

**METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS EN ESTUDIOS  
DE PRE FACTIBILIDAD DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**KAREN BEATRIZ QUINTERO BETIN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
Escuela de Ingeniería Civil  
MEDELLÍN  
2009**

**METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS EN ESTUDIOS  
DE PRE FACTIBILIDAD DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**KAREN BEATRIZ QUINTERO BETIN**

**Trabajo de grado**

**Profesor  
Ramiro Marbello Pérez  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
Escuela de Ingeniería Civil  
MEDELLÍN  
2009**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HIDROLOGÍA</b> .....	<b>12</b>
1.1 MEDICIÓN DEL SALTO .....	12
1.2 MEDICIÓN DEL CAUDAL .....	13
1.2.1 MÉTODO DEL ÁREA Y VELOCIDAD .....	14
1.2.2 MÉTODO DEL FLOTADOR.....	14
1.2.3 MEDIDORES DE CORRIENTE O CORRENTÓMETROS .....	15
1.2.4 MÉTODO DEL RECIPIENTE .....	15
1.3 EVALUACIÓN DE LA POTENCIA HIDRÁULICA GENERADA .....	16
1.4 ESTUDIO HIDROLÓGICO .....	18
1.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA .....	18
1.5.1 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CAUDALES.....	19
1.5.2 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES.....	22
<b>2 DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS</b> .....	<b>24</b>
2.1 BOCATOMA DE FONDO .....	24
2.1.1 AZUD .....	25
2.1.2 SOLERAS .....	25
2.1.3 MUROS LATERALES .....	25
2.1.4 CANAL COLECTOR .....	26
2.1.5 REJILLA.....	26

2.1.6 CÁMARA DE RECOLECCIÓN.....	26
2.1.7 TRAMPA DE GRAVAS.....	27
2.1.9 DISEÑO DE LA REJILLA.....	28
2.1.10 NIVELES EN EL CANAL COLECTOR:.....	29
2.1.11 DISEÑO DE LA CÁMARA DE RECOLECCIÓN.....	30
2.1.12 EJEMPLO DE DISEÑO DE LA BOCATOMA DE FONDO .....	31
2.2 DISEÑO DEL AZUD, LOS ALIVIADEROS Y EL POZO DE DISIPACIÓN.....	36
2.2.1 DISEÑO DEL VERTEDERO DE CRECIENTES TIPO CREAGER CON POZO DISIPADOR LISO .....	37
2.2.2 DISEÑO DE LA ALTURA DE LOS MUROS DE ENCAUZAMIENTO .....	41
2.3 CANAL DE CONDUCCIÓN .....	41
2.4 DISEÑO DEL DESARENADOR CONVENCIONAL:.....	49
2.4.1 COMPONENTES.....	50
2.4.2 CRITERIOS DE DISEÑO .....	51
2.4.3 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DEL DESARENADOR.....	54
2.4.4 EJEMPLO DE DISEÑO DE DESARENADOR .....	55
2.5 TÚNEL.....	57
2.5.1 EJEMPLO DE DISEÑO DEL TÚNEL .....	59
2.6 DISEÑO DE LA CÁMARA DE CARGA.....	61
2.7 DISEÑO DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN .....	64
2.7.1 TUBERÍA DE PRESIÓN .....	64
2.7.2 APOYOS Y ANCLAJES .....	67
2.7.3 ESPACIAMIENTO DE SOPORTES.....	68

<b>3 MANTENIMIENTO DE UNA PEQUEÑA CENTRAL .....</b>	<b>70</b>
3.1 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN BOCATOMAS .....	71
3.2 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN DESARENADORES.....	72
3.3 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CANALES.....	72
3.4 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CÁMARAS DE CARGA.....	73
3.5 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TUBERÍAS .....	74
3.6 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN VÁLVULAS.....	75
3.7 REPUESTOS Y HERRAMIENTAS PARA MANTENIMIENTO .....	75
3.8 OPERACIÓN DE LA PCH .....	76
3.9 MANUALES, DOCUMENTOS DEL FABRICANTE Y DEL INSTALADOR.....	76
3.10 CAPACITACIÓN DE OPERADORES.....	77
 <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	 <b>79</b>

## TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DETERMINACIÓN DEL SALTO HIDRÁULICO .....	12
FIGURA 1.2 MÉTODO DEL RECIPIENTE.....	16
FIGURA 1.3 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES-MÉTODO DE MOREIRA.....	23
FIGURA 2.1 BOCATOMA TIPO TIROL.....	24
FIGURA 2.2 CÁMARA DE RECOLECCIÓN .....	27
FIGURA 2.3 PLANTA BOCATOMA TIROL O DE FONDO .....	35
FIGURA 2.4 SECCIÓN A-A. BOCATOMA TIROL.....	36
FIGURA 2.5 SECCIÓN B-B. BOCATOMA TIROL.....	36
FIGURA 2.6 VERTEDERO TIPO CREAGER - BOCATOMA DE FONDO .....	37
FIGURA 2.7 RELACIONES ANALÍTICAS ENTRE F Y H/Y1 PARA UN VERTEDERO DE CRESTA ANCHA (FORSTER Y SKRINDE).....	40
FIGURA 2.8 CANAL.....	41
FIGURA 2.9 CANAL RECTANGULAR .....	43
FIGURA 2-10 SECCIÓN TÍPICA DE UN CANAL.....	49
FIGURA 2.10 SECCIÓN TÍPICA DE UN CANAL .....	49
FIGURA 2-11. DESARENADOR.....	49
FIGURA 2-12 PLANTA DEL DESARENADOR.....	56
FIGURA 2-13 CORTE D - D DEL DESARENADOR .....	57
FIGURA 2-14 CORTE E - E DEL DESARENADOR .....	57
FIGURA 2-15 CARACTERÍSTICAS DE TÚNEL TIPO BAÚL.....	58
FIGURA 2-16 PLANTA CÁMARA DE CARGA.....	63
FIGURA 2-17 SECCIÓN G - G CÁMARA DE CARGA.....	63
FIGURA 2-18 SECCIÓN F - F CÁMARA DE CARGA .....	63
FIGURA 2-19 COMPONENTES DE UNA TUBERÍA DE PRESIÓN.....	68

FIGURA 2-20 PLANTA DE ANCLAJE .....	68
FIGURA 2-21 SECCIÓN B - B DEL ANCLAJE .....	69
FIGURA 2-22 PLANTA DE SILLAR .....	69
FIGURA 2-23 SECCIÓN C – C DE SILLAR.....	69

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1-1 REGISTROS DE LOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES DE LA QUEBRADA LA JUANA .....	20
TABLA 1-2 CUADRO DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS .....	21
TABLA 2-1 VALORES DE K Y N.....	39
TABLA 2-2 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE ALGUNOS MATERIALES.....	44
TABLA 2-3 VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA EN SUELOS.....	47
TABLA 2-4 VISCOSIDAD CINEMÁTICA .....	51
TABLA 2-5 ANCHOS RECOMENDADOS PARA TÚNELES .....	58
TABLA 2-6 CONSTANTE DE CAPACIDAD.....	62
TABLA 3-1 RECOMENDACIONES PARA EL TRABAJO DE RESANE .....	71
TABLA 3-2 VELOCIDAD MÁXIMA PERMISIBLE EN CANALES DE TIERRA.....	73

## INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene algunas metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil, egresada de la Universidad Nacional, Sede Medellín.

La experiencia ha demostrado que durante el proceso de análisis, predimensionamiento, cálculo, diseño y ejecución del proyecto para una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), el componente denominado obras hidráulicas, normalmente integra un 20 % de la inversión total necesaria para su puesta en servicio. Actualmente, en Colombia se estima que un proyecto podría ser viable si arroja inversiones de USD \$2 000/kW-instalado.

Dentro de la concepción que se establece para desarrollar un proyecto de PCH, usualmente, se tienen en cuenta cuatro componentes básicos cuyo tratamiento, desarrollo y concepción deben mantener una estrecha relación durante el proceso de diseño, a saber: el análisis socio-económico, la evaluación y determinación de la obra civil necesaria, la selección el equipamiento electromecánico y el emplazamiento de la infraestructura eléctrica necesaria para su correcta conexión a las redes de transmisión y distribución. Cada uno de los componentes citados mantiene su importancia frente a los otros tres pero ninguno puede considerarse el más importante.

Este trabajo de grado tratará sobre la evaluación y determinación del lote grueso de las obras hidráulicas, y para ello consta de tres (3) capítulos distribuidos, así:

- **Capítulo 1: Hidrología.** Hace referencia a los diferentes procedimientos que permiten caracterizar el salto bruto y el caudal de una cuenca como factores fundamentales en la evaluación de la potencia hidráulica a generar y que se soporta en el estudio hidrológico inherente como resultado del análisis específico de la información meteorológica de la cuenca en estudio.
- **Capítulo 2: Diseño de obras hidráulicas.** Contiene los procedimientos elementales para el diseño de las estructuras hidráulicas principales que integran los diferentes sistemas de una pequeña central hidroeléctrica, tales como: bocatoma, canal de derivación, desarenador, sistema de conducción de baja presión (túnel, tubería o canal), cámara de carga, tubería de presión y canal de restitución del agua turbinada, nuevamente, al cauce. Los referidos procedimientos están orientados a guardar una íntima cercanía con aspectos de fundamentación ingenieril que tienen que ver con: la simplicidad y solidez estructural, el mínimo mantenimiento, la fácil operación, el uso racional de materiales y mano de obra, y la excelente y correcta supervisión y control del proceso constructivo.
- **Capítulo 3: Mantenimiento.** Este capítulo compendia las diferentes acciones de mantenimiento necesarias para preservar las diferentes estructuras

hidráulicas de una pequeña central hidroeléctrica, resaltando la importancia de dichas acciones en la operación de la PCH, lo significativo de la existencia, conocimiento y manejo de la documentación que orienta esas actividades de mantenimiento y de la capacitación y entrenamiento de los intervinientes e interesados. Corregir oportunamente acciones deficientes en la operación y el mantenimiento de los diferentes componentes básicos de las estructuras hidráulicas de una PCH por parte de los usuarios evitará, sin lugar a dudas, permanentes paralizaciones en el sistema de generación, deficiente servicio, elevados costos globales de operación que redundarán en el cumplimiento de las previsiones de rentabilidad asumidas en el análisis económico que impulsó el desarrollo integral del proyecto.

En resumen, este trabajo de grado pretende presentar el valor de la energía hidroeléctrica como la energía renovable, prácticamente gratuita y limpia que en la producción de electricidad sustituye a los combustibles de origen fósil y nuclear con todos los inconvenientes de eliminación de desechos que traen consigo estas últimas.

Las ventajas de la energía hidroeléctrica, en general, y de los pequeños aprovechamientos, en particular, están respaldadas por la mayor conciencia que actualmente se tiene en cuanto a los problemas del medio ambiente.

Tanto el fabricante de materiales y equipos para una PCH como el propietario de una instalación generadora de este tipo ya no pueden permanecer indiferentes ante la pregunta de si la tecnología elegida con tal fin es o no perjudicial para el medio ambiente.

# 1 HIDROLOGÍA

La capacidad de generación de energía mediante el empleo de agua está determinada por el salto o caída (energía potencial) que se pueda obtener y del caudal disponible.

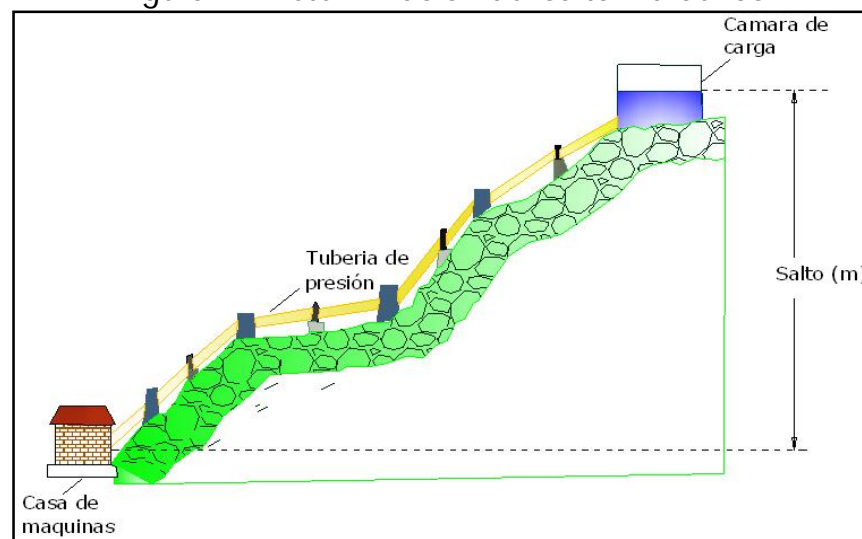
El salto depende de la topografía del terreno, y el caudal de las características del río o arroyo que se va a utilizar.

A continuación se describen metodologías sencillas para medir el salto y el caudal en ríos y canales; sin embargo, es necesario evaluar hidrológicamente la cuenca a estudiar, razón de más para explicar métodos de cálculo del caudal de diseño.

Es importante orientar el análisis de bases de datos hidrométricos (aforos) y en la evapotranspiración del área de influencia de la cuenca para predecir el caudal a lo largo del año.

## 1.1 MEDICIÓN DEL SALTO

Figura 1.1 Determinación del salto hidráulico



Los mapas con curvas de nivel son usualmente usados para efectuar una primera estimación del salto disponible y pueden utilizarse para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs). Es habitual que en los estudios de factibilidad y en los estudios definitivos sea necesario realizar mediciones del caudal en el lugar determinado de la cuenca, con el propósito de suprimir errores en la estimación de este valor.

Siempre buscamos precisiones de más o menos 3% con respecto a la escala energética, puesto que la caída o salto bruto es un parámetro importante en el diseño del sistema.

Motivo por el cual es recomendable efectuar por lo menos tres (3) mediciones y analizar los resultados con el propósito de corregirlos u obtener nuevas medidas en el caso de ser necesario. Es fundamental determinar en campo si las mediciones realizadas difieren entre sí exageradamente para proceder con las correcciones a que haya lugar.

## **1.2 MEDICIÓN DEL CAUDAL**

Como el caudal de los ríos varía a lo largo del año, realizar una medida de la carga hidráulica instantánea proporciona un resultado cuyo registro aislado es de utilidad relativamente pequeña.

Es probable que algunas veces se pueda contar con información suficiente o simplemente no exista para elaborar un estudio hidrológico coherente, razón por la que habrá que recolectar datos propios a partir de mediciones instantáneas del caudal. Lo ideal es hacer mediciones a diario, aunque también se usan mediciones semanales y mensuales.

Es importante contar con esta información porque será una prueba objetiva y fidedigna del devenir hidrológico de la cuenca y un requisito confiable y necesario para cumplir con las estipulaciones y requerimientos de la Autoridad Ambiental.

Existen diversos métodos de medición de caudal entre los cuales se encuentran: el método de la solución de la sal, el del recipiente, el del área y velocidad, el método de vertedero.

En este trabajo estudiaremos las características de algunos de estos métodos, con el fin de utilizarlos adecuadamente aprovechando las ventajas que estos ofrecen.

Es recomendable realizar las mediciones del caudal del río, caño, quebrada o manantial en diferentes épocas para tener registros de los valores mínimos, máximos e intermedios y conocer más de cerca el comportamiento de la fuente en diferentes épocas.

Es importante, además, establecer la "historia" de la fuente, en lo posible, por medio del diálogo con los vecinos de la localidad, o también, por datos de organismos especializados.

### 1.2.1 MÉTODO DEL ÁREA Y VELOCIDAD

Este método se basa en el principio de continuidad. Para un fluido de densidad constante fluyendo a través del área de una sección conocida, el producto del área de la sección por la velocidad media será constante:

$$V_{prom} \times A = Q \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Donde:

A= área de la sección (m<sup>2</sup>)

$V_{prom}$  = velocidad promedio del agua en la corriente en m/s

Este producto arroja como resultado el valor del caudal volumétrico en m<sup>3</sup>/s, que se supone constante.

### 1.2.2 MÉTODO DEL FLOTADOR

En este método se utilizan los *valores promedio* de las variables determinadas, para desarrollarlo procedemos así:

- Se selecciona en el río un tramo, preferiblemente en el sitio donde ubicaremos la bocatoma, teniendo en cuenta que no haya la presencia de rocas grandes o troncos de árboles, que pueda obstruir que el agua fluya libremente, el lugar debe estar libre de turbulencias, o impedimentos.
- Después de tener seleccionado el lugar, procedemos a medir el tiempo que se demora el objeto flotante en recorrer una longitud preestablecida del río, que puede variar entre 10 m y 20 m.

Con este procedimiento obtenemos la velocidad superficial del flujo de agua. No es la velocidad media de la corriente, ya que el flotador está en la superficie del agua y al multiplicar por el factor de corrección sólo se obtiene una aproximación.

Es importante el medir el ancho del río en el lugar que se presenten las condiciones promedio y donde, además, se facilite la medición del área transversal.

Para calcular el área transversal, podemos admitir como método práctico, con aceptable aproximación, tomar la altura promedio de la sección establecida anteriormente.

Después de tener toda esta información bastará multiplicar el área de la sección promedio por la velocidad del caudal promediada y corregida. Se obtiene un estimado del valor del volumen de agua que fluye. Las

imprecisiones de este método son obvias. A menos que se considere un canal de pendiente suave y regular, obtener un valor preciso del área de la sección de la corriente de agua será muy difícil y tedioso.

La velocidad promedio obtenida no es la velocidad media de la corriente, ya que el flotador está en la superficie del agua y el factor de corrección sólo es una aproximación.

### **1.2.3 MEDIDORES DE CORRIENTE O CORRENTÓMETROS**

En este método, la velocidad del agua se mide por medio de un correntómetro o molinete, el cual consiste en un mango con una hélice o copas conectadas al final. La hélice rota libremente y la velocidad de rotación está relacionada con la velocidad del agua. Un contador mecánico registra el número de revoluciones del propulsor que se ubica a la profundidad deseada

Los correntómetros más empleados son los de hélice, de los cuales hay de varios tamaños; cuanto más grande sea el caudal o más alta sea la velocidad, mayor debe ser también el tamaño del aparato. Cada correntómetro debe tener un certificado de calibración en el que figura la fórmula necesaria para calcular la velocidad del agua sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo.

Los medidores de corriente son suministrados con una fórmula que relaciona la velocidad de rotación del instrumento con la velocidad de la corriente. Generalmente, estos aparatos son usados para medir velocidades de 1,2 a 5 m/s con un error probable de 2%.

Al igual que otros medidores de velocidad, el molinete debe ser sumergido bajo el agua. A menudo el fabricante coloca una marca en el mango del medidor para indicar la profundidad de los álabes.

### **1.2.4 MÉTODO DEL RECIPIENTE**

El método del recipiente es una manera muy simple de medir el caudal. Todo el caudal a medir debe ser desviado hacia un balde o barril y se anota el tiempo que toma llenarlo. Como el volumen del envase se conoce, obtenemos el caudal simplemente dividiendo este volumen por el tiempo de llenado.

Para obtener mejores resultados en la estimación del caudal, se debe tomar varias veces el tiempo de llenado del recipiente, de manera que sea posible determinar el valor promedio.

La desventaja de este método es que todo el caudal debe ser canalizado o entubado al envase, lo cual puede resultar complejo, a menudo construir una pequeña presa temporal puede ser de una gran ayuda.

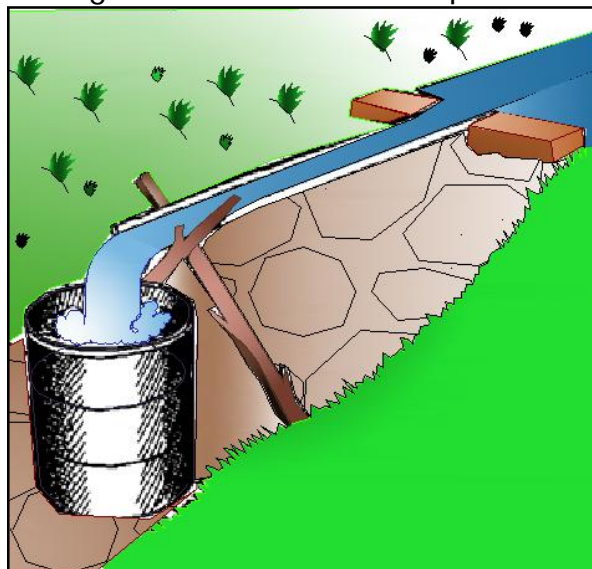
En vista de los problemas que se pueden presentar con grandes caudales es claro que este método resulta práctico solo para caudales pequeños.

De esta forma para realizar la medición se necesita:

- Un balde o caneca de capacidad (volumen en litros) conocida.
- Un reloj o cronómetro.
- Tejas de zinc o plásticas para la conducción del agua.

Se debe ubicar el tramo más adecuado para realizar la medición y luego encauzar la fuente para que la totalidad del agua caiga en el recipiente, de conformidad con la representación de la Figura 1.2.

Figura 1.2 Método del Recipiente



### 1.3 EVALUACIÓN DE LA POTENCIA HIDRÁULICA GENERADA

El trabajo que realiza cierto volumen de agua al desplazarse de una altitud a otra, puede expresarse de la forma siguiente:

$$T = Pe * H$$

Donde,

T: Trabajo

Pe: Peso del volumen de agua

H: Desnivel de energía

Si este trabajo se realiza en un tiempo  $t$  y se expresa el peso del agua como  $P_e = \gamma * V$ , siendo  $V$  el volumen trasladado y  $\gamma$  el peso específico del agua, se tiene que la potencia  $P$  correspondiente es:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{\gamma * V * H}{t} = \gamma * Q * H$$

Para conducir el agua de un nivel a otro inferior se ocasionan pérdidas de energía debidas a la fricción y a la resistencia de forma de la infraestructura de conducción (codos, válvulas, etc.). Esta circunstancia obliga a desaprovechar íntegramente el desnivel de energía  $H$  o altura de generación o salto bruto, permitiendo usar sólo una fracción de éste denominado salto neto de generación  $H_n$ . Si  $h_t$  es la pérdida de energía o de carga total del sistema, se obtiene:

$$H_n = H - h_t$$

Luego,

$$P = \gamma * Q * H_n$$

En la práctica la potencia se expresa usualmente en caballos de vapor o “horse power” métricos (CV o hp métricos) o en kilovatios (kW) por lo que se deben aplicar factores de conversión correspondientes, obteniendo valores de la potencia, así:

$$P = \frac{1}{75} * \gamma * Q * H_n \text{ (en CV)} = 0,01333333 * \gamma * Q * H_n$$

$$P = 0,0098066667 * \gamma * Q * H_n \text{ (en kW)}$$

$$P = 9,8066667 * Q * H_n \text{ (en kW)}$$

1 caballo de vapor  $\equiv$  75 kilogramo-metro por segundo  $\equiv$  735,5 watt  $\equiv$  0,735 kW

1 CV = 0,98632007061967 HP = 735,49875 W  $\approx$  735,5 W

$$P = 0,98632007 * Q * H_n \text{ (en hp)}$$

$$P = 0,735794773 * \gamma * Q * H_n \text{ (en kW)}$$

$$P = (1\ 622,13316)/(165,411267) * Q * H_n \text{ (en kW)}$$

1 caballo de fuerza  $\equiv$  550 libras-pie por segundo  $\equiv$  746 watt  $\equiv$  0,746 kW

1 HP = 1,01386966542385 CV = 745,6987158216 W  $\approx$  746 W

Esta expresión permite evaluar la potencia hidráulica generada por un determinado caudal al trasladarse un nivel o salto neto. Para transformar potencia hidráulica en potencia eléctrica es necesario convertir la primera en potencia mecánica mediante el empleo de turbinas. Y, finalmente, la potencia

mecánica se transforma en potencia eléctrica por medio de generadores o alternadores.

#### **1.4 ESTUDIO HIDROLÓGICO**

La hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los recursos hidráulicos, a través de ella, podemos determinar la cantidad de agua que escurre un río a lo largo del año. A pesar de que puede presentar muchas variaciones debidas a las condiciones propias de la cuenca, tales como: cambios climáticos, topografía del terreno, área de la cuenca y las características geológicas de la cuenca.

Las mediciones ocasionales del caudal son referencias importantes que deben tomarse en cuenta, pero por sí solas no son suficientes para informarnos si el año será muy seco o muy lluvioso, o a qué niveles de caudal puede bajar el río en época de estiaje y hasta qué niveles podría subir en tiempo de avenidas.

Los estudios hidrológicos son fundamentales para el diseño de obras hidráulicas, pero debido a que la hidrología no es una ciencia exacta, por lo general las respuestas se dan en forma probabilística de ocurrencia. Donde frecuentemente los modelos matemáticos representan el comportamiento de la cuenca.

#### **1.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

El registro de la variación del caudal a lo largo del año se toma de las estaciones de aforo, las cuales están ubicadas en el cauce de los principales ríos, generalmente las instituciones ambientales se encargan de llevar registro de esta información.

En muchas de las estaciones meteorológicas se toman los datos en forma interdiaria, ya que sin dudas un registro de aforos de varios años resulta de gran utilidad para predecir las variaciones estacionales de un caudal.

En caso de no contarse con esta información se puede realizar una estimación de los caudales sobre la base de información meteorológica en la cuenca. Este análisis consiste en elaborar primero tablas de frecuencias absolutas y relativas agrupando los datos en clases o rangos. La tabla de frecuencias relativas acumulativas representa en buena cuenta la curva de duración de caudales, como veremos a continuación.

### 1.5.1 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CAUDALES

El histograma es una herramienta que permite representar gráficamente el comportamiento de un conjunto de datos en cuanto a su tendencia central, forma y dispersión.

Con base en el número de registros tabulados, asumiendo  $N_{\text{registros}} = 324$ , se establece el intervalo específico para el cálculo de la curva de caudales, así:

❖ Primero se calcula el Número de Clase,  $N_c$ :

$$N_c = 1 + 3,3 \cdot \ln(N_{\text{registros}}) = 1 + 3,3 \cdot \ln(324) = 20,08$$

❖ Segundo se determinan los caudales máximo y mínimo:

$$Q_{\text{máx}} = X_{\text{máx}} = 7,17 \text{ m}^3/\text{s} \text{ y } Q_{\text{min}} = X_{\text{min}} = 0,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

❖ El intervalo  $[\Delta x]$ , se calcula con base en la siguiente expresión:

$$\Delta x = (X_{\text{máx}} - X_{\text{min}}) / (N_c - 1) \approx 0,35$$

Una vez calculado el intervalo de cada frecuencia, procedemos a elaborar el cuadro de distribución de frecuencias, ver Tabla 1-2.

Debe entenderse que para realizar dicho procedimiento es necesario contar con un registro histórico de los caudales del río o quebrada a estudiar.

Por ejemplo, para realizar una valoración adecuada acerca del caudal de diseño de la quebrada La Juana, es necesario contar con esta información. En la Tabla 1-1 puede apreciarse una serie de caudales mensuales de dicha cuenca, cabe aclarar que la “existencia” de esta quebrada es sólo para efectos ejemplificar el procedimiento, así mismo su registro de caudales.

Tabla 1-1 Registros de los caudales medios mensuales de la quebrada La Juana

<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
79	1,21	1,56	2,04	2,45	2,93	3,68	2,37	2,74	3,90	3,61	4,71	3,46
80	1,61	1,32	0,83	0,91	1,76	2,47	2,55	3,40	3,40	5,09	3,26	3,21
81	2,48	2,29	1,92	2,58	3,03	3,47	5,64	4,00	3,35	3,08	2,49	3,52
82	6,95	6,36	1,92	2,65	2,97	1,80	1,83	1,90	1,64	4,13	3,58	3,37
83	1,10	1,57	1,62	3,31	1,53	1,75	1,89	2,19	2,36	3,67	2,70	4,43
84	1,14	2,51	2,25	2,50	5,58	5,26	3,70	5,52	7,17	4,83	2,57	4,56
85	2,07	1,53	0,85	2,93	4,78	3,08	3,87	4,83	4,51	4,11	3,13	2,52
86	1,70	1,76	2,38	2,83	3,97	2,33	2,26	2,57	2,44	3,22	2,94	2,72
87	1,16	1,54	1,27	1,57	2,53	2,08	1,85	2,47	3,25	4,43	3,89	2,34
88	0,95	1,24	1,68	2,42	4,53	3,13	3,44	3,32	3,62	3,48	3,26	2,82
89	1,39	1,77	0,97	0,74	4,68	2,14	2,84	2,37	3,11	3,03	2,81	1,88
90	0,77	1,06	1,10	1,29	1,72	2,23	3,72	2,34	2,44	2,93	2,08	1,88
91	1,66	1,35	1,74	2,43	4,22	3,27	2,22	2,09	2,26	2,59	1,81	3,14
92	1,11	1,09	1,42	1,56	1,97	1,34	1,67	1,83	2,28	1,88	2,13	1,30
93	0,81	1,04	1,37	1,55	1,82	1,29	1,65	2,17	2,37	2,15	1,76	1,71
94	0,89	1,40	1,90	2,34	1,64	1,59	1,83	1,80	1,81	2,03	3,34	3,18
95	0,75	1,07	1,47	1,40	1,29	1,65	1,98	1,61	2,50	2,60	2,87	2,74
96	2,10	1,96	2,51	2,44	2,34	2,06	2,30	2,81	2,58	3,40	2,35	2,07
97	1,68	1,62	1,42	1,97	3,23	2,45	1,92	1,67	2,10	1,72	1,37	1,37
98	0,67	0,86	1,58	2,46	3,70	3,31	2,30	3,22	3,68	3,77	2,98	2,60
99	1,36	2,02	2,62	3,66	4,06	5,09	1,98	1,48	2,48	3,26	2,05	1,81
0	1,66	2,08	2,64	3,18	4,99	2,80	2,76	3,16	2,70	2,45	1,75	1,37
1	1,13	1,07	1,39	1,21	4,77	2,59	2,46	2,74	3,40	3,30	2,39	2,22
2	1,42	1,14	1,21	1,47	3,59	1,90	1,64	1,19	1,37	1,41	1,34	1,31
3	0,62	1,03	1,03	1,44	1,96	2,59	2,35	0,94	0,55	2,16	1,91	1,78
4	0,92	1,33	2,06	1,72	1,36	1,50	1,58	2,63	2,04	2,79	2,27	1,52
5	1,07	1,14	1,39	1,74	3,91	2,38	2,16	2,72	3,01	2,14	2,76	1,41

Tabla 1-2 Cuadro de distribución de frecuencias

Cuadro de distribución de frecuencias						
Ítem	Intervalo		Q min (inter)	Fcia Núm.	Fcia Acumulada	Probabilidad de Permanencia
	Lim inf	Lim sup				
1	0,55	0,89	0,55	10,00	324,000	100,00
2	0,89	1,24	0,89	27,00	314,000	91,67
3	1,24	1,59	1,24	44,00	287,000	78,09
4	1,59	1,93	1,59	51,00	243,000	62,35
5	1,93	2,28	1,93	37,00	192,000	50,93
6	2,28	2,63	2,28	49,00	155,000	35,80
7	2,63	2,98	2,63	26,00	106,000	27,78
8	2,98	3,32	2,98	24,00	80,000	20,37
9	3,32	3,67	3,32	19,00	56,000	14,51
10	3,67	4,02	3,67	12,00	37,000	10,80
11	4,02	4,36	4,02	4,00	25,000	9,57
12	4,36	4,71	4,36	7,00	21,000	7,41
13	4,71	5,06	4,71	5,00	14,000	5,86
14	5,06	5,41	5,06	3,00	9,000	4,94
15	5,41	5,75	5,41	3,00	6,000	4,01
16	5,75	6,10	5,75	0,00	3,000	4,01
17	6,10	6,45	6,10	1,00	3,000	3,70
18	6,45	6,79	6,45	0,00	2,000	3,70
19	6,79	7,14	6,79	1,00	2,000	3,40
20	7,14	7,49	7,14	1,00	1,000	3,09

En la Tabla 1-2 se puede observar el procesamiento estadístico de los datos. En las primeras columnas se encuentran los rangos de caudales seguidos de la frecuencia absoluta de cada rango y, posteriormente, la frecuencia acumulativa y, finalmente, en la última columna está la probabilidad de permanencia de dicho caudal.

Para calcular la frecuencia relativa se divide el número de ocurrencias entre el número total de aforos.

$$Fr(\%) = \frac{F}{N} \times 100$$

De esta manera la probabilidad de permanencia para el ítem 2 será:

$$100 - \frac{27}{324} \times 100 = 91,67$$

Se procede de esta manera hasta el último intervalo.

En la primera columna los datos se han ordenado de menor a mayor con el fin de facilitar la interpretación de la curva de duración y la gráfica de la misma.

En términos prácticos, la frecuencia relativa acumulativa viene a ser la duración en términos de porcentaje.

### 1.5.2 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

La curva de duración es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal,  $Q$ , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal,  $Q$ , es excedido o igualado, como abscisa.

La ordenada  $Q$ , para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio que se espera sea excedido o igualado por un porcentaje,  $P$ , del tiempo.

Los datos de caudal medio anual, mensual o diario se pueden usar para construir la curva, estos se disponen en orden descendente, usando intervalos de clase si el número de valores es muy grande.

Esta curva nos da la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el período de aforos, en el que el caudal es igual o menor al caudal correspondiente ha dicho porcentaje de tiempo.

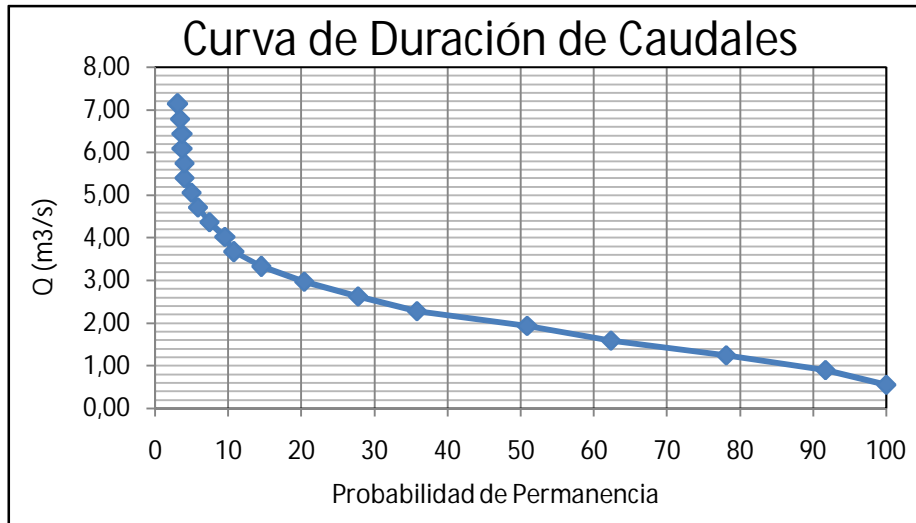
El caudal medio se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = \sum Q_j \times fr/100$$

Después de elaborar la curva de duración dependerá del diseñador y de sus necesidades decidir sobre cuál será el caudal de diseño a usar en el proyecto. Evidentemente, si queremos que la central trabaje el 100% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño será muy pequeño ( $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Si esto no es importante y queremos que trabaje un 40% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño o disponible para el diseño será mucho mayor ( $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Existen otros procedimientos para el cálculo del caudal de diseño, en los que la información meteorológica siempre va a resultar de gran ayuda, porque la hidrología de una cuenca depende de condiciones climáticas como: la precipitación, la humedad, la temperatura y velocidad del viento.

Figura 1.3 Curva de duración de caudales-Método de Moreira



Otros métodos como el de Penman estima el valor de la evaporación potencial de una superficie libre de agua con base en datos climatológicos. Ese valor estimado multiplicarse por un factor, obtenido empíricamente, puede tener la evapotranspiración potencial de una zona determinada.

El caudal del río varía durante el año, pero la PCH está diseñada para captar un caudal constante. La bocatoma debe, en lo posible, derivar el caudal adecuado hacia el canal, sea que el río tenga mucha o poca cantidad de agua. La función principal del barraje es asegurar que el caudal del canal se mantenga, incluso en época de estiaje.

## 2 DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

### 2.1 BOCATOMA DE FONDO

Las bocatoma son obras hidráulicas cuya función es regular y captar un caudal determinado de agua, en este caso, para, la producción de energía hidroeléctrica.

Las bocatoma nos permiten tomar el agua de los ríos, garantizando que la captación de agua será una cantidad constante, a la vez impide el ingreso de materiales sólidos y flotantes. Además, debe proteger el resto del sistema de hidráulico del ingreso de avenidas o embalses que pudieran producirse en las épocas lluviosas y/o de crecientes extraordinarias.

La ubicación más apropiada para una bocatoma se presume en los tramos rectos y estables del río, dependiendo de la topografía, la geología, la capacidad portante de los suelos y, principalmente, de las variaciones hidrológicas del lugar que nos servirá de emplazamiento.

Figura 2.1 Bocatoma tipo Tirol



Por lo tanto, como criterios de diseños, es aconsejable considerar la configuración del terreno (pendiente del cauce, ancho del valle, etc.), nivel de aguas mínimas y máximas ordinarias, nivel de aguas máximas extraordinarias (coeficiente de retorno), así como presencia de fallas, tipo de material deleznable (arcillas, calizas, etc.) en las zonas de cimentación de la bocatoma.

Es muy importante preservar las condiciones naturales, por lo que no se deben afectar bosques o zonas destinadas como reservas forestales.

En la bocatoma el agua se capta a través de una rejilla colocada en la parte superior de la presa y que se ubica en sentido normal de la corriente. El ancho de esta presa puede ser igual o menor que el ancho del río.

La bocatoma de fondo consta de una presa, con cota superior al mismo nivel de la cota del fondo del río, construida generalmente en concreto y dentro de la que se encuentra el canal de colector.

Las partes integrantes de una bocatoma de fondo, son:

### **2.1.1 AZUD**

El azud es una estructura de derivación que sirve para elevar el nivel de las aguas, a la vez cumple la función de captar y dejar escapar el agua excedente que no debe ingresar al sistema.

Se conocen también como presa vertedora, porque se construye en sentido transversal al río, levantando de este modo el nivel del agua, y vertedora porque deja pasar el agua no derivada.

Esta estructura es empleada en el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), en sitios donde el caudal es pequeño. También debe tenerse en cuenta que las descargas del vertedor no erosionen ni socaven el talón aguas abajo.

### **2.1.2 SOLERAS**

Se trata de una losa o piso a desnivel, en concreto o en roca, que se ubican aguas arriba y aguas abajo de la presa.

Tienen por objeto protegerla de la erosión, además, crear un pozo de sedimentación donde se depositen los materiales de suspensión.

### **2.1.3 MUROS LATERALES**

Encauzan el agua del río hacia la rejilla y protegen los taludes de avenidas o crecientes, se construyen en concreto donde el espesor y la longitud de estos dependerá del estudio de estabilidad de los muros.

#### **2.1.4 CANAL COLECTOR**

Recibe el agua a través de la rejilla y entrega el agua captada a la cámara de recolección. Por facilidad de construcción y de mantenimiento se recomienda la utilización de la sección rectangular, la que debe tener una pendiente entre 1 % y 14 %, garantizando la velocidad adecuada para que el agua fluya previniendo la sedimentación.

#### **2.1.5 REJILLA**

Esta se coloca sobre el canal colector que se encuentra dentro de la presa. La longitud de la rejilla, y, por tanto, la del canal colector, puede ser menor que la longitud de la presa, según las necesidades del caudal que se ha de captar.

Los barrotes y el marco pueden ser de hierro, con separación entre barrotes de cinco a diez centímetros y diámetro de los mismos de 1/2", 3/4" ó 1".

#### **2.1.6 CÁMARA DE RECOLECCIÓN**

Generalmente, es cuadrada o rectangular, con muros en concreto reforzado cuyo espesor puede ser de 30 centímetros y su altura igual a la de los muros laterales.

En su interior se encuentra un vertedero de excesos lateral, que entrega el agua a una tubería de excesos, elemento hidráulico-estructural cuya función es regresar el sobrante de agua captada al cauce. Por efectos de seguridad y mitigación de riesgos de accidente se preverá una tapa en la placa superior ("manhole" de inspección) y una escalera para el acceso del personal de mantenimiento.

Figura 2.2 Cámara de recolección



### 2.1.7 TRAMPA DE GRAVAS

La trampa de gravas es un canal de sección rectangular de profundidad efectiva, compuesta por disipadores-retenedores aguas arriba de la bocatoma que se extiende en todo el ancho del cauce.

Esta se construye con el fin de atrapar la mayor cantidad de sedimento grueso granular a una distancia, aguas arriba de la rejilla captadora, de hasta 3 veces el ancho del canal colector.

El diseño de esta estructura está basado en las teorías fundamentales de la hidráulica: Ecuaciones de energía, continuidad y cantidad de movimiento, complementadas con las ecuaciones de vertederos y orificios.

Inicialmente, para el diseño debe establecerse el punto donde se ubicará la bocatoma, sitio donde debe conocerse el caudal, la cota del fondo del río, y el ancho del río.

La bocatoma y la garganta de la bocatoma se diseñan como un vertedero rectangular, cuya ecuación corresponde a:

$$Q = 1,84 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

Con el fin de determinar el valor de la lámina de agua para las condiciones de diseño, se despeja el valor de H:

$$H = \left( \frac{Q}{1,84L} \right)^{2/3}$$

A causa de la existencia de las contracciones laterales, se debe hacer la correspondiente corrección de la longitud de vertimiento, según lo indicado por la ecuación:

$$L' = L - 0,1nH$$

En donde n es el número de contracciones laterales.

La velocidad del agua al pasar sobre la rejilla será de:

$$V_r = \frac{Q}{L'H}$$

Dicha velocidad deberá estar entre 0,3 y 3 m/s, de esta manera, pueden aplicarse las ecuaciones de H. Babbit para determinar el ancho del canal colector.

### 2.1.8 CANAL COLECTOR:

Para el diseño de esta obra utilizamos las ecuaciones de alcance de chorro, con las cuales podemos determinar el ancho del canal colector, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X_s &= 0.36 V_r^{2/3} + 0.60 H^{4/7} \\ X_i &= 0.18 V_r^{4/7} + 0.74 H^{3/4} \\ B &= X_s + 0.10 \end{aligned}$$

En donde:  $X_s$  = Alcance filo superior (m)  
 $X_i$  = Alcance filo inferior (m)  
 $V_r$  = Velocidad del río (m/s)  
 $H$  = Profundidad de la lámina de agua sobre la presa (m)  
 $B$  = Ancho del canal colector (m)

### 2.1.9 DISEÑO DE LA REJILLA

Como consideramos que las barras de la rejilla se colocarán perpendiculares a la presa, y por lo tanto en la dirección del flujo, se considera que el área neta de la rejilla se puede determinar con la siguiente expresión:

$$A_n = aBN$$

Siendo:  $A_n$  = Área neta de la rejilla (m<sup>2</sup>)

a = Separación entre barras (m)  
N = Número de orificios entre barras

Donde  $b$  es el diámetro de cada barrote.

La superficie total de la rejilla es aproximadamente:

$$A_n = (a + b)BN$$

Haciendo la relación entre área neta y área total (área total en función de la longitud de la rejilla), se obtiene:

$$A_{neta} = \frac{a}{(a + b)} A_{total}$$

$$L_r = \frac{(a + b)}{(a * B)} A_{neta}$$

Por último, se estima la velocidad aproximada entre barrotes:

$$V_B = \frac{Q}{A_n * B}$$

En donde:  $K = 0,9$  para flujo paralelo a la sección.

### 2.1.10 NIVELES EN EL CANAL COLECTOR:

Si se supone que todo el volumen de agua se capta al inicio del canal, se puede obtener el nivel de la lámina aguas arriba por medio del análisis de cantidad de movimiento en el canal:

$$h_o = \left[ 2h_e^2 + \left( h_e - \frac{iL_e}{3} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{2}{3} iL_e$$

La entrega a la cámara de recolección debe hacerse en descarga libre, por lo que debe cumplirse que:

$$h_e = h_c$$

$$h_c = \left( \frac{\alpha Q^2}{gB^2} \right)^{1/3}$$

En donde:  $h_o$  = Profundidad aguas arriba (m)  
 $h_e$  = Profundidad aguas abajo (m)  
 $h_c$  = Profundidad crítica (m)  
 $i$  = Pendiente del fondo del canal

$g$  = Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)  
 $L_c$  = Longitud del canal

Como se estableció anteriormente, para que la ecuación de dimensionamiento de la cámara sea válida, la velocidad, a la entrega de la cámara de recolección, debe ser mayor de 0,3 m/s y menor de 3,0 m/s.

### 2.1.11 DISEÑO DE LA CÁMARA DE RECOLECCIÓN

Nuevamente, empleamos las ecuaciones del alcance de chorro, sustituyendo los términos de la condición de entrada a la cámara de recolección:

$$\begin{aligned}X_s &= 0.36 V_e^{2/3} + 0.60 h_e^{4/7} \\X_i &= 0.18 V_e^{4/7} + 0.74 h_e^{3/4} \\L &= X_s + 0.30\end{aligned}$$

Se debe tener en cuenta que, aunque se requieren los cálculos hidráulicos para establecer las condiciones mínimas de la cámara de recolección, es importante que las dimensiones de la cámara sean las mínimas necesarias para realizar un adecuado mantenimiento de ésta.

La profundidad  $H$ , debe ser tal que cubra las pérdidas por entrada y fricción del canal entre bocatoma y desarenador.

Diseño de zona de limpia y excesos: El caudal de excesos se determina teniendo en cuenta que sobre la rejilla de la bocatoma pasará un caudal mayor que el caudal de diseño.

Se producirá entonces una lámina de agua superior a la de diseño que se puede evaluar según la siguiente ecuación:

$$Q_{cap} = C_d A_{neta} \sqrt{2gH}$$

En donde:  $Q_{cap}$  = Caudal a través de la rejilla (m<sup>3</sup>/s)  
 $C_d$  = Coeficiente de descarga (0,3)  
 $A_{neta}$  = Área neta de la rejilla (m<sup>2</sup>)  
 $H$  = Altura de la lámina de agua sobre la rejilla (m)

Este caudal llega a la cámara de recolección a través del canal en donde se podrá instalar una división móvil tipo “Stock Log” o “Contrapeso” que servirá para separar el caudal de diseño del caudal de excesos y para evacuar los sedimentos acumulados en el fondo de la cámara. Para cumplir con lo anterior, la cota de la cresta del vertedero debe coincidir con el nivel de agua necesario para conducir el caudal de diseño al desarenador. Por tanto, el caudal de excesos será la diferencia entre el caudal captado a través de la rejilla y el caudal de diseño.

$$Q_{excesos} = Q_{Cap} - Q_{diseño}$$

Posteriormente, se debe ubicar el vertedero de excesos a una distancia adecuada de la pared de la cámara de recolección.

### 2.1.12 EJEMPLO DE DISEÑO DE LA BOCATOMA DE FONDO

Información previa del lugar de captación:

- Caudal de diseño= 1,37 m<sup>3</sup>/s
- Caudal mínimo = 0,242 m<sup>3</sup>/s
- Caudal máximo= 6,85 m<sup>3</sup>/s
- Caudal medio = 1,37 m<sup>3</sup>/s
- Ancho del río= 5,2 m<sup>3</sup>/s

La lámina de agua en las condiciones de diseño es de:

$$H = \left( \frac{Q}{1.84L} \right)^{2/3} = \left( \frac{1.37}{1.84 \times 5.2} \right)^{2/3} = 0.274 \text{ m}$$

Velocidad del río sobre la presa:

$$V_r = \frac{Q}{L * H} = \frac{1.37}{5.2 \times 0.274} = 0.96 \text{ m/s}$$

Como 0.3 m/s < 0.96 m/s < 3.0 m/s →ok

#### -Diseño de la rejilla y canal de aducción

Ancho del canal de aducción (B):

$$X_s = 0.36 (0.96)^{2/3} + 0.60(0.274)^{4/7}$$

$$X_s = 0.64 \text{ m}$$

$$X_i = 0.18(0.96)^{4/7} + 0.74(0.274)^{3/4}$$

$$X_i = 0.44 \text{ m}$$

$$B = 0.64 + 0.10 = 0.74 \text{ m}$$

$$B \cong 1 \text{ m}$$

### -Longitud de la rejilla y número de orificios

Se adoptan barrotes de 1", con una separación entre ellos de 2". Por otra parte, se supone la velocidad entre barrotes igual a 0,6 m/s.

$$A_n = \frac{Q}{0.9 V_b} = \frac{1.37}{0.9 \times 0.6} = 2.53 \text{ m}^2$$

$$L_r = \left( \frac{a+b}{a} \right) \frac{A_n}{B}$$

$$L_r = \left( \frac{2.53 \times (0.05 + 0.0254)}{0.05 \times 1} \right) = 3.81 \text{ m}$$

Se adopta 3,9 m de longitud de rejilla. Recalculando, se tiene:

$$A_n = \frac{0.05}{0.05 + 0.0254} \times 1 \times 3.90 = 2.60 \text{ m}^2$$

El número de orificios es de:

$$N = \frac{A_n}{a \times B} = \frac{2.60}{0.05 \times 1} = 51.8 \text{ orificios}$$

Se adoptan 52 orificios, separados entre sí 5 cm, con lo que se obtienen las siguientes condiciones finales:

$$A_n = 0.05 \times 1 \times 52 = 2.64 \text{ m}^2$$

$$V_b = \frac{1.37}{0.9 \times 2.62} = 0.58 \text{ m/s}$$

$$L_r = \left( \frac{2.64 \times (0.05 + 0.0254)}{0.05 \times 1} \right) = 3.96 \text{ m}$$

Los niveles de agua en el canal de aducción son:

- Aguas abajo:

$$h_e = h_c = \left( \frac{\alpha Q^2}{gB^2} \right)^{1/3} = \left( \frac{1.0(1.37)^2}{9.81 \times (1)^2} \right)^{1/3} = 0.58 \text{ m}$$

- Aguas arriba:

$$L_{\text{canal}} = L_{\text{rejilla}} + \text{espesor del muro} = 3,96 + 0,3 = 4,26 \text{ m}$$

Tomando una pendiente,  $i = 3\%$

$$h_o = \left[ 2h_e^2 + \left( h_e - \frac{iL_e}{3} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{2}{3}iL_e$$

$$h_o = \left[ 2(0.58)^2 + \left( 0.58 - \frac{0.03 \times 4.26}{3} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{2}{3} \times 0.03 \times 4.26 = 0.89 \text{ m}$$

La altura total de los muros del canal de aducción es:

$$H_o = h_o + B.L. = 0.89 + 0.25 = 1.14 \text{ m}$$

$$H_e = H_o + iL_e = 1.14 + 0.03 \times 4.26 = 1.27 \text{ m}$$

La velocidad del agua al final del canal es:

$$V_e = \frac{Q}{Bh_e} = \frac{1.37}{1 \times 0.58} = 2.38 \text{ m/s}$$

0.3 m/s < 2.38 m/s < 3.0 m/s → OK

#### **-Diseño de la cámara de recolección**

$$X_s = 0.36 (2.38)^{2/3} + 0.60(0.58)^{4/7}$$

$$X_s = 1.08 \text{ m}$$

$$X_i = 0.18(2.38)^{4/7} + 0.74(0.58)^{3/4}$$

$$X_i = 0.78 \text{ m}$$

$$B_{cámara} = 1.08 + 0.30 \cong 1.40 \text{ m}$$

Por facilidad de acceso y mantenimiento, se adopta una cámara de 1,50 m (en el sentido de  $B_{cámara}$  por 2,6 m de lado.

El borde libre de la cámara es de 25 cm, por lo que el fondo de la cámara estará a 55 centímetros por debajo de la cota del fondo del canal de aducción a la entrega (suponiendo una cabeza de 0,40 m que debe verificarse una vez realizado el diseño de la derivación al desarenador).

#### **-Cálculo de la altura de los muros de contención**

Tomando el caudal máximo del río de 6,85 m<sup>3</sup>/s, la altura de la lámina de agua en la garganta de la bocatoma es:

$$H = \left( \frac{Q}{1.84L} \right)^{2/3} = \left( \frac{6.85}{1.84 \times 5.2} \right)^{2/3} = 0.80 \text{ m}$$

Dejando un borde libre de 40 cm, la altura de los muros será de 1,2 m.

### -Cálculo del caudal de excesos

Dentro de las condiciones iniciales del diseño, se ha supuesto un caudal medio del río de 1,37 m<sup>3</sup>/s. La altura de la lámina de agua en la garganta y el caudal de excesos son:

$$H = \left( \frac{Q}{1.84L} \right)^{2/3} = \left( \frac{1.37}{1.84 \times 5.2} \right)^{2/3} = 0.27 \text{ m}$$

$$Q_{cap} = C_d A_{net} \sqrt{2gH} = 0.3 \times 2.64 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.27} = 1.835 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{excesos} = Q_{Capt} - Q_{diseño} = 1.835 - 1.37 = 0.465 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las condiciones en el vertedero de excesos serán:

$$H_{exc} = \left( \frac{Q}{1.84B_{camara}} \right)^{2/3} = \left( \frac{0.465}{1.84 \times 1.5} \right)^{2/3} = 0.30 \text{ m}$$

$$V_{exceo} = \frac{Q_{exc}}{H_{exc} B_{camara}} = \frac{0.465}{0.30 \times 1.5} = 1.02 \text{ m/s}$$

$$X_s = 0.36 (1.02)^{2/3} + 0.60 (0.30)^{4/7}$$
$$X_s = 0.67 \text{ m}$$

El vertedero de excesos estará colocado a 1 m (0,67 m + 0,3 m) de la pared aguas abajo de la cámara de recolección.

### -Cálculo de cotas

Partimos de la cota del fondo del río en el punto de captación.

- Fondo del río = 1943,25 msnm

#### *Lámina sobre la presa*

- Diseño = 1943,25 + 0,274 = 1943,52 msnm
- Máxima = 1943,25 + 0,80 = 1944,05 msnm
- Promedio = 1943,25 + 0,27 = 1943,52 msnm
- Corona de los muros de contención = 1943,25 + 1,20 = 1944,45 msnm

### Canal de aducción

- Fondo aguas arriba =  $1943,25 - 1,14 = 1942,11$  msnm
- Fondo aguas abajo =  $1943,25 - 1,27 = 1941,98$  msnm
- Lámina aguas arriba =  $1942,11 + 0,89 = 1943,00$  msnm
- Lámina aguas abajo =  $1941,98 + 0,58 = 1942,56$  msnm

### Cámara de recolección

- Lámina de agua =  $1941,98 - 0,25 = 1941,73$  msnm
- Cresta del vertedero de exceso =  $1941,73 - 0,30 = 1941,43$  msnm
- Fondo =  $1941,43 - 1,2 = 1940,23$  msnm

### Tuberías de exceso

- Cota de entrada = 1940,23 msnm

Figura 2.3 Planta Bocatoma Tirol o de fondo

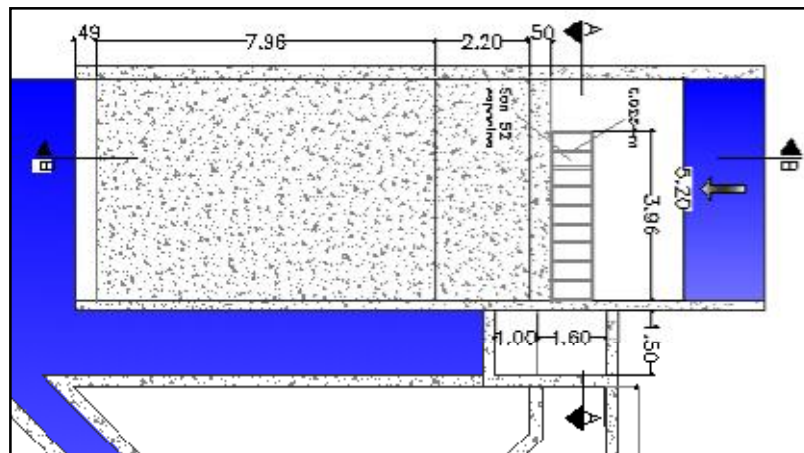


Figura 2.4 Sección A-A. Bocatoma Tirol

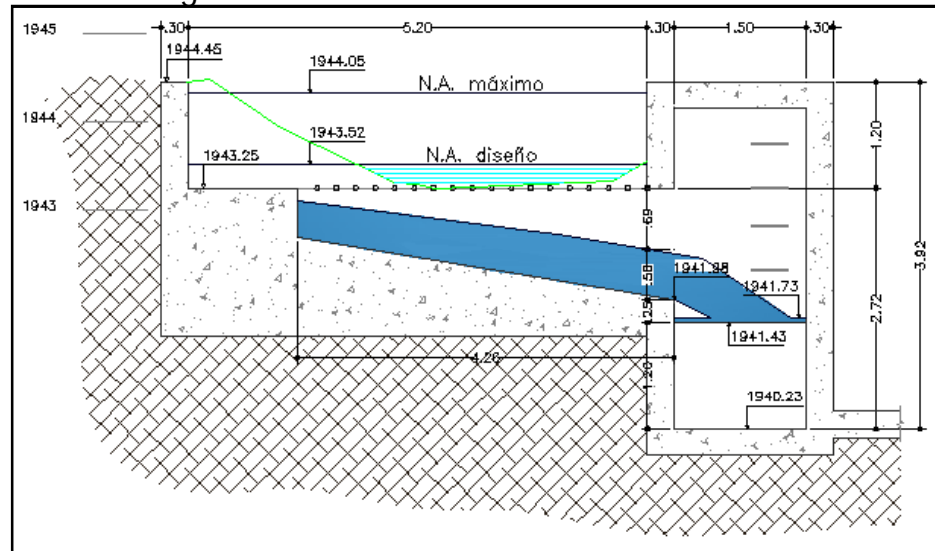
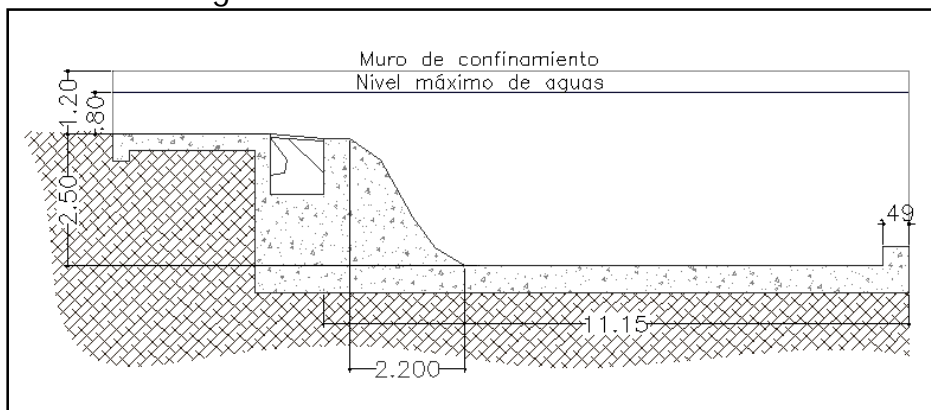


Figura 2.5 Sección B-B. Bocatoma Tirol



## 2.2 DISEÑO DEL AZUD, LOS ALIVIADEROS Y EL POZO DE DISIPACIÓN

Estas estructuras se diseñan para permitir la salida de los volúmenes de agua que, en determinado momento, pueden superar el nivel de las aguas normales del pondaje. La salida de las aguas de exceso debe entregarse a un canal situado aguas abajo de la bocatoma. Las diferentes geometrías de las obras de excedencias están determinadas en función de la topografía del lugar, con base en la caracterización de la magnitud del caudal de diseño, su costo comparativo y las condiciones de cimentación de cada estructura.

La salida de las aguas de exceso debe emplazarse en el río o quebrada aguas abajo del sitio de la presa.

Las obras de excedencias pueden ser de diferentes formas, estas se seleccionan de acuerdo con la topografía del lugar, por la magnitud del caudal de diseño, por el costo y por las condiciones de la cimentación de la estructura.

Es recomendable construir otros aliviaderos a intervalos de 100 m a lo largo de todo el canal principal, así como tener desagües para conducir el agua de rebose lejos de la base del canal. El costo de incluir estos reboses y desagües es considerablemente menor que el costo de la erosión de la pendiente y los daños que ocurrirían al canal si éste llegara a rebalsarse

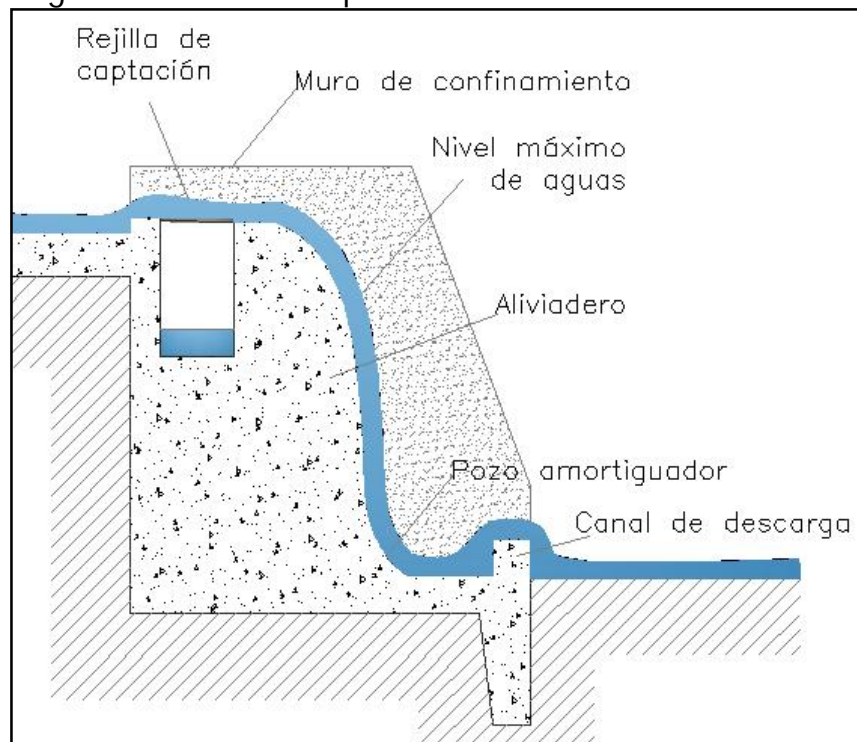
Para el caso de las pequeñas obras de excedencias, en nuestro medio, es frecuente utilizar vertederos de planta recta y perfil tipo Creager.

Podemos elaborar el diseño con un Q máximo de avenida correspondiente a un período de retorno de 100 años y pozo de amortiguación liso.

### 2.2.1 DISEÑO DEL VERTEDERO DE CRECIENTES TIPO CREAGER CON POZO DISIPADOR LISO

Para el caso de las pequeñas obras de excedencias, es frecuente utilizar vertederos de planta recta y perfil tipo Creager (WES). Esta estructura hidráulica se caracteriza porque adopta, a partir de la sección de control, la forma del flujo del agua. Consta de una sección de control, un pozo amortiguador o disipador de energía y un canal de descarga. La Figura 3-5 ilustra la forma típica de un vertedero tipo Creager.

Figura 2.6 Vertedero tipo CREAGER - Bocatoma de fondo



El diseño hidráulico de un vertedero tipo Creager deberá definir, previamente, las siguientes variables:

- ❖ **K** y **n**: Exponentes de la ecuación del perfil
- ❖ **x**: Distancia horizontal medida a partir del origen de coordenadas
- ❖ **y**: Distancia vertical medida a partir del origen de coordenadas
- ❖ **Ha**: Carga de velocidad en m
- ❖ **Hd**: Altura del agua sobre la cresta del vertedero en m
- ❖ **He**: Carga total sobre la cresta del vertedero en m; **He = Ha + Hd**
- ❖ **h**: Altura del dique hasta la cresta del vertedero en m
- ❖ **C**: Coeficiente de descarga
- ❖ **L**: Longitud total de la cresta del vertedero en m
- ❖ **Q<sub>máx</sub>**: Caudal máximo de diseño en m<sup>3</sup>/s
- ❖ **V<sub>c</sub>**: Velocidad crítica en m/s
- ❖ **Y<sub>c</sub>**: Profundidad crítica en m
- ❖ **F<sub>1</sub>**: Número de Froude al pie de la presa
- ❖ **V<sub>1</sub>**: Velocidad al pie de la presa en m/s
- ❖ **Z**: Altura medida desde el nivel máximo aguas arriba de la estructura hasta el nivel del pozo de amortiguación, en m
- ❖ **Y<sub>2</sub>**: Altura del resalto en el pozo de amortiguación, en m
- ❖ **Y<sub>3</sub>**: Altura del agua a la salida del canal de descarga, en m
- ❖ **L<sub>j</sub>**: Longitud del pozo de amortiguación, en m

La secuencia metodológica del cálculo es la siguiente:

- 1) Cálculo de la longitud de la cresta (L): Se determina de acuerdo con la topografía y la geología de la zona, refinando el resultado con los históricos de idoneidad operativa.
- 2) Cálculo de la carga de diseño (H<sub>d</sub>): Se considera un vertedero de cresta ancha (Ecuación de Francis).

$$Q_{max.} = 1,84LH_d^{3/2}$$

Luego:

$$H_{max.} = \left[ \frac{Q_{max.}}{184 * L} \right]^{2/3}$$

- 3) Se determina el efecto de la velocidad, mediante la relación (**h/H<sub>d</sub>**):

-Si **h/H<sub>d</sub> » 1,33** => El efecto de la velocidad es despreciable, se considera que **H<sub>e</sub> = H<sub>d</sub>**.

-Sí la relación  $(h/H_d) < 1,33 \Rightarrow$  El efecto de la velocidad es significativo, se considera que  $H_e = H_d + H_a$ .

- 4) Se determina el valor de la velocidad del flujo en la cresta del vertedero utilizando la ecuación de continuidad.

$$Q = V \times A$$

- 5) Se calcula la profundidad crítica.

La forma de la ecuación general es:

$$X^n = KHd^{n-1}Y$$

Los valores de  $(K)$  y  $(n)$  están dados como sigue:

Tabla 2-1 Valores de k y n

Pendiente de la cara aguas arriba	$K$	$n$
Vertical	2.000	1.850
3: 1	1.936	1.836
3:2	1.939	1.810
3:3	1.873	1.776

- 6) Se calcula la velocidad crítica.
- 7) Se calcula el perfil del aliviadero mediante la utilización de los parámetros  $(K)$  y  $(n)$  que se están en función de la pendiente de la cara aguas arriba del vertedero.
- 8) Se diseña el pozo de amortiguación, que consiste en una estructura corta, cuya solera, vaciada en concreto y ubicada al pie del aliviadero, produce y retiene el resalto hidráulico. Su función característica es hacer pasar el flujo excedente o de crecientes del régimen supercrítico al subcrítico, condición necesaria para evitar la socavación de la estructura aguas abajo del sector no pavimentado.
- 9) Se estima la velocidad  $(V_1)$  al pie del aliviadero:

$$V_1 = [2g(Z-0,5Hd)]$$

- 10) Se calcula la altura del agua a la salida o pie de la presa  $(Y_1)$ :

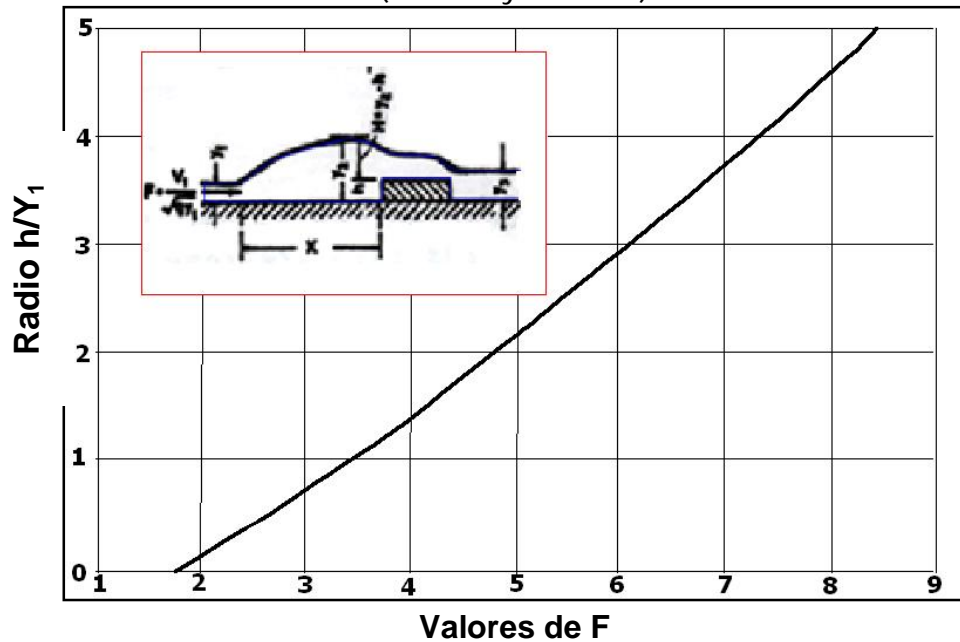
$$Y_1 = Q_{max.}/(V_1 * B)$$

- 11) Se calcula el número de Froude  $(F_1)$ :

$$F_1 = V_1 / \sqrt{g * Y_1}$$

12) Se determina la altura (h) del diente del dique en el pozo de amortiguación con base en la Figura 3.6:

Figura 2.7 Relaciones analíticas entre F y h/Y1 para un vertedero de cresta ancha (Forster y Skrinde)



13) Se calcula el valor de la altura máxima del resalto (Y2) en el pozo de amortiguación:

$$2.2.667F_1[1 + (h/Y_1)]/(Y_2/Y_1) = (Y_2/Y_1) - h/Y_1)^3$$

14) Se determina el valor de la profundidad del flujo a la salida del pozo de amortiguación (Y3):

$$Y_3 < (2Y_2 + h)/3$$

15) Se determina la longitud del pozo de amortiguación (Lj):

$$L_j = 6.9(Y_2 - Y_1)$$

ó

$$L_j = 5(h + Y_3)$$

## 2.2.2 DISEÑO DE LA ALTURA DE LOS MUROS DE ENCAUZAMIENTO

Tomando el caudal máximo del río ( $5 \cdot Q_d$ ), la altura de la lámina de agua en la garganta de la bocatoma es:

$$H_{m\acute{a}x} = \left( \frac{Q_{m\acute{a}x}}{1,84 \cdot L} \right)$$

Dejando un borde libre adecuado, la altura de los muros será:

$$Alturademuros = H_{m\acute{a}x} + BL$$

Se obtiene un valor de altura ligado a las características del caudal de avenida.

Figura 2.8 Canal



## 2.3 CANAL DE CONDUCCIÓN

El canal es una estructura hidráulica de forma, comúnmente, rectangular y artificialmente construida, que en razón de su pendiente puede conducir agua de un lugar a otro.

Antes de empezar a calcular las dimensiones de cualquiera de las secciones del canal, primero se deberá determinar su longitud (L) y el material con el que estará hecho o revestido. Si la ruta pasa por un suelo arenoso esto hará que las paredes se desmoronen hacia adentro, a menos que los lados estén inclinados ligeramente y el ancho del canal presente una relación adecuada con respecto a su profundidad.

En este caso, se recomienda revestir el canal porque el revestimiento ayuda a reducir la fricción y la filtración, además, de que permite una mayor velocidad evitando la erosión al mismo tiempo que impide la acción de agentes atmosféricos que puedan meteorizar el sustrato de cimentación y el crecimiento de plantas obstructivas.

Debe tenerse en cuenta que el canal se puede revestir de una forma más económica si se utilizan impermeabilizantes o incluso esto puede obviarse si el terreno es lo suficientemente firme.

El diseño ideal para un canal se basa en considerar que la velocidad del agua debe ser tan alta como para asegurar que los sólidos en suspensión no se asienten en el fondo del canal y debe ser tan baja para asegurar que no se erosionen sus paredes laterales. Por tanto se *recomienda que la velocidad oscile entre 0,7 y 2,0 m/s*, si esto es imposible, se deberá considerar el uso de un revestimiento más resistente.

El desnivel en todo el canal deberá ser reducido entre 0,5% y 1% así se garantiza que las pérdidas sean mínimas. También hay que tener en cuenta que el canal debe tener una vida útil alta, por lo cual debe estar libre de sedimentación, contar con aliviaderos que protejan la obra de caudales de avenidas, de altos escurrimientos causados por las lluvias y, si se encuentra en una zona inestable, contar con un recubrimiento que lo proteja de las rocas que caen debido a derrumbes o deslizamientos.

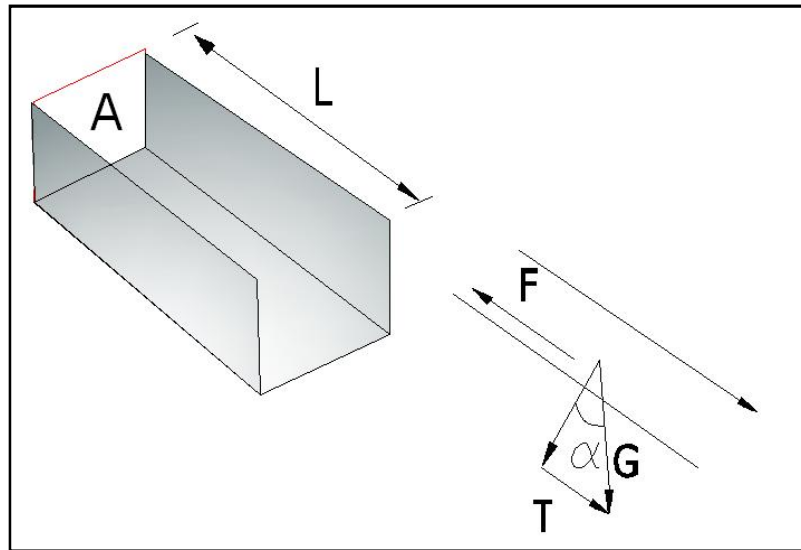
Casi siempre se trata de conductos abiertos de sección muy diversa (rectangulares, trapezoidales, semicirculares o, muchas veces, de sección irregular). En la Figura 3-5 se ilustra un canal rectangular de sección  $A$  y longitud  $L$ , cuyo peso es:

$$G = W \times L \times A$$

Donde  $W$  es el peso específico del agua y la componente en el sentido del movimiento (véase Figura 3-5) es:

$$T = W \times L \times A \times \sin \alpha = G \times \sin \alpha$$

Figura 2.9 Canal rectangular



La fuerza de rozamiento  $F$  ejercida entre el agua y la superficie del cauce equivale a:

$$F = K \times L \times P \times V^2$$

Donde:

- $K$  es una constante de proporcionalidad
- $P$  es el perímetro mojado
- $V$  es la velocidad del cauce
- $L$  es la longitud

Si se suman las fuerzas en el sentido horizontal se obtiene:

$$W \times L \times A \times \sin \alpha - K \times L \times P \times V^2 = 0$$

Al despejar la velocidad se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{w \sin \alpha A}{p K}}$$

Dado que la pendiente de los canales es menor de  $6^\circ$ , se puede considerar que:

$$\tan \alpha = j$$

Donde  $j$  es el gradiente hidráulico y  $C$  es una constante:

$$C = \sqrt{\frac{W}{k}}$$

$R$  es el radio hidráulico y equivale a:

$$R = \frac{A}{P}$$

De tal forma se obtiene que la velocidad es igual a:

$$V = C\sqrt{R \times j}$$

Empíricamente Manning encontró una relación para la constante  $C$

$$C = \frac{1}{n}R^{0.6}$$

$R$  es el radio hidráulico.

Donde  $n$  es un coeficiente que depende del tipo de material (véase la Tabla 3-1)

Tabla 2-2 Coeficiente de rugosidad de algunos materiales

Material del cauce	Mín.	Med.	Máx.
Roca áspera	-	0.040	0.045
Roca igualadas las asperezas	0.020	0.033	0.035
Canales grandes en buen estado	0.020	0.0225	0.025
Canales grandes en estado regular	0.023	0.025	0.027
Canales grandes en mal estado	0.025	0.0275	0.030:
Canales malos semi-derrumbados	0.028	0.030	0.030
Canal irregular con vegetación	0.033	0.035	0.040
Madera cepillada	0.010	0.013	0.014
Madera sin cepillar	0.012	0.015	0.018
Hormigón sin alisado con buen encofrado	0.013	0.014	0.015
Hormigón con huellas de tablas	0.015	0.016	0.018
Hormigón alisado	0.011	0.012	0.013
Mampostería, piedra	0.017	0.0225	0.030
Gaviones	0.025	0.027	0.032:
Ladrillo enlucido	0.012	0.015	0.017

De tal forma, la velocidad según Chezy-Manning es:

$$V = C\sqrt{R \times j} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} j^{\frac{1}{2}}$$

La forma del área mojada óptima, si se conduce por una superficie mojada mínima el mayor caudal posible, se podría obtener con una sección circular, aunque de difícil construcción y poca estabilidad, razón por la que se recomienda la sección trapezoidal.

El canal se acompaña de una pequeña berma para recoger aguas lluvias o para que cualquier derrumbe pueda depositarse, temporalmente, en ella. Además, se podría construir un camino que, en principio, facilita la construcción misma del canal y, posteriormente, su mantenimiento.

La altura de seguridad se establece en función del caudal y de la velocidad.

Los canales se revisten con el fin de permitir una mayor velocidad evitando la erosión y reduciendo el coeficiente de rugosidad.

#### **-Dimensionamiento del canal en régimen permanente y uniforme**

Conociendo el trazado del canal se selecciona el tipo de material para su construcción, el cual indica la velocidad máxima permitida por la obra de conducción que se muestra en la Tabla 3-2.

Se halla la sección requerida por medio de la expresión:

$$S = \frac{Q}{V}$$

Donde:

- Q es el caudal m<sup>3</sup>/s
- V es la velocidad m/s

Y se selecciona la forma de la sección.

Con base en la forma de la sección se halla el ancho b y el tirante del canal en la Tabla 3-2, identificando el valor de la velocidad máxima permitida de acuerdo con el tipo de suelo o material de revestimiento.

Se determina la gradiente del canal j.

Se halla la velocidad real en el canal.

Esta velocidad debe ser menor que la velocidad máxima permitida para el tipo de canal y revestimiento:

$$V < V_{max}$$

En caso contrario existen las siguientes opciones:

- Disminuir el gradiente del canal.
- Seccionar otra forma de sección.
- Revestir el canal.

Una vez se cumplan las condiciones mencionadas se determina la altura de seguridad:

$$S = j \times L + H + C + 0.05$$

Donde:

- $s$  es la altura de seguridad
- $j$  es la pendiente longitudinal del canal
- $L$  es la longitud entre aliviaderos
- $H$  es la sobreelevación del agua
- $C$  es la altura de la onda de traslación
- 0,05 es un incremento adicional en metros para control de sobrevertimientos

Tabla 2-3 Velocidad máxima permitida en suelos

Tipo de Suelo	V <sub>máxima</sub> m/s	
	Agua limpia	Material en suspensión
Lodo	0.10	0.15
Barro suelto	0.15	0.20
Arena fina (0.02-0.2 mm)	0.30	0.40
Arena media (0.2-0.5 mm)	0.35	0.50
Limo arenoso	0.40	0.60
Arena gruesa (2-5 mm)	0.45	0.65
Grava muy arenosa	0.60	0.80
Limo compacto (natural)	0.70	1.00
Grava media (5-20 mm)	0.80	1.15
Tierra arcillosa grasosa	1.00	1.30
Grava gruesa, piedras (20-50mm)	1.40	1.60
Piedras (50-75 mm)	1.70	1.80
Cantos rodados (75-100 mm)	1.90	2.00
Césped/ prado, bien radicado	1.80	1.80
<b>Tipo de revestimiento</b>		
Concreto (materia en suspensión, mucha arena)	-	2.00
Concreto (agua sin arena)	4.0	-
Mampostería con piedras sentadas y mortero	5.0	-

El ejemplo de aplicación a incluir en este documento será de un canal rectangular por ser la sección más utilizada, al ocupar menor volumen, que redonda en una mayor economía.

Para este proyecto se dimensionará una conducción abierta y un túnel que cruzaría un terreno de sustrato arcilloso. Para la conducción abierta se proponen varias opciones, una de las cuales es un canal rectangular con revestimiento.

En el dimensionamiento de la conducción se usará el caudal de diseño. El caudal de dimensionamiento es:

$$Qd_c = Qd$$

Se supone un caudal de

$$Qd_c = 7,56 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se elige la velocidad de conducción igual a:

$$V = 3 \text{ m/s}$$

Estableciendo que el ancho del canal sea de:

$$b = 2,0 \text{ m}$$

Y el tirante del canal sea:

$$d = 1,33 \text{ m}$$

La sección requerida para estas condiciones es de:

$$A = b * d = 2,66 \text{ m}^2$$

Perímetro mojado es igual a:

$$P = b + 2 * d = 4,66 \text{ m}$$

El radio hidráulico es igual a:

$$R = \frac{2,66}{4,66} = 0,57 \text{ m}$$

Se dimensionará un canal hecho en materiales y otro recubierto. Para la opción en materiales se tiene que de acuerdo con la Tabla 3-2 el valor de la velocidad máxima permitida para **concreto** es de:

$$V = 3 \text{ m/s}$$

Con base en la Tabla 3-1, se tiene que el coeficiente n para un canal no revestido en buen estado es de:

$$n = 0,017$$

Se selecciona un gradiente para el canal j igual a:

$$j = 0,005$$

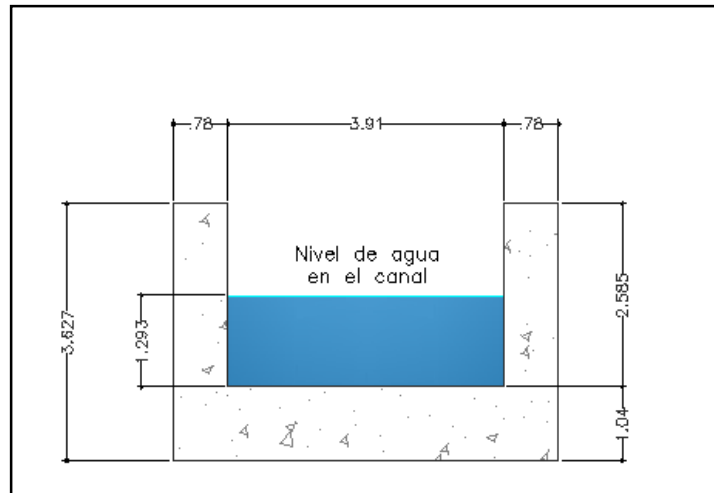
Se halla la velocidad real en el canal:

$$V = \frac{1}{0,017} \times 0,57^{2/3} \times 0,005^{1/2} = 2,86 \text{ m/s}$$

Esta velocidad es menor que la velocidad máxima permitida, esto indica que las dimensiones del canal rectangular en concreto son las adecuadas.

$$V < V_{max}$$

Figura 2-10 Sección típica de un canal



## 2.4 DISEÑO DEL DESARENADOR CONVENCIONAL:

Un desarenador convencional es un tanque construido con el propósito de sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad. El desarenador debe ubicarse lo más cerca posible de la bocatoma, con el fin de evitar problemas de obstrucción en la línea de aducción. El material en suspensión transportado por el agua es básicamente arcilla, arena o grava fina.

El diseño del desarenador es necesario para efectuar la remoción de partículas hasta el tamaño de arenas.

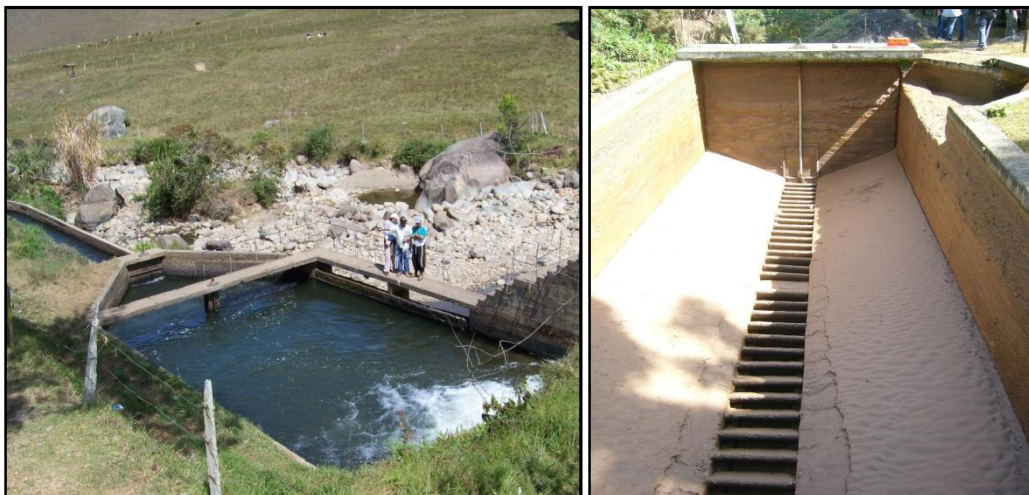


Figura 2-11. Desarenador

En el estudio de sedimentación se hacen las siguientes suposiciones teóricas:

- El flujo se reparte uniformemente a través de la sección transversal
- El agua se desplaza con velocidad uniforme a lo largo del tanque.
- Toda partícula que toque el fondo antes de llegar a la salida será removida.

## 2.4.1 COMPONENTES

Esta unidad se puede dividir en varias partes o zonas.

### 2.4.1.1 ZONAS DEL DESARENADOR:

- **Zona I:** Cámara de aquietamiento. Por la ampliación de la sección, se disipa energía y velocidad en la tubería de llegada. El paso del agua a la zona siguiente puede establecerse por medio de un canal de repartición con orificios sumergidos. Lateralmente, se puede emplazar un vertedero de excesos que transporta el caudal sobrante, nuevamente, al río mediante una tubería o canal que se une con el canal de lavado o limpieza de lodos.
- **Zona II:** Entrada al desarenador. Ubicada entre la cámara de aquietamiento y una cortina, que obliga a las líneas de flujo a descender con rapidez, sedimentando el material más grueso.
- **Zona III:** Zona de sedimentación. Consta de un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas. La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos.
- **Zona IV:** Almacenamiento de lodos. Comprende el volumen entre la cota de profundidad útil en la **Zona III** y el fondo del tanque. El fondo tiene pendientes longitudinales y transversales hacia la tubería de lavado.
- **Zona V:** Salida del desarenador. Constituida por una pantalla sumergida, el vertedero de salida y el canal de recolección, que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.

El período de diseño del desarenador es en general el mismo de la estructura de captación. El sistema de desarenadores debe estar constituido por un mínimo de dos módulos que funcionen en paralelo, con el fin de permitir una mejora en la operación del sistema cuando alguno de ellos esté fuera de servicio por razones de limpieza y mantenimiento.

En caso de caudales pequeños, como suele ocurrir en las PCHs se podrá contar con una sola unidad que debe integrarse con un canal de by-pass para efectos de mantenimiento.

## 2.4.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Dentro de las condiciones para el diseño del desarenador de la PCH, se debe considerar:

- Caudal de diseño  $\equiv$  Caudal de llegada del canal de derivación
- Diámetro de la partícula: 0,25 mm
- Temperatura del agua en el sitio

El diámetro de la partícula que pasa, cuando la sedimentación es correcta, permite el funcionamiento eficaz de la turbina. Partículas con diámetro mayor al de la partícula que pasa podrían causar daños en los equipos electromecánicos con consecuencias económicas onerosas para los propietarios de la PCH.

Otra de las consideraciones para el diseño es tener en cuenta que es preferible contar con un tanque rectangular con relación de longitud a ancho (L/B) entre 3/1 y 5/1. cuya profundidad mínima especificada es de 1,5 m y la máxima de 4,5 m.

Se recomienda una relación de longitud a profundidad de almacenamiento de lodos de aproximadamente 10/1. Normalmente la profundidad de lodos está entre 0,75 m y 1,5 m.

Las pendientes del fondo del desarenador deben oscilar entre 5 % y 8 % para que la masa lodosa rueda hacia el desagüe.

Con esta información se obtiene el valor de la viscosidad cinemática de la siguiente tabla:

Tabla 2-4 Viscosidad Cinemática

Temperatura (°C)	Viscosidad Cinemática (cm <sup>2</sup> /s)	Temperatura (°C)	Viscosidad Cinemática (cm <sup>2</sup> /s)
0	0,01792	16	0,01112
2	0,01763	18	0,01059
4	0,01567	20	0,01007
6	0,01473	22	0,00960
8	0,01386	24	0,00917
10	0,01308	26	0,00876
12	0,01237	28	0,00839
14	0,01172	30	0,00804
15	0,01146	32	0,00772

### -Dimensionamiento del desarenador

El cálculo de los parámetros de sedimentación se establece, así:

$$V_s = \frac{g \times (\rho_s - \rho) \times d^2}{\mu}$$

$$V_s = \frac{90 \times d^2}{\mu}$$

$$V_s = 418 \times (\rho_s - \rho) \times d \times \left( \frac{T + 10}{60} \right)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} \times C + 32$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de sedimentación de la partícula (cm/s)

$\rho_s$  = Densidad relativa de la arena = 2,65

$\rho$  = densidad del fluido = 1

$g$  = aceleración de la gravedad (981 cm/s<sup>2</sup>)

$d$  = diámetro de la partícula. (cm)

$T$  = temperatura del agua (°C)

Se determina el tiempo que tarda la partícula  $c$  en llegar al fondo con la expresión:

$$t = \frac{H}{V_s}$$

Donde:

$H$  = Profundidad útil de sedimentación, la cual es supuesta (m)

$V_s$  = Velocidad de sedimentación de la partícula  $c$ . (m/s)

Se procede a calcular el tiempo que se demora la partícula de agua en entrar y salir del tanque:

$$\theta = 3 \times t$$

$\theta$  = período de retención hidráulico en horas

De este modo se determina el volumen del tanque como:

$$Vol = \theta \times Q$$

Se calcula el área superficial del tanque en m<sup>2</sup>, así:

$$A_s = \frac{Vol}{H}$$

Se determina las dimensiones de largo, ancho y profundidad respetando los criterios de diseño.

Por ejemplo si tomamos una relación longitud ancho, igual a 4:1 tenemos que:

El ancho B (m) del tanque sedimentador es:

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{4}}$$

Y tendrá una longitud:

$$L = 4 \times B$$

Donde el caudal por unidad de área superficial  $q$  ( $m^3/m^2$ -día) se establece como:

$$q = \frac{Q}{A_s}$$

Este valor será igual a velocidad de sedimentación de la partícula crítica  $V_0$  ( $\frac{cm}{s}$ ) en condiciones teóricas:

$$V_0 = q$$

Luego, se calcula la velocidad horizontal:

$$V_h = \frac{Q}{W} = \frac{V_0 \times L}{H}$$

Se determina la velocidad de desplazamiento o resuspensión,  $V_d$  ( $\frac{cm}{s}$ )

$$V_d = \sqrt{\frac{8 \times k \times g \times (\rho_s - \rho) \times d}{f}}$$

Se deberá garantizar que no habrá resuspensión, por lo cual  $V_d > V_h$

## 2.4.3 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DEL DESARENADOR

### 2.4.3.1 VERTEDERO DE SALIDA

Con un vertedero de salida de longitud de cresta igual al ancho de la unidad se tiene como altura de agua sobre el vertedero:

$$H_v = \left( \frac{Q}{1,84 \times B} \right)^{\frac{2}{3}}$$
$$V_v = \frac{Q}{B \times H_v}$$
$$X_s = 0,36 \times V_v^{\frac{2}{3}} + 0,6 \times H_v^{\frac{4}{7}}$$
$$L_v = X_s + 0,1$$

### 2.4.3.2 PANTALLA DE SALIDA

- Profundidad =  $H_s/2 = 2$  m
- Distancia al vertedero de salida =  $15H_v$

### 2.4.3.3 PANTALLA DE ENTRADA

- Profundidad =  $H_s/2$
- Distancia a la cámara de aquietamiento =  $L/4$

### 2.4.3.4 ALMACENAMIENTO DE LODOS

Para el diseño de sector tan importante del desarenador se establece la relación **longitud/profundidad de lodos**, además de adoptar unos valores para la profundidad máxima y mínima.

Se puede calcular de ese modo:

- Distancia desde el punto de salida a la cámara de aquietamiento =  $L/3$
- Distancia desde el punto de salida al vertedero de salida =  $2L/3$
- Pendiente transversal:

$$S_t = \frac{prof_{max} - prof_{min}}{B}$$

- Pendiente longitudinal en (L/3):

$$S_{L/3} = \frac{prof_{max} - prof_{min}}{Dist. cam. aqui}$$

- Pendiente longitudinal (2L/3):

$$S_{2L/3} = \frac{prof_{max} - prof_{min}}{Dist. vert. salida}$$

#### 2.4.3.5 CÁMARA DE AQUIETAMIENTO

- Profundidad = Hs/3
- Ancho = B/3
- Y el largo es adoptado.

#### 2.4.4 EJEMPLO DE DISEÑO DE DESARENADOR

Si se tienen las siguientes condiciones de diseño del desarenador:

- Qd = 2,41m<sup>3</sup>/s
- Remoción de partículas de diámetro d = 0,25 mm
- Temperatura = 20 °C
- Viscosidad cinemática = 0,01007 cm<sup>2</sup>/s
- Relación longitud: ancho, 4:1

En consecuencia,

*Se calculan los elementos del desarenador:*

- ✓ Dimensiones del tanque:

- ❖ B = 5,69 m

- ❖ L = 22,76 m

- ✓ Vertedero de salida:

La velocidad sobre la cresta del vertedero debe ser, en teoría, mayor de 0,3 m/s para poder aplicar, en rigor, la ecuación del alcance horizontal de la vena vertiente.



Figura 2-13 Corte D - D del desarenador

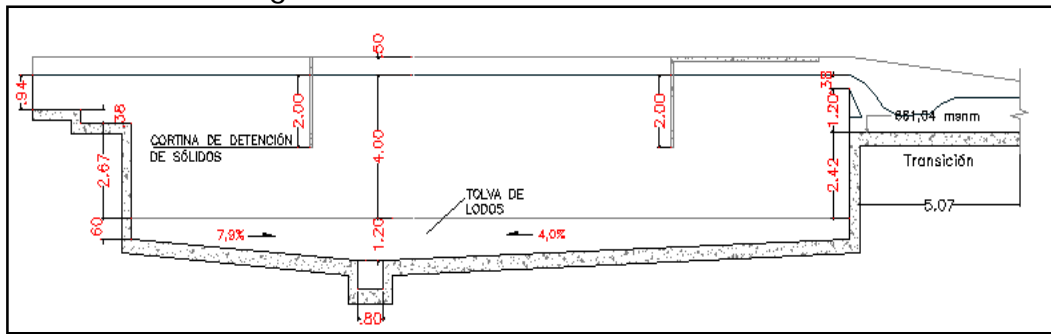
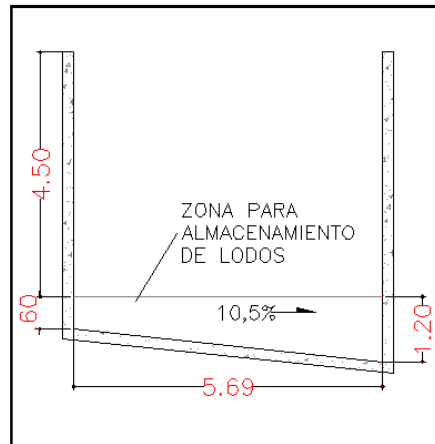


Figura 2-14 Corte E - E del desarenador



## 2.5 TÚNEL

El túnel es una obra de construcción subterránea que se excava siguiendo su eje y es usada en los siguientes casos:

- ✓ Cuando es más económico atravesar un macizo que trazar un canal por su contorno.
- ✓ Cuando la pendiente transversal del terreno es elevada (mayor de 45%) y el material no permite asegurar la estabilidad del canal.

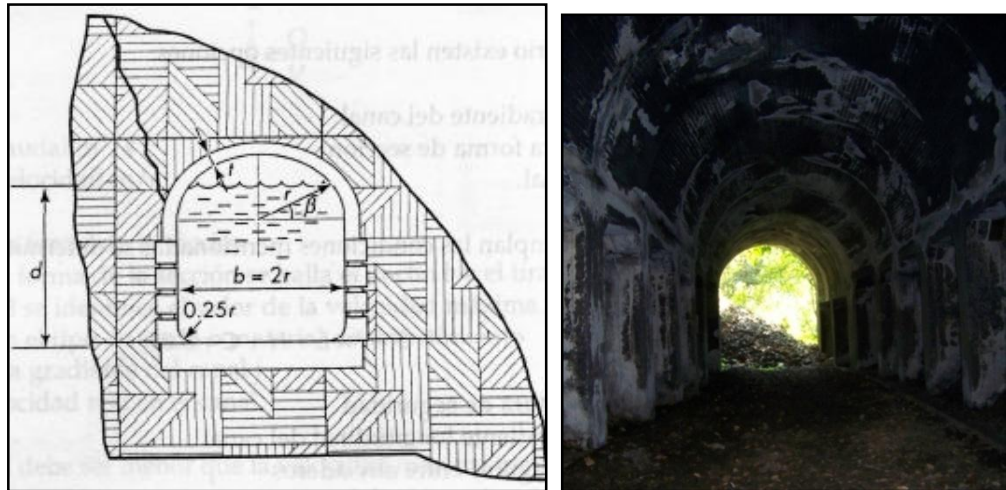
El túnel de conducción de una PCH a filo de agua trabaja a presión atmosférica, simulando un canal abierto.

El túnel debe mantener la pendiente del canal y seguir la distancia más corta la cual se verá alterada por las condiciones topográficas, geológicas y geomorfológicas del terreno.

La forma de la sección del túnel debe ser tal que su área permita la circulación del caudal máximo y resista las presiones, las cuales determinan la forma de sección y el tipo de revestimiento del túnel.

Los túneles pueden tener forma circular, de herradura o de baúl. La forma circular garantiza el área óptima, pero es de difícil construcción; la forma de baúl es más sencilla de construir. La Figura 3-6 ilustra las características de un túnel tipo baúl.

Figura 2-15 Características de túnel tipo baúl



Las dimensiones de los túneles deben garantizar la facilidad de su construcción. El ancho y tipo de túnel dependerá de las necesidades del proyecto, establecidos por criterios como el caudal y la velocidad. Según la experiencia se puede recomendar algunos anchos que funcionan hidráulicamente:

Tabla 2-5 Anchos recomendados para túneles

Ancho	Tipo de túnel
1,8 m	para sección baúl
2 m	para sección herradura
2,2 m	para sección circular

El área mojada es igual a:

$$A_T = 0.5 \times r^2 \left( 3.9462 + \frac{\pi \times \beta}{90} + \sin^2 p \right) = K_1 \times r^2$$

Donde  $r$  es el radio de la bóveda:

$\beta$  es el ángulo con la horizontal que hace el radio que toca la intersección de la superficie del agua con la bóveda.

$p$  es el calado de agua.

El perímetro mojado es igual a:

$$p = r \left( 3.785 + \frac{\pi \times \beta}{90} \right) = K_2 \times r$$

El radio hidráulico es igual a:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{K_1 \times r^2}{K_2 \times r} = k_3 \times r$$

El caudal es igual a:

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} j^{\frac{1}{2}}$$

De igual forma pueden obtenerse las ecuaciones para otras formas de sección.

La velocidad en el túnel oscila entre 1,5 y 2,5 m/s.

### 2.5.1 EJEMPLO DE DISEÑO DEL TÚNEL

El túnel de la conducción de baja presión llevará las aguas a través de la montaña, con el fin de ganar una mayor caída y se empalmará con el canal rectangular. El túnel es de tipo baúl y tiene las siguientes características:

- El túnel estará totalmente revestido en hormigón y tendrá una velocidad máxima permitida de acuerdo con la Tabla 3-2 de:

$$V_{max} = 4.0 \text{ m}^3/s$$

- Considerando que la conducción es revestida en hormigón, pero que presentará asperezas, establecemos que el valor del coeficiente de rugosidad sea de:

$$n = 0.035$$

- Se selecciona un gradiente para el canal, j igual a:

$$j = 0.005$$

Dado que el túnel será una continuación del canal rectangular, su ancho es igual al ancho del canal:

$$b = 2 \text{ m}$$

Luego,

$$b = 2 \times r$$

Se tiene que el radio de la bóveda es igual a:

$$r = 1 \text{ m}$$

- La sección requerida para estas condiciones es de:

$$A = \frac{7.56}{2.86} = 2.64 \text{ m}^2$$

- Conocidos la sección y el radio de la bóveda se halla la constante  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{2.64}{1^2} = 2.64$$

- El perímetro mojado es igual a:

$$p = 1 \left( 3.785 + \frac{\pi \times 2}{90} \right) = 3.85 \text{ m}$$

- El radio hidráulico es igual a:

$$R = \frac{2.64}{3.85} = 0.68 \text{ m}$$

- Se halla la velocidad real en el túnel:

$$V = \frac{1}{0.035} \times 0.68^{2/3} \times 0.005^{1/2} = 1.57 \text{ m/s}$$

Esta velocidad es menor que la velocidad máxima permitida, indicando que las dimensiones del túnel son las adecuadas. Sin embargo, con estas medidas su construcción es un tanto difícil, por lo cual se hace necesario que el diseñador decida si las aumenta.

Donde el terreno es pantanoso y los cauces de quebradas constituyen un problema agudo, el uso de una tubería semejante podrá evitar gastos de construcción inconvenientes para el resultado final del kW instalado.

La selección de alternativas de menor costo que cumplan los requerimientos económicos, están orientadas a reducir la longitud de la conducción por medio de túneles, sifones, rellenos u otro tipo de obras. Así que debe considerarse que los túneles se construyen cuando representan una solución más económica o más estable que un canal abierto.

El túnel es una alternativa técnica cuando el terreno no es estable, por ello se busca con él encontrar un terreno más firme. Con esto se reduce el costo por longitud y por sección debido al aumento de pendiente.

## 2.6 DISEÑO DE LA CÁMARA DE CARGA

Esta estructura hidráulica busca crear un volumen de reserva de agua que permita satisfacer las necesidades de las turbinas y garantizar la sumergencia del sistema de conducción de alta presión, manteniendo una altura de agua suficiente que evite, a toda costa, la entrada de aire a estos equipos de generación.

Las principales funciones de la cámara de carga o tanque de presión son: permitir la conexión entre el sistema de conducción y la tubería de presión, producir la sedimentación y eliminación de materiales sólidos que pudiera transportar el sistema de conducción, impidiendo de esta forma la entrada a la tubería de presión de materiales sólidos, de arrastre y flotantes. También debe desalojar el exceso de agua en las horas en que la cantidad consumida por las turbinas es inferior al caudal de diseño.

Estas obras deben tener una longitud y un ancho adecuados, sin ser demasiado voluminosos o caros.

Para el diseño de la cámara de carga establecemos lo siguiente:

- El caudal de diseño será el mismo que llega a través del canal
- El tirante de entrada es equivalente al tirante del canal, de igual manera el ancho de entrada corresponde al ancho del canal.

$$Vt = \frac{0,693 \times Q^2}{A \times i \times g}$$

Donde:

$Vt$  = volumen del tanque de carga ( $m^3/s$ )

$A$  = área del canal de conducción ( $m^2$ )

$i$  = pendiente del canal de llegada

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

**0,693** es un coeficiente de disminución del volumen

A partir del volumen del tanque podemos obtener la constante de capacidad de este, para ello empleamos la siguiente tabla:

Tabla 2-6 Constante de capacidad

<b>V (cientos de m<sup>3</sup>)</b>	<b>k</b>
<3	2,0
4-6	1,8
7-9	1,5
10-13	1,3
14-16	1,0
>17	0,7

Predimensionamiento del tanque:

$$H = \frac{V_t}{3} + k$$

$$B = \sqrt{\frac{V_t}{H}}$$

Donde:

H = profundidad del tanque de almacenamiento

B = ancho del tanque de almacenamiento

L = Largo del tanque de almacenamiento

Se considera, para efectos prácticos, que  $B = L$ .

De esta manera si se tiene un caudal de  $7,56 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$V_t = \frac{0,693 \times 7,56^2}{1,73 \times 0,005 \times 9,8} = 467 \text{ m}^3$$

En cientos de metros cúbicos, será 4,67 por lo que se utiliza  $k = 1,8$ :

$$H = \frac{4,67}{3} + 1,8 = 3,36 \text{ m}$$

$$B = \sqrt{\frac{467}{3,36}} = 11,80 \text{ m}$$

Por tanto, las dimensiones calculadas para la cámara de carga son:

- Profundidad (**Hcc**) = 3,36 m
- Ancho (**B**) = 11,80 m
- Longitud (**L**) = 11,80 m

Dimensiones que garantizan que el chorro, producto de la caída desde el canal de conducción, se integre a la cámara de carga sin afectar sus paredes con deterioros imprevistos.

Figura 2-16 Planta cámara de carga

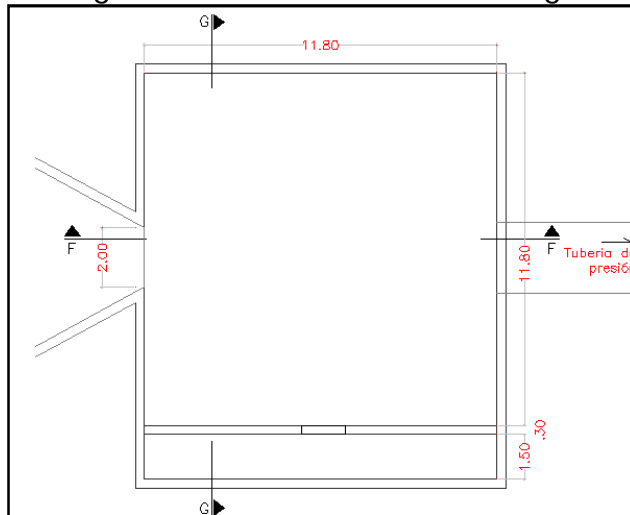


Figura 2-17 Sección G - G cámara de carga

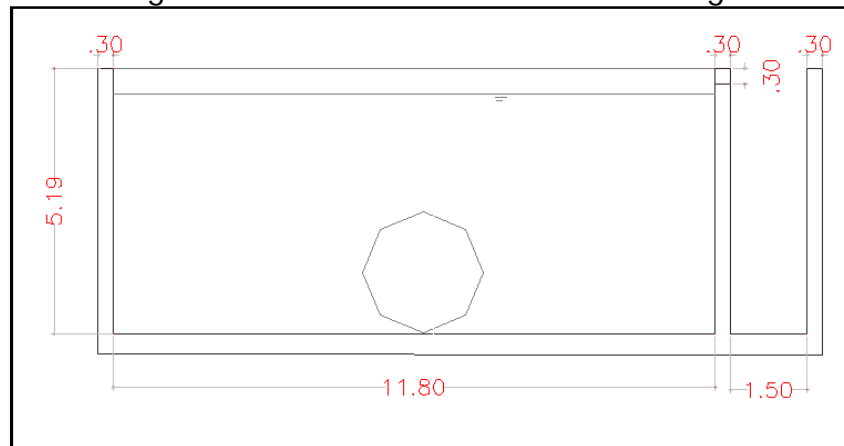
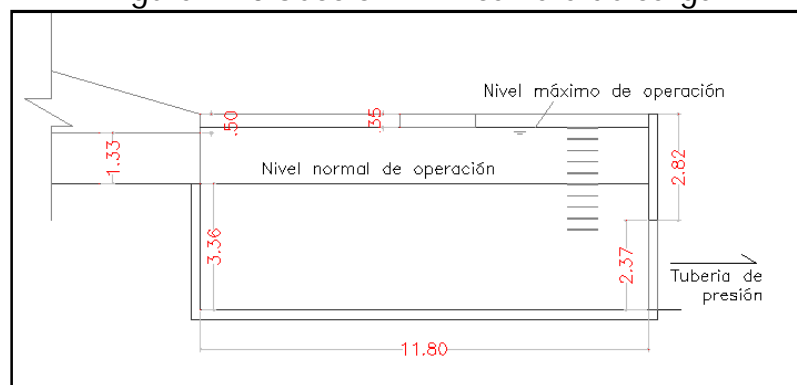


Figura 2-18 Sección F - F cámara de carga



## 2.7 DISEÑO DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN

### 2.7.1 TUBERÍA DE PRESIÓN

Son tuberías que transportan agua bajo presión hasta la turbina, se conectan con la cámara de carga, para que desde allí empiece el sistema de conducción de alta presión.

Para la escogencia del material ideal para la tubería de presión de un proyecto analizaremos los resultados del estudio de geología y geotecnia, las inspecciones de campo llevadas a cabo, la presión de diseño, además, deberá considerarse el diámetro de la tubería, las pérdidas por fricción y el costo del tipo de material que la constituye.

Debido a que el costo de esta tubería puede representar gran parte del presupuesto invertido en la conducción, es prioritario optimar el diseño, para reducir no sólo los costos de mantenimiento sino la inversión inicial.

Para el diseño de la tubería de presión debemos considerar que:

- Para definir la presión de servicio de la tubería, es necesario definir la presión de diseño del proyecto, la cual debe ser inferior a la presión de la tubería. La presión de diseño corresponde al valor de la presión estática en el perfil trazado, multiplicado por un factor de seguridad de 1,3.
- Diámetro de diseño:

$$D = \frac{\sqrt[7]{6,6 * Q^3}}{H_t}$$

Donde

- D** = Diámetro económico (m)
- Q** = Gasto máximo en picos (m<sup>3</sup>/s)
- H<sub>t</sub>** = Carga total (m) = H + ΔH
- H** = Carga estática
- ΔH** = Sobrepresión que se estima pudiera provocar el golpe de ariete

- El diseño hidráulico de la tubería se realiza con base en el coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams (C), que es función principalmente de la tubería y del estado de las paredes del tubo.
- La velocidad económica (V) se expresó en función de la carga estática, así:

$$V = 0,125 * \sqrt{2g * H}$$

- Teniendo en cuenta la posibilidad de transportar sólidos suspendidos en una conducción a presión, se recomienda una velocidad mínima de 0,6 m/s. La velocidad máxima depende del tipo de material de la tubería, que la suministra el fabricante. Como criterio general se recomienda una velocidad máxima de 6 m/s, pero debe verificarse la magnitud de la sobrepresión por golpe de ariete, la cual puede influenciar la selección de la “clase” de tubería.
- Se calculan las pérdidas de carga en la tubería: por rejillas, por entrada, por fricción, por codos y por ramales.
- Se realiza el chequeo para golpe de ariete en un punto cualquiera de la tubería.
- Se calculan espesores de pared adecuados para los tamaños de tubería.
- Se diseñan los soportes, anclajes y uniones para la tubería de presión.
- Se prepara una tabla de opciones calculando el costo total de cada una de las alternativas y debe establecerse si los componentes están disponibles en el mercado.

Además, se asumen cargas en la tubería como:

- Cargas de gravedad: Peso del anclaje y de la tubería llena que queda soportada por el anclaje.
- Cargas de presión: Suma vectorial de la presión, incluyendo el efecto de cierre de válvulas, sobre todas las áreas aguas arriba y aguas abajo del vértice del anclaje.
- Cargas de fricción: Causadas por el movimiento de la tubería sobre los sillares y en las juntas de expansión, debidas a variaciones de temperatura.
- Cargas hidrodinámicas: Debidas al cambio de dirección del flujo del agua en el vértice del anclaje.
- Efecto de “Poisson”: Fuerza longitudinalmente generada en la tubería cuando, estando su movimiento axial restringido, la presión causa un aumento de diámetro del tubo.
- Sismo: se considera una fuerza horizontal equivalente al 12,5 % de las cargas de gravedad, colocada en el centro de gravedad, para estimar la acción de un sismo importante sobre la estabilidad de los anclajes.

Existen programas que pueden ayudar en el cálculo del diámetro de la tubería de presión, como es el caso del programa AYA del profesor Ricardo Alfredo Cualla.

Dicho programa suele ser muy útil en el momento de establecer un diámetro mínimo para la tubería de presión, sin embargo, debe garantizarse la permanencia de la velocidad de entrada del flujo de la cámara de carga a la tubería de presión, lo que requiere estipular el diámetro de seguridad que cumpla con este requisito, así:

$$V=Q/A$$

Donde, la velocidad de entrada corresponde a la velocidad de salida de la cámara de carga. De esta forma si tenemos una velocidad conocida y un caudal, que corresponde al caudal de diseño podemos establecer el diámetro de la tubería.

Por ejemplo si se tiene que:

$$V = 2,13 \text{ m/s}$$

$$Q = 2,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

Para que el diámetro se pueda expresar:

$$D = \left( \frac{4 \times Q}{\pi \times V} \right)^{0.5}$$

El diámetro de seguridad que se calculó tiene un valor de 1,20 m (1 200 mm), que, además, garantiza que se eviten sobrepresiones y se produzcan traumas en el sistema.

Para el cálculo del espesor mínimo de la tubería se utiliza la expresión:

$$e = \frac{P_1 * D}{2 * \sigma_f * k_f} + e_s$$

En donde: e = espesor de la pared del tubo [mm]  
P<sub>1</sub> = Presión hidrostática [kN/mm<sup>2</sup>]  
D = Diámetro interno del tubo [mm]  
σ<sub>f</sub> = Resistencia a la Tracción del acero [1200 kg/cm<sup>2</sup>]  
k<sub>f</sub> = 0,9 para uniones soldadas y radiografiadas  
e<sub>s</sub> = sobre espesor para tener en cuenta en la corrosión [1 mm]

Como resultado de este procedimiento, se obtiene un espesor de la pared de la tubería de 7 mm.

Con base en lo ya expresado el material constituyente de la tubería será el que cumpla con las expectativas del diseñador, cabe decir que el acero de calidad ASTM – 285 Grado C, puede ser muy útil, dada la facilidad de su construcción con los diámetros y espesores requeridos.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que con el tiempo se presentarán incrustaciones de calcio y magnesio (elementos contenidos en el agua) en las paredes de la tubería, modificando así la rugosidad, lo que puede ser crítico para tuberías de acero

### **2.7.2 APOYOS Y ANCLAJES**

Los pilares de soporte, los anclajes y los bloques de empuje cumplen la función de dar el peso necesario para contrarrestar las fuerzas de los fluidos que pueden hacer que la tubería se mueva y corra el peligro de romperse.

El soporte de la tubería, anclajes y sillares, sostiene su propio peso y del agua que transporta. Los anclajes sirven para mantener en tierra a la tubería, así como para fijarla y evitar los movimientos laterales. El bloque de empuje se usa en codos de tuberías enterradas a fin de transmitir las fuerzas a la tierra circundante.

Los apoyos o soportes deben construirse de manera tal que permitan el movimiento longitudinal de la tubería al contraerse o dilatarse debido a cambios de temperatura.

Además, los soportes tienen que ser construidos sobre suelo firme y no en un relleno. La superficie de contacto del apoyo con el suelo de cimentación debe estar calculada para soportar el peso sin exceder el límite de capacidad de resistencia del suelo. Además es necesario hacer canaletas de drenaje (cunetas, lavaderos y rondas) a lo largo de la tubería para evitar la erosión de los cimientos de los soportes, los deslizamientos y las fallas de los taludes circundantes.

En la Figura 2-19 se pueden apreciar los principales componentes de una estructura de tubería de presión

Figura 2-19 Componentes de una tubería de presión



### 2.7.3 ESPACIAMIENTO DE SOPORTES

Se deberán calcular el máximo de espaciamiento entre los soportes de una tubería a fin de que ésta no se fracture o flexione excesivamente.

Para el espaciamiento de pilares basándose en la experiencia y en las recomendaciones de los fabricantes de tuberías, se puede estimar que para 90 m deberá emplazarse un anclaje y los sillares se deberán distribuir por tramo entre anclajes cada 15 m.

Por lo general, y si se tienen dudas, se usa un soporte por cada pieza de tubería.

Figura 2-20 Planta de anclaje

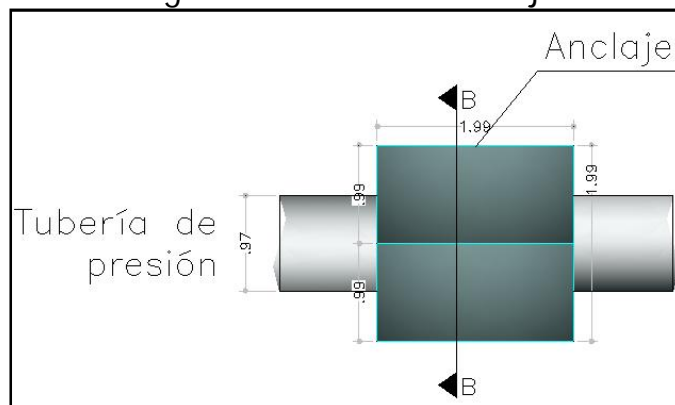


Figura 2-21 Sección B - B del anclaje

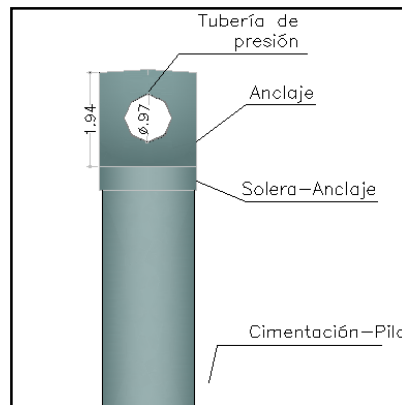


Figura 2-22 Planta de sillar

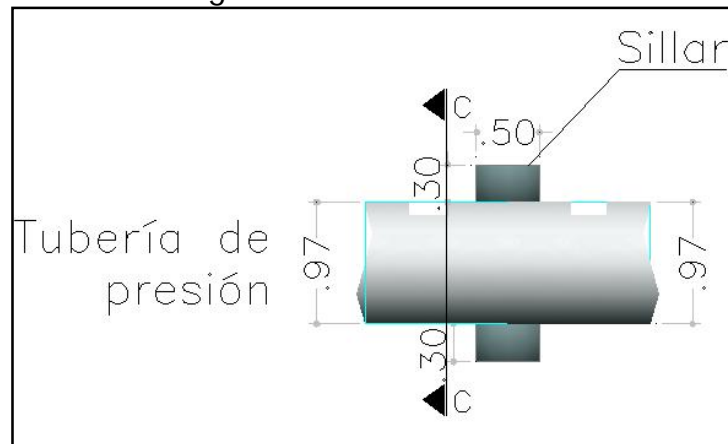
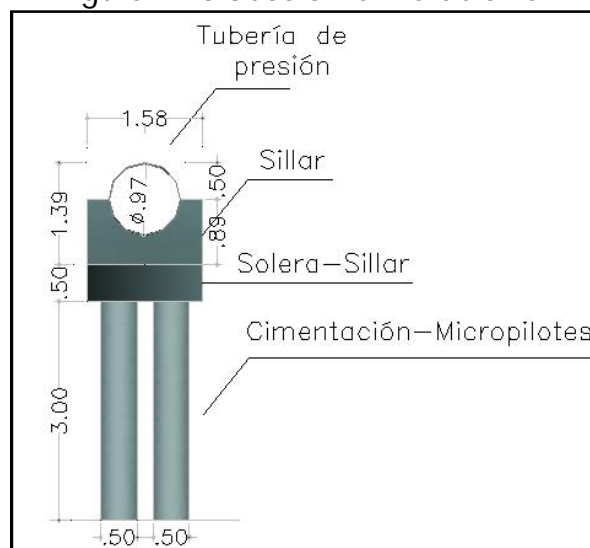


Figura 2-23 Sección C - C de sillar



### 3 MANTENIMIENTO DE UNA PEQUEÑA CENTRAL

La implementación de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) requiere de la inversión de un gran capital. A fin de recuperar esta inversión en el plazo previsto en el análisis económico de rentabilidad, la central debe funcionar todo el tiempo para el que fue diseñada que por lo general, es  $365 \times 24 = 8,760$  horas/año. A este habrá que restar el tiempo programado de paradas por diversos motivos, incluyendo las que corresponden al tiempo dedicado al mantenimiento.

Para cumplir con las expectativas del proyecto es necesaria una adecuada operación del sistema y un programa de mantenimiento bien planificado que efectivamente sea llevado a la práctica.

Sin embargo, el estado de muchas plantas demuestra que no se comprende la cualidad preventiva del mantenimiento y, en muchos casos, los propietarios o responsables del servicio la ignoran deliberadamente, a lo que por lo general se ven obligados por los siguientes motivos:

- Ausencia de recursos financieros para la adquisición de herramientas, repuestos y materiales diversos.
- desconocimientos básicos para la ejecución de ciertas actividades de mantenimiento.
- Falta o inexistencia de programas claros de mantenimiento.

Las consecuencias de una inadecuada operación y la desatención del mantenimiento devienen en una serie de problemas relacionados directamente con el estado del equipo electromecánico y también en pérdidas económicas, por energía dejada de producir y por costos imprevistos de reposición y/o reparación de piezas.

Por lo tanto, los procedimientos y actividades de mantenimiento deben especificarse como una "secuencia de acciones" que se repiten periódicamente y encargarse a una persona, que puede o no ser el operador de la planta, pero que debe estar capacitado para ejecutar, registrar y programar estas acciones.

Las acciones de mantenimiento más comunes en función de las obras civiles de la PCH se describen con detalle, para aquellas labores que requieran cierto conocimiento técnico para su ejecución. Se darán algunas recomendaciones prácticas para el efectivo cumplimiento de los programas de mantenimiento en base a la experiencia adquirida, así como lineamientos generales para la realización de diagnósticos de fallas.

### 3.1 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN BOCATOMAS

Es notable que las partes principales de la bocatoma sean: la presa, los muros de encauzamiento y la rejilla de captación.

En consecuencia hay que tener en cuenta que, la presa o barraje, aunque necesita poco mantenimiento, debe estar libre de de rajaduras o filtraciones, de vegetación, arenas y piedras, por lo cual es necesario considerar el retiro de estos últimos materiales, especialmente en épocas de lluvias.

La existencia de rajaduras o filtraciones en la presa se pueden observar mejor en época de estiaje. Durante esta temporada se deben realizar los trabajos de resane; de no ser posible, se debe impermeabilizar temporalmente la filtraciones con sacos de arena.

El resane se debe hacer poniendo mortero de concreto de acuerdo a las indicaciones del siguiente cuadro:

Tabla 3-1 Recomendaciones para el trabajo de resane

<b>Recomendado para:</b>	<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Otros materiales</b>
Reparación de fugas de agua debido a rajaduras en paredes de canales, presas, etc.	una parte	dos a tres partes	5 % de cemento blanco, para fraguado rápido
Resane de superficies que estén en contacto permanente con agua en canales, bocatoma, cámara de carga, desarenado, etc.	una parte	tres partes de arena tamizada	ninguno
Superficies externas que no estén en contacto con el agua, dependiendo del grado de resistencia requerido.	una parte	cuatro partes cinco partes seis partes	ninguno
Superficies que estén en contacto con agua.	una parte	una y media partes	
Trabajos de recomposición estructural.	una parte	dos partes	cuatro partes de fierro de construcción

La rejilla de captación es el punto donde el agua deja el río para irse por el canal, por lo cual es necesario inspeccionar esta rejilla regularmente en épocas de estiaje y diariamente en épocas de avenidas; ya que sabemos que dentro de sus funciones esta evitar el paso algunos materiales flotantes, los cuales pueden quedar atrapados en las rejas, bloqueando el paso del agua.

Algunas rejillas están provistas de paredes que limitan el flujo de agua en avenidas, mientras que otras están provistas de compuertas de desfogue o limpieza que cumplen el mismo trabajo; si así fuera, es recomendable mantenerla totalmente abierta para prevenir excesos de agua en el canal, que

podrían ser causa de rebalses a lo largo del canal y a su vez provocar derrumbes.

Los desfogues y rebosaderos que pudieran formar parte de la bocatoma también deben ser inspeccionados periódicamente para detectar daños que podrían ocurrir con el tiempo, como rajaduras o deslizamientos de la cimentación, que deben ser reparados rápidamente, pues los daños podrían extenderse y ser causa de costosas reparaciones.

### **3.2 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN DESARENADORES**

El desarenador es una parte importante de una PCH, pues determina el deterioro por erosión del rodete de la turbina. Más aún en las turbinas de admisión total en las que el agua se acelera en el interior del rodete, como las turbinas Francis. Por lo que es necesario que dichas partículas sean extraídas antes de que el agua ingrese a la tubería de presión.

Es claro que en el desarenador la velocidad del agua es disminuida, permitiendo que las partículas en suspensión caigan a la base del desarenador. Los sedimentos recolectados deben ser expulsados con una periodicidad que depende de la capacidad de la tolva de almacenamiento de estos.

Mediante la apertura de la compuerta de purga; estos sedimentos pueden ser eliminados, aunque no es lo recomendable dado las consecuencias ambientales a las que se llega. Pero también se pueden retirar con pala a pesar de lo tedioso, lo importante es hacer esta limpieza ya que de no efectuarse, se seguirán acumulando sedimentos hasta que alguna partícula producto del exceso pase a la turbina.

Durante la temporada de lluvia la frecuencia de vaciado del desarenador deberá ser mayor, debido al aumento en el transporte de pequeñas partículas de material duro y abrasivo (sedimento).

Aparte de la limpieza de sedimentos, el desarenador requiere poco mantenimiento, como la ocasional reparación de la mampostería que podría ejecutarse durante los períodos secos del año. Mientras que las guías y accesorios de la compuerta de purga podrían requerir lubricación cada cierto tiempo, dependiendo de su diseño.

### **3.3 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CANALES**

La mayoría de las PCHs tienen alguna forma de canal para llevar el agua de la bocatoma a la cámara de carga. Existen muchos tipos de canales; los más usados son los de tierra, empedrados y de concreto y, en algunos casos, es posible encontrar una combinación de los tres.

Una de las consideraciones importantes que se deben tener en cuenta es la velocidad con la que el agua circula. En un canal de tierra la velocidad de desplazamiento del agua debe ser menor que en un canal revestido.

Si en alguno de estos canales el agua se traslada a una velocidad mayor que la velocidad designada, el canal podría erosionarse, y si el agua se traslada a una velocidad menor el canal tiende a sedimentar los sólidos suspendidos en el agua. Por tanto, es conveniente intentar mantener la velocidad entre los límites designados. Esta consideración debe tomarse en cuenta cuando se reparan canales sin revestimiento (Tabla 3-1).

Tabla 3-2 Velocidad máxima permisible en canales de tierra

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Velocidad en m/s</b>
Arena fina	0.3 - 0.4
Arena + arcilla	0.4 - 0.6
Arcilla	0.6 - 0.8
Arcilla compacta	0.8 - 2.0

Las acciones de mantenimiento en el canal deben estar orientadas a prevenir fugas y repararlas tan pronto como ellas aparezcan. Los acueductos, también llamados canoas, deben ser inspeccionados en sus soportes y estructura en general, cualquiera que sea el material del que están fabricados.

Adicionalmente debe hacerse un chequeo del canal con regularidad que permita establecer si hay obstrucciones debido a caída de rocas, o si existe la presencia de vegetación, cuidando de removerlas.

### **3.4 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CÁMARAS DE CARGA**

La cámara de carga es el punto donde se conecta la tubería de presión al canal de conducción. En algunas PCHs junto a la cámara de carga hay un desarenador. La cámara de carga está compuesta por una rejilla, un rebosadero y, en ocasiones, una válvula para controlar el paso de agua a la turbina.

La rejilla requiere limpieza. La frecuencia de esta acción dependerá de la cantidad de materiales flotantes que el agua traiga consigo. Es importante que el único elemento que pase a la turbina sea el agua, cualquier objeto, dependiendo de su dimensión, podría causar la disminución de la potencia, al quedarse atorado en un abertura de la turbina.

Los desfuegos y rebosaderos que forman parte de la cámara de carga también deben ser inspeccionados en sus soportes y estructura para detectar daños que podrían ocurrir con el tiempo, como es el caso de las rajaduras o deslizamientos de la cimentación.

Algunas PCHs están provistas de un gran reservorio para el almacenamiento de agua, la tubería es conectada a este reservorio y la turbina puede ser operada por unas horas a su más alta potencia, este reservorio también actúa como un gran desarenador, por lo que es necesario limpiar los sedimentos cada cierto tiempo. Generalmente hay unas rejillas antes del reservorio, pero necesitan menor limpieza que aquellas ubicadas en la cámara de carga.

### **3.5 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TUBERÍAS**

La tubería de presión lleva el agua de la cámara de carga a la turbina, En PCHs antiguas es común ver tuberías de planchas de acero remachadas o soldadas; en las más recientes se viene empleando las tuberías de GRP (glass reinforced plastic o plástico reforzado con fibras de vidrio) que garantizan menor rugosidad y por tanto menores pérdidas.

Las tuberías de presión requieren poco mantenimiento, aunque a veces, si tenemos tuberías de acero, las uniones de los tubos pueden gotear. Esto se puede resolver rápidamente cuando se trata de uniones espiga campana para lo cual es común utilizar soldadura de plomo; en el caso de bridas empernadas, bastará con ajustar los pernos y, si persistiera la fuga, habrá que revisar el estado de la empaquetadura. Igual atención merecen las juntas de dilatación.

En el caso de tener tuberías de acero se presenta con mucha frecuencia la corrosión, que se puede presentar en forma generalizada o localizada. Lo que hace conveniente una minuciosa limpieza de la superficie con cepillos de cerdas de acero, solventes químicos o arenado. La aplicación inmediata de una capa de pintura anticorrosiva sobre el metal puede ayudar a extender el tiempo de vida de la tubería; se recomienda esta aplicación con alguna periodicidad.

En tuberías viejas no es recomendable retirar las formaciones calcáreas del interior de los tubos debido a que se puede reducir sustancialmente el espesor y provocar el consecuente debilitamiento del material.

Las tuberías de material plástico PVC no deben ser expuestas a los rayos solares debido al prematuro envejecimiento que los rayos ultravioleta provocan en el PVC. Es recomendable que las tuberías se instalen en zanjas y sean totalmente cubiertas con tierra, lo que también las protege de ocasionales golpes que podrían fracturarla con relativa facilidad.

Dichas complicaciones pueden evitarse con tubería GRP, que a pesar de su alto costo inicial puede resultar muy resistente y duradero. Lo que se debe tenerse en cuenta en el caso de decidirse por dicha tubería será las pérdidas en los accesorios.

Es sumamente importante inspeccionar el estado de los anclajes y soportes, considerando la presencia de drenajes laterales para conducir aguas de lluvia

que de otro modo podrían socavar el terreno provocando inestabilidad y, en casos extremos, deformación y hasta rotura de la tubería.

### **3.6 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN VÁLVULAS**

Las válvulas son instaladas al final de la tubería, en la mayoría de los casos en la casa de maquinas. Las válvulas tienden a presentar fugas de agua por la prensa estopa, lo cual no es mayor problema porque bastará ajustar el sello o cambiar la empaquetadura del mismo.

Este ajuste del sello se debe realizar hasta que el agua deje de salir; un ajuste mayor dificulta el libre accionamiento y, lo que es peor, provoca desgaste localizado del eje o vástago de accionamiento.

Dichas válvulas están diseñadas para trabajar en una determinada posición, es decir cerrada o abierta, nunca en una posición intermedia debido al desgaste prematuro del elemento obturador y las fuertes pérdidas de carga que producen en esta posición.

Si la válvula no tiene cierre hermético es debido a que los asientos del obturador y el asiento se han desgastado (erosionado) por lo que habrá que desmontarla para que en el taller se proceda a realizar la recuperación de forma mediante soldadura de relleno y torneado correspondiente.

### **3.7 REPUESTOS Y HERRAMIENTAS PARA MANTENIMIENTO**

Para llevar a cabo todas las acciones de mantenimiento descritas anteriormente, es necesario la existencia de un stock mínimo de repuestos y herramientas en la pequeña central.

Las herramientas y repuestos necesarios deben ser especificadas desde el comienzo del proyecto por el ingeniero encargado del diseño de la planta y suministradas por el fabricante de los equipos y el contratista encargado de la ejecución de obra.

La sola existencia de repuestos y herramientas no es garantía de que se pueda disponer de ellos cuando se los necesite; además, deben almacenarse en un lugar dentro de la casa de maquinas, en forma ordenada y libres de polvo, preferentemente en su envase o envoltura sellada. Asimismo, debe haber un inventario de estos en un lugar visible. Debe tenerse en cuenta que es preferible desechar repuestos inservibles.

### **3.8 OPERACIÓN DE LA PCH**

Es deseable que funcione las 24 horas del día, mientras que sólo funcionará cuando exista demanda de uso de la máquina impulsada. Por lo tanto el tiempo de parada es distinto para ambos casos, lo que se debe tomar en cuenta al momento de programar una acción de mantenimiento que requiera hacerse con la PCV fuera de servicio, por ejemplo, una reparación de canal o un cambio de rodamientos.

En términos generales, se puede concluir que, por mantenimiento, la central debe paralizarse preferiblemente solo en meses de estiaje.

#### **Libro de registro:**

El libro de registros es un documento que debe permanecer en la central. En él se deben consignar las ocurrencias diarias como por ejemplo:

- ¿Qué ocurrió?
- ¿A qué hora ocurrió?
- ¿Qué acciones se tomó?
- ¿Quiénes participaron?
- ¿Qué materiales o repuestos se usaron?

En el caso de acciones de mantenimiento, ¿cuándo se debe realizar nuevamente esta actividad?

Esta información tiene importancia al momento de evaluar la ocurrencia de una falla para la toma de una decisión correctiva, y forma parte de la historia de funcionamiento de la central. De esta forma es posible programar acciones de mantenimiento en el futuro y las precauciones que se debe tener para su ejecución.

Asimismo, en el libro de registro deben figurar las horas de funcionamiento diario; la lectura del contador de energía (kWh) debe servir como criterio para la evaluación del factor de carga.

### **3.9 MANUALES, DOCUMENTOS DEL FABRICANTE Y DEL INSTALADOR**

Es importante que el contratista entregue un manual que describa las acciones de operación y mantenimiento de la PCH. Debe consignar una propuesta de periodicidad de las acciones de mantenimiento sobre la base de sugerencias del fabricante de los equipos.

En lo posible debe haber manuales de cada equipo individual como textos de consulta para solucionar algunas dudas sobre las consideraciones generales de funcionamiento del equipo cuando ocurra alguna falla o se requiera una reparación.

Estos documentos deben permanecer en la PCH.

### **3.10 CAPACITACIÓN DE OPERADORES**

Es conveniente adiestrar una o más personas para la operación de la planta. Esta labor debe estar a cargo del propietario y/o de su delegado (para operación y mantenimiento del sistema) quienes, conjuntamente, deben seleccionar a las personas idóneas para el cargo y, en forma práctica, enseñarles el funcionamiento de los equipos, los nombres de las partes, el modo de operación de los equipos y cómo llevar a cabo acciones de mantenimiento.

Hay que recalcar la importancia de la capacitación, ya que no es una actividad que se tenga muy en cuenta, y es notable que en la mayoría de los casos, en los presupuestos de costos de la PCH no existan egresos para tal concepto.

Por lo general el operador es una persona que, habiendo participado en la construcción de las obras, durante su trabajo mostró disciplina y voluntad. Ello, sumado a un par de explicaciones lo convierte en operador. Quizás no sea la mejor forma de selección; por lo que se debe poner cuidado en la selección, y tener en cuenta que el cargo de operador requiere de las personas, los siguientes requisitos:

- Saber leer y escribir.
- Habilidades manuales para el manejo de herramientas.
- Capacidad de retención para memorizar secuencias.
- Iniciativa e imaginación para la solución de problemas.
- Capacidad de deducción para distinguir causa y efecto.
- Alto sentido de responsabilidad.
- Gozar del respeto comunal.

Ahora bien, las funciones del cargo deben especificarse claramente. En la generalidad de los casos, estas funciones implican:

- Llenar el registro diario de funcionamiento y ocurrencias.
- Llevar a cabo acciones de mantenimiento periódicas y programar en el tiempo su repetición.
- Realizar las maniobras para un adecuado llenado de la tubería de presión.

- Saber regular la cantidad de agua necesaria en la bocatoma y en la cámara de carga.
- Realizar inspecciones en los diferentes componentes de la PCH para la detección de fallas o posible ocurrencia de falla.
- Saber proporcionar primeros auxilios, en caso de accidentes.

Adicionalmente, el operador debe contar con la capacidad de realizar maniobras para el reparto de energía eléctrica y en caso de que la turbina esté acoplada a una máquina, maniobrar sobre la turbina de acuerdo a los requerimientos de potencia de la máquina acoplada; saber instalar y hacer reparaciones eléctricas menores en tomas de corriente eléctrica, fusibles, focos e interruptores.

Se resumen las principales actividades a realizarse en un programa de mantenimiento de las obras civiles:

- Sellado de fugas y reparación del canal.
- Limpieza barraje colector de bocatoma.
- Limpieza rejilla en cámara de carga.
- Inspección de barraje de derivación.
- Inspección de existencia de piedras y lodo en bocatoma.
- Inspección de estado de compuerta de regulación.
- Inspección de estado bocatoma, canal y desarenador
- Limpieza del tanque desarenador.
- Inspección de compuertas en la cámara de carga.
- Limpieza del canal.
- Inspección de zonas susceptibles de derrumbes.
- Inspección de filtraciones en la tubería presión.

## **BIBLIOGRAFÍA**

European Hydropower Association. Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. 2006. 310 p.

López Cualla, Ricardo Alfredo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. 2 ed. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería. 546 p.

Ortiz Flórez, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. Bogotá D.C, Nomos S.A. 357 p.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grados y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá D.C. ICONTEC, 2008. 42 p. NTC 1486.