujo, que empieza aproximadamente en la distancia media entre último aireador y el segundo obstáculo del vertedero (Esquema 55). Luego, entre los dos obstáculos se forma un colchón de agua que permite mejorar la reducción de velocidad del flujo (Esquema 56), pero con presencia de una ligera turbulencia. Consecuentemente la velocidad de salida del vertedero de servicio disminuye y la longitud del chorro se acorta.

En la poza disipadora, el colchón amortiguador que se forma permite mejorar la disminución de la velocidad y que el desarrollo del flujo sea tranquilo (Esquema 57). La longitud del chorro a la salida del vertedero de servicio es contenido dentro de la poza disipadora (Esquema 58). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Anexo E y el Plano L-03 del Anexo L.

Tabla 30. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 500 m³/s – Alternativa 4

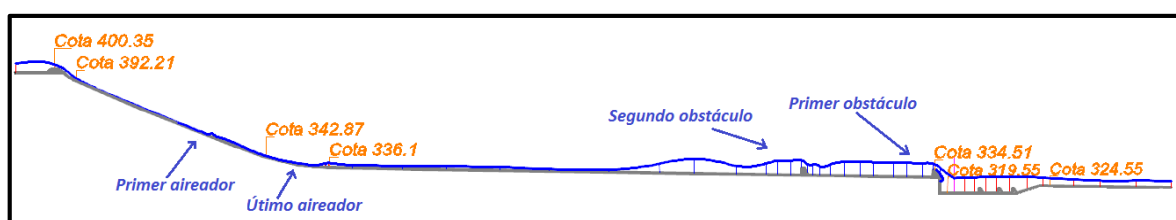
SECCIÓN - SALIDA DE POZA DISIPADORA		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
4.5 cm	3.23	3.23
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	2.81	3.23
Centro	3.66	
Margen derecha	3.21	

Fuente: Elaboración propia

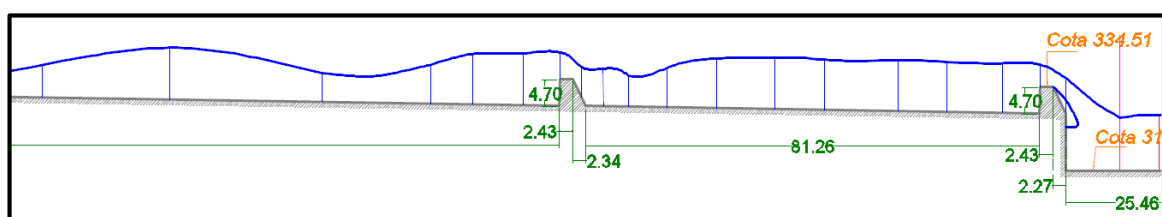
Tabla 31. Longitud del chorro, caudal 500 m³/s – Alternativa 4

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda →			Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
8.1	9.3	9.6	9.6	8.4

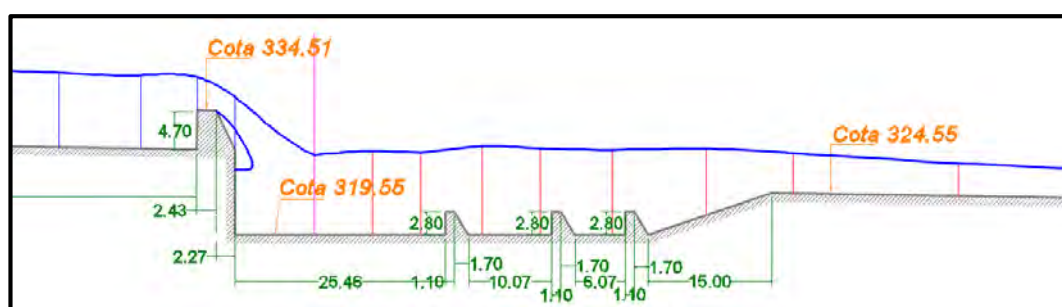
Fuente: Elaboración propia

Esquema 55. Desarrollo del flujo en el vertedero, caudal 500 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Esquema 56. Detalle del desarrollo del flujo entre obstáculos del vertedero, caudal 500 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Esquema 57. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 500 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

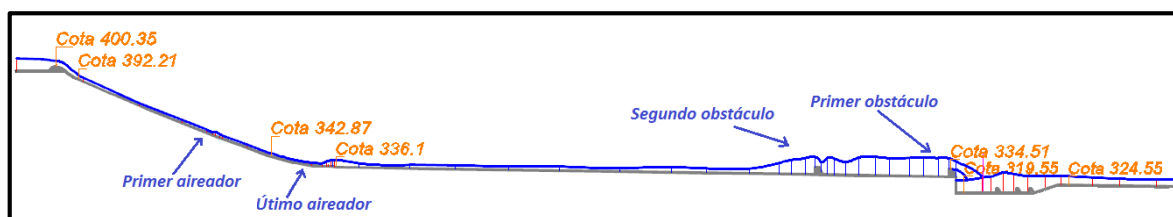
SECCIÓN - SALIDA ÚLTIMA VERTEDERO		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
7 cm	6.05	5.80
4 cm	5.56	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	5.74	5.80
Centro	5.85	
Margen derecha	5.81	
SECCIÓN - SALIDA DE POZA DISIPADORA		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
7 cm	5.15	4.88
4 cm	4.61	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	3.52	4.88
Centro	5.85	
Margen derecha	5.27	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Longitud del chorro, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

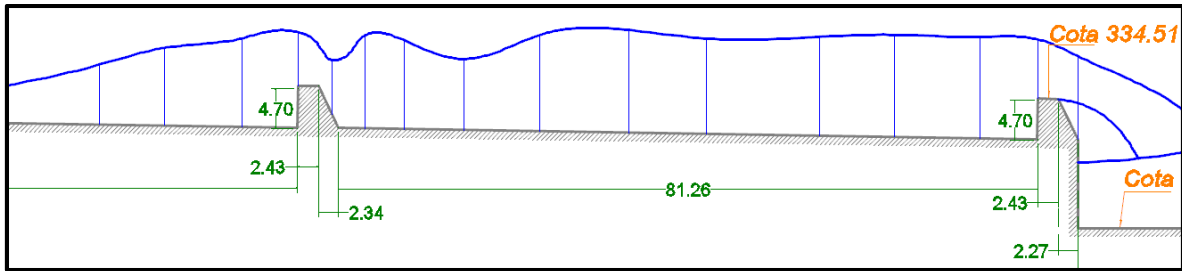
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda →			Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
15	16.8	16.8	17.4	16.8

Fuente: Elaboración propia



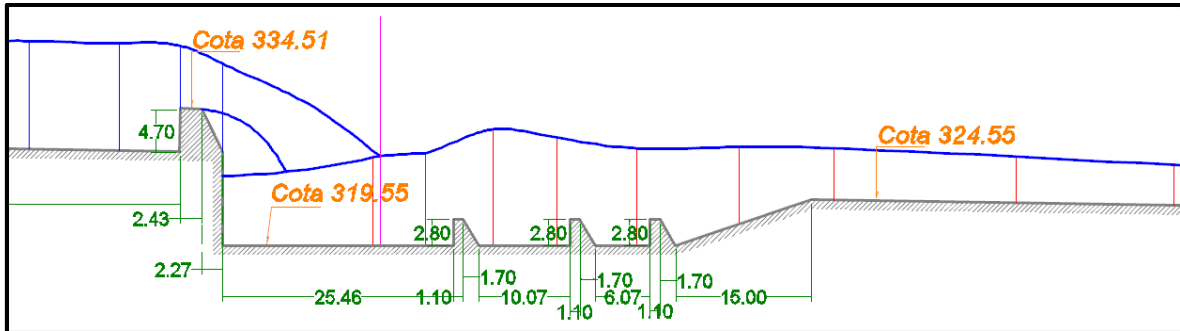
Esquema 59. Desarrollo del flujo en el vertedero, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia



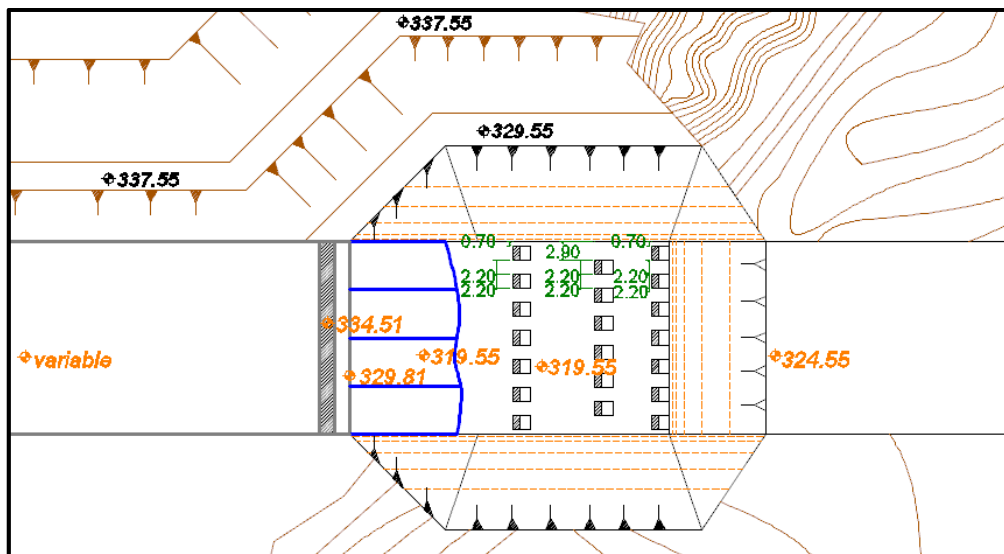
Esquema 60. Detalle del desarrollo del flujo entre obstáculos del vertedero, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia



Esquema 61. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia



Esquema 62. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 1144 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.4. Caudal 2318 m³/s

La medición de la velocidad tanto en la sección de salida última del vertedero como en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 34). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida tanto del vertedero como de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del

chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 5 puntos de medición (Tabla 35).

Según el ensayo realizado en el modelo físico, se ha obtenido velocidades menores con el diseño de la Alternativa 4 comparado al diseño original (Anexo E).

En el vertedero de servicio se desarrolla dos resaltos hidráulicos, el primero, que por su fuerza y magnitud empieza a una distancia corta aguas arriba del segundo obstáculo del vertedero y termina en la parte media del colchón de agua que se forma entre los obstáculos (Esquema 63), este resalto es muy turbulento; el segundo, que se forma a consecuencia del choque del chorro con el primer obstáculo del vertedero, el cuál se desarrolla en forma más tranquila y controlable (Esquema 64). Consecuentemente la velocidad de salida del vertedero de servicio disminuye y la longitud del chorro se acorta.

En la poza disipadora se ha mejorado la reducción de la velocidad, esto debido a que el chorro impacta en los dados disipadores, apreciándose la formación de un resalto hidráulico más formado dentro de la poza (Esquema 65). La longitud del chorro a la salida del vertedero de servicio es contenido dentro de la poza disipadora (Esquema 66). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano L-05 del Anexo L.

Tabla 34. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4

2516 m/s – Alternativa 4

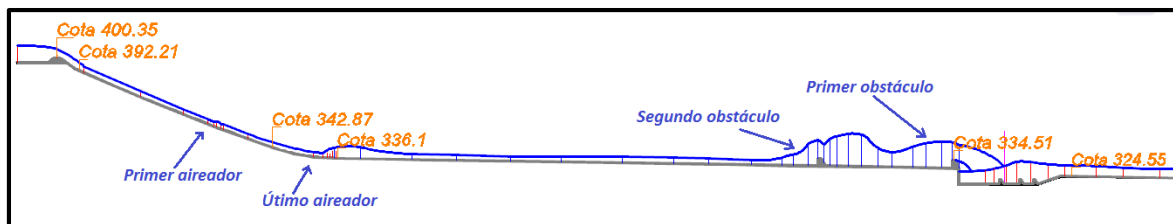
SECCIÓN - SALIDA ÚLTIMA VERTEDERO		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
14 cm	8.49	9.23
9 cm	10.20	
4.5 cm	8.99	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	9.24	9.23
Centro	8.29	
Margen derecha	10.16	
SECCIÓN - SALIDA DE POZA DISIPADORA		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
9 cm	6.90	6.98
4.5 cm	7.06	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	5.14	6.98
Centro	8.74	
Margen derecha	7.06	

Fuente: Elaboración propia

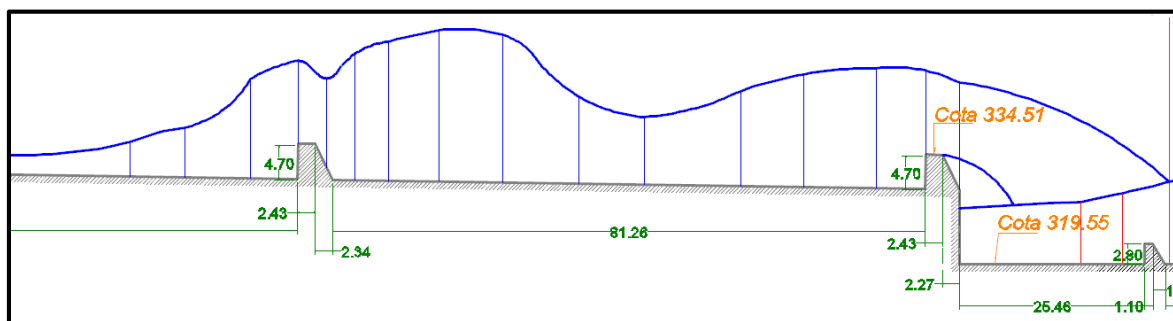
Tabla 35. Longitud del chorro, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda →			Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
28.8	28.5	28.8	28.2	25.5

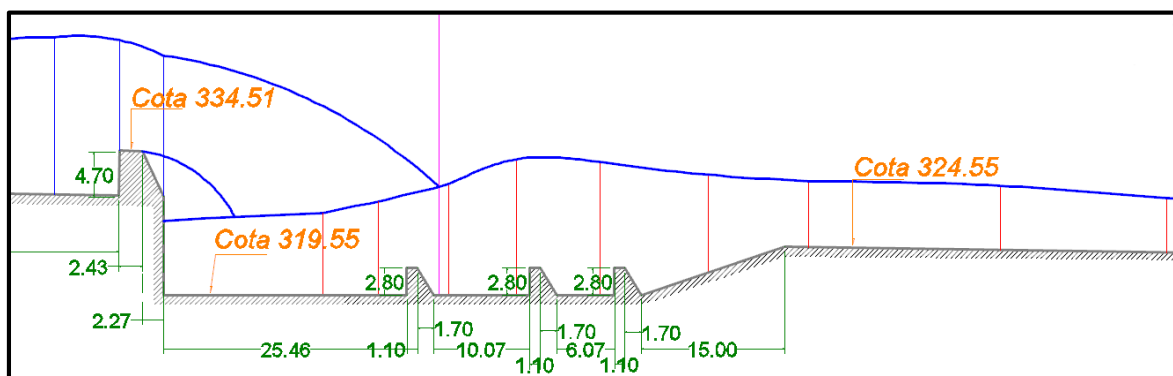
Fuente: Elaboración propia

Esquema 63. Desarrollo del flujo en el vertedero, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4

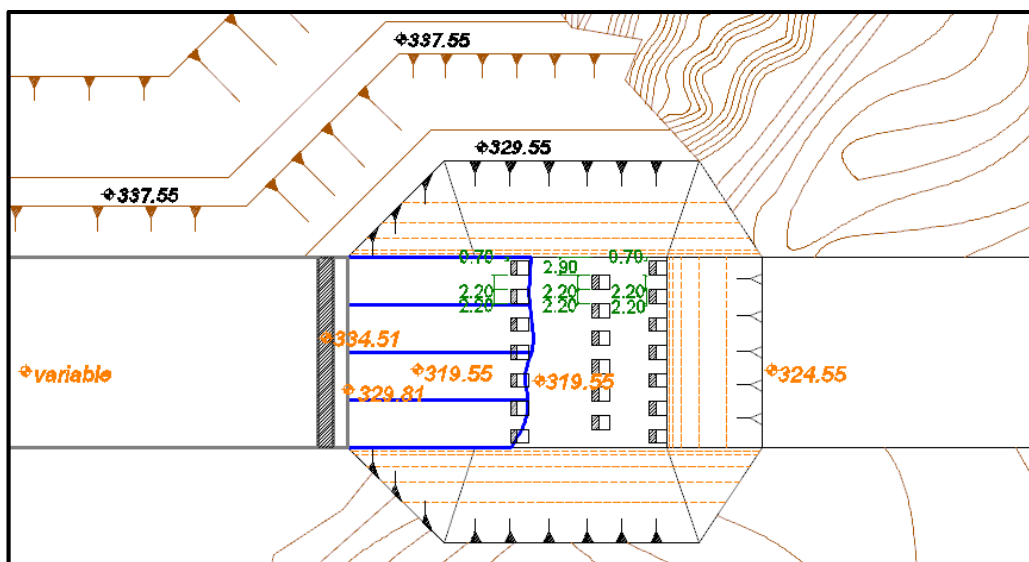
Fuente: Elaboración propia

Esquema 64. Detalle del desarrollo del flujo entre obstáculos del vertedero, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia

Esquema 65. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4

Fuente: Elaboración propia



Esquema 66. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 2318 m³/s – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

4.4.2.5. Caudal 3342 m³/s

La medición de la velocidad tanto en la sección de salida última del vertedero como en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 36). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida tanto del vertedero como de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 5 puntos de medición (Tabla 37).

Según el ensayo realizado en el modelo físico, se ha obtenido velocidades menores con el diseño de la Alternativa 4 comparado al diseño original (Anexo E).

En el vertedero de servicio se desarrolla dos resaltos hidráulicos, el primero, que por su fuerza y magnitud empieza a una distancia corta aguas arriba del segundo obstáculo del vertedero y termina en la parte media del colchón de agua que se forma entre los obstáculos (Esquema 67), este resalto es muy turbulento; el segundo, que se forma a consecuencia del choque del chorro con el primer obstáculo del vertedero, el cuál se desarrolla en forma turbulenta (Esquema 68). Consecuentemente la velocidad de salida del vertedero de servicio disminuye y la longitud del chorro se acorta.

En la poza disipadora se ha mejorado la reducción de la velocidad, apreciándose el desarrollo de un resalto hidráulico más formado y turbulento, esto debido a que el chorro impacta en los dados disipadores (Esquema 69). La longitud del chorro a la salida del vertedero de servicio es contenido dentro de la poza disipadora (Esquema 70). Para un mejor detalle de los ensayos realizados, revisar Plano L-06 del Anexo L.

Tabla 36. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4

3342 m/s – Alternativa 4

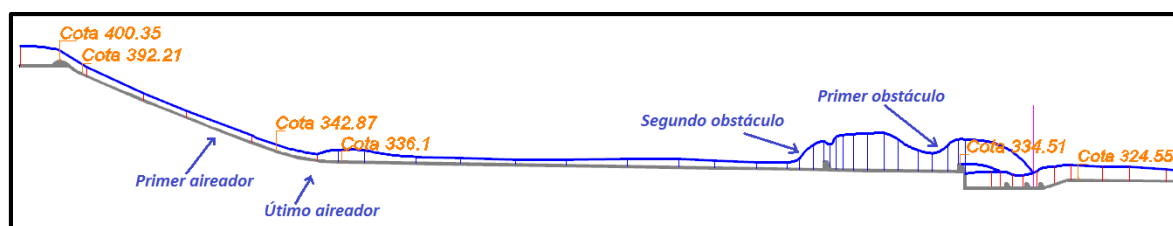
SECCIÓN - SALIDA ÚLTIMA VERTEDERO		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
16 cm	11.73	12.08
12 cm	12.32	
6 cm	12.18	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	12.00	12.08
Centro	11.97	
Margen derecha	12.26	
SECCIÓN - SALIDA DE POZA DISIPADORA		
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
12 cm	6.86	9.07
6 cm	11.28	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	7.21	9.07
Centro	10.49	
Margen derecha	9.52	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Longitud del chorro, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4

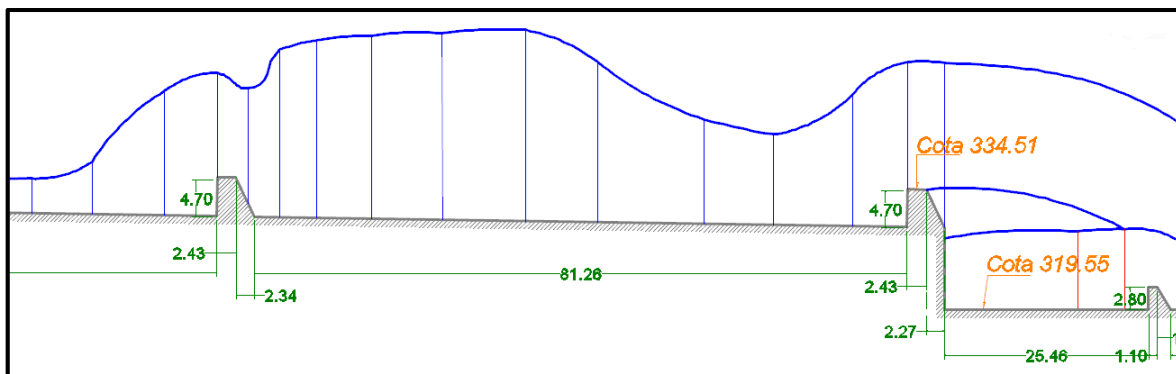
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda		→	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
39	42.6	43.5	43.2	41.4

Fuente: Elaboración propia

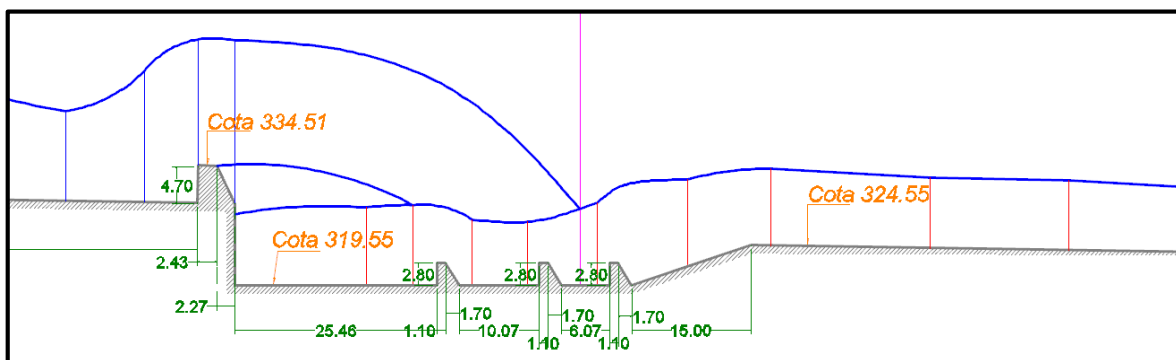


Esquema 67. Desarrollo del flujo en el vertedero, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4

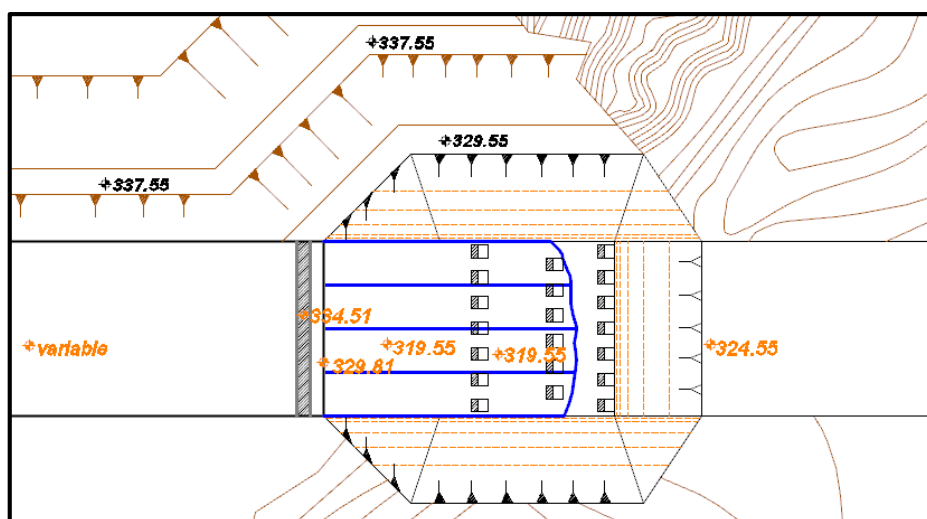
Fuente: Elaboración propia



Esquema 68. Detalle del desarrollo del flujo entre obstáculos del vertedero, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia



Esquema 69. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia



Esquema 70. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 3342 m³/s – Alternativa 4
Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa

4.5. Alternativa 5: Poza proporcional

4.5.1. Análisis de diseño – cálculos

Este diseño está en función al cumplimiento de las características generales de un desarrollo normal del resalto hidráulico del flujo, teniendo en cuenta que para un determinado caudal “Q”, número de Froud y cota de restitución existen características normales de desarrollo del resalto hidráulico que se deben de cumplir para que no existan problemas en el cauce aguas abajo de la poza disipadora.

En el diseño de la poza disipadora, se busca que en el resalto hidráulico, el nivel de la profundidad conjugada “ y_2 ” sea igual al nivel de la profundidad de salida o cota de restitución del cauce, de esta forma se consigue que el resalto hidráulico se forme dentro de la zona protegida y evitar la erosión aguas abajo en el cauce.

En los diseños de las alternativas propuestas anteriores, para los caudales mayores ensayados $Q = 3342, 2318$ y $1144 \text{ m}^3/\text{s}$ se observaba que la cota de restitución para cada caudal siempre era muy inferior al nivel de la profundidad conjugada “ y_2 ” del resalto hidráulico de cada caudal, lo que ocasionaría erosiones en el cauce. Esto se debe a que en el vertedero de servicio, los caudales transitan en un ancho relativamente bajo, suscitando a que los caudales unitario en el vertedero sean muy altos; además que el cauce posee un área muy amplia y relativamente plana, tiene aproximadamente 560 m de ancho, lo que hace que el tirante de recepción del cauce o cota de restitución del cauce sea muy bajo. Así mismo no existe una proporcionalidad adecuada de entrega de flujo, pues el vertedero es angosto y el cauce es muy amplio.

Para la solución de esta irregularidad de diseño, en el modelo físico se tenía que ir probando anchos que permitan encontrar un equilibrio de caudal de entrega al cauce respetando las cotas de restitución. Para ello en el modelo físico se tendría que destruir, volver a construir, probar y si no funciona, volver a reintentar repetidamente hasta lograr el equilibrio. Esto demandaría mucho tiempo e inversión.

Por tal motivo, se aplicó un artificio. Este artificio consistió en mantener el ancho del vertedero de servicio e ir probando caudales representativos proporcionales que simulen a los caudales mayores, bajo sus mismas condiciones de cota de restitución respectivamente, de tal forma que se nivele la profundidad conjugada “ y_2 ” con la cota de restitución del cauce. Este artificio permitirá encontrar un factor de proporcionalidad, el cual amplía el ancho del vertedero de servicio a un ancho proporcional simulado, sin la necesidad de destruir, ampliar y construir nuevamente en el modelo físico.

Después de haber aplicado este artificio, se determinó que el factor de proporcionalidad “ f_p ”= 3.342, permite establecer los caudales proporcionales, que equiparan los niveles de salida de la poza disipadora con los niveles de restitución del cauce para cada caudal (1144, 2318, 3342 m^3/s).

Para el diseño de la poza proporcional, es necesario tener en cuenta las condiciones de salida del cauce para cada caudal de estudio (Tabla 38), la longitud promedio del chorro (Tabla 39) y la velocidad promedio a la salida de la poza del Diseño original (Tabla 40).

Tabla 38. Cota de restitución – Sección 33

Caudal río (m³/s)	Caudal vertedero (m³/s)	Caudal río + vertedero (m³/s)	Cota de restitución Sec - 33 (m.s.n.m.)
640	342.31	982.31	327.81
640	693.60	1333.60	328.88
640	1000	1640	329.42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Longitud promedio chorro, caudal proporcional – Diseño original

Caudal (m³/s)	Longitud chorro - salida vertedero Diseño original (m)
350	19.6
700	32.4
1000	39.7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Velocidad promedio salida poza disipadora, caudales proporcionales – Diseño original

Velocidad promedio - Diseño original - salida poza disipadora (m/s)		
Caudal (m³/s)	Velocidad (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
85	2.07	1.99
	1.98	
	1.93	
220	3.71	3.19
	3.31	
	2.56	
342.31	3.89	3.89
500	5.05	5.02
	5.00	
	5.02	
693.60	6.27	6.27
1000	8.30	8.30
1144	8.69	9.15
	9.64	
	9.12	
2318	13.50	16.37
	18.83	
	16.79	
3342	20.78	21.40
	20.78	
	22.64	

Fuente: Elaboración propia

Caudal 342.31 m³/s, caída “h” = 8.05 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 327.81 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 322.86 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 0.39 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"V ₁ "	"Fr ₁ "
Q/b	q^2/gh^3	$0.54hD^{0.425}$	$1.66hD^{0.27}$	Según ensayos	$Q/(bY_1)$	$V_1/\sqrt{gY_1}$
11.4 m ³ /s*m	0.025	0.91 m	4.96 m	19.6 m	12.5 m/s	4.18

Dados disipadores (Figura 20):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y ₁	d ₁ = 1.3y ₁	ls ₁ = 0.5y ₁	li ₁ = 1.3y ₁	a ₁ = y ₁	s ₁ = a ₁
342.31 m ³ /s	0.91 m	1.2 m	0.5 m	1.2 m	1 m	1 m

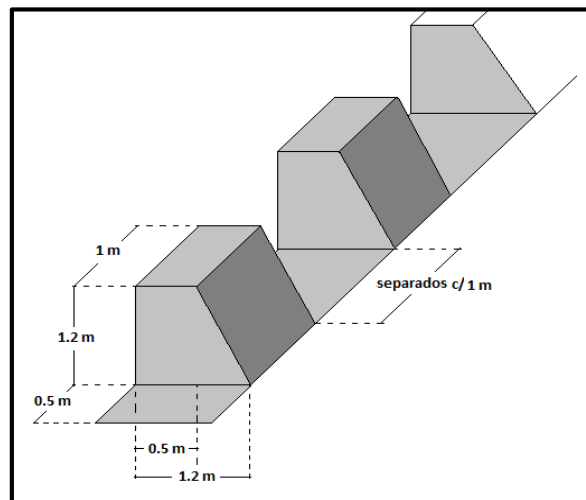
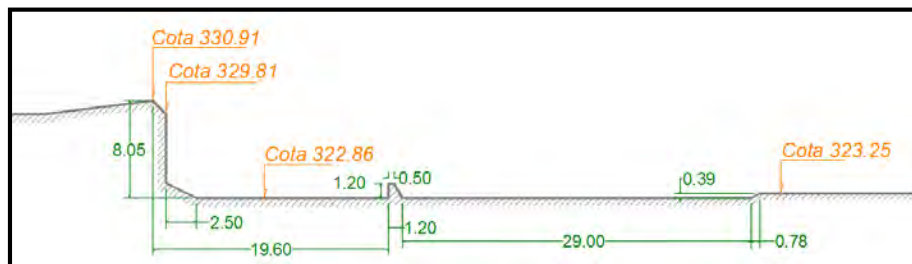


Figura 20. Datos disipadores, caudal proporcional 342.31 m³/s – Alternativa 5
Fuente: Elaboración propia

Estanque amortiguador (Esquema 71):

Según la Tabla 39, deducimos que para $Q = 342.31 \text{ m}^3/\text{s}$, $L_d \approx 19.6 \text{ m}$
Como, $2.5 \leq \text{Froude} = 4.18 \leq 4.5$, entonces la longitud de estanque tipo I:
 $L_I = y_2 (1.5 + 1.768 \text{Fr} - 0.174 \text{Fr}^2) = 29 \text{ m}$

Para un mejor detalle, revisar el Plano M-01 del Anexo M.



Esquema 71. Poza disipadora, caudal proporcional 342.31 m³/s – Alternativa 5
Fuente: Elaboración propia

Caudal 693.6 m³/s, caída “h” = 9.52 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 328.88 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 321.39 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 1.86 m

Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"V ₁ "	"Fr ₁ "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	Q/(bY ₁)	V ₁ /√gY ₁
23.12 m ³ /s*m	0.063	1.59 m	7.5 m	32.4 m	14.55 m/s	3.68

Dados disipadores (Figura 21):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y ₁	d ₁ = 1.3y ₁	ls ₁ = 0.5y ₁	li ₁ = 1.3y ₁	a ₁ = y ₁	s ₁ = a ₁
693.6 m ³ /s	1.59 m	2.1 m	0.8 m	2.1 m	1.6 m	1.6 m

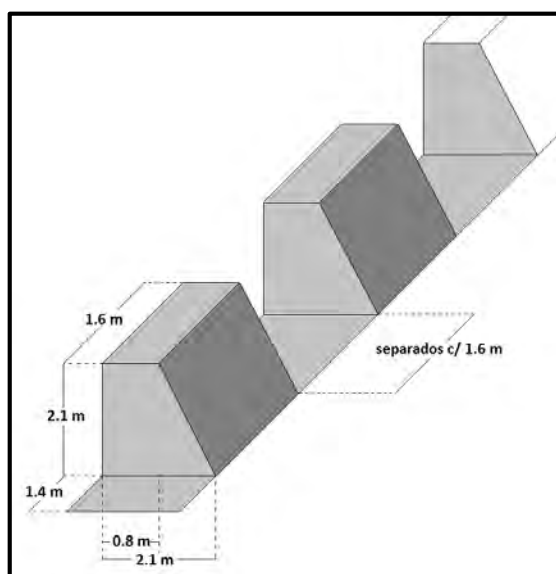


Figura 21. Datos disipadores, caudal proporcional 693.6 m³/s – Alternativa 5
Fuente: Elaboración propia

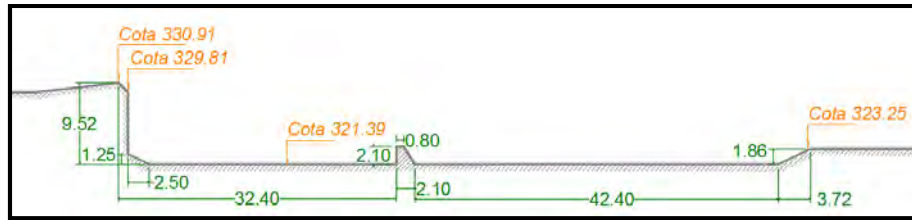
Estanque amortiguador (Esquema 72):

Según la Tabla 39, deducimos que para Q = 693.6 m³/s, L_d ≈ 32.4 m

Como, 2.5 ≤ Froude = 3.68 ≤ 4.5, entonces la longitud de estanque tipo I:

$$L_I = y_2 (1.5 + 1.768 Fr - 0.174 Fr^2) = 42.37 \text{ m} = 42.4 \text{ m}$$

Para un mejor detalle, revisar el Plano M-01 del Anexo M.

Esquema 72. Poza disipadora, caudal proporcional 693.6 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

Caudal 1000 m³/s, caída “h” = 10.85 m, ancho vertedero “b” = 30 m

Cota de restitución S-33 = 329.42 m.s.n.m.

Cota salida del vertedero = 330.91 m.s.n.m.

Cota salida de poza disipadora = 323.25 m.s.n.m.

Cota fondo de poza disipadora = 320.06 m.s.n.m.

Profundidad de poza disipadora = 3.19 m

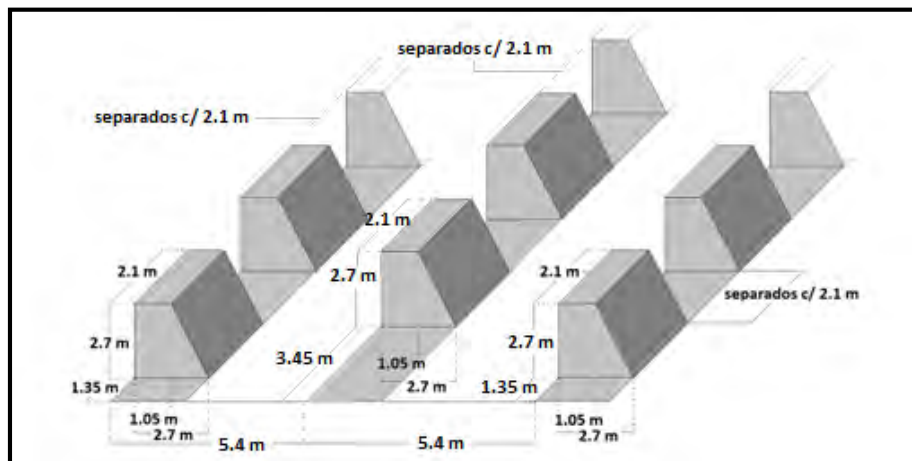
Caudal unitario "q"	"D"	"y ₁ "	"y ₂ "	"L _d "	"V ₁ "	"Fr ₁ "
Q/b	q ² /gh ³	0.54hD ^{0.425}	1.66hD ^{0.27}	Según ensayos	Q/(bY ₁)	V ₁ /√gY ₁
33.33 m ³ /s*m	0.0887	2.09 m	9.37 m	39.7 m	15.93 m/s	3.52

Dados disipadores (Figura 22):

Datos disipadores						
Caudal	Profundidad inicial	Altura	Largo superior	Largo inferior	Ancho	Separación entre dados
	y ₁	d ₁ = 1.3y ₁	l _s = 0.5y ₁	l _i = 1.3y ₁	a ₁ = y ₁	s ₁ = a ₁
1000 m ³ /s	2.09 m	2.7 m	1.05 m	2.7 m	2.1 m	2.1 m

Solo para el caudal 1000 m³/s, se diseñó con 3 filas de dados disipadores para que la disipación de energía por turbulencia sea más efectiva. Para los caudales menores no serán necesarias más filas de dados disipadores, bastará solo con una fila de dados y el estanque amortiguador.

Separación entre filas de dados disipadores: $s_{fila\ dados} = 2d_1 = 5.4\text{ m}$

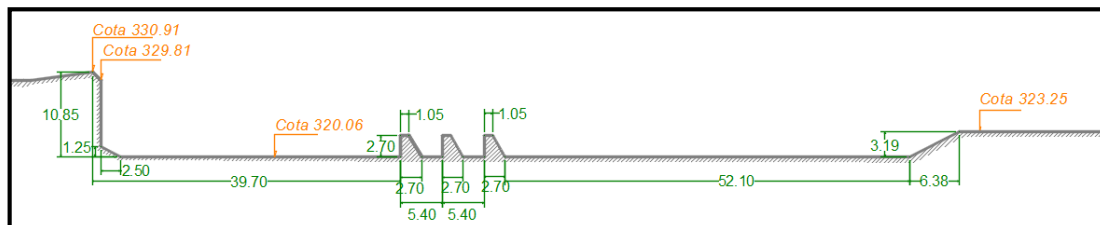
Figura 22. Dados disipadores, caudal proporcional 1000 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

Estanque amortiguador (Esquema 73):

Según la Tabla 39, deducimos que para $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $L_d \approx 39.7 \text{ m}$
 Como, $2.5 \leq \text{Froude} = 3.52 \leq 4.5$, entonces la longitud de estanque tipo I:
 $L_I = y_2 (1.5 + 1.768 \text{ Fr} - 0.174 \text{ Fr}^2) = 52.10 \text{ m}$

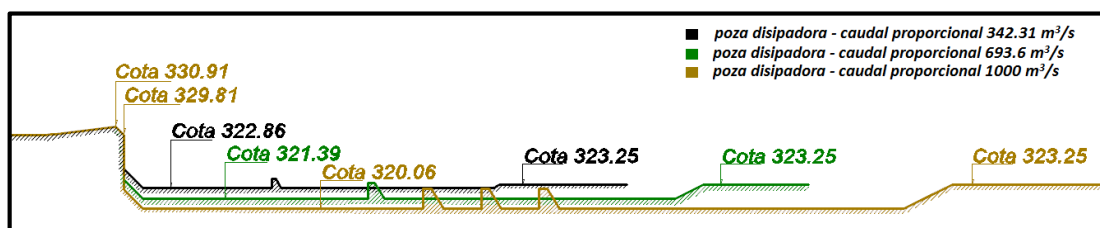
Para un mejor detalle, revisar el Plano M-01 del Anexo M.



Esquema 73. Poza disipadora, caudal proporcional $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

Según sea para cada caudal proporcional “ $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $693.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $342.31 \text{ m}^3/\text{s}$ ”, se ha determinado su diseño correspondiente (Esquema 74).

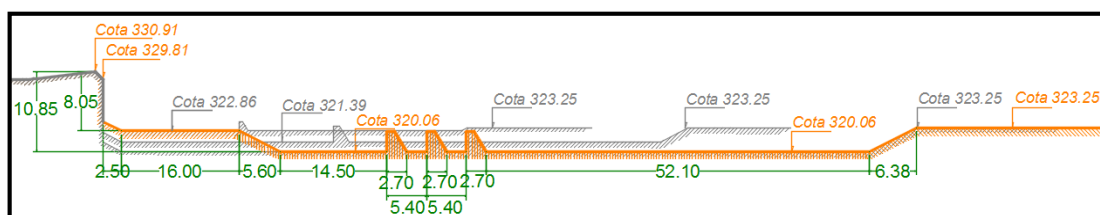


Esquema 74. Poza disipadora, todos los caudales proporcionales – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones del diseño de la poza disipadora y el “ L_d ” del chorro para el caudal proporcional de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, envuelven las dimensiones de las pozas y las longitudes del chorro de los caudales proporcionales menores. Es necesario resaltar que para el caudal proporcional de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, la formación del resalto hidráulico se efectuará en las progresivas posteriores a “ L_d ”; las progresivas anteriores, es solo una dimensión complementaria de poca importancia (Figura 8). Por lo tanto, se aprovechará estas dimensiones complementarias para acoplar los diseños de pozas disipadoras de los caudales proporcionales menores, lo cual generará ahorros en costos de excavación comparado al diseño de la poza para el caudal proporcional de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

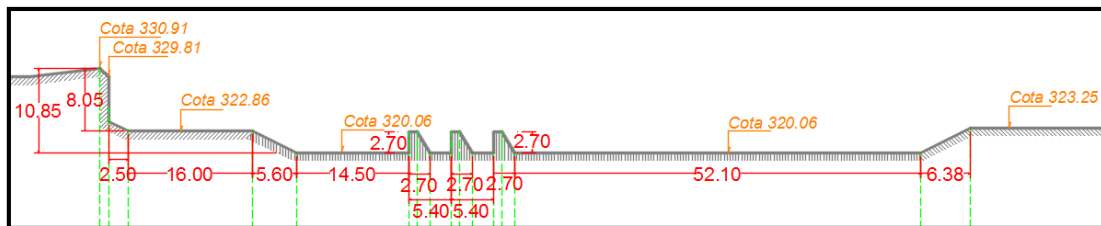
Se unificará todos los diseños para todos los caudales proporcionales en un solo diseño (Esquema 75), de la siguiente forma:



Esquema 75. Unificación de poza disipadora, todos los caudales proporcionales – Alternativa 5

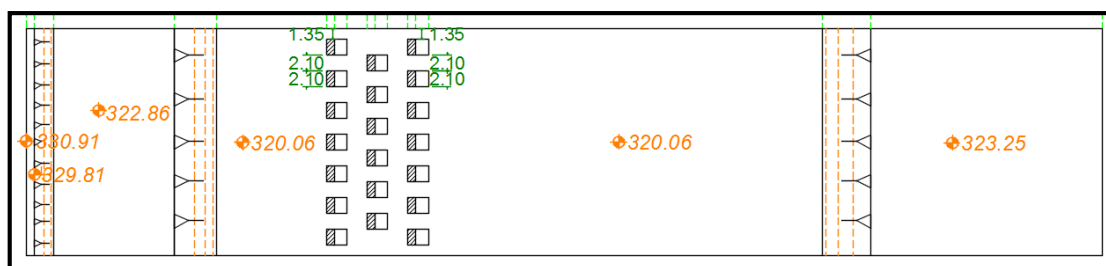
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se muestra el diseño y geometría final de la Alternativa 5, tanto en la vista de perfil (Esquema 76) como en la vista de planta (Esquema 77).



Esquema 76. Diseño final de poza disipadora, todos los caudales proporcionales – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia



Esquema 77. Vista de planta del diseño final de poza disipadora, todos los caudales proporcionales – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Resultados

4.5.2.1. Caudal 342.31 m³/s (1144 m³/s)

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 41). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 5 puntos de medición (Tabla 42).

Según los resultados, para el caudal proporcional de 342.31 m³/s, se ha obtenido velocidades menores comparado al diseño original, pues en su recorrido sobre la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón amortiguador de agua que se forma dentro de la misma y a la presencia de dados disipadores (Anexo F). El desarrollo del flujo en el interior de la poza disipadora se realiza de forma tranquila, sin turbulencia (Anexo 78). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando reducción de velocidad esperada (Esquema 79). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano M-01 del Anexo M.

Tabla 41. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 342.31 m³/s – Alternativa 5

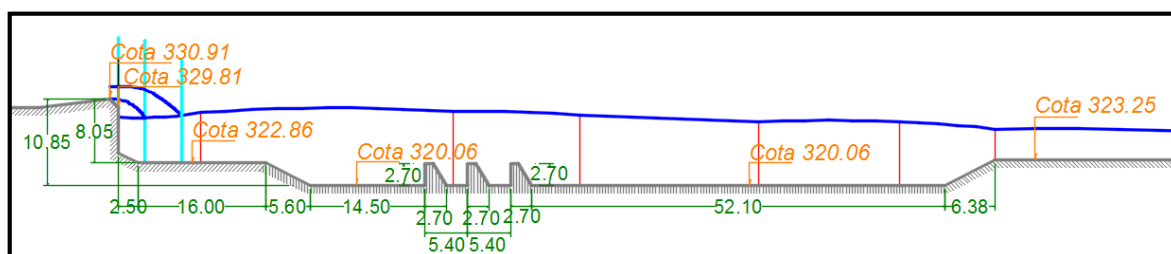
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
3 cm	3.05	3.05
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	2.90	3.05
Centro	3.26	
Margen derecha	2.99	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Longitud del chorro, caudal 342.31 m³/s – Alternativa 5

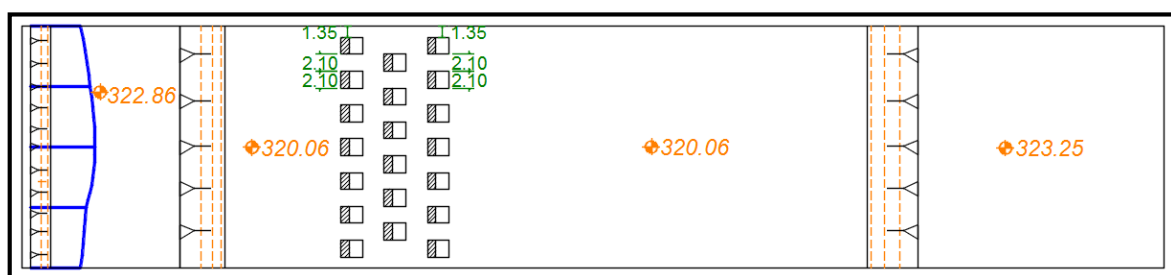
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda		→	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
6.18	7.32	7.92	6.84	6.12

Fuente: Elaboración propia



Esquema 78. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 342.31 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia



Esquema 79. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 342.31 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.2. Caudal 693.6 m³/s (2318 m³/s)

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 43). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 5 puntos de medición (Tabla 44).

Según los resultados, para el caudal proporcional de 693.6 m³/s, se ha obtenido velocidades menores comparado al diseño original, pues en su recorrido sobre la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón amortiguador de agua que se forma dentro de la misma y a la presencia de dados disipadores (Anexo F). El desarrollo del flujo es ligeramente turbulento, con presencia de oscilaciones en la superficie del mismo (Anexo 80). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, generando la reducción de velocidad (Esquema 81). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano M-01 del Anexo M.

Tabla 43. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 693.6 m³/s – Alternativa 5

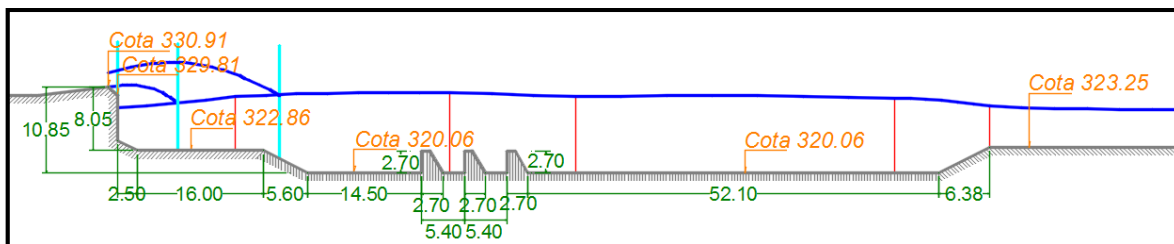
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
5 cm	4.72	4.52
3 cm	4.33	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	4.40	4.52
Centro	4.44	
Margen derecha	4.73	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44. Longitud del chorro, caudal 693.6 m³/s – Alternativa 5

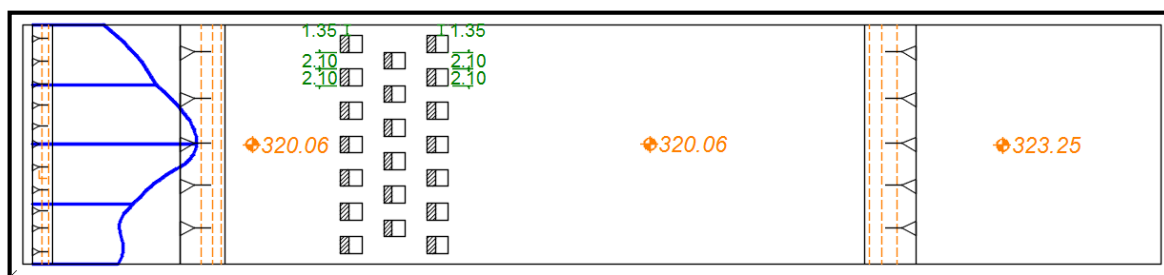
Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda		→	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
0	7.5	15	22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
9	15.6	20.58	12.6	10.8

Fuente: Elaboración propia



Esquema 80. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 693.6 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia



Esquema 81. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 693.6 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

4.5.2.3. Caudal 1000 m³/s (3342 m³/s)

La medición de la velocidad en la sección de salida de la poza disipadora, se ha hecho de dos formas (Tabla 45). La primera, tomando medidas parciales que están contenidas dentro de la altura máxima del tirante de salida; y la segunda, en función a los ejes de la sección de salida de la poza disipadora. De igual forma, para determinar la longitud del chorro en la sección de salida del vertedero, ha sido necesario dividir la sección en 5 puntos de medición (Tabla 46).

Según los resultados, para el caudal proporcional de 1000 m³/s, se ha obtenido velocidades menores comparado al diseño original, pues en su recorrido sobre la poza disipadora, el flujo ha perdido gran parte de su energía cinética, debido al colchón amortiguador de agua que se forma dentro de la misma y a la presencia de dados disipadores (Anexo F). En la poza disipadora, el resalto hidráulico se desarrolla por turbulencia, con presencia de oscilaciones en la superficie y movimientos circulares dentro del mismo (Anexo 82). Así mismo, la longitud del chorro es contenida dentro de la poza, e impacta sobre los dados disipadores (Esquema 83). Para un mejor detalle del ensayo realizado, revisar el Plano M-01 del Anexo M.

Tabla 45. Velocidades obtenidas con el correntómetro, caudal 1000 m³/s – Alternativa 5

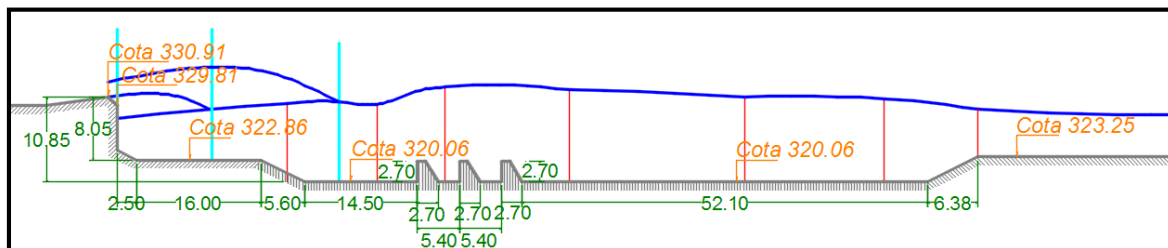
Velocidad por altura (m/s)		
Altura "h"	Velocidad por altura (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE ALTURAS (m/s)
7 cm	4.70	5.53
4 cm	6.35	
Velocidad por eje (m/s)		
Eje	Velocidad por eje (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DE EJES (m/s)
Margen izquierda	5.29	5.53
Centro	5.07	
Margen derecha	6.21	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Longitud del chorro, caudal 1000 m³/s – Alternativa 5

Ubicación de puntos desde margen izquierda hacia margen derecha (m)				
Margen izquierda		→	Margen derecha	
P1	P2		P4	P5
0	7.5		22.5	30
Longitud del chorro - salida del vertedero (m)				
Margen izquierda		Eje	Margen derecha	
P1	P2	P3	P4	P5
12.84	20.13	28.5	20.4	14.28

Fuente: Elaboración propia



Esquema 82. Desarrollo del flujo en la poza disipadora, caudal 1000 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia



Esquema 83. Longitud del chorro en la poza disipadora, caudal 1000 m³/s – Alternativa 5

Fuente: Elaboración propia

4.6. Resumen general

Las Tablas 47 y 48 describen las cotas de restitución del cauce en la sección 33, para los diferentes tipos de caudales.

Tabla 47. Cota de restitución – Sección 33

Caudal río (m³/s)	Caudal vertedero (m³/s)	Caudal río + vertedero (m³/s)	Cota de restitución Sec - 33 (m.s.n.m.)
640	220	860	326.6
640	500	1140	327.03
640	1144	1784	327.81
640	2318	2958	328.88
640	3342	3982	329.42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. Cota de restitución, caudal proporcional – Sección 33

Caudal río (m³/s)	Caudal vertedero (m³/s)	Caudal río + vertedero (m³/s)	Cota de restitución Sec - 33 (m.s.n.m.)
640	342.31	982.31	327.81
640	693.60	1333.60	328.88
640	1000	1640	329.42

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 49 y 50 describen los tirantes del flujo a la salida del vertedero para todos los caudales de ensayo correspondientes al diseño original, el cual no presenta modificaciones en el vertedero. Así mismo la Tabla 51 describe los tirantes del flujo a la salida del vertedero, correspondiente a la Alternativa 4, el cual si presenta modificaciones en el vertedero.

Tabla 49. Tirante de salida en el vertedero – Diseño original

Caudal	Tirante salida - vertedero (m)					
	Diseño original					Tirante Prom.
220 m³/s	1.50	1.20	1.14	1.38	1.68	1.38
500 m³/s	1.92	1.38	1.38	1.98	2.22	1.78
1144 m³/s	2.04	1.80	1.92	2.10	2.70	2.11
2318 m³/s	3.60	3.30	3.18	3.00	3.90	3.40
3342 m³/s	4.20	4.38	4.56	4.86	5.52	4.70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Tirante de salida en el vertedero, caudal proporcional – Diseño original

Caudal proporcional	Tirante salida - vertedero (m)
	Diseño original
342.31 m³/s (1144 m³/s)	1.55
693.60 m³/s (2318 m³/s)	1.83
1000 m³/s (3342 m³/s)	2.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Tirante de salida en el vertedero – Alternativa 4

Caudal	Tirante salida - vertedero (m)
	Alternativa 4
220 m ³ /s	1.90
500 m ³ /s	4.14
1144 m ³ /s	6.60
2318 m ³ /s	8.40
3342 m ³ /s	9.35

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 52 y 53 describen los tirantes del flujo a la salida de la poza disipadora para todos los caudales de ensayo correspondientes al diseño original, el cual no presenta modificaciones en la poza disipadora. Así mismo las Tablas 54 y 55 describen los tirantes del flujo a la salida de la poza disipadora correspondiente a las alternativas propuestas, el cual si presenta modificaciones en la poza disipadora.

Tabla 52. Tirante de salida en la poza disipadora – Diseño original

Tabla 52. Tirante de salida en la poza disipadora - Diseño original						
Caudal	Tirante salida - poza disipadora (m)					Tirante Prom.
	Diseño original					
220 m³/s	2.10	1.80	2.16	2.10	2.40	2.11
500 m³/s	3.00	3.15	2.40	2.55	2.58	2.74
1144 m³/s	4.80	2.70	2.70	3.00	3.90	3.42
2318 m³/s	4.80	4.80	4.20	4.80	3.60	4.44
3342 m³/s	4.20	-	-	-	4.20	4.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Tirante de salida en la poza disipadora, caudal proporcional – Diseño original

Caudal proporcional	Tirante salida - poza disipadora (m)
	Diseño original
342.31 m³/s (1144 m ³ /s)	2.36
693.60 m³/s (2318 m ³ /s)	2.95
1000 m³/s (3342 m ³ /s)	3.27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Tirante de salida en la poza disipadora – Alternativa 1, 2, 3, 4

Caudal	Tirante salida - poza disipadora (m)			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
220 m ³ /s	-	2.52	-	2.58
500 m ³ /s	-	3.84	-	5.34
1144 m ³ /s	-	5.70	7.14	6.30
2318 m ³ /s	-	9.66	10.62	7.20
3342 m ³ /s	13.74	11.88	13.68	9.72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Tirante de salida en la poza disipadora, caudal proporcional – Alternativa 5

Caudal	Tirante salida - poza disipadora (m)
proporcional	Alternativa 5 - proporcional
342.31 m³/s (1144 m³/s)	3.84
693.60 m³/s (2318 m³/s)	5.22
1000 m³/s (3342 m³/s)	6.12

Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 56 y 57 describen las velocidades del flujo a la salida del vertedero para todos los caudales de ensayo correspondientes al diseño original, el cual no presenta modificaciones en el vertedero. Así mismo la Tabla 58 describe las velocidades del flujo a la salida del vertedero, correspondiente a la Alternativa 4, el cual si presenta modificaciones en el vertedero.

Tabla 56. Velocidad de salida en el vertedero, caudal proporcional – Diseño original

Caudal	Velocidad salida - vertedero (m/s)
proporcional	Diseño original
342.31 m³/s (1144 m³/s)	7.44
693.60 m³/s (2318 m³/s)	12.50
1000 m³/s (3342 m³/s)	16.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Velocidad de salida en el vertedero – Diseño original

Caudal	Velocidad salida - vertedero (m/s)
	Diseño original
220 m³/s	5.52
500 m³/s	9.79
1144 m³/s	18.06
2318 m³/s	22.84
3342 m³/s	23.90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Velocidad de salida en el vertedero – Alternativa 4

Caudal	Velocidad salida - vertedero (m/s)
	Alternativa 4
220 m³/s	3.78
500 m³/s	4.21
1144 m³/s	5.80
2318 m³/s	9.23
3342 m³/s	12.08

Fuente: Elaboración propia

Las Tabla 59 y 60 describen las velocidades del flujo a la salida de la poza disipadora para todos los caudales ensayados correspondiente al diseño original, el cual no presenta modificaciones en la poza disipadora. Así mismo las velocidades del flujo a la salida de la poza disipadora, correspondiente a las alternativas propuestas, el cual si presenta modificaciones en la poza disipadora.

Tabla 59. Velocidad de salida en la poza disipadora, Diseño original – Alternativa 1, 2, 3, 4

Caudal	Velocidad salida - poza disipadora (m/s)				
	Diseño original	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
220 m ³ /s	3.19	-	3.02	-	2.79
500 m ³ /s	5.02	-	4.57	-	3.23
1144 m ³ /s	9.15	-	6.76	5.41	4.88
2318 m ³ /s	16.37	-	8.06	7.39	6.98
3342 m ³ /s	21.40	8.18	9.48	8.30	9.07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. Velocidad de salida en la poza disipadora, caudal proporcional, Diseño original – Alternativa 5

Caudal proporcional	Velocidad salida - poza disipadora (m/s)	
	Diseño original	Alternativa proporcional de poza disipadora - Alternativa 5
342.31 m³/s (1144 m ³ /s)	3.89	3.05
693.60 m³/s (2318 m ³ /s)	6.27	4.52
1000 m³/s (3342 m ³ /s)	8.30	5.53

Fuente: Elaboración propia

En las Gráficas 1, 2, 3 y 4 se observa la comparación de velocidades a la salida de la poza disipadora entre el diseño original y todas las alternativas propuestas. En todas las gráficas se deduce que, la reducción de energía cinética es en mayor proporción para los caudales comprendidos entre 1144 m³/s y 3342 m³/s.

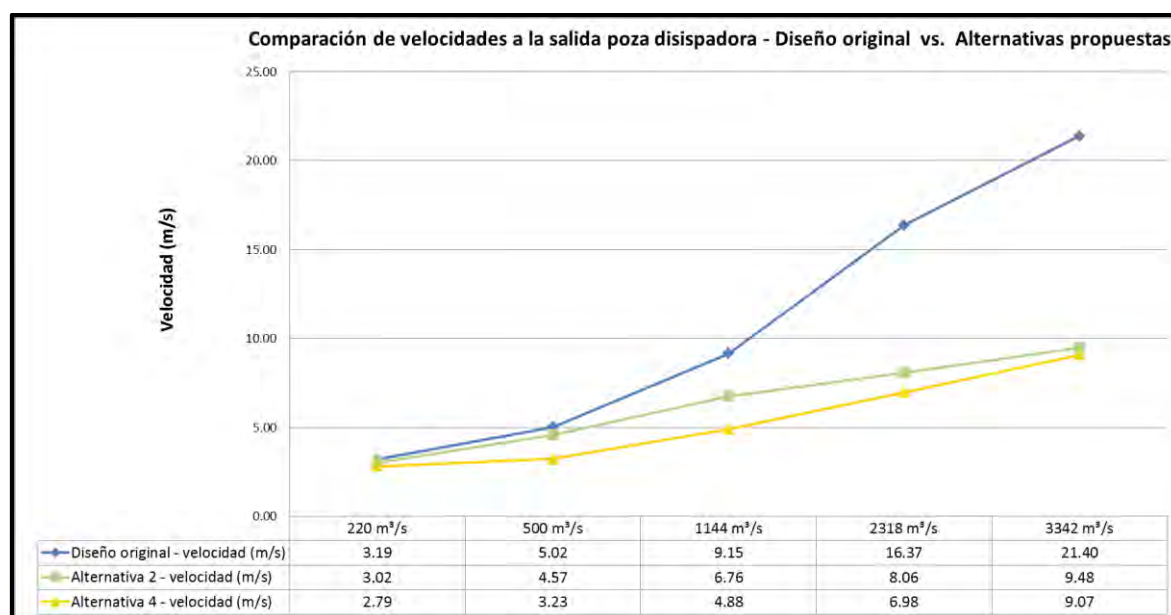


Gráfico 1. Comparación velocidades de salida en la poza disipadora, Diseño original vs. Alternativa 2, 4

Fuente: Elaboración propia

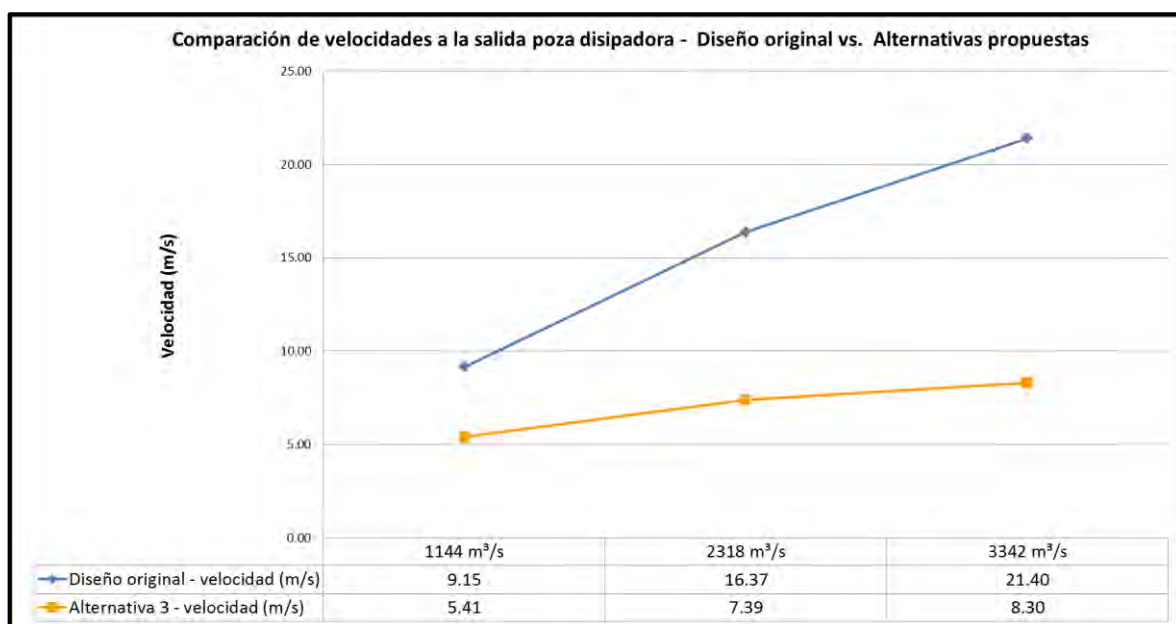


Gráfico 2. Comparación velocidades de salida en la poza disipadora, Diseño original vs. Alternativa 3
Fuente: Elaboración propia

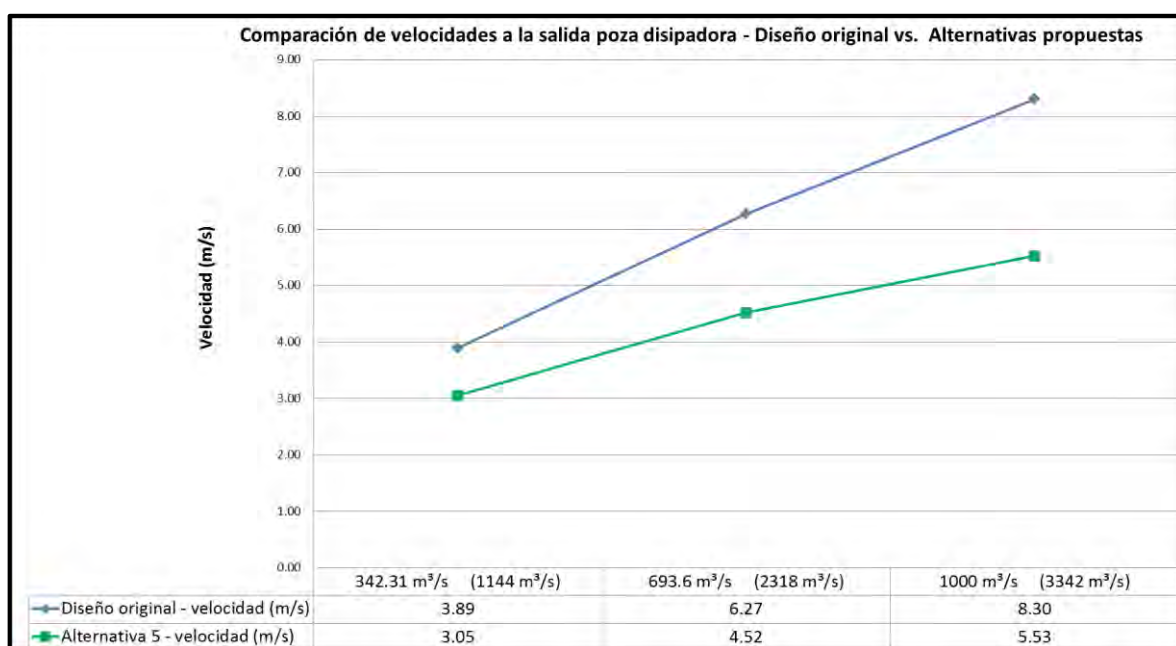


Gráfico 3. Comparación velocidades de salida en la poza disipadora, Diseño original vs. Alternativa 5
Fuente: Elaboración propia



Gráfico 4. Comparación velocidad de salida en la poza disipadora, Diseño original vs. Alternativa 1
Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 5 describe el resumen general de velocidades obtenidas a la salida de la poza disipadora tanto para el diseño original, como también el de todas las alternativas propuestas. Así mismo da una claridad general comparativa entre los mismos.

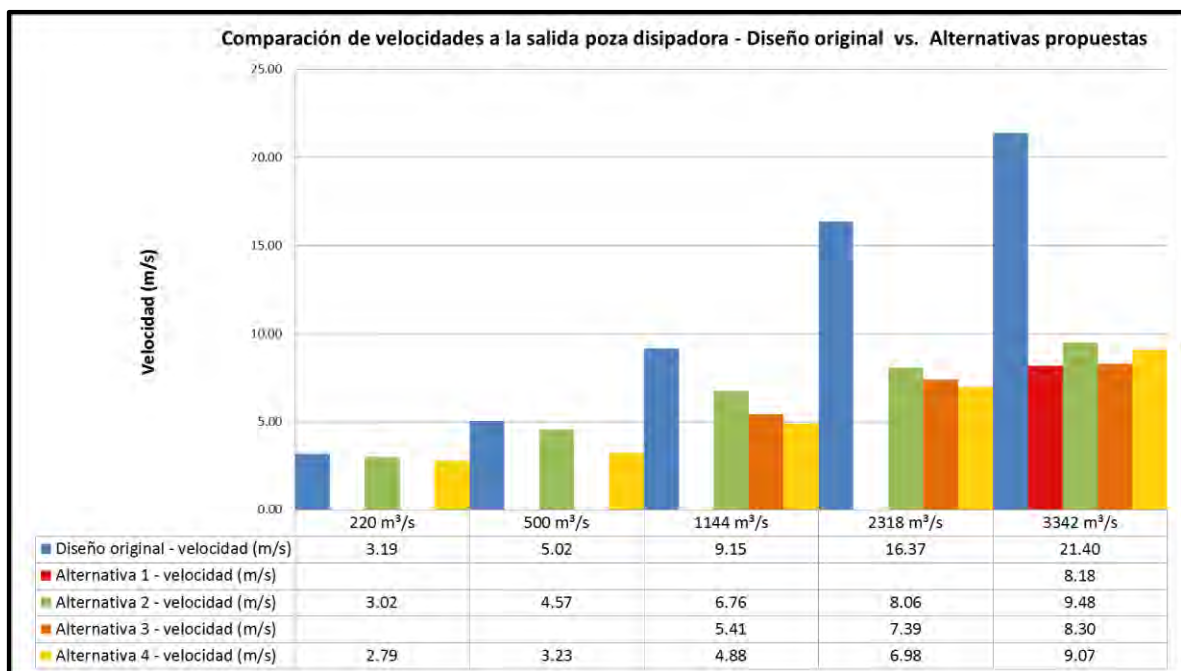


Gráfico 5. Comparación general – velocidad de salida poza disipadora, Diseño original vs. Alternativas propuestas
Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 61 y 62 describen el resumen comparativo de energía específica obtenido entre la salida del vertedero de servicio y la salida de la poza disipadora tanto para el diseño original, como también el de todas las alternativas propuestas. Debido a que la Alternativa 4 posee modificaciones en el vertedero, esto hace que no sea comparable con los demás diseños. Ante ello, en la Tabla 62, existen datos en las secciones “a, b y c” el cual permite la comparación con los demás diseños.

Tabla 61. Comparación de energía específica entre el vertedero y poza disipadora – todas las Alternativas

	Caudal	Vertedero		Energía Específica 1	Poza disipadora		Energía Específica 2
		Tirante salida (m)	Velocidad salida (m/s)		Tirante salida (m)	Velocidad salida (m/s)	
Diseño original	220 m³/s	1.38	5.52	2.93	2.11	3.19	2.63
	500 m³/s	1.78	9.79	6.66	2.74	5.02	4.02
	342.31 m³/s	1.55	7.44	4.37	2.36	3.89	3.13
	693.6 m³/s	1.83	12.50	9.79	2.95	6.27	4.95
	1000 m³/s	2.00	16.40	15.71	3.27	8.30	6.78
	1144 m³/s	2.11	18.06	18.74	3.42	9.15	7.69
	2318 m³/s	3.40	22.84	29.99	4.44	16.37	18.10
Alternativa 1	3342 m³/s	4.70	23.90	33.82	4.20	21.40	27.54
					13.74	8.18	17.15
Alternativa 2	220 m³/s	1.38	5.52	2.93	2.52	3.02	2.98
	500 m³/s	1.78	9.79	6.66	3.84	4.57	4.90
	1144 m³/s	2.11	18.06	18.74	5.70	6.76	8.03
	2318 m³/s	3.40	22.84	29.99	9.66	8.06	12.97
	3342 m³/s	4.70	23.90	33.82	11.88	9.48	16.46
Alternativa 3	1144 m³/s	2.11	18.06	18.74	7.14	5.41	8.63
	2318 m³/s	3.40	22.84	29.99	10.62	7.39	13.40
	3342 m³/s	4.70	23.90	33.82	13.68	8.30	17.19
Alternativa 4	220 m³/s	1.90	3.78	2.63	2.58	2.79	2.98
	500 m³/s	4.14	4.21	5.04	5.34	3.23	5.87
	1144 m³/s	6.60	5.80	8.31	6.30	4.88	7.52
	2318 m³/s	8.40	9.23	12.74	7.20	6.98	9.68
	3342 m³/s	9.35	12.08	16.79	9.72	9.07	13.91
Alternativa 5	342.31 m³/s (1144 m³/s)	1.55	7.44	4.37	3.84	3.05	4.31
	693.60 m³/s (2318 m³/s)	1.83	12.50	9.79	5.22	4.52	6.26
	1000 m³/s (3342 m³/s)	2.00	16.40	15.71	6.12	5.53	7.68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Reducción de energía específica entre el vertedero y poza disipadora – todas las Alternativas

	Caudal	Energía Específica 1		Energía Específica 2	Diferencia de energía "ΔE"		Reducción de energía específica (%)	
Diseño original	220 m³/s	2.93		2.63	0.30		10.27%	
	500 m³/s	6.66		4.02	2.64		39.62%	
	342.31 m³/s	4.37		3.13	1.24		28.34%	
	693.6 m³/s	9.79		4.95	4.84		49.42%	
	1000 m³/s	15.71		6.78	8.93		56.82%	
	1144 m³/s	18.74		7.69	11.05		58.97%	
	2318 m³/s	29.99		18.10	11.88		39.63%	
	3342 m³/s	33.82		27.54	6.28		18.56%	
Alternativa 1	3342 m³/s	33.82		17.15	16.67		49.29%	
Alternativa 2	220 m³/s	2.93		2.98	-0.05		n.d.	
	500 m³/s	6.66		4.90	1.76		26.37%	
	1144 m³/s	18.74		8.03	10.71		57.16%	
	2318 m³/s	29.99		12.97	17.02		56.76%	
	3342 m³/s	33.82		16.46	17.36		51.32%	
Alternativa 3	1144 m³/s	18.74		8.63	10.11		53.94%	
	2318 m³/s	29.99		13.40	16.59		55.31%	
	3342 m³/s	33.82		17.19	16.62		49.16%	
Alternativa 4	220 m³/s	2.63	2.93 ^a	2.98	-0.35	-0.4 ^b	n.d	n.d
	500 m³/s	5.04	6.66 ^a	5.87	-0.83	0.79 ^b	n.d	11.87% ^c
	1144 m³/s	8.31	18.74 ^a	7.52	0.80	11.22 ^b	9.61%	59.89% ^c
	2318 m³/s	12.74	29.99 ^a	9.68	3.06	20.30 ^b	24.00%	67.71% ^c
	3342 m³/s	16.79	33.82 ^a	13.91	2.87	19.90 ^b	17.12%	58.86% ^c
Alternativa 5	342.31 m³/s (1144 m³/s)	4.37		4.31	0.06		1.31%	
	693.60 m³/s (2318 m³/s)	9.79		6.26	3.53		36.07%	
	1000 m³/s (3342 m³/s)	15.71		7.68	8.03		51.14%	

^a Energía específica 1, con respecto al Diseño original^b Diferencia de Energía "ΔE", con respecto al Diseño original^c Reducción de Energía específica, con respecto al Diseño original

n.d. No detectable, debido a que se ha tomado datos de velocidades promedio y unidimensionales

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63. Reducción de la velocidad de salida entre el vertedero y poza disipadora – todas las Alternativas

	Caudal	Vertedero	Poza disipadora	Reducción de energía cinética (%)
		Velocidad salida (m/s)	Velocidad salida (m/s)	
Diseño original	220 m ³ /s	5.52	3.19	42.15%
	500 m ³ /s	9.79	5.02	48.69%
	342.31 m ³ /s	7.44	3.89	47.68%
	693.6 m ³ /s	12.50	6.27	49.84%
	1000 m ³ /s	16.40	8.30	49.38%
	1144 m ³ /s	18.06	9.15	49.34%
	2318 m ³ /s	22.84	16.37	28.31%
	3342 m ³ /s	23.90	21.40	10.46%
Alternativa 1	3342 m ³ /s	23.90	8.18	65.78%
Alternativa 2	220 m ³ /s	5.52	3.02	45.36%
	500 m ³ /s	9.79	4.57	53.32%
	1144 m ³ /s	18.06	6.76	62.58%
	2318 m ³ /s	22.84	8.06	64.73%
	3342 m ³ /s	23.90	9.48	60.33%
Alternativa 3	1144 m ³ /s	18.06	5.41	70.07%
	2318 m ³ /s	22.84	7.39	67.66%
	3342 m ³ /s	23.90	8.30	65.26%
Alternativa 4	220 m ³ /s	3.78	2.79	26.16%
	500 m ³ /s	4.21	3.23	23.36%
	1144 m ³ /s	5.80	4.88	15.81%
	2318 m ³ /s	9.23	6.98	24.37%
	3342 m ³ /s	12.08	9.07	24.91%
Alternativa 5	342.31 m ³ /s (1144 m ³ /s)	7.44	3.05	59.01%
	693.60 m ³ /s (2318 m ³ /s)	12.50	4.52	63.84%
	1000 m ³ /s (3342 m ³ /s)	16.40	5.53	66.31%

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados de la Tabla 63 y tomando en cuenta los niveles de restitución del cauce descritos en las Tablas 47 y 48, podemos inferir lo siguiente:

Diseño original

En este diseño, la lectura de datos de reducción de energía específica no es representativo, ya que el flujo se dispersa en una sección superior a la sección de control, haciendo que una parte del volumen del flujo ingrese a la sección de control, y la otra parte de disperse en el cauce. Sin embargo, sirve como una base de información relativa.

Para 220 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **42.15%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **10.27%**.

Para 342.31 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **47.68%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **28.34%**.

Para 500 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **48.69%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **39.62%**.

Para 693.6 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **49.84%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **49.42%**.

Para 1000 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **49.38%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **56.82%**.

Para 1144 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **49.34%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **58.97%**.

Para 2318 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **28.31%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **39.63%**.

Para 3342 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en un **10.46%**. Así mismo, se logra disipar la energía específica en un **18.56%**.

Alternativa 1

La disipación de la energía cinética se reduce en un **65.78%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “23.9 m/s a 8.18 m/s” en la salida de la poza disipadora. La energía específica se reduce en un **49.29%** y un **30.7%** adicional comparado al Diseño original.

Además, el nivel de restitución del cauce para el caudal 3342 m³/s, es la cota 329.42, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 336.99) en la poza disipadora. La diferencia de alturas generará el desplazamiento del resalto hacia aguas abajo originando erosiones en el cauce.

Alternativa 2

En todos los ensayos realizados para cada caudal, se consiguió la reducción de energía cinética.

Para 220 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **45.36%**, frente al Diseño original con una reducción del **42.15%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **3.21%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 220 m³/s, es la cota 326.6, el cual es superior al tirante de salida del flujo (cota 325.77) en la poza disipadora, lo que originaría el desplazamiento del resalto hidráulico hacia aguas arriba, convirtiéndose en un resalto sumergido; este es el caso más seguro de un diseño de pozas disipadora, pues el resalto se ubica en la zona protegida, pero es menos eficiente.

Para 500 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **53.32%**, frente al Diseño original con una reducción del **48.69%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **4.63 %** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 500 m³/s, es la cota 327.03, el cual es similar al tirante de salida del flujo (cota 327.09) en la poza disipadora; este es el caso que se recomienda para el diseño de pozas disipadoras. La energía específica se reduce en un **26.37%**. No logra una adecuada disipación de energía específica frente al Diseño original.

Para 1144 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **62.58%**, frente al Diseño original con una reducción del **49.34%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **13.24%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 1144 m³/s, es la cota 327.81, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 328.95) en la poza disipadora; este caso no se recomienda diseñar, pues la diferencia de alturas ocasionaría la erosión aguas abajo en el cauce. La energía específica se reduce en un **57.16%**. Relativamente igual al Diseño original.

Para 2318 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **64.73%**, frente al Diseño original con una reducción del **28.31%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **36.42%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 2318 m³/s, es la cota 328.88, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 332.91) en la poza disipadora, originando erosiones fuertes en el cauce aguas abajo. La energía específica se reduce en un **56.76%** y un **17.13%** adicional comparado al Diseño original.

Para 3342 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **60.33%**, frente al Diseño original con una reducción del **10.46%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **49.87%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 3342 m³/s, es la cota 329.42, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 335.13) en la poza disipadora, ocasionando muy fuerte erosiones aguas abajo en el cauce. La energía específica se reduce en un **51.32%** y un **32.76%** adicional comparado al Diseño original.

Alternativa 3

Este diseño se basa en la Alternativa 2, con modificaciones en el acortamiento del largo de la poza por la presencia de dados disipadores. Se consiguió reducir la energía cinética.

Para 1144 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **70.1%**, frente al Diseño original con una reducción del **49.34%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **20.76%** y un **7.51%** frente a la Alternativa 2, de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 1144 m³/s, es la cota 327.81, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 330.39) en la poza disipadora; este caso no se recomienda diseñar, pues la diferencia de alturas ocasionaría la erosión aguas abajo en el cauce. La energía específica se reduce en un **53.94%**. No logra una adecuada disipación de energía específica frente al Diseño original.

Para 2318 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **67.7%**, frente al Diseño original con una reducción del **28.31%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **39.39%** y un **2.97%** frente a la Alternativa 2, de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 2318 m³/s, es la cota 328.88, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 333.87) en la poza disipadora, originando erosiones en el cauce aguas abajo. La energía específica se reduce en un **55.31%** y un **15.68%** adicional comparado al Diseño original.

Para 3342 m³/s: En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **65.3%**, frente al Diseño original con una reducción del **10.46%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **54.84%** y un **4.97%** frente a la Alternativa 2, de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 3342 m³/s, es la cota 329.42, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 336.93) en la poza disipadora, ocasionando muy fuerte erosiones aguas abajo en el cauce. La energía específica se reduce en un **49.16%** y un **30.6%** adicional comparado al Diseño original.

Alternativa 4

Se hizo modificaciones al Diseño original, en la salida del vertedero de servicio, así como en la parte inicial de la poza disipadora, además de la colocación de dados disipadores en la poza disipadora.

La Tabla 64 describe un cuadro comparativo de reducción de energía cinética relativa obtenido entre el diseño original y la Alternativa 4.

Tabla 64. Comparación de reducción de velocidad de salida entre el Diseño original y Alternativa 4

	Caudal	Velocidad (m/s)		Reducción de energía cinética(%)
		Diseño original	Alternativa 4	
Vertedero	220 m ³ /s	5.52	3.78	31.52
	500 m ³ /s	9.79	4.21	57.01
	1144 m ³ /s	18.06	5.80	67.88
	2318 m ³ /s	22.84	9.23	59.59
	3342 m ³ /s	23.90	12.08	49.46
Poza disipadora	220 m ³ /s	3.19	2.79	12.59
	500 m ³ /s	5.02	3.23	35.79
	1144 m ³ /s	9.15	4.88	46.63
	2318 m ³ /s	16.37	6.98	57.36
	3342 m ³ /s	21.40	9.07	57.61

Fuente: Elaboración propia

En todos los ensayos realizados en este diseño se redujo la energía cinética, tanto en el vertedero como en la poza disipadora.

Según los resultados de la Tabla 64 y tomando en cuenta la Tabla 47, podemos inferir lo siguiente:

En el vertedero:

Para 220 m³/s: En la salida del vertedero, la disipación de energía cinética se hace efectiva, pues se reduce en un **31.52%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “5.52 m/s a 3.78 m/s”.

Para 500 m³/s: En la salida del vertedero, la disipación de energía cinética se hace efectiva, pues se reduce en un **57%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “9.79 m/s a 4.21 m/s”.

Para 1144 m³/s: En la salida del vertedero, la disipación de energía cinética se hace efectiva, pues se reduce en un **67.88%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “18.06 m/s a 5.8 m/s”.

Para 2318 m³/s: En la salida del vertedero, la disipación de energía cinética se hace efectiva, pues se reduce en un **60%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “22.84 m/s a 9.23 m/s”.

Para 3342 m³/s: En la salida del vertedero, la disipación de energía cinética se hace efectiva, pues se reduce en un **46.46%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “23.9 m/s a 12.08 m/s”.

En la poza disipadora:

Para 220 m³/s: Se reduce la energía cinética en un **12.6%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “3.19 m/s a 2.79 m/s”. El nivel de restitución del cauce para el caudal 220 m³/s, es la cota 326.6, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 327.13) en la poza disipadora, lo que originaría erosiones aguas abajo en el cauce.

Para 500 m³/s: Se reduce la energía cinética en un **35.79%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “5.02 m/s a 3.23 m/s”. El nivel de restitución del cauce para el caudal 500 m³/s, es la cota 327.03, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 329.89) en la poza disipadora; lo que originaría erosiones aguas abajo en el cauce.

Para 1144 m³/s: Se reduce la energía cinética en un **46.63%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “9.15 m/s a 4.88 m/s”. El nivel de restitución del cauce para el caudal 1144 m³/s, es la cota 327.81, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 330.85) en la poza disipadora. La diferencia de alturas ocasionaría la erosión aguas abajo en el cauce.

Para 2318 m³/s: Se reduce la energía cinética en un **57.4%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “16.4 m/s a 6.98 m/s”. El nivel de restitución del cauce para el caudal 2318 m³/s, es la cota 328.88, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 331.75) en la poza disipadora, originando erosiones fuertes aguas abajo en el cauce.

Para 3342 m³/s: Se reduce la energía cinética en un **57.6%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “21.4 m/s a 9.07 m/s”. El nivel de restitución del cauce para el caudal 3342 m³/s, es la cota 329.42, el cual es inferior al tirante de salida del flujo (cota 334.27) en la poza disipadora, ocasionando erosiones muy fuertes aguas abajo en el cauce.

La Tabla 65, describe la comparación de reducción de energía cinética absoluta que existe entre el Diseño original y la Alternativa 4.

Tabla 65. Diseño original (salida vertedero) – Alternativa 4 (disipación conjunta vertedero-poza disipadora)

Caudal	Velocidad (m/s)		Reducción de energía cinética (%)
	Salida del vertedero Diseño original	Salida de la poza disipadora Alternativa 4	
220 m ³ /s	5.52	2.79	49.44
500 m ³ /s	9.79	3.23	67.05
1144 m ³ /s	18.06	4.88	72.96
2318 m ³ /s	22.84	6.98	69.44
3342 m ³ /s	23.90	9.07	62.05

Fuente: Elaboración propia

Se infiere lo siguiente:

Para 220 m³/s: En la salida de la poza disipadora (incluyendo la energía disipada en el vertedero), se reduce la energía cinética en un **49.44%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “5.52 m/s a 2.79 m/s”.

Para 500 m³/s: En la salida de la poza disipadora (incluyendo la energía disipada en el vertedero), se reduce la energía cinética en un **67.1%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “9.79 m/s a 3.23 m/s”. La energía específica se reduce en un **11.87%**. No logra una adecuada disipación de energía específica frente al Diseño original.

Para 1144 m³/s: En la salida de la poza disipadora (incluyendo la energía disipada en el vertedero), se reduce la energía cinética en un **72.96%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “18.06 m/s a 4.88 m/s”. La energía específica se reduce en un **59.89%**. Relativamente igual al Diseño original.

Para 2318 m³/s: En la salida de la poza disipadora (incluyendo la energía disipada en el vertedero), se reduce la energía cinética en un **69.44%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “22.84 m/s a 6.98 m/s”. La energía específica se reduce en un **67.71%** y un **28.08%** adicional comparado al Diseño original.

Para 3342 m³/s: En la salida de la poza disipadora (incluyendo la energía disipada en el vertedero), se reduce la energía cinética en un **62.05%** comparado al Diseño original, reduciendo la velocidad de “23.9 m/s a 9.07 m/s”. La energía específica se reduce en un **58.86%** y un **40.3%** adicional comparado al Diseño original.

Alternativa 5

Como se puede comprobar en los diseños anteriores, los niveles de agua en el punto de salida de la poza disipadora para los caudales mayores (1144, 2318, 3342 m³/s) son superiores a los niveles de restitución del cauce. Esto se debe a que, en el vertedero, los “q” unitarios para cada caudal son muy elevados y el tirante del nivel de restitución para cada caudal son bajos, ya que las dimensiones del cauce son extensas, 560 m de ancho aproximadamente.

Por tal motivo, en la Alternativa 5 se determinó el factor de proporcionalidad “fp”= 3.342, el cual permitió establecer los caudales proporcionales.

Para 342.31 m³/s (1144 m³/s): En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **59.01%**, frente al Diseño original con una reducción del **47.68%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **11.33%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal 342.31 m³/s, es la cota 327.81, el cual es ligeramente superior al tirante de salida del flujo (cota 327.09) en la poza disipadora. La energía específica se reduce en un **1.31%**.

Para $693.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ($2318 \text{ m}^3/\text{s}$): En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **63.84%**, frente al Diseño original con una reducción del **49.84%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **14%** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal $693.6 \text{ m}^3/\text{s}$, es la cota 328.88, el cual es ligeramente superior al tirante de salida del flujo (cota 328.47) en la poza disipadora. La energía específica se reduce en un **36.07%**.

Para $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($3342 \text{ m}^3/\text{s}$): En la salida de la poza disipadora, se redujo la energía cinética en **66.31%**, frente al Diseño original con una reducción del **49.38%**. Esto indica que, comparado al Diseño original se ha ganado un **16.93 %** de reducción de energía cinética. El nivel de restitución del cauce para el caudal $3342 \text{ m}^3/\text{s}$, es la cota 329.42, el cual es ligeramente superior al tirante de salida del flujo (cota 329.37) en la poza disipadora. La energía específica se reduce en un **51.14%**.

Capítulo 5

Análisis general y conclusiones

5.1. Análisis general

En el Diseño original, la poza disipadora por su geometría y dimensionamiento, no logra contener el flujo, por tanto no conforma al resalto hidráulico. Para caudales mayores a 1144 m³/s el flujo no cae sobre la poza disipadora, originando la erosión de la misma y por consecuencia la poca disipación de energía cinética. En este diseño no se toma en consideración la cota de restitución para efectos de disipación de energía.

De las Tablas 63 y 65, se puede deducir que, para caudales bajos, es decir menores a 1144 m³/s, las Alternativas 1, 2, 3 y 4 correspondientes a la primera etapa, logran una reducción adicional de energía cinética que varían entre el 3.2% y 23.63% comparado al Diseño original; y para caudales altos, superiores a 1144 m³/s, la reducción adicional de energía cinética es bastante significativa que varía entre el 13.25% y 55.32%.

El flujo que transita a lo largo de la poza disipadora de la Alternativa 3 es muy turbulento, pues la longitud de la misma no permite la uniformidad del flujo.

Ahora, de acuerdo a las condiciones geológicas del cauce, a partir de la cota 320 m.s.n.m. hacia abajo es un macizo rocoso de mala calidad, el cual es un condicionante fuerte a tomar en cuenta, por ende construir las Alternativas 1, 2 y 3, implicaría excavar a lo largo y profundo que demande la poza disipadora, elevar los muros a una altura que permita contener el nivel de agua y retirar grandes volúmenes de no solo material aluvial sino también roca, lo que exageraría su costo.

Aunque la poza disipadora de la Alternativa 4 se encuentre en la cota 320 m.s.n.m., de igual forma implicaría que el tránsito del caudal máximo que pasa a una velocidad muy elevada de aproximadamente 24 m/s, destruya totalmente los obstáculos propios del vertedero de servicio, lo que imposibilitaría su funcionamiento; así mismo que en los últimos 110 m del tramo final del vertedero de servicio la altura de los muros tendrían que ser de 25 m, lo que elevaría su costo.

La Alternativa 5 correspondiente a la segunda etapa, ubica a la poza disipadora en la cota 320 m.s.n.m. Luego, de la Tabla 63 se infiere que, para los caudales mayores proporcionales se logra una reducción adicional de energía cinética que varía entre el 11.33% y 16.93% comparado con el Diseño original; así mismo si tomamos como referencia el caudal máximo proporcional (1000 m³/s) se observa que, redujo la velocidad de 8.3 m/s a 5.53 m/s en comparación con el Diseño original.

5.2. Conclusiones

5.2.1. Conclusiones específicas

- El modelo físico ha sido una herramienta necesaria para realizar la investigación de mi presente tesis en cuanto a la disipación de energía.
- En resumen podemos indicar que, se ha estudiado el diseño original y cinco alternativas adicionales para disipar la energía cinética del flujo.
- En todos los ensayos realizados para cada diseño, la disipación de energía se realiza por turbulencia, el cual permite cambiar las características iniciales del flujo a uno con menor energía cinética.
- Se determinó que, el problema que se suscita en la disipación de energía del vertedero de servicio, se debe a que el caudal unitario que transita sobre el mismo es muy alto y que el cauce del río Yaque del Sur es muy amplio ya que no existe una proporcionalidad dimensional adecuada de entrega de flujo, pues el vertedero de servicio es angosto y el cauce es muy amplio.
- Desde el punto de vista de disipación de energía cinética – primera etapa, tomando en consideración solo la mejor opción en cuanto a reducción de energía cinética y sin tomar en cuenta las condiciones normales de entrega del flujo al cauce (cota de restitución del cauce), podemos inferir que, en comparación al diseño original, la Alternativa 4 es la propuesta que mejor disipa la energía cinética, ya que se logra a partir de los obstáculos y los dados disipadores ubicados en el vertedero de servicio y en la poza disipadora, respectivamente. Esto se respalda viendo los resultados de la Tabla 65, Tabla 63 y Gráfico 5. Sin embargo, ésta a su vez escapa de la realidad, ya sea por su imposibilidad de funcionamiento, limitación e inversión elevada de construcción.
- Así mismo, desde el punto de vista de la adecuada y correcta disipación de energía – segunda etapa, es decir tomando en cuenta las condiciones normales de entrega del flujo al cauce (cota de restitución), podemos inferir que la Alternativa 5 es la mejor opción de diseño. Esto se logra encontrando los caudales proporcionales respectivos que respete y se equipare con las cotas de restitución de los caudales mayores. Esto se respalda viendo los resultados de la Tabla 48, Tabla 57 y al Gráfico 3.

- La presente tesis, encontró la solución al problema de disipación de energía del vertedero de servicio de la Presa Sabana Yegua, mediante la Alternativa 5, teniendo en cuenta las limitaciones y condiciones geológicas a las que se enfrentaría poder trabajar sobre un suelo rocoso. Por tanto, el ancho del vertedero de servicio y de la poza disipadora corresponden a 100.26 m.
- La aplicación del artificio matemático en la Alternativa 5, tuvo un papel muy importante en la toma de decisiones, pues se redujo tiempo y dinero.
- Es importante la protección a la salida de la poza disipadora de la Alternativa 5, mediante la colocación de un paquete que otorgue resistencia al suelo, puede ser la protección del suelo con geotextil y enrocado, en una longitud en la que el flujo de salida de la poza se condicione y adecue al cauce, ya que si bien es cierto se mantiene el mismo nivel pero las velocidades son distintas; esta longitud es aproximadamente 45 m. Conjuntamente la rugosidad de las rocas aportará en la disminución de la velocidad y un ligero aumento del nivel de restitución del cauce.

5.2.2. Conclusiones generales

- Los fenómenos naturales y sus consecuencias deben ser tomados en cuenta para el diseño de las estructuras hidráulicas porque las ponen en riesgo, tales como: fenómenos del niño, huracanes. Para ello es necesario un adecuado criterio de diseño, tanto en el aspecto hidrológico como hidráulico.
- Los diseños de grandes estructuras hidráulicas cuyo colapso puede afectar poblaciones, se recomienda que el periodo de diseño que utilicen sea el de la crecida máxima probable que tiene un periodo de retorno infinito.
- La complejidad de los fenómenos hidráulicos no es posible analizarlos y describirlos matemáticamente. El modelo físico es una herramienta adicional necesaria para investigar fenómenos tridimensionales, flujos en los que se presenta fenómenos locales, de disipación de energía o de erosión. En la actualidad, se diseñan y construyen estructuras hidráulicas con estudios preliminares en modelos físicos.
- Los artificios matemáticos son una fuente enriquecedora de ideas, el cual su aplicación simplifica y reduce los problemas en el mundo ingenieril.
- La adecuada información bibliográfica ha sido de gran importancia ya que sirvió como base para la formación de criterios de elaboración y evaluación de alternativas de diseño.
- Los métodos de cálculos matemáticos solo permiten estimar, pues representan una realidad aproximada bajo ciertas condiciones, más no de describirla en forma exacta.

- Es posible encontrar soluciones hidráulicas a problemas de disipación de energía, sin embargo si éstas no son posibles de construir, de resistir o no tiene la resistencia estructural, esta solución se descarta. Por lo tanto la mejor solución es la que contempla todas las áreas de ingeniería civil.
- Si una estructura hidráulica tiene un caudal unitario muy alto entonces tendría una imposibilidad de lograr una disipación de energía cinética adecuada.

Referencias Bibliográficas

Universidad de Piura. (2011). *Vertedero de servicio del proyecto de rehabilitación y complementación de la presa Sabana Yegua en el río Yaque del Sur, República Dominicana*. Piura.

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de República Dominicana. (2011). *Proyecto de rehabilitación y complementación de la presa de Sabana Yegua*. República Dominicana.

Presa Sabana Yegua. (2009). Obtenido de Fundación Gilberto Montero: <http://www.gilbertomontero.com>

National Weather Service. (29 de Mayo de 2012). *Tropical Weather*. Obtenido de <http://www.srh.noaa.gov>

Quezada, A. & Pérez, G. (1999). *El huracán Georges en la Republica Dominicana: Efectos y lecciones aprendidas*. Washington: CRID.

El Nuevo Diario. (14 de Setiembre de 2012). Director INDRHI: Trabajo Presa Sabana Yegua avanzan a buen ritmo. *El Nuevo Diario*. Recuperado de <http://www.elnuevodiario.com.do>

Tellerías, A. & Liriano, J. (30 de Noviembre de 2008). República Dominicana, su historia de ciclones. *Listin Diario*. Recuperado de <http://www.listindiario.com.do>

Vásquez, R. (2008). *Los ciclones, huracanes y tormentas en República Dominicana*. Obtenido de: <http://www.santo-domingo-live.com>

Chow, V.T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: Mc Graw Hill.

Giles, R.V. (1986). *Mecánica de fluidos e hidráulica*. México: Mc Graw Hill.

Rocha, F.A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

French. (1993). *Hidráulica de canales abiertos*. México: McGraw-Hill

Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. Lima: Imprenta del Gobierno de Perú.

Wei, C.Y. & Lindell, J. (1984). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Chicago, Illinois: Mc Graw Hill. Disponible en: <http://www.digitalengineeringlibrary.com>

Bureau of Reclamation. (1978). *Design of Small Canals Structures*. Denver Colorado: United States Department of the Interior.

Bureau of Reclamation. (1987). *Diseño de presas pequeñas*. Washington DC: A water resources technical publication.

Villón, B.M. (2008). *Hidráulica de canales* (2ª ed.). Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Novak, P. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (2ª ed.). Bogotá: Mc Graw Hill.

Alegret, E. & Pardo, R. (2001-2005). *Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas*. Cuba: Centro de Investigaciones Hidráulicas Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

Thompson, P.L. & Kilgore, R.T. (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. (Publication No. FHWA-NHI-06-086). Washington, D.C: EE.UU. National Highway Institute.