

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Juan Marcus Schwenk



**COMPUERTAS AUTOLIMPIANTES DE  
DESCARGA DE FONDO PARA DESARENADORES  
EN PEQUEÑAS CENTRALES  
HIDROELECTRICAS**

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil

**JOSÉ SEBASTIÁN IGNACIO VALENZUELA JARA**

CONCEPCIÓN, MARZO 2015.

## **NOMENCLATURA**

MW        Megawatt.

PCH        Pequeña Central Hidroeléctrica.

ERNC      Energía Renovable no Convencional.

DCR        Decremento.

## INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1    Objetivo General.....	4
1.1.2    Objetivos Específicos.....	4
ELEMENTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	5
2.1 Energía Hidroeléctrica.....	5
2.2 Centrales Hidroeléctricas.....	5
2.2.1 Central de agua fluyente o pasada.....	5
2.2.2 Central de embalse o reserva (regulación).....	7
2.3 Desarenador.....	8
2.3.1 Tipos de desarenadores.....	8
2.3.2 Elementos de un desarenador de lavado intermitente.....	9
2.4 Compuertas.....	10
2.4.1 Tipos de compuertas.....	11
2.5 Comparación de Compuertas.....	14
METODOLOGÍA.....	15
3.1 Diseño Desarenador.....	15
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	19
4.1 Selección del tipo de compuerta a Pre-diseñar.....	19
4.2 Diseño de compuerta Autolimpiante de lavado.....	19
4.2.1 Determinación del caudal entregado por una compuerta.....	21
4.2.2 Funcionamiento de compuerta libremente.....	26
4.2.3 Análisis de fuerzas en la compuerta.....	27
4.2.4 Dimensiones de la compuerta.....	30
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	33
ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES.....	35
ANEXO B: DISEÑO DESARENADOR.....	39
ANEXO C: PREDISEÑO COMPUERTA.....	43

**INDICE DE FIGURAS.**

Figura 1. Diagrama Central hidroeléctrica de pasada..... 7

Figura 2. Compuertas planas. .... 11

Figura 3. Compuerta radial..... 13

Figura 4. Desareandor..... 18

Figura 5. Compuerta Autolimpiante..... 20

Figura 6. Decremento. .... 21

Figura 7. Compuerta radial..... 22

Figura 8. Velocidad de autolavado de partículas de 0,6 mm..... 24

Figura 9. Velocidad de autolavado de partículas de 0,3 mm..... 25

Figura 10. Dimensiones de Compuerta prediseñada. .... 30

Figura 11, Efecto turbulencia en un desarenador. .... 38

Figura 12, Tamaño de partículas y velocidad de caída..... 40

Figura 13, Gráfico Thomas Camp (1946). .... 41

Figura 14. Caudal unitario, 0,6 mm..... 50

Figura 15. Caudal unitario, 0,3 mm..... 51

**INDICE DE TABLAS.**

Tabla 1. Cuadro Comparativo Entre Compuertas Lateral y Radial.....	14
Tabla 2. Caudal de Diseño y Área Mojada.....	16
Tabla 3. Dimensionamiento Desarenador .....	17
Tabla 4. Longitud de Desarenación.....	17
Tabla 5. Decremento y Altura de Apoyo de Compuerta. ....	23
Tabla 6. Ancho de Lavado.....	26
Tabla 7. Distancia Eje Articulación.....	29
Tabla 8, Altura de caída.....	39
Tabla 9, Potencia instalada. ....	39
Tabla 10, Tamaño de partículas a desarenar.....	39
Tabla 11, Coeficiente K.....	39
Tabla 12. Decremento 0,3 mm y 0,6 mm. ....	42
Tabla 13. Resultados altura 1,700 m. ....	43
Tabla 14. Resultados altura 2,260 m. ....	44
Tabla 15. Resultados altura 2,820 m. ....	44
Tabla 16. Resultados altura 3,380 m. ....	45
Tabla 17. Resultados altura 3.940 m. ....	45
Tabla 18. Resultados altura 4,500 m. ....	46
Tabla 19. Resultados altura 1,880 m. ....	46
Tabla 20. Resultados altura 2,500 m. ....	47
Tabla 21. Resultados altura 3,120 m. ....	47
Tabla 22. Resultados altura 3,760 m. ....	48
Tabla 23. Resultados altura 4,380 m. ....	48
Tabla 24. Resultados altura 5,000 m. ....	49
Tabla 25. Caudal unitario 0,6 mm. ....	50
Tabla 26. Caudal unitario, 0,3 mm. ....	51
Tabla 27. Velocidad en Canal de lavado, 0,6 mm.....	52
Tabla 28. Velocidad Canal de Lavado, 1,84 m <sup>2</sup> /s/m. ....	53

## **COMPUERTAS AUTOLIMPIANTES DE DESCARGA DE FONDO PARA DESARENADORES EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS.**

**JOSÉ SEBASTIÁN IGNACIO VALENZUELA JARA**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.

[jvalenz@alumnos.ubiobio.cl](mailto:jvalenz@alumnos.ubiobio.cl)

**JUAN MARCUS SCHWENK**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

[jmarcus@jms.cl](mailto:jmarcus@jms.cl)

### **RESUMEN**

Las pequeñas centrales hidroeléctricas son consideradas un tipo de energía renovable no convencional, debido a que su potencia máxima instalada es menor a los 20 MW. En su operación es necesario la implementación de desarenadores los que cumplen la función de acumular los sedimentos, para luego ser desalojados a través de una compuerta de descarga de fondo. La mayoría de los desarenadores cuentan con compuertas deslizantes de operación manual, lo cual es una gran dificultad debido a las grandes distancias que encuentran las obras, por lo que es necesario sustituirlas con estructuras autolimpiantes que puedan regular de manera automática el desalojo de las partículas sólidas acumuladas en el desarenador. Para lograrlo se realizó un estudio de las diferentes características de las pequeñas centrales hidroeléctricas, para luego investigar las diferentes compuertas que puedan aplicarse como autolimpiante sin utilizar algún tipo de energía.

En esta investigación se determinó que la compuerta que cumple con las condiciones para ser del tipo autolimpiante es la compuerta Radial. Además cumple con las condiciones de lavado de partículas para alturas máximas de desarenador igual a 1,5 m y para caudales mayores a  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$  para partícula igual a 0,3 mm,  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$  para partículas igual a 0,6 mm. Sin embargo presentan la desventaja de tener que trabajar con superficie libre, lo que implica sobredimensionamiento de la compuerta.

**Palabras claves:** Pequeña Central Hidroeléctrica, Desarenador, Compuerta de descarga de fondo.

5623 Palabras Texto + 17\*250 Tablas/Figuras = 9873 Palabras Totales

## **SELF-CLEANING GATES FOR BOTTON DISCHARGE TO SEDIMENTER IN SMALL CENTRAL HYDROELECTRICAL.**

**JOSE SEBASTIAN IGNACIO VALENZUELA JARA**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.

[jsvalez@alumnos.ubiobio.cl](mailto:jsvalez@alumnos.ubiobio.cl)

**JUAN MARCUS SCHWENK**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío.

[jmarcus@jms.cl](mailto:jmarcus@jms.cl)

### **ABSTRACT**

Small hydropower plants are considered a type of non-conventional renewable energy, because its maximum installed capacity is less than 20 MW. In the operation of these it is necessary the implementation of chambers which function is to accumulate sediments, before being evacuated through a botton discharge gate. Most chambers have manually operated slide gates, which is a major challenge because of the great distances that are in the works, so it must be replaced with self-cleaning structures that can automatically regulate the removal of solid particles accumulated in the desander. A study of the different characteristics of small hydropower plants was performed, then it was investigate different gates that can be implemented as self-cleaned without using some energy.

In this investigation it was determined that the gate to meet the conditions for the self-cleaning is the Radial gate. Furthermore this gate meets meets the conditions for washing particles desarenador maximum heights of 1,5 m and equal to higher flow rate to 0,37 m<sup>3</sup>/s to 0,6 mm particle, 0,21 m<sup>3</sup>/s for particles equal to 0,6 mm. However they have the disadvantage of having to work with free surface, implying gate overdimensioning.

Keywords: Small Hydroelectrical, Sedimenter, Botton discharge gate.

## INTRODUCCIÓN

Las energías renovables actualmente han dejado de ser tecnologías caras y minoritarias para ser plenamente competitivas y eficaces para cubrir la demanda. Dentro de estas encontramos la energía hidroeléctrica, como principal generador de energía verde. En Chile, son consideradas como parte de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) las centrales hidroeléctricas cuya potencia máxima no sobrepasa los 20 MW.

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía eléctrica, se utilizan turbinas acopladas a los alternadores, las que aprovechan la diferencia de altura entre los puntos de captación y devolución. Se denominan pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) a aquellas instalaciones de potencia instalada menor a los 10 MW.

Para poder aprovechar el movimiento de estas masas de agua, se realiza una obra de toma, la cual desvía una parte del caudal del río y la conduce hasta la central para que esta sea turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua desviada es devuelta nuevamente al cauce del río.

Las obras de toma tienen gran relevancia ya que cumplen con una función muy importante dentro de la generación de electricidad, produciendo un mínimo impacto ambiental y bajo costo. Las centrales hidroeléctricas se componen de una serie de elementos que conducen el caudal hacia las turbinas. Dentro de estos encontramos el desarenador, obra hidráulica que cumple la función de separar y retirar el material sólido que lleva el agua en el canal.

El desalojo de las partículas depositadas en el desarenador se realiza a través de la compuerta de descarga de fondo, con el fin de prevenir un desgaste prematuro de las turbinas. Esto significa una disminución del rendimiento y a veces exige reposiciones frecuentes y costosas.

Hoy en día las compuertas que son utilizadas para la descarga en desarenadores de obras de toma presentan una serie de desventajas, como el atascamiento por el paso de sedimentos, un difícil sellado hidráulico y por último son accionadas manualmente. Debido a esto se plantea el proyecto de título con la finalidad de proponer el prediseño de compuertas autolimpiantes en desarenadores de obras de toma, para dar solución a las problemáticas mencionadas anteriormente, por medio de un estudio de diferentes tipos de compuertas para lograr establecer los criterios básicos para el prediseño de una compuerta autolimpiante.



## **1.1.-Objetivos.**

### *1.1.1 Objetivo General.*

- Proponer el prediseño de compuertas autolimpiantes en desarenadores de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

### *1.1.2 Objetivos Específicos.*

- Identificar los diferentes elementos que componen una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH).
- Seleccionar una tipología de compuerta de descarga de fondo para su uso automático.
- Establecer los criterios básicos para el prediseño de una compuerta autolimpiante.

## **ELEMENTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.**

La producción energética a nivel mundial está basada en gran parte en la generación de energía a partir de combustible fósiles como el petróleo, carbón mineral y el gas. La generación de energía a partir de estas materias está siendo replanteada, ya que los recursos son limitados y se encuentran en ciertos puntos del planeta.

En este capítulo se hará una breve descripción de las pequeñas centrales hidroeléctricas a través del aprovechamiento por derivación de agua sin embalse, además de la situación mundial de la energía hidroeléctrica en la actualidad.

### **2.1 Energía Hidroeléctrica.**

Las centrales hidroeléctricas aprovechan el movimiento del agua y la diferencia de altura entre dos puntos para transformarla en energía eléctrica. La energía se transforma primero en energía mecánica en la turbina hidráulica, la cual activa el generador que posteriormente transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Desde ahí pasa a los transformadores, para luego iniciar su viaje a los centros de consumo.

Se considera como PCH aquellas que presentan una potencia máxima instalada menor o igual a 10 MW (Bonifetti, 2010), siendo considerada como energía renovable no convencional (ERNC) ya que su potencia máxima es inferior a 20 MW (ley 20.257).

En Chile existen 71 centrales hidroeléctricas, de las cuales solo 10 de ellas son de embalse, pero son las que más potencia instalada neta es de 3769 MW, cada una con 450 MW o más de potencia. Las 61 centrales de pasada tienen una potencia instalada neta que va desde menos de 1 MW hasta 180 MW, con un total de 2186 MW ([www.centralenergia.cl](http://www.centralenergia.cl)).

### **2.2 Centrales Hidroeléctricas.**

Según el régimen de flujo y el tipo de embalse las Centrales pueden clasificarse en: centrales de agua fluyente o pasada y centrales de embalse o reserva.

#### *2.2.1 Central de agua fluyente o pasada.*

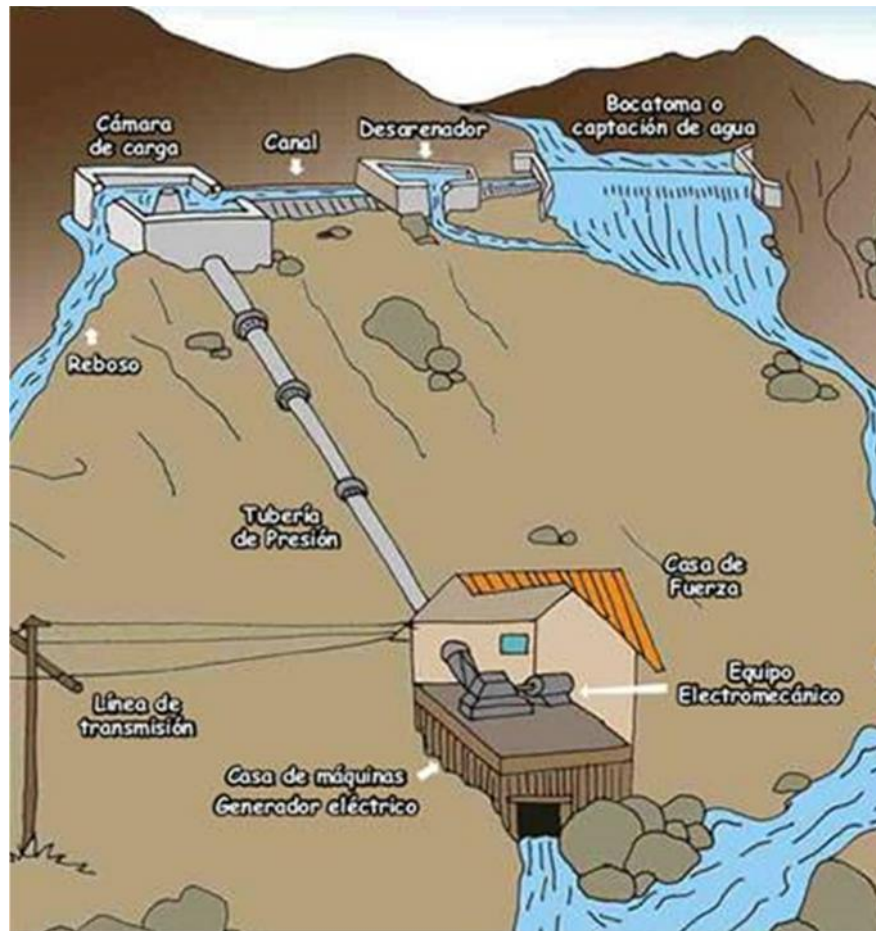
Es aquel aprovechamiento en el que se desvía parte del agua del río mediante una obra de toma, y a través de canales o conducciones se lleva hasta la central donde será turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua desviada es devuelta nuevamente al cauce del río.

El proceso se inicia con una bocatoma, donde se desvía el agua por un canal hasta una cámara de carga, desde allí parte una tubería a presión que lleva el agua hasta la turbina que se encuentra en la casa de máquina, junto con el generador eléctrico. Luego se restituye al río a través de un canal de devolución.

La característica más común de las centrales de pasadas es que dependen directamente de la hidrología, ya que no tienen la capacidad de regulación del caudal turbinado y por lo tanto tiende a ser muy variable de estación a estación. Por lo tanto la potencia depende directamente del caudal que pasa por el río.

Una central de pasada presenta los siguientes componentes fundamentales, figura 1:

- a) Sistema de captación de aguas: se compone de una bocatoma que se encarga de captar el agua de su fuente (cauce natural, canal) incluye un sistema de rejillas, desripador, un desarenador para eliminar arenas y otros elementos extraños que puedan desgastar, dañar e incluso detener las turbinas.
- b) Canal de aducción: lleva el agua desde el sistema de captación hasta el punto donde se dejará caer el agua, que es la cámara de carga.
- c) Cámara de carga: es una variante de la obra de toma convencional, está ubicada al final del canal de aducción. Su objetivo es alimentar la tubería a presión, asegurándose de que no ingrese aire a ésta.
- d) Casa de máquinas: en ésta se encuentran los mecanismos que generan la energía eléctrica, los elementos de medición y control. Además de las instalaciones para despachar la energía.
- e) Canal de devolución: para devolver el agua generada a su cauce original o a donde corresponde de acuerdo a los derechos de agua y las necesidades de riego.



**Figura 1. Diagrama Central hidroeléctrica de pasada.**

Fuente. ANALES, 2010.

Este tipo de centrales son las más utilizadas a la hora de realizar un pequeña central hidroeléctrica, debido que están sometidas a un menor caudal de captación. Las centrales de pasadas existentes en Chile tienen una altura de caída que varía entre los 20 m y 1000 m.

### *2.2.2 Central de embalse o reserva (regulación)*

El aprovechamiento es por acumulación o retención de agua, ya sea del cauce del río como de las lluvias y del deshielo. Este es el tipo más frecuente de central hidroeléctrica. A través de una o varias presas se forman embalses que se utilizan para retener grandes cantidades de agua y por así regular la cantidad que pasa por las turbinas.

A diferencia de las centrales de pasadas, estas disponen de un embalse de agua que regula la cantidad pasante por las turbinas. Tienen la característica de que su producción de electricidad se puede adaptar a la demanda.

## 2.3 Desarenador

El desarenador es una obra hidráulica que sirve para separar (decantar) y remover (evacuar) las partículas de material sólido suspendidas en el agua. Las partículas están en suspensión ya que al entrar por la bocatoma tienen gran velocidad, suficiente para arrastrar las partículas sólidas; especialmente esto ocurre cuando existen crecidas en los ríos, entrando una alta cantidad de sedimentos.

La finalidad del desarenador es eliminar las partículas de material sólido. Para esto se debe disminuir la velocidad de entrada, a través de la variación de pendiente antes del desarenador y cambiando la sección del área transversal.

La presencia de material sólido modifica la sección transversal del sedimentador, reduciendo su capacidad producto de la sedimentación de los sólidos que se encuentran en el agua, Estos también dañan las tuberías de presión. Sin embargo el mayor daño que producen es en las turbinas, ya que la arena que arrastra produce en desgaste en ellas, entre mayor velocidad mayor desgaste. Esto produce una disminución del rendimiento y a veces exige reposiciones costosas para el proyecto.

### 2.3.1 Tipos de desarenadores

Los desarenadores se pueden clasificar según su función de operación a la hora de eliminar los sedimentos. Existen desarenadores de lavado continuo o de lavado discontinuo (intermitente). Además de pueden clasificar en función de la velocidad de escurrimiento.

#### a) Desarenador de lavado continuo.

En este tipo de desarenadores se elimina el material sólido de manera continua, por lo tanto la sedimentación y la evacuación de los sedimentos son dos operaciones simultáneas. Para esto se necesita que el caudal disponible sea mayor al de diseño.

#### b) Desarenador de lavado intermitente

Son el tipo más común, almacenan y luego expulsan los sedimentos, los cuales se hacen en tiempo diferentes. Este desarenador debe limpiarse periódicamente, se pretende hacer en el menor tiempo posible para evitar interrupciones en el servicio de energía eléctrica, todo depende de la cantidad de sedimentos que contenga el agua.

En la cámara de sedimentación, decantan las partículas sólidas debido a la disminución de velocidad por el aumento de la sección. La forma del desarenador puede ser rectangular o trapezoidal.

Para desalojar los materiales sólidos el desarenador cuenta con una cierta pendiente en el fondo de un 2% a 6%. El incremento de pendiente hace que aumente el volumen del desarenador, lo cual no se incluye en el cálculo, ya que este aumento de tamaño es utilizado por el material sólido que sedimenta. Se debe evitar la turbulencia, ya que agita el sedimento y lo mantiene en suspensión.

### *2.3.2 Elementos de un desarenador de lavado intermitente.*

Para que el desarenador cumpla con su función, se compone de los siguientes elementos:

- a) Transición de entrada: es la estructura que está encargada de unir adecuadamente el canal con el desarenador, de manera que no se produzcan grandes pérdidas de energía, además se encarga de garantizar una velocidad baja con la finalidad de minimizar la turbulencia. Se recomienda colocar un ángulo de divergencia suave, menor o igual a  $12,5^\circ$  con respecto al canal de entrada.
- b) Tanque de desarenación: es en el cual las partículas sólidas caen al fondo, debido a la velocidad uniforme que se produce por el aumento de la sección transversal. Esta se diseña para velocidades que varían entre 0,1 m/s y 0,4 m/s (considerado de baja velocidad), con una profundidad que varía entre 1,5 metros y 4 metros. Para un cierta velocidad y un caudal dado, a mayor profundidad será un ancho menor y a menor profundidad un ancho mayor.

La sección transversal puede tener forma rectangular o trapezoidal. La primera simplifica mucho su construcción, pero es relativamente más cara ya que los muros deben soportar la presión del suelo exterior y por tanto es necesario hacer su diseño como muros de sostenimiento. En el caso de la sección trapezoidal es hidráulicamente más eficiente, ya que las paredes del desarenador trabajan como un simple revestimiento, la pendiente transversal usualmente escogida es de 1:1 a 1:5.

En desarenadores de este tipo de velocidad baja (desarenadores lentos) permiten la depositación de material más fino. El caudal de lavado varía entre 5 y 15% de caudal de funcionamiento de la unidad.

- c) Vertedero de excedencias: esta obra tiene la finalidad de eliminar el exceso de agua que trae la bocatoma, enviándola nuevamente al cauce del río.
- d) Compuerta de descarga de fondo: sirve para desalojar los materiales sólidos depositados en el fondo del desarenador. Para que el material depositado en el fondo llegue más fácilmente hacia la compuerta se le da una pendiente fuerte que varía entre un 2% y 6%. Para lavar la cámara del desarenador se aprovecha la velocidad que tomará el agua al abrir la compuerta, la cual arrastra la mayor cantidad de sedimentos. Se debe asegurar que el fondo de la compuerta de lavado se encuentre más alto que el punto del río de evacuación donde llegarán todas las partículas sedimentadas. Por último se debe asegurar que el gradiente del fondo de la compuerta sea suficiente para obtener una velocidad capaz de arrastrar las arenas. Se considera que para el lavado pueda efectuarse de manera rápida y eficaz, se debe tener una velocidad de entre 3 m/s a 6 m/s.
- e) Transición de salida: Sirve para conducir el agua de la cámara de sedimentación hacia el canal de salida, cumple la función de regular la formación de turbulencia a la salida del desarenador, pudiendo remover los sedimentos ya decantados.

## 2.4 Compuertas

Las compuertas corresponden a dispositivos hidráulicos-mecánicos que cumplen la función de regular el paso de agua en canales, tuberías, presas u otras estructuras hidráulicas.

Las compuertas pueden tener varias maneras de ser agrupadas; algunos criterios de clasificación pueden ser los siguientes: propósito, paso del agua y forma de la compuerta (ERBISTI, 2003).

De acuerdo al propósito operacional, las compuertas se utilizan generalmente para la regulación de flujo o de los niveles de agua; también para cerrar el flujo de agua en canales, o mantener vacío el canal o conducto de manera que se pueda hacer mantenimiento. Esto es muy utilizado cuando existen equipos como turbinas, bombas u otras compuertas. Además se puede clasificar de acuerdo al paso del agua con respecto a la posición de la compuerta.

El agua se puede descargar sobre la compuerta, bajo la hoja de la compuerta, abajo o arriba de la compuerta. Por último según la forma, éstas pueden ser planas o radiales, lo cual también limitará su diseño.

Otro tipo de clasificación propuesto es dependiendo del control que requiera el conducto, esto pueden ser: derivación, regulación, retención y autolimpieza (Meza, 2008).

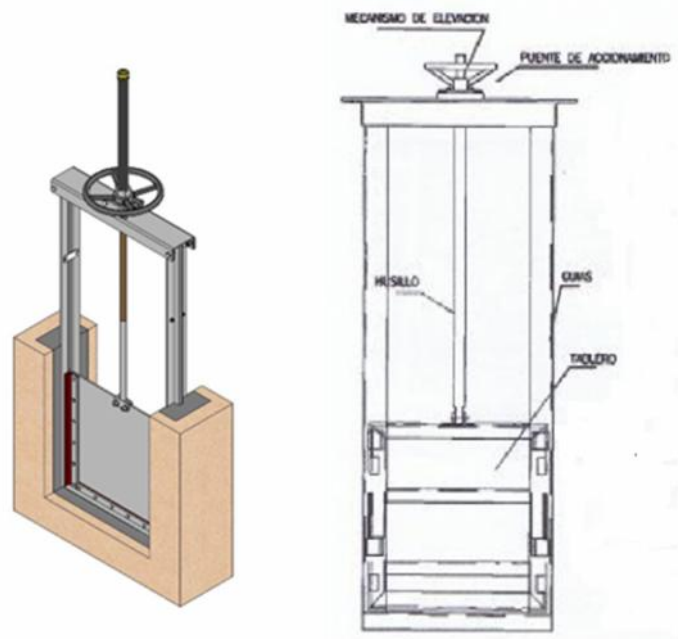
#### 2.4.1 Tipos de compuertas

Existen varios tipos de compuertas, pero son sólo dos diferentes tipos las más utilizadas en el lavado del desarenador.

##### a) Compuertas planas.

Las compuertas planas son los clásicos elementos de cierre ampliamente utilizados en las obras hidráulicas para asegurar el control de un flujo de agua, donde un tablero se encarga de oponerse al paso del agua, la compuerta se mueve por el interior a través de unos carriles verticales que le sirven como un marco guía a la hora de elevarla y al mismo tiempo de la impermeabilización lateral.

Estas compuertas constituyen el sistema más sencillo de compuertas de tablero. Se emplean generalmente en pequeños vanos y con poca altura de agua, por lo que son muy utilizadas debido a su sencillez, robusta construcción y fácil conservación. La figura 2 muestra un esquema de una compuerta plana.



**Figura 2. Compuertas planas.**

Fuente: CMO (2012)



Existen compuertas planas que se caracterizan porque el agua no suele superar la altura de su tablero. Estas reciben el nombre de compuertas canal y por lo tanto presentan estanqueidad a tres caras. Cuando la altura del agua supera ampliamente a la del tablero, se requiere una estanqueidad a las 4 caras de la compuerta, las cual tiene el nombre de compuerta mural.

El sistema de cierre presenta inconvenientes a la hora de aumentar la resistencia al deslizamiento, sobre todo cuando se incrementa la luz del vano que se está cubriendo, además presenta inconveniente cuando la altura del agua aumenta, ya que el empuje horizontal del agua sobre el tablero de la compuerta provoca compresiones contra los carriles que dificultan las maniobras de deslizamiento.

Estas compuertas presentan principalmente accionamiento manual, el cual se realiza a través de una tuerca de bronce, un husillo con rosca y un volante de maniobra; también incluye rodamientos de bolas y casquillos de bronce o nylon. Existen otros casos específicos donde la compuerta puede ser accionada a través de un motorreductor, servomotor o accionamiento hidráulico.

#### b) Compuerta Radial o Taintor.

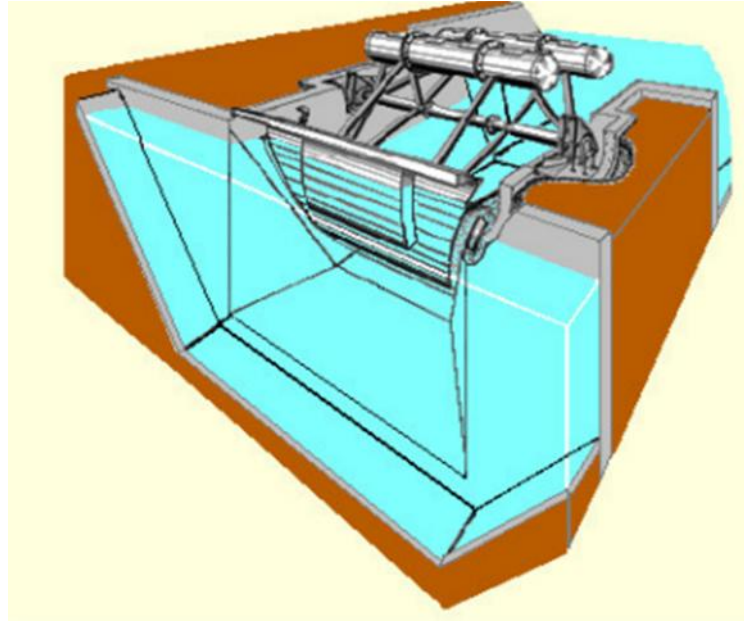
Se busca en este tipo de compuertas que el sistema de elevación del tablero fuese independiente de la resistencia de rodaduras o deslizamientos, lo cual lo llevó a hacer los tableros giratorios alrededor de un eje fijo por medio de unos brazos radiales, los cuales ayudan a transmitir la presión del agua a la estructura. El tablero que soporta la presión del agua es un segmento cilíndrico de radio constante.

La característica principal de las compuertas radiales, a diferencia del resto, es que el eje de giro de la compuerta queda por encima del nivel de aguas abajo. Esto quiere decir que el eje nunca queda inundado. La resultante de la presión hidráulica pasa por el eje de giro, produciendo un momento nulo, por lo que al momento de realizar la elevación de la compuerta, teóricamente no se necesita esfuerzo.

Hay que considerar para el diseño de la compuerta que los ejes de apoyo deben quedar por encima del nivel de aguas abajo, aproximadamente 1,5 veces desde el umbral de la compuerta. También se debe tener presente que el radio del tablero tiende a ser 1,5 veces la altura de la compuerta.

El inconveniente que presentan con respecto a las compuertas planas es que necesitan una gran cantidad de espacio para poder instalarlas, pero una menor altura de las pilas.

Existen casos que para reducir los esfuerzos de elevación de la compuerta se han prolongado los brazos para poder agregar un contrapeso y de esta forma reducir el esfuerzo que hace el mecanismo, este contrapeso ayuda a equilibrar las fuerzas que actúan sobre la compuerta. En la figura 3 se muestra una compuerta radial con una serie de contrapesos.



**Figura 3. Compuerta radial**

Fuente: Hydrostec (2005)

Los mecanismos de accionamiento que puede utilizar en estas compuertas, son mediante cilindros oleohidráulicos o también son utilizados cables o cadenas, en la cual un motor-reductor ayuda al levantamiento de la compuerta.

### 2.5 Comparación de Compuertas.

En la tabla 1, se presenta un cuadro comparativo entre las compuertas Lateral y Radial, con las ventajas de una con respecto a la otra. Se puede observar que la compuerta lateral no conviene aplicarla en canales de gran anchura, mientras que la compuerta Radial tiene la desventaja de que su aplicación necesita gran cantidad de espacio.

**Tabla 1. Cuadro Comparativo Entre Compuertas Lateral y Radial**

	<b>COMPUERTAS</b>	<b>Lateral</b>	<b>Radial</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	¿Ranuras laterales?	Sí	No
	Esfuerzo de elevación	Medio	Bajo
	Costos de equipos de operación	Medio	Bajo
	Sencillez mecanismos de elevación	Medianamente sencillo	Sencillo
	¿Posibilidad de atrapar cuerpos flotantes en las ranuras?	Alta	Baja
	Efectividad en canales de gran anchura	Muy baja	Alta
	Altura de los muros laterales	Cortos	Altos
	¿Apoyos protegidos de los cuerpos flotantes?	No	Sí
	Complejidad de fabricación	Baja complejidad	Compleja
	¿Eliminación de los esfuerzos debido a la presión del agua?	No	Sí
	Sistemas de accionamiento	Manual, eléctrico	Manual, eléctrico e hidráulico

Fuente: Elaboración Propia.

## METODOLOGÍA

En este capítulo se mostrarán los diferentes criterios que influirán en el prediseño de la compuerta autolimpiante, además que los elementos de las pequeñas centrales hidroeléctricas que intervienen en él. El principal elemento que se debe diseñar para obtener las condiciones del prediseño de la compuerta autolimpiante es el desarenador. En este capítulo se entregarán las distintas características de esta obra hidráulica.

### 3.1 Diseño Desarenador.

Para realizar el diseño del desarenador primero se deberá analizar el caudal con el cual operará, de esto dependerá la potencia instalada por la PCH, la cual varía entre 2 MW y 10 MW, así en este estudio se analizarán diferentes caudales de manera que se cumpla con la potencia.

Las centrales de pasadas en Chile tiene una altura de caída que varían entre 20 m a 1000 m, debido a esto se analizarán diferentes caudales dentro de la cámara de desarenación, los cuales variarán desde  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Con los caudales de diseño se procede a obtener la velocidad media del escurrimiento en la cámara para el caudal de diseño “ $v_0$ ”, esta velocidad no debe ser capaz de arrastrar los sedimentos depositados y por lo tanto no vuelvan a ponerse en suspensión nuevamente, para asegurarse de esto se utiliza la siguiente relación:

$$v_0 = K\sqrt{d_0} \quad \text{ecuación 1}$$

Donde el coeficiente K depende del diámetro de la partícula a remover en un 100%,  $d_0$ , para diámetros que varían entre  $1\text{mm} > d_s > 0.1\text{mm}$  se adopta un coeficiente de 13,9. Como el diámetro de partículas a desarenar se encuentra dentro del rango anterior se obtiene que la velocidad de diseño del desarenador será igual a  $0,2 \text{ m/s}$  para todos los caso estudiados. Con el caudal y la velocidad de diseño se podrá obtener el área mojada del desarenador, Los resultados se presentan en la tabla 2, a continuación:

**Tabla 2. Caudal de Diseño y Área Mojada**

Q (m <sup>3</sup> /s)	Área Mojada (m <sup>2</sup> )
0,5	2,5
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50

Fuente: Elaboración propia.

Conocida el área mojada del desarenador se pueden obtener las diferentes dimensiones de la cámara. La profundidad del desarenador varía entre 1,5 m y 4 m, por lo que se analizarán las dimensiones del tanque para diferentes profundidades.

Para el diseño del tanque de desarenación se considerará uno de sección rectangular en la parte superior, esta elección se realizó debido a que su construcción es considerablemente mucho más simple.

La Tabla 3 presenta las dimensiones del desarenador con diferentes alturas de diseño, en cual se observa que a mayor altura de escurrimiento, disminuye el ancho de la cámara de desarenación y viceversa.

La longitud del desarenador está condicionada por el diámetro de partículas a desarenar en un 100% ( $d_o$ ). El tamaño de partículas a desarenar en este estudio corresponderá a dos, con tamaño de 0,6 mm y 0,3 mm.

**Tabla 3. Dimensionamiento Desarenador**

		Altura Desarenador (m)					
Q (m3/s)		1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
b (m)	0,5	1,67	1,25	1,00	0,83	0,71	0,63
	1	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25
	2	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86	2,50
	3	10,00	7,50	6,00	5,00	4,29	3,75
	4	13,33	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00
	5	16,67	12,50	10,00	8,33	7,14	6,25
	6	20,00	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50
	7	23,33	17,50	14,00	11,67	10,00	8,75
	8	26,67	20,00	16,00	13,33	11,43	10,00
	9	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25
	10	33,33	25,00	20,00	16,67	14,29	12,50

Fuente: Elaboración propia.

Según Arkhangelski (1935), la velocidad de caída de las partículas para un tamaño 0,6 mm es de 6,48 cm/s, mientras que para un diámetro de partículas igual a 0,3 mm la velocidad de sedimentación corresponde a 3,24 cm/s. Para obtener la longitud del tanque de desarenación es necesario considerar el efecto de la turbulencia, para lo que se utiliza el gráfico de Thomas Camp, con el cual se obtendrá la velocidad de sedimentación, influenciada por la turbulencia ( $\omega'_0$ ), la que será necesaria para obtener la longitud de la cámara de desarenación ( $L_C$ ). El largo de la cámara de desarenación quedará determinado por la siguiente ecuación:

$$L_C = \frac{h_o \times v_0}{\omega'_0} \text{ ecuación 2}$$

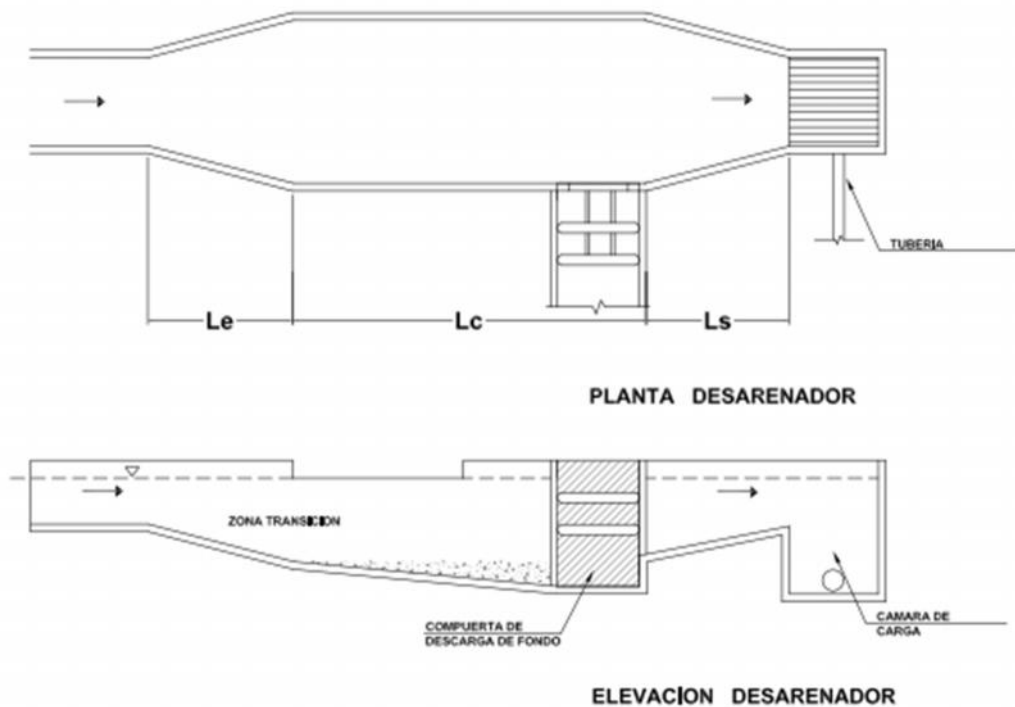
Con lo anterior se obtiene las diferentes longitudes del desarenador para las diferentes alturas de escurrimiento y los diferentes tamaños de partículas a desarenar. Los resultados se muestran en la tabla 4:

**Tabla 4. Longitud de Desarenación.**

		Altura diseño de desarenador [m]					
		1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
0,6 mm	L <sub>C</sub> [m]	9,26	12,35	15,43	18,52	21,6	24,69
	L adoptada [m]	10,00	13,00	16,00	19,00	22,00	25,00
0,3 mm	L <sub>C</sub> [m]	18,52	24,69	30,86	37,04	43,21	49,38
	L adoptada [m]	19	25	31	38	44	50

Fuente: Elaboración propia.

Estas longitudes adoptadas de la cámara de desarenación serán las mismas para los diferentes caudales estudiados, debido a que la suspensión se produce de manera vertical y el tamaño de partículas a desarenar es la misma para las diferentes caudales. Se producirá variación en el área horizontal del tanque de desarenación. En la figura 4 se muestra la estructura del desarenador, con sus diferentes elementos.



**Figura 4. Desarenador.**

Fuente: Elaboración propia.

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS.**

En este capítulo se determinará el tipo de compuerta a utilizar según forma, además el tipo de accionamiento que tendrá. Por último se determinarán los diferentes criterios hidráulicos para el prediseño de la compuerta autolimpiante.

### **4.1 Selección del tipo de compuerta a Pre-diseñar.**

Lo que se busca con este estudio es una compuerta autolimpiante, de manera de que el esfuerzo de elevación sea mínimo. Es por esto que se elige una compuerta del tipo Radial.

La superficie cilíndrica o pantalla se hace concéntrica con los ejes de los apoyos, de manera que todo el empuje producido por el agua pasa por ellos, por lo que sólo se necesita una pequeña cantidad para elevar o cerrar la compuerta. Las cargas que tiene que superar la compuerta serán por lo tanto el peso de esta.

Principales ventajas:

- Esfuerzo de elevación considerablemente menor, comparado con las compuertas deslizantes.
- Funcionamiento sencillo y seguro.
- Existencia de compuertas automáticas (ausencia de cualquier tipo de accionamiento).

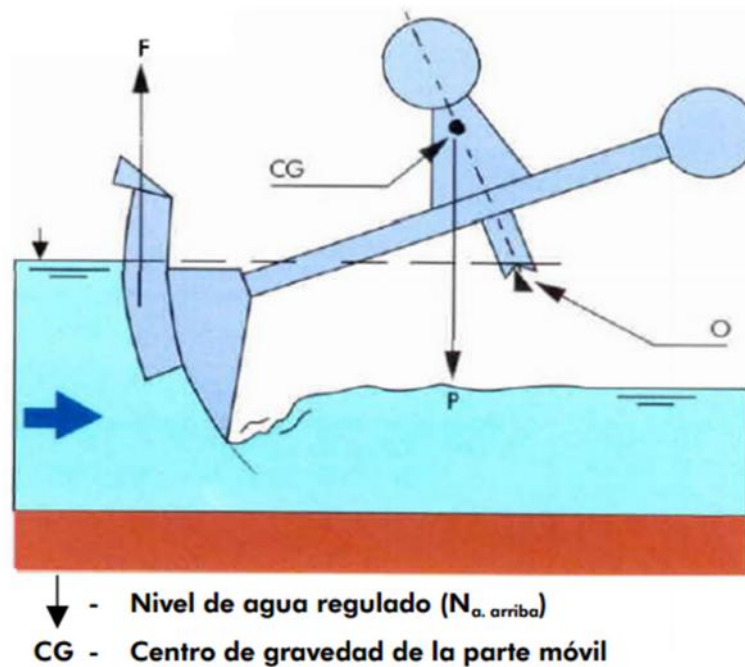
### **4.2 Diseño de compuerta Autolimpiante de lavado.**

Se plantea un tipo de compuerta Radial la cual no necesita de ningún tipo de accionamiento para su apertura o cierre. Estas compuertas mantienen el nivel de aguas arriba a una determinada cota constante. La compuerta se mantendrá cerrada para caudal mínimos y a medida que el caudal aumente comenzará su apertura. El nivel de aguas arriba de la compuerta es mantenido constante independiente de la fluctuación del caudal extraído.

La ausencia de cualquier tipo de accionamiento otorga a este tipo de compuertas excelentes características de precisión, seguridad operacional y fácil instalación. La condicionante de operación de este tipo de compuertas debe funcionar en superficie libre. Debido a que la compuerta cuenta con un flotador y debe existir una variación de empuje hidrostático influenciado por la altura aguas arriba de la compuerta.



La parte móvil de la compuerta está constituida por una armadura unida rígidamente a un tablero cilíndrico que cuenta con un flotador aguas arriba de la compuerta y un sistema de contrapesos de manera que se equilibren. Todo el conjunto gira alrededor de un eje horizontal indicado con la letra “O” en la figura 5.



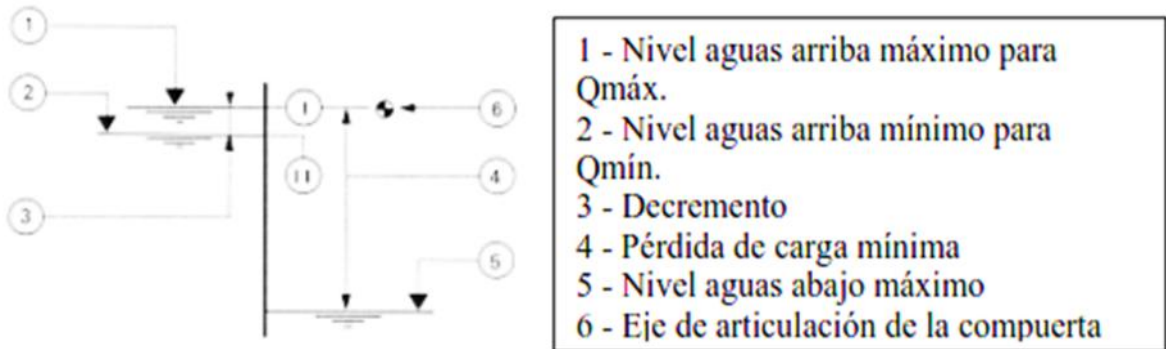
**Figura 5. Compuerta Autolimpiante.**

Fuente: Hydrostec, 2005.

El empuje hidráulico sobre el tablero pasa por el eje de articulación (“O”), y por lo tanto no influye en el equilibrio del conjunto flotador – peso compuerta. Los momentos producidos por el principio de Arquímedes en el flotador (MF) y el conjunto compuerta producido por el peso de esta (MP), deben ser igual y opuesto para todas las posiciones del tablero, cuando el nivel de aguas arriba está al mismo nivel que el eje de articulación de compuerta. El movimiento de apertura o cierre de la compuerta se produce cuando la altura aguas arriba de la compuerta coincide con el eje de articulación de la compuerta. Por lo tanto se puede decir:

- Cuando el nivel aguas arriba de la compuerta aumenta se tiene:  $MF > MP$  y la compuerta se abrirá.
- Cuando el nivel aguas arriba de la compuerta disminuye se tiene  $MF < MP$  y la compuerta se cerrará.

Para el diseño de la compuerta será necesario determinar la altura del eje de articulación, lo cual dependerá principalmente de la variación entre la altura máximo que tendrá el desarenador y la altura mínima, la cual corresponderá a la altura de diseño del desarenador. Esta variación de alturas también conocido como decremento (DCR) y es representado en la figura 7.



**Figura 6. Decremento.**

Fuente: Maldonado, 2001.

#### 4.2.1 Determinación del caudal entregado por una compuerta

Las compuertas radiales tiene la característica principal de que el empuje hidráulico producido por el agua pasa por el eje de articulación. Los parámetros característicos del escurrimiento cuando la compuerta funciona libremente (no hay influencia de aguas abajo), son:

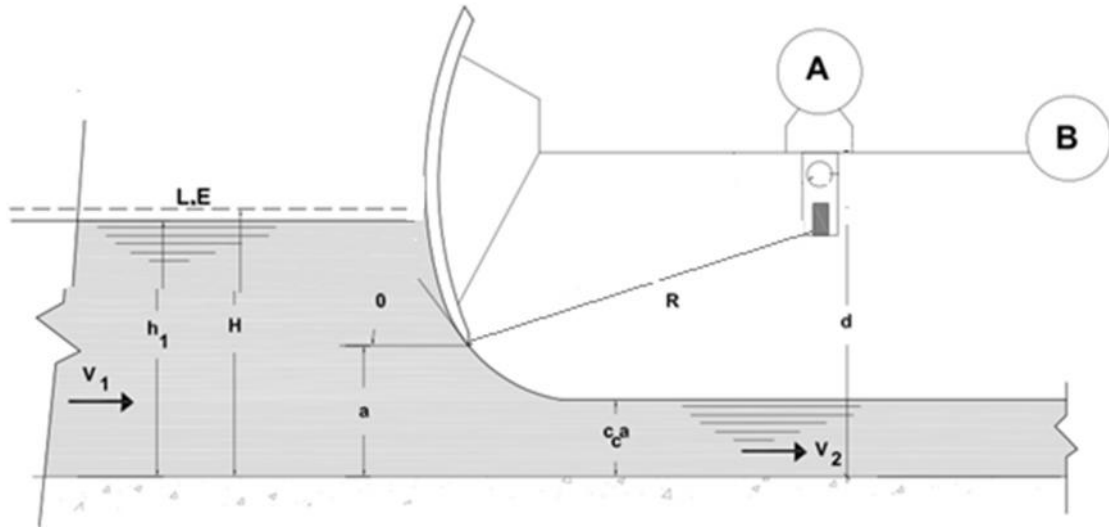
$h_1$ : Altura de aguas arriba de la compuerta.

$a$ : Abertura de la compuerta.

$R$ : Radio del tablero de la compuerta.

$d$ : Altura de apoyos de la compuerta.

$\alpha$ : Ángulo formado por la tangente en la parte inferior del tablero y la horizontal.



**Figura 7. Compuerta radial.**

Fuente: elaboración propia.

Para poder obtener el caudal que pasa bajo la compuerta es necesario obtener el coeficiente de contracción y coeficiente de gasto de la compuerta. Para esto existe el estudio experimental, que fue realizado por Toch (1955). La expresión queda determinada por la ecuación 3:

$$C_c = 1 - 0.75 \times \theta + 0.36 \times \theta^2 \quad \text{ecuación 3}$$

El ángulo queda determinada por la ecuación 4:

$$\theta = \frac{\text{arc.cos}((d - a)/R)}{90^\circ} \quad \text{ecuación 4}$$

Para obtener el caudal entregado por la compuerta es necesario obtener el coeficiente de gasto, se obtiene con ecuación 5:

$$C_Q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \times \frac{a}{h_1}}} \quad \text{ecuación 5}$$

El caudal por unidad de ancho descargado por la compuerta queda determinado por la ecuación 6:

$$q = C_Q \times a \times \sqrt{2 \times g \times h_1} \quad \text{ecuación 6}$$

En el diseño de la compuerta de debe determinar la altura máxima aguas arriba de esta y obtener el decremento que se produce entre la altura máxima y la mínima que soporta el desarenador, la cual corresponde a la altura de diseño de este.

La altura máxima en el desarenador se alcanzará cuando la caída de fondo de la cámara de desarenación alcance su máxima capacidad, lo que producirá un aumento en la altura de escurrimiento de este debido a la existencia de la acumulación de sedimentos en el fondo, esto a su vez producirá un aumento del empuje hidrostático, lo cual activará la apertura de la compuerta.

Se obtiene para las diferentes alturas de diseño el DCR, el cual queda determinado por la altura de aguas arriba máxima (Con sedimentos) y la altura mínima, para la cual fue diseñado el desarenador. La altura de los apoyos de la compuerta radial queda determinada por la ecuación 7:

$$d = h_o + DCR \text{ ecuación 7}$$

Dónde:

d: Altura de apoyo compuerta.

h<sub>o</sub>: Profundidad de diseño desarenador.

DCR: Decremento.

En la tabla 5 se presentan el decremento y altura de los apoyos para las diferentes alturas de diseño para la cámara de desarenación.

**Tabla 5. Decremento y Altura de Apoyo de Compuerta.**

		Altura diseño de desarenador (m)					
		1,5	2	2,5	3	3,5	4
<b>0,6 mm</b>	<b>DCR (m)</b>	0,2	0,26	0,32	0,38	0,44	0,5
	<b>d (m)</b>	1,7	2,26	2,82	3,38	3,94	4,5
<b>0,3 mm</b>	<b>DCR (m)</b>	0,38	0,50	0,62	0,76	0,88	1,00
	<b>d (m)</b>	1,88	2,50	3,12	3,76	4,38	5,00

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de la compuerta se debe cumplir dos condiciones, la principal consiste que la velocidad de lavado debe encontrarse entre 3 m/s y 6 m/s, además el Q<sub>lavado</sub> < Q<sub>captado</sub>, de manera que la cámara de desarenación siga en funcionamiento cuando se produzca el lavado de las partículas, se elegirá el caudal menor bajo la compuerta para que no se produzca una pérdida continua de agua en la limpieza del desareandor. Con ambas condiciones se procede a obtener la

apertura de la compuerta y por lo tanto el caudal entregado por esta, se considerará un caudal unitario para el diseño.

La altura que se produce aguas abajo de la compuerta, es posible obtenerlo con la siguiente expresión, la cual estará influenciada por el coeficiente de contracción de la compuerta.

$$h_2 = C_c \times a \quad \text{ecuación 8}$$

Con la altura aguas abajo de la compuerta, se puede obtener la velocidad de lavado con la ecuación 9:

$$V_2 = \frac{Q_{lavado}}{h_2 \times b} \quad \text{ecuación 9}$$

Debido a que el caudal obtenido para el diseño de la compuerta es un caudal unitario, este quedará condicionado al ancho de la compuerta, por lo tanto la única condición que se utilizará para la elección será la de velocidad de lavado.

Aplicando la altura de apoyo de la compuerta y la altura máxima aguas arriba de esta, para cada una de las alturas de diseño y diferentes aberturas de compuertas, para los diferentes tamaños de partículas. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 9 y figura 10.

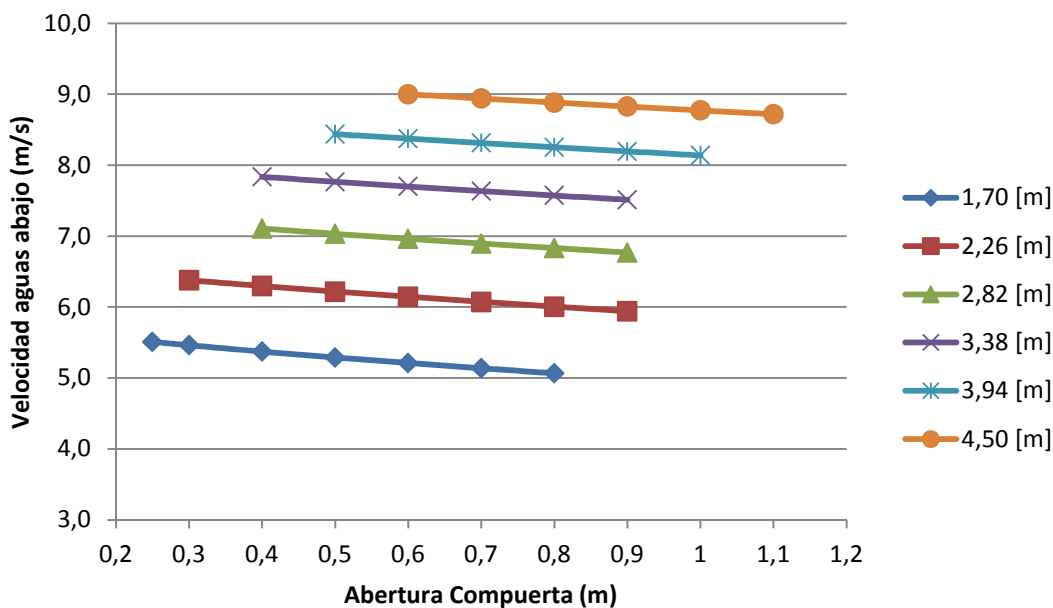
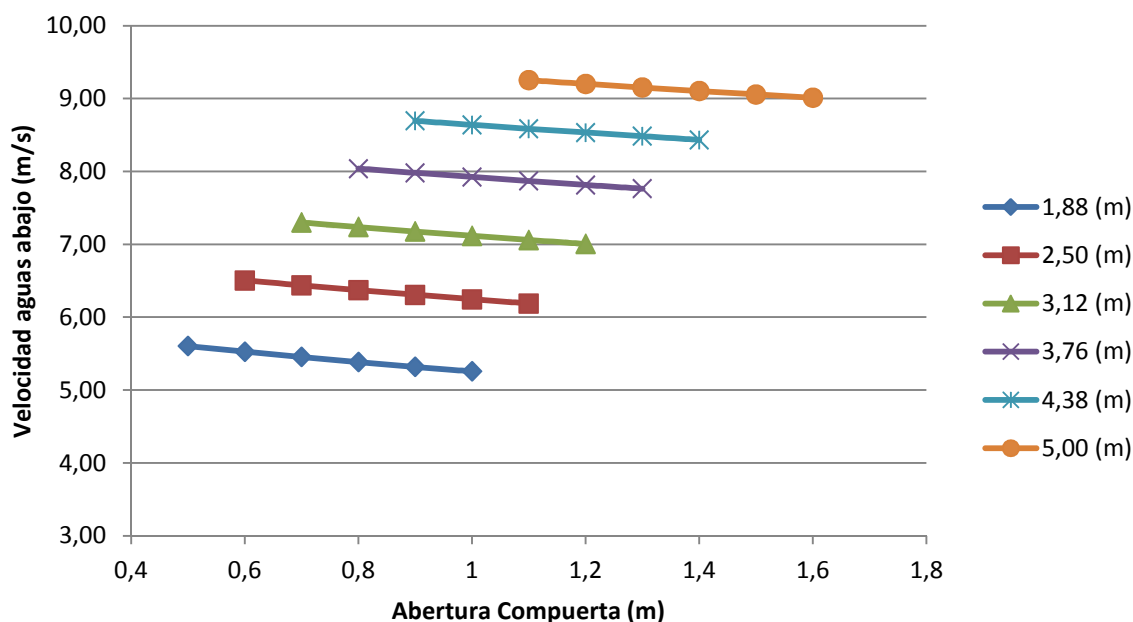


Figura 8. Velocidad de autolavado de partículas de 0,6 mm.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9. Velocidad de autolavado de partículas de 0,3 mm.**

Fuente: Elaboración propia.

Se analizaron diferentes aberturas de compuertas, donde se obtiene que la altura de 1,7 m cumple con la velocidad de lavado. Para el resto de las alturas se obtiene que ninguna cumple, excepto la compuerta con aguas arriba igual a 2,26 m y con abertura de 0,9 m se obtiene una velocidad de lavado igual a 5,94 m/s.

Obtenida estas condiciones se elige la compuerta de 1,7 m de altura aguas arriba, con abertura de 0,25 m, ya que esta cumple con las condiciones de lavado y será la que ocupará un menor caudal para realizar la limpieza del desarenador. Con esta abertura de compuerta se obtiene un caudal unitario igual a 0,93 m<sup>2</sup>/s/m.

Para el caso del diámetro de partículas igual a 0,3 mm, se obtiene que la única altura de apoyo que cumple con la condición de lavado para las diferentes aberturas es la de 1,88 m, para el resto de las alturas de apoyo ninguna cumple con la condición como se puede apreciar en la figura 10. En estas condiciones se elige la compuerta con una altura de igual a 1,88 m y con una abertura de 0,5 m de manera de minimizar las pérdidas por lavado, el caudal unitario obtenido para esta altura de apoyo de compuerta es igual a 1,84 m<sup>2</sup>/s/m.

En los desarenadores lentos se considera que el caudal de lavado varía entre 5% y 15% del caudal del funcionamiento de la unidad. Por lo tanto se debe utilizar un ancho que cumpla con esta

condición, de manera que no se produzcan grandes pérdidas de agua. Se obtiene la variación del ancho de compuerta para cada caudal de diseño del desarenador. Además dentro de la operación de desarenadores existen casos donde se trabaja con más de una nave de desarenación, de manera que para el lavado se utilice el 100% del caudal de captación, es por esto que también se analizará el ancho con un caudal igual al caudal de diseño del desarenador. Los anchos obtenidos tanto para 5%, 15% y 100% del caudal de diseño se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6. Ancho de Lavado**

Caudal Diseño (m <sup>3</sup> /s)	Ancho de Lavado (m)					
	0,93 (m <sup>2</sup> /s/m)			1,84 (m <sup>2</sup> /s/m)		
	b 5%	b 15%	b 100%	b 5%	b 15%	b 100%
0,5	0,03	0,08	0,54	0,01	0,04	0,27
1	0,05	0,16	1,08	0,03	0,08	0,54
2	0,11	0,32	2,15	0,05	0,16	1,09
3	0,16	0,48	3,23	0,08	0,24	1,63
4	0,22	0,65	4,30	0,11	0,33	2,17
5	0,27	0,81	5,38	0,14	0,41	2,72
6	0,32	0,97	6,45	0,16	0,49	3,26
7	0,38	1,13	7,53	0,19	0,57	3,80
8	0,43	1,29	8,60	0,22	0,65	4,35
9	0,48	1,45	9,68	0,24	0,73	4,89
10	0,54	1,61	10,75	0,27	0,82	5,43

Fuente: Elaboración propia.

Para la prediseño de la compuerta se utilizarán los diferentes anchos de compuertas calculados, tanto para un caudal de lavado igual al 5%, otro de 15% y por último uno igual al 100% del caudal de diseño.

#### 4.2.2 Funcionamiento de compuerta libremente.

A la hora del prediseño de la compuerta se debe comprobar que esta trabaja libremente, no se encuentra influenciada por aguas abajo, de manera que no existan turbulencias que puedan volver en suspensión sedimentos que ya fueron decantados anteriormente. El criterio utilizado será el prentado por Mery (2013), el cual dice que si la altura aguas abajo de la compuerta no supera la altura conjugada del torrente, este escurrimiento continuará hacia aguas abajo evolucionando según la pendiente del canal y la rugosidad. Si la altura de escurrimiento de aguas abajo es mayor

que la altura conjugada, el torrente a la salida quedará influenciado por una altura que se denominará “ $h'_1$ ” y la cual cubrirá la compuerta, produciéndose un resalto ahogado.

Por lo tanto se procede a obtener la altura crítica en el canal, para comprobar que se encuentra en torrente, si  $h_2 < h_c$ , se comprueba que el flujo se encuentra en torrente. Luego con la altura del torrente se procede a obtener la altura conjugada, la cual se comparará con la altura normal del canal de limpieza de manera que cumpla condición de compuerta libre. Se obtiene para los diferentes anchos de compuerta que todas trabajan libremente ya que todas las alturas normales obtenidas no alcanzan a superar la altura conjugada del torrente cumpliendo con la condición dada.

Con los resultados obtenidos, todas las compuertas analizadas, con los diferentes caudales cumple con la condición de operación libre, debido que ninguna de las alturas normales obtenida con los diferentes anchos, supera la altura crítica para cada caso, por lo tanto no cumple la condición impuesta, ya que no que no supera la altura conjugada del torrente.

En el canal de lavado se debe cumplir que la velocidad del fluido deber encontrarse entre 2 m/s y 6 m/s de manera que se produzca el arrastre de sedimentos y no se exista acumulación de sedimentos en el fondo del canal. Para el caso del caudal unitario igual a  $0,93 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$  se comprueba que se cumple la condición de lavado todas aquellas compuertas que tienen un ancho de compuerta mayor a 0,22 m. Mientras que para el caso del caudal unitario igual a  $1,84 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$  cumple todas las compuertas con anchos mayores o igual a 0,20 m.

#### *4.2.3 Análisis de fuerzas en la compuerta.*

Para el análisis de fuerzas se realizará un diagrama de cuerpo libre, tomando en cuenta el diseño seleccionado para una compuerta autolimpiante. Cuando el nivel del agua en el desarenador alcance la altura de articulación de la compuerta, ésta se abrirá y comenzará la eliminación de los sedimentos según las condiciones calculadas anteriormente.



Las fuerzas que pueden producir giro sobre la compuerta a través de su eje de rotación son:

- I. El propio peso de la compuerta. La magnitud de esta fuerza es el peso de todo el conjunto compuerta, y su punto de aplicación es el centro de gravedad de la compuerta. Tiene sólo componente vertical y su sentido es hacia abajo.
- II. La componente vertical del empuje hidrostático sobre el flotador. La componente vertical está representada por el empuje de Arquímedes. Su magnitud es igual al volumen de agua desplazado por el peso específico del agua. Tiene sólo componente vertical y hacia arriba.

Las fuerzas de empuje que afectan la compuerta autolimpiante no producen momento ya que la resultante de esta fuerza pasa por el eje de articulación. Esto se debe a una de las propiedades que presentan los líquidos que expresa que la fuerza de presión de un líquido estará siempre actuando normal al área de acción y empujando la superficie mojada, de tal manera que todas las fuerzas puntuales actúan sobre la cara circular de la compuerta son perpendiculares a las tangentes de cada punto y así pasan por el eje de rotación.

Cuando el tirante de operación aguas arriba coincide con la altura del eje de rotación de la compuerta, está se encuentra en equilibrio, por lo tanto esta es la condicionante para que la compuerta pueda abrirse, hasta alcanzar su abertura máxima.

Cuando la compuerta alcance la abertura máxima los flotadores ya no producirán empuje, ya que su parte inferior se encontrará al mismo nivel del eje de articulación y el momento producido será igual a cero, al igual como el momento producido por el peso de la compuerta ya que la componente vertical pasará por el eje de articulación, produciendo un momento nulo con lo que la compuerta nuevamente se encontrará en equilibrio. A medida que la altura aguas arriba de la compuerta disminuye la compuerta comenzará a cerrarse.

Haciendo sumatoria de momentos en la compuerta se tiene:

$$\sum M_O = 0 \rightarrow d_P \times P = d_F \times F \quad \text{ecuación 10}$$

$d_P$ : Distancia desde el centro de gravedad de la compuerta al eje de articulación O.

P: Peso total del conjunto compuerta.

$d_F$ : Distancia desde el punto de aplicación del empuje en el flotador al eje de articulación.

F: Empuje producido en el flotador.

Para lograr lo propuesto en la ecuación 10, el momento respecto al eje de rotación debido al contrapeso contenido en B, se equilibra con el peso de la compuerta y el momento generado por el contrapeso A, se equilibra con el empuje hidrostático.

En conclusión, los momentos generados por el empuje hidrostático sobre el flotador y por el peso de la compuerta y contrapesos, son iguales en magnitud y de direcciones opuestas para cualquiera posición de la hoja de la compuerta sólo cuando el nivel de tirante aguas arriba coincide con la elevación del eje de rotación.

Ayudado por el software AUTOCAD, se obtuvo el volumen de diferentes flotadores, variando en ancho de estos y sus diferentes distancias al eje de articulación con un peso de compuerta determinado, así obtener la distancia del peso de la compuerta al eje de articulación para que la compuerta se encuentre en equilibrio. Para estimar el peso de la compuerta se toma un valor aproximado, según el diseño de forma de la compuerta en otros estudios realizados, esto es un peso igual a 3920 [N] sin los contrapesos. Se considerará con los contrapesos un peso total para el estudio igual a 18620 [N] y un ancho de flotador igual a 0.8 [m], con un ancho de compuerta igual a 2,72 m y un caudal de 5 m<sup>3</sup>/s de lavado. Además se obtuvo la distancia al eje de articulación de una compuerta con un ancho igual a 2 m y un caudal de lavado igual a 2 m<sup>3</sup>/s. La tabla 7 muestra la distancia obtenida desde el eje de articulación de la compuerta al centro de gravedad del conjunto compuerta contrapesos, con diferentes áreas de flotadores.

Como se puede observar en la tabla 7, a medida que el volumen del flotador aumenta se necesita una mayor distancia desde el CG de la compuerta al eje de articulación. Esto se debe a que el empuje producido por el flotador aumenta. Si aumentara el peso de la compuerta la distancia D<sub>p</sub> disminuye, debido a que el momento que produce el peso de la compuerta es mucho mayor que el empuje en el flotador.

**Tabla 7. Distancia Eje Articulación.**

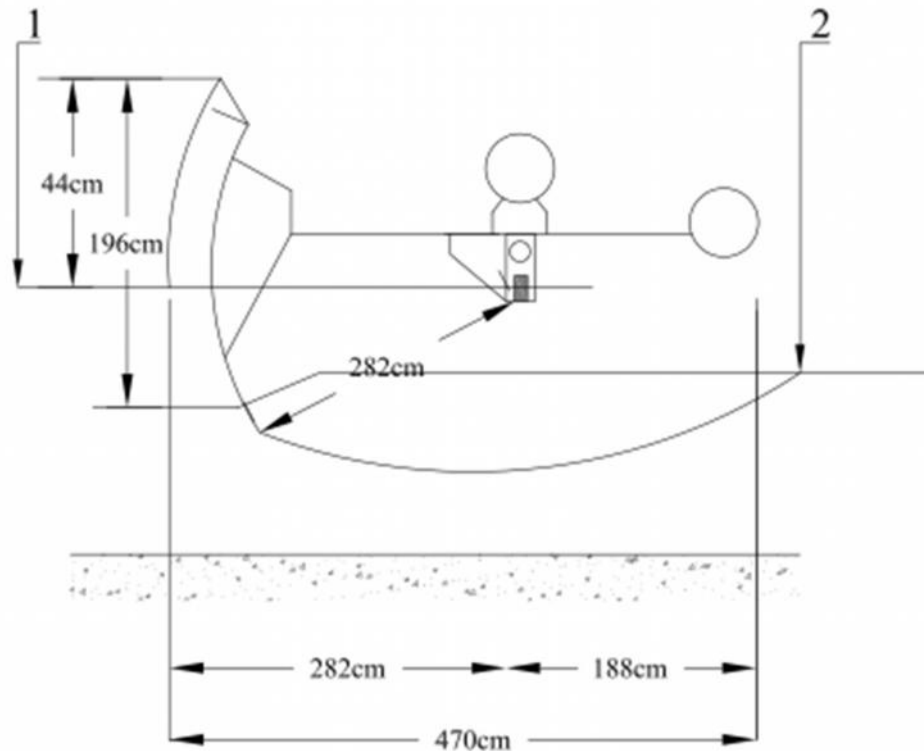
<b>Caudal</b>	<b>R m</b>	<b>A m<sup>2</sup></b>	<b>Ancho m</b>	<b>D<sub>F</sub> m</b>	<b>MF N·m</b>	<b>d<sub>p</sub> m</b>
5 m <sup>3</sup> /s	2,92	0,044	0,80	2,88	993,48	0,05
	3,02	0,088	0,80	2,92	2014,56	0,10
	3,12	0,132	0,80	2,96	3063,24	0,16
2 m <sup>3</sup> /s	2,65	0,052	0,50	2,59	662,47	0,04
	2,75	0,104	0,50	2,68	1370,98	0,08
	2,85	0,156	0,50	2,78	2133,21	0,12

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto a la hora de un diseño de este tipo de compuertas es necesario conocer el peso total de la compuerta con todos los elementos que le corresponden.

#### 4.2.4 Dimensiones de la compuerta.

En la figura 10, se muestran las dimensiones de la compuerta autolimpiante para un flotador de variación entre radio interno y externo igual a 0,1 m.



**Figura 10. Dimensiones de Compuerta prediseñada.**

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Dentro de los componentes más importantes en una pequeña central hidroeléctrica se encuentra el desarenador el cual determinará la altura aguas arriba que tendrá la compuerta a diseñar. La altura total del desarenador no debe ser superior a 1,5 m de manera que cumpla con las condiciones de lavado.

Se eligió la compuerta Radial principalmente debido al mínimo esfuerzo que se debe realizar para la apertura, debido a que el empuje hidrostático sobre la cara aguas arriba del tablero pasa por el eje de rotación, por lo tanto no genera momento alguno.

El tipo de compuertas autolimpiantes propuesta para la descarga de fondo en PCH tienen el inconveniente de trabajar sólo para una altura determinada aguas arriba de la compuerta, si el caudal disminuye disminuirá la altura en el desarenador y por lo tanto la compuerta no abrirá hasta alcanzar su altura de diseño.

Las compuertas autolimpiantes propuestas son totalmente automáticas y no necesitan ningún accionamiento mecánico para su abertura, no requiriendo así ningún tipo de energía externa. Los sólidos circulan libremente en el canal pasando por abajo de la compuerta.

En todas las condiciones de la compuerta se debe presentar una descarga libre, de manera que no se produzcan turbulencias que puedan volver a poner en suspensión sedimentos que ya habían decantado en el fondo del desarenador.

La compuerta autolimpiante propuesta cumple con las condiciones de lavado para caudales mayores a  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$  en el caso del desarenador para partículas de 0,6 mm y para caudales mayores a  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$  en el caso de desarenador para partículas igual a 0,3 mm.

Para las condiciones propuestas, es decir para un caudal constante y una abertura fija, la pérdida de carga tiende a ser muy grande, debido a la gran altura aguas arriba de la compuerta y la velocidad que se necesita para el lavado de los sedimentos.

Las condiciones impuestas para el prediseño de las compuertas tiene la desventaja de que los anchos que se obtienen en el diseño del desarenador son mucho más grandes que el largo de este, lo que limita el caudal de operación de la pequeña central hidroeléctrica.

La decisión de fijar el tamaño de partículas a desarenar en un 100% en un determinado proyecto es un problema económico, entre menor es el tamaño “do” mayor es el costo del tanque de desarenación y menores serán los costos operacionales por reparación de rodets, y menores serán las pérdidas de rendimiento de las unidades. Por esto se recomienda realizar un estudio de factibilidad económica para la aplicación de compuertas autolimpiantes para la descarga de fondo en PCH.

En estudios futuros sobre el tema se recomienda realizarlo en un lugar determinado, de manera que los datos usados para el diseño sean más precisos. Además de determinar el peso total de la compuerta.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Mery, Horacio 2013, HIDRÁULICA aplicada al diseño de obras. RIL Editores.

Ven Te Chow, 2000. HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS. Ed. McGraw Hill.

Chanson, Hubert 2002. Hidráulica de flujos en canales abiertos. Ed. McGraw Hill.

Isla de Juana, Ricardo 2005. Proyectos de plantas de tratamiento de aguas. Ed. Beilisco Ediciones.

Iroume, Andrés 2000. “Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile”. Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile.

Sparrow, Edgar 2008. “El desarenador”. Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería, Escuela Académica profesional Ingeniería Civil.

Mapelli, Luis 2010. Equipos para tratamientos de aguas y reciclajes de residuos. Hidrometálica Compuertas.

Nateras, Eder 2006. Determinación experimental del coeficiente de descarga en una compuerta AMIL. Facultad de Ingeniería Civil. Univeridad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Maldonado, B. 2001. Diseño de una estructura hidromecánica para el control automático de niveles en canales de riego. Universidad Autónoma de Zacatecas.

López, Gilberto 2010. Aplicación del método de energía–momento en la calibración de una compuerta radial. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo.

Guiñez, Cristián 2008, Energía Renovanle No Convencional Hidroeléctrica en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María.

Hydrostec. Página con información referente a compuertas automáticas [En línea]. [http://www.hydrostec.com.br/espanhol/catalogo/canais\\_reservatorios/A10-01-0.pdf](http://www.hydrostec.com.br/espanhol/catalogo/canais_reservatorios/A10-01-0.pdf). [Diciembre 2005].

Anales. Página con información referente a Pequeñas Centrales Hidroeléctricas [En línea].  
[http://www.revista-anales.es/web/n-10/sección\\_7.html](http://www.revista-anales.es/web/n-10/sección_7.html) [2010].

CMO. Página con información referente a compuertas planas verticales [En línea].  
<http://www.cmo.es/pdf/acumulación31.pdf>. . [2012].

Einar. Página con información referente a compuertas de control aguas abajo [En línea].  
<http://www.einar.es/area-rc-compuertas-narbio-narbis.html>.

PUC. Página con información referente a la energía renovable no convencional [En línea].  
<http://web.ing.puc.cl/~power/alumno08/renewables/ernc.html>.

## **ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES.**

### **A.1 Obras de Toma**

Las obras de toma o Bocatoma es la estructura por medio de la que se controla el volumen de agua requerida para una potencia determinada. Existen diferentes tipos de obras de captación, pero fundamentalmente se pueden agrupar en dos: obras de embalsamiento y obras de captación directa.

- a) Obras de embalsamiento: Consisten en presas que cierran el cauce de un río formando un embalse hacia aguas arriba de esta estructura, este reservorio permite regular el caudal del río, pudiendo almacenarlo en épocas de crecientes para así ser utilizado durante la sequía. Las presas pueden ser de tierra, piedra u hormigón.
- b) Obras de captación directa: El agua se capta sin ningún almacenamiento, por lo tanto no son necesarias obras de regulación. Para que esto sea posible, el caudal que circula por el río debe ser mayor que el caudal de captación.

Para asegurar que la obra de toma presente un buen funcionamiento se debe tener una estructura que peralte el cauce del río, de manera que eleve el nivel de agua hasta una cota determinada para su captación. Este tipo de toma con azud se llama del tipo convencional por ser la solución más utilizada. Existe otro tipo de toma que tiene la estructura de captación en el cuerpo del azud, la cual se llama toma de fondo o tirolesa.

#### **A.1.1 Partes de la obra de toma**

Los componentes principales de una obra de toma directa son los siguientes:

- a) Azud: busca cerrar el cauce del río, obligando a subir el agua que se encuentra por debajo de la cota de la cresta, de manera que ingrese hacia el canal de conducción. En épocas de crecientes el dique funciona como vertedero.
- b) Rejilla: esta se encarga de que pase material sólido muy grueso hacia el canal de conducción. El agua captada debe estar en lo posible libre de sólidos, para no saturar al desarenador, es por esto que se hace una rejilla dentro de la bocatoma
- c) Colchón al pie del azud: sirve para disipar la energía con la cae el agua desde el azud en épocas de crecidas.



### A.1.2 Transporte de sedimentos.

Los sedimentos que transporta una corriente de agua son consecuencia natural de la degradación del suelo, o también por movimientos de masas (desprendimientos, deslizamientos u otros).

Las fuerzas que intervienen en el movimiento de las partículas son: la fuerza peso (partículas grandes), fuerzas cohesivas (partículas pequeñas), fuerzas de viscosidad del flujo, algunas fuerzas resistentes están relacionadas con el tamaño de los granos y la distribución de estos. Las partículas gruesas tienen un movimiento en forma individual mientras que las finas tienen un movimiento en grupos.

De acuerdo con el mecanismo de transporte pueden ser distinguidos dos formas:

- a) Carga en Suspensión: Las partículas de materia sólida que son barridas por la corriente turbulenta de un río constituyen lo que se llama material en suspensión. Este proceso está controlado principalmente por la turbulencia del agua.
- b) Carga de lecho: Los materiales que se mueven a lo largo del fondo de una corriente constituyen la carga de lecho de una corriente determinada. Las partículas se mueven hacia adelante de tres maneras, por saltación, rodamiento y deslizamiento.

Las partículas se mueven generalmente rodando o deslizándose unas sobre otras en velocidades bajas. Sin embargo cuando las velocidades aumentan, arenas e incluso gravas pueden ser transportadas en suspensión.

La concentración de los sedimentos en un cauce natural es de vital importancia para el diseño del desarenador. La forma más sencilla de tomar una muestra de sedimentos en suspensión consiste en sumergir un recipiente en la corriente, en un punto en que se encuentre bien mezclada. El sedimento contenido en un volumen medido de agua se filtra, se seca y se pesa. Esto nos entregará una medida de la concentración del sedimento.

Las características que definen los procesos de suspensión, transporte y depositación del sedimento no depende solamente de las condiciones del flujo sino también de algunas propiedades de las partículas, como es el tamaño, forma, peso específico, velocidad de caída, granulometría, todas estas propiedades están relacionadas con las partículas individuales.

A la hora del diseño del desarenador las propiedades más relevantes son:

- a) **Tamaño:** La propiedad más importante de una partícula de sedimento es su tamaño, este nos definirá con qué tipo de sedimento estamos tratando.
- b) **Densidad:** Es la relación entre la masa que posee la partícula y el volumen de esta. La mayoría de los sedimentos en suspensión de los ríos son principalmente arenas medias y finas, limos y arcillas. La densidad relativa de estas partículas es 2.65.
- c) **Peso específico:** Es la relación entre el peso de la partícula y su volumen. Es igual al producto de la densidad por la aceleración de gravedad (g).
- d) **Velocidad de sedimentación ( $v_0$ ):** Es la velocidad límite que tendrá la partícula cuando cae en agua en reposo. Para este aspecto existen varias fórmulas empíricas y tablas para obtener la velocidad de caída con respecto al diámetro de la partícula.
- e) **Diámetro de sedimentos:** Es el diámetro de una esfera equivalente de misma densidad y velocidad de caída que la partícula sólida en estudio. Una misma partícula puede tener varios diámetros de sedimentación, dependiendo de líquido y la temperatura.

### **A.1.3 Remoción de las partículas en un tanque de desarenación**

Los sedimentos que llegan en suspensión al desarenador desde la zona de transición, tienen una granulometría variada, las partículas que presenten un diámetro mayor o igual " $d_0$ " (para el cual se diseñó el desarenador) se abatirán completamente, no así las partículas que son de diámetro menor a " $d_0$ " se abatirán solo algunas. Es aquí donde entra el concepto de factor de remoción (R), el cual representa el material abatido con respecto al total del material que pasa por el desarenador. Existen diferentes formas para poder obtener el factor de remoción según la forma del tanque y una granulometría conocida. Según literatura el factor de remoción que se utiliza para desarenadores de centrales hidroeléctricas oscila entre 60% y el 80% (Dr. Demetrio Fernández, 2004). La remoción dependerá principalmente de las características del material en suspensión que traen las aguas. Si este es principalmente material fino, ningún desarenador tendrá buena remoción; en cambio, si las aguas arrastran abundante material mayor que " $d_0$ ", la remoción será buena.

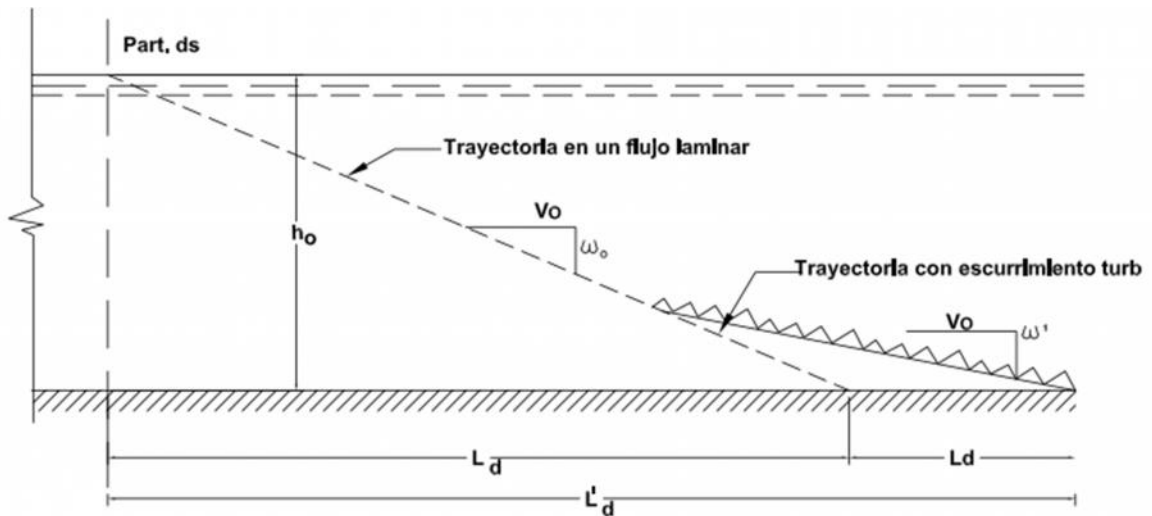
El desarenador se diseñará para un largo " $L_d$ ", esta longitud será necesaria para abatir una partícula de diámetro equivalente " $d_0$ ". Por lo tanto a la hora de la remoción de partículas, todas

aquellas que presente un diámetro mayor a “ $d_0$ ” se abatirán completamente, mientras que las partículas menores al diámetro “ $d_0$ ” pero mayores al diámetro mínimo de desarenación se abatirán parcialmente.

**A.1.4 Efecto de la turbulencia en la sedimentación de las partículas en un desarenador.**

En los desarenadores no se cumple la teoría de la desarenación ideal, la cual se produciría en un escurrimiento ficticio supuesto laminar y sin turbulencia. Donde la partícula más desfavorable se encuentra ubicada en la superficie libre y toma una trayectoria rectilínea, según su velocidad de caída hasta llegar al fondo del tanque.

Cuando existe el efecto de la turbulencia en la sedimentación de las partículas en una cámara de desarenación, es decir se produce una disminución de la velocidad de sedimentación de las partículas, lo que producirá un retarde del tiempo de sedimentación y por lo tanto será necesario alargar el tanque. Existen partículas que debido a la turbulencia no logran decantar y permanecen en suspensión, esto ocurre cuando las velocidades turbulentas son mayores que la velocidad de sedimentación.



**Figura 11, Efecto turbulencia en un desarenador.**

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO B: DISEÑO DESARENADOR

Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según altura de caída y potencia instalada.

**Tabla 8, Altura de caída.**

Bajas caídas	2,5 a 15 m
Medias caídas	15 a 300 m
Altas caídas	> 300 m

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9, Potencia instalada.**

Microcentrales	< 100 kW
Minicentrales	101 kW a 2.000 kW
Pequeñas Centrales	2.001 kW a 10.000 kW

Fuente: Elaboración propia.

Un parámetro característico para diseñar una cámara de desarenación, es el diámetro de partículas que se tratan de eliminar un 100%. El valor adoptado es cada caso depende del uso del agua desaranada. En lo referido a hidroelectricidad el profesor M. Bouvard propone fijar el tamaño de partículas a desarenar de acuerdo a la altura de caída de la central. Los valores propuestos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 10, Tamaño de partículas a desarenar.**

Altura de caída [m]	do [mm]
H < 100	No desarenar
100 < H < 200	0,6
200 < H < 300	0,5
300 < H < 500	0,3
500 < H < 1000	0,1

Fuente: M. Bouvard, 1960.

Determinación del coeficiente K según el tamaño de partículas.

**Tabla 11, Coeficiente K**

do [mm]	K
> 1	11,4
1 > ds > 0,1	13,9
< 0,1	16,1

Fuente: Elaboración propia.

El área total del desarenador será:

$$A_t = h_1 * b + h_2^2 + (b - 2 * h_2) * h_2$$

Obtención de dimensiones:

$$\frac{h_1}{h_2} = 0,80 \rightarrow h_1 = 0.8h_2$$

$$h_0 = h_2 + 0.80h_2$$

A continuación se presentan las diferentes velocidades de caídas para distintos diámetros de partículas.

d (mm)	w (cm/s)
0.05	0.178
0.10	0.692
0.15	1.560
0.20	2.160
0.25	2.700
0.30	3.240
0.35	3.780
0.40	4.320
0.45	4.860
0.50	5.400
0.55	5.940
0.60	6.480
0.70	7.320
0.80	8.070
1.00	9.44
2.00	15.29
3.00	19.25
5.00	24.90

**Figura 12, Tamaño de partículas y velocidad de caída.**

Fuente: Hidráulica, 2013

La remoción será de 100%, debido a que se quieren eliminar todas las partículas con un tamaño mayor a igual a 0.6 mm y otro análisis para partículas mayores a 0,3 mm.

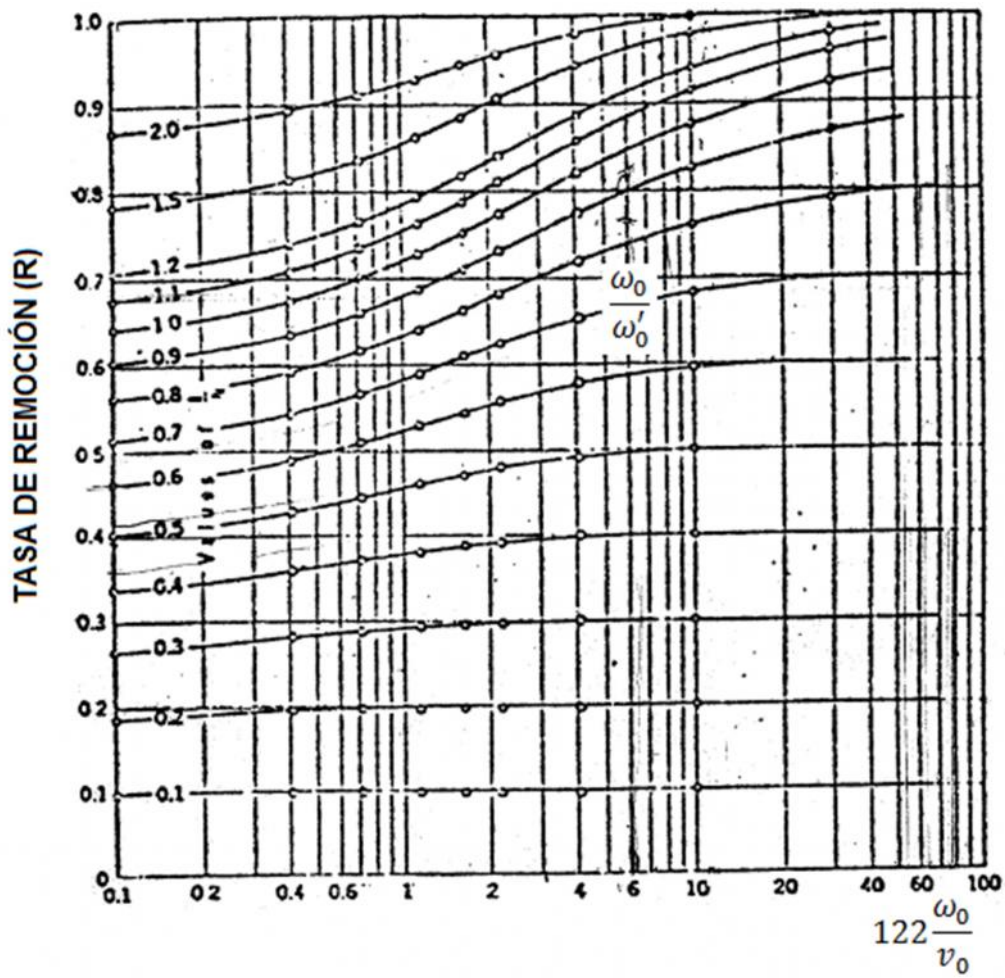


Figura 13, Gráfico Thomas Camp (1946).

Fuente: Hidráulica (H. Mery, 2013)

Se obtiene:

$$\frac{\omega_0}{\omega'_0} = 2$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la obtención de DCR, a través de la caída de fondo del desarenador, para 0,3 mm y 0,6 mm, en la tabla 12 se entregan los resultados.

**Tabla 12. Decremento 0,3 mm y 0,6 mm.**

0,3 mm	Velocidad de sedimentación m/s	$w_0$	0,0648	0,0648	0,0648	0,0648	0,0648	0,0648
	Velocidad desarenador m/s	$v_0$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Relación Thomas Camp	$122w_0/v_0$	39,528	39,528	39,528	39,528	39,528	39,528
	Relación Vel. c/ y s/ turbulencia.	$w_0/w'o$	2	2	2	2	2	2
	Velocidad de sedimentación c/ turb. m/s	$w'o$	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324
	Longitud desarenador [m]	Ld	9,26	12,35	15,43	18,52	21,60	24,69
	Longitud adoptada desarenador. m	Ladoptada	10,00	13,00	16,00	19,00	22,00	25,00
	Pendiente desarenador m/m	i	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Caída de fondo m	Z	0,200	0,260	0,320	0,380	0,440	0,500
	Altura de apoyo compuerta. m	d	1,700	2,260	2,820	3,380	3,940	4,500
	Decremento m	DCR	0,200	0,260	0,320	0,380	0,440	0,500
0,6 mm	Velocidad de sedimentación m/s	$w_0$	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324	0,0324
	Velocidad desarenador m/s	$v_0$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Relación Thomas Camp	$122w_0/v_0$	19,764	19,764	19,764	19,764	19,764	19,764
	Relación Vel. c/ y s/ turbulencia.	$w_0/w'o$	2	2	2	2	2	2
	Velocidad de sedimentación c/ turb. m/s	$w'o$	0,0162	0,0162	0,0162	0,0162	0,0162	0,0162
	Longitud desarenador m	Ld	18,52	24,69	30,86	37,04	43,21	49,38
	Longitud adoptada desarenador. m	Ladoptada	19,00	25,00	31,00	38,00	44,00	50,00
	Pendiente desarenador m/m	i	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Caída de fondo m	Z	0,380	0,500	0,620	0,760	0,880	1,000
	Altura de apoyo compuerta. m	d	1,880	2,500	3,120	3,760	4,380	5,000
	Decremento m	DCR	0,380	0,500	0,620	0,760	0,880	1,000

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO C: PREDISEÑO COMPUERTA.**

A en las siguientes tablas se muestran los resultados de prediseño para las diferentes caída de fondo y altura de poyo de compuerta, tanto para diámetro de partículas a desarenar igual a 0,3 mm y 0,6 mm.

Desde la tabla 13 a la 18 muestran los resultados del Prediseño de compuerta para partículas a desarenar igual a 0,3 mm. Mientras que desde la tabla 19 a la 24 muestran los resultados del Prediseño de compuerta para partículas a desarenar igual a 0,6 mm. Además en la tabla

**Tabla 13. Resultados altura 1,700 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	1,70	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	1,70	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
Radio del tablero de la compuerta.	R m	2,55	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550
Abertura de compuerta.	a m	0,25	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,6149	0,630	0,659	0,688	0,716	0,743	0,770
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,6749	0,670	0,662	0,654	0,648	0,641	0,636
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,6437	0,634	0,616	0,599	0,584	0,570	0,558
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	0,9294	1,098	1,422	1,730	2,024	2,306	2,577
Ancho compuerta	b m	1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,17	0,201	0,265	0,327	0,389	0,449	0,509
Velocidad de salida.	$V_2$ m	5,51	5,461	5,372	5,289	5,210	5,137	5,067

Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 14. Resultados altura 2,260 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260	2,260
Radio del tablero de la compuerta.	R m	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390	3,390
Abertura de compuerta.	a m	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,608	0,630	0,652	0,674	0,696	0,717	0,737
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,677	0,670	0,664	0,658	0,652	0,647	0,643
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,649	0,634	0,620	0,607	0,595	0,584	0,574
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	1,296	1,688	2,064	2,426	2,774	3,111	3,437
Ancho compuerta	b m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,203	0,268	0,332	0,395	0,457	0,518	0,578
Velocidad de salida.	$V_2$ m	6,378	6,296	6,218	6,144	6,073	6,006	5,942

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 15. Resultados altura 2,820 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	2,820	2,820	2,820	2,820	2,820	2,820
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	2,820	2,820	2,820	2,820	2,820	2,820
Radio del tablero de la compuerta.	R m	4,230	4,230	4,230	4,230	4,230	4,230
Abertura de compuerta.	a m	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,612	0,630	0,648	0,666	0,683	0,700
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,676	0,670	0,665	0,660	0,656	0,651
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,646	0,634	0,623	0,612	0,602	0,593
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	1,921	2,357	2,778	3,187	3,583	3,968
Ancho compuerta	b m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,270	0,335	0,399	0,462	0,525	0,586
Velocidad de salida.	$V_2$ m	7,106	7,032	6,962	6,895	6,830	6,768

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16. Resultados altura 3,380 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	3,380	3,380	3,380	3,380	3,380	3,380
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	3,380	3,380	3,380	3,380	3,380	3,380
Radio del tablero de la compuerta.	R m	5,070	5,070	5,070	5,070	5,070	5,070
Abertura de compuerta.	a m	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,600	0,615	0,631	0,645	0,660	0,675
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,680	0,675	0,670	0,666	0,662	0,658
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,654	0,643	0,634	0,624	0,615	0,607
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	2,130	2,620	3,096	3,558	4,009	4,448
Ancho compuerta	b m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,272	0,337	0,402	0,466	0,529	0,592
Velocidad de salida.	$V_2$ m	7,834	7,765	7,698	7,634	7,572	7,512

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 17. Resultados altura 3.940 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	3,940	3,940	3,940	3,940	3,940	3,940
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	3,940	3,940	3,940	3,940	3,940	3,940
Radio del tablero de la compuerta.	R m	5,910	5,910	5,910	5,910	5,910	5,910
Abertura de compuerta.	a m	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,604	0,617	0,630	0,643	0,656	0,668
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,678	0,674	0,670	0,666	0,662	0,659
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,650	0,642	0,633	0,625	0,617	0,610
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	2,860	3,386	3,899	4,399	4,888	5,366
Ancho compuerta	b m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,339	0,404	0,469	0,533	0,596	0,659
Velocidad de salida.	$V_2$ m	8,436	8,372	8,311	8,251	8,193	8,137

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 18. Resultados altura 4,500 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Radio del tablero de la compuerta.	R m	6,750	6,750	6,750	6,750	6,750	6,750
Abertura de compuerta.	a m	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,608	0,619	0,631	0,642	0,653	0,664
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,677	0,674	0,670	0,667	0,664	0,661
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,648	0,641	0,634	0,626	0,620	0,613
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	3,656	4,215	4,762	5,298	5,822	6,337
Ancho compuerta	b m	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,406	0,472	0,536	0,600	0,664	0,727
Velocidad de salida.	$V_2$ m	8,999	8,940	8,882	8,826	8,772	8,719

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19. Resultados altura 1,880 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
Radio del tablero de la compuerta.	R m	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82
Abertura de compuerta.	a m	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,67	0,70	0,73	0,75	0,77	0,80
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	1,84	2,16	2,46	2,76	3,04	3,31
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,33	0,39	0,45	0,51	0,57	0,63
Velocidad de salida.	$V_2$ m	5,60	5,53	5,45	5,38	5,32	5,26

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20. Resultados altura 2,500 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Radio del tablero de la compuerta.	R m	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Abertura de compuerta.	a m	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,66	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,61	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	2,58	2,96	3,32	3,67	4,01	4,35
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,40	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70
Velocidad de salida.	$V_2$ m	6,51	6,44	6,37	6,31	6,25	6,19

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21. Resultados altura 3,120 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12
Radio del tablero de la compuerta.	R m	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68
Abertura de compuerta.	a m	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,65	0,67	0,69	0,70	0,72	0,73
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58	0,58
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	3,39	3,82	4,23	4,63	5,03	5,41
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,46	0,53	0,59	0,65	0,71	0,77
Velocidad de salida.	$V_2$ m	7,30	7,24	7,18	7,12	7,06	7,00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22. Resultados altura 3,760 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76	3,76
Radio del tablero de la compuerta.	R m	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
Abertura de compuerta.	a m	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,65	0,66	0,67	0,69	0,70	0,71
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,67	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,62	0,61	0,61	0,60	0,59	0,59
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	4,28	4,75	5,21	5,67	6,11	6,54
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,53	0,60	0,66	0,72	0,78	0,84
Velocidad de salida.	$V_2$ m	8,04	7,98	7,92	7,87	7,82	7,76

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23. Resultados altura 4,380 m.**

Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
Radio del tablero de la compuerta.	R m	6,57	6,57	6,57	6,57	6,57	6,57
Abertura de compuerta.	a m	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,64	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,62	0,62	0,61	0,60	0,60	0,59
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	5,21	5,73	6,23	6,73	7,21	7,69
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,60	0,66	0,73	0,79	0,85	0,91
Velocidad de salida.	$V_2$ m	8,69	8,64	8,59	8,53	8,48	8,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Resultados altura 5,000 m.

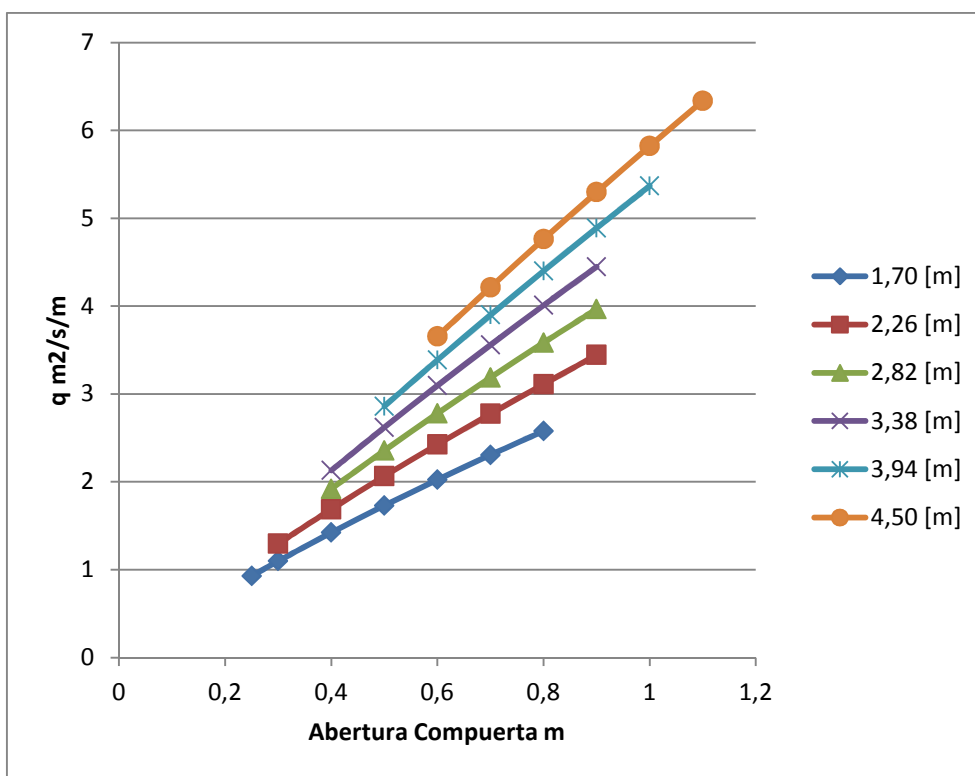
Altura de aguas arriba de la compuerta.	$h_1$ m	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Altura de apoyos de la compuerta.	d m	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Radio del tablero de la compuerta.	R m	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
Abertura de compuerta.	a m	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60
Ángulo formado por la parte inferior del tablero y la horizontal.		0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70
Coefficiente de contracción.	$C_c$	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65
Coefficiente de gasto.	$C_q$	0,62	0,61	0,61	0,60	0,60	0,59
Caudal unitario	$q$ m <sup>2</sup> /s/m	6,76	7,30	7,84	8,36	8,88	9,39
Ancho compuerta	b m	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Alturas aguas abajo compuerta	$h_2$ m	0,73	0,79	0,86	0,92	0,98	1,04
Velocidad de salida.	$V_2$ m	9,25	9,20	9,15	9,10	9,06	9,01

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 25. Caudal unitario 0,6 mm.**

Apertura [m]	1,7	2,26	2,82	3,38	3,94	4,5
0,25	5,510					
0,30	5,461	6,378				
0,40	5,372	6,296	7,106	7,834		
0,50	5,289	6,218	7,032	7,765	8,437	
0,60	5,210	6,144	6,962	7,698	8,373	8,999
0,70	5,137	6,073	6,895	7,634	8,311	8,940
0,80	5,067	6,006	6,830	7,572	8,252	8,882
0,90		5,940	6,768	7,512	8,194	8,826
1,00					8,137	8,772
1,10						8,719

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14. Caudal unitario, 0,6 mm**

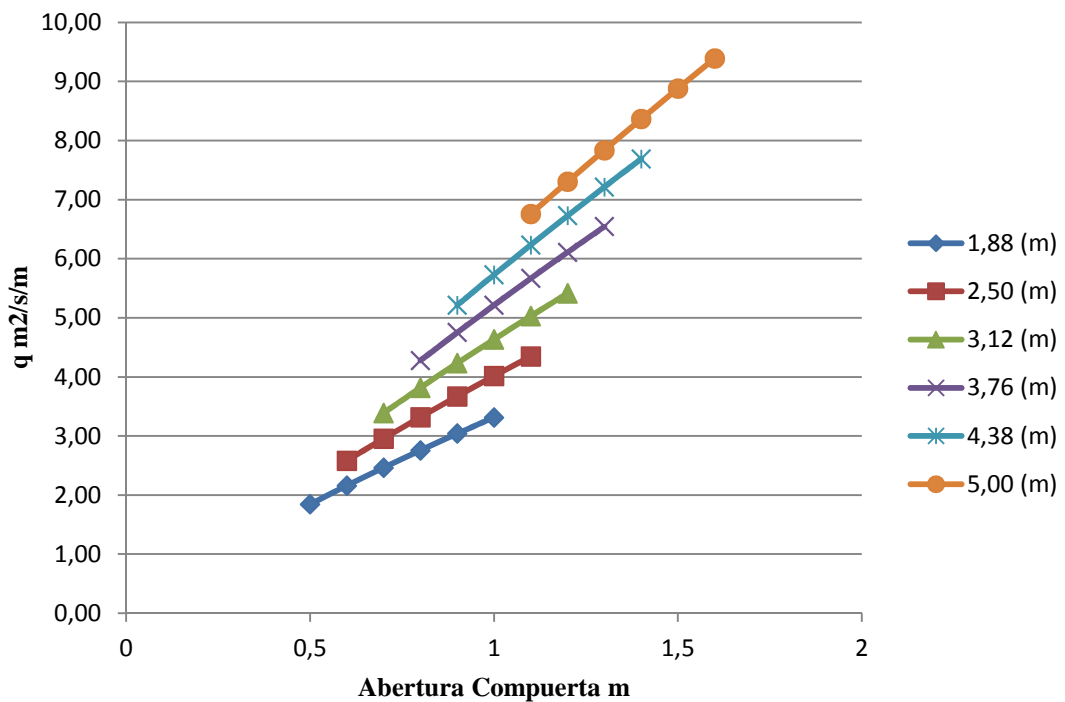
Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores se puede comprobar que los caudales menores se obtienen con aperturas menores, es por esta razón que para el prediseño de la compuerta se utilizará la que presenta una apertura menor igual a 0.25 m.

**Tabla 26. Caudal unitario, 0,3 mm.**

Apertura [m]	1,88 (m)	2,50 (m)	3,12 (m)	3,76 (m)	4,38 (m)	5,00 (m)
0,5	1,84					
0,6	2,16	2,58				
0,7	2,46	2,96	3,39			
0,8	2,76	3,32	3,82	4,28		
0,9	3,04	3,67	4,23	4,75	5,21	
1	3,31	4,01	4,63	5,21	5,73	
1,1		4,35	5,03	5,67	6,23	6,76
1,2			5,41	6,11	6,73	7,30
1,3				6,54	7,21	7,84
1,4					7,69	8,36
1,5						8,88
1,6						9,39

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 15. Caudal unitario, 0,3 mm.**

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores se puede comprobar que los caudales menores se obtienen con aperturas menores, es por esta razón que para el prediseño de la compuerta se utilizará la que presenta una abertura menor igual a 0.50 m.



Cálculo canal de lavado

Con el prediseño de la compuerta se procede a calcular las dimensiones que tendrá el canal de limpieza del desarenador. El canal será rectangular, y de Hormigón el que presentara una rugosidad de manning igual a 0.014 (Ven Te Chow), tendrá una pendiente igual al 2% de manera de asegurar el lavado de los sedimentos. Con estos datos se procede a obtener la altura normal en el canal con la ecuación de Chezy-manning, para los diferentes anchos de compuertas.

$$Q = \frac{A(h)^{5/3} \times s^{1/2}}{P(h)^{2/3} \times n}$$

Con:

Q: Corresponde al Caudal lavado en [m<sup>3</sup>/s].

A(h): Área mojada en función de h

P(h): Perímetro mojado en función de h.

n: Rugosidad de manning.

S: Pendiente del canal en m/m.

La velocidad de lavado en el canal debe variar entre 2 m/s y 6 m/s. En la tabla 27 se presentan los resultados obtenidos, tanto para la altura normal y la velocidad de lavado.

**Tabla 27. Velocidad en Canal de lavado, 0,6 mm.**

Caudal Diseño m <sup>3</sup> /s	hcr	Ancho (5%)	hn	V m/s	Ancho (15%)	hn	V m/s	Ancho (100% )	hn	V m/s
0,5	0,45	0,027	-	-	0,08	-	-	0,54	0,327	2,84
1	0,45	0,054	-	-	0,16	-	-	1,08	0,282	3,30
2	0,45	0,108	0,656	1,42	0,32	0,395	2,35	2,15	0,26	3,58
3	0,45	0,161	0,547	1,70	0,48	0,342	2,72	3,23	0,253	3,68
4	0,45	0,215	0,453	2,05	0,65	0,311	2,99	4,30	0,249	3,73
5	0,45	0,269	0,419	2,22	0,81	0,297	3,13	5,38	0,247	3,77
6	0,45	0,323	0,395	2,35	0,97	0,287	3,24	6,45	0,246	3,78
7	0,45	0,376	0,364	2,55	1,13	0,28	3,32	7,53	0,245	3,80
8	0,45	0,430	0,352	2,64	1,29	0,275	3,38	8,60	0,244	3,81
9	0,45	0,484	0,342	2,72	1,45	0,271	3,43	9,68	0,243	3,83
10	0,45	0,538	0,327	2,84	1,61	0,267	3,48	10,75	0,243	3,83

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del caudal igual a  $0,93 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$ , se observa que todas las compuertas estudiadas cumplen con la condición de lavado en el canal.

En la tabla 28 se muestran los resultados obtenido para un caudal igual a  $1,84 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$ .

**Tabla 28. Velocidad Canal de Lavado,  $1,84 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$ .**

Caudal Diseño $\text{m}^3/\text{s}$	hcr	Ancho (5%)	hn	V m/s	Ancho (15%)	hn	V m/s	Ancho (100%)	hn	V m/s
0,5	0,70	0,01	-	-	0,04	-	-	0,27	0,78	2,37
1	0,70	0,03	-	-	0,08	-	-	0,54	0,57	3,24
2	0,70	0,05	-	-	0,16	1,04	1,77	1,09	0,46	4,02
3	0,70	0,08	-	-	0,24	0,83	2,21	1,63	0,43	4,33
4	0,70	0,11	1,27	1,45	0,33	0,69	2,67	2,17	0,41	4,50
5	0,70	0,14	1,08	1,70	0,41	0,63	2,93	2,72	0,40	4,62
6	0,70	0,16	1,05	1,75	0,49	0,59	3,14	3,26	0,39	4,69
7	0,70	0,19	0,93	1,97	0,57	0,56	3,32	3,80	0,39	4,74
8	0,70	0,22	0,85	2,16	0,65	0,53	3,47	4,35	0,38	4,79
9	0,70	0,24	0,83	2,21	0,73	0,51	3,59	4,89	0,38	4,83
10	0,70	0,27	0,78	2,37	0,82	0,49	3,75	5,43	0,38	4,85

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el único diseño de compuerta que supera la altura crítica es aquella que tiene un caudal igual a  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y presenta un ancho igual a  $0,27 \text{ [m]}$ , pero no se encuentra influenciada aguas abajo ya que la altura normal, no alcanza la altura conjugada.

Para el caso del caudal igual a  $1,84 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$ , se observa que todas las compuertas estudiadas cumplen con la condición de lavado en el canal, ya que su velocidad es mayor a  $2 \text{ m/s}$ .



