

# 10 MANEJO DEL CAUDAL DE AGUA

- 10.1 La Obra de Toma
- 10.2 Canales
- 10.3 Cámaras de Carga
- 10.5 Reservorios

## 10.1 La Obra de Toma

La obra de toma de un sistema pico hidro puede ser una obra bien sencilla y de bajo costo. Se favorecen tomas no-permanentes sobre las represas formales, debido a sus bajos costos y mayor flexibilidad. El efecto de inundaciones siempre tiene que tomarse en cuenta cuando se diseña la obra de toma.

Obra de toma hecha de tubería - para caudales relativamente grandes

Muchas veces es suficiente colocar piedras grandes para desviar parte del caudal de un río hacia un canal sencillo o una sección enterrada de tubería, a como se demuestra en la Figura 10.1. Con este diseño tan sencillo y barato, el daño causado por inundaciones y tormentas puede ser reparado con materiales disponibles en la vecindad. Se deberá construir con cuidado para evitar daños frecuentes y muchas reparaciones. A veces se requiere una tubería bastante larga para asegurar el desnivel adecuado entre la boca de entrada y la salida hacia el canal. Es más fácil trabajar con tubería flexible que con tubería rígida, y se deberá anclar el tubo en el río utilizando piedras grandes. La boca del tubo deberá ser elevada un poco por encima del lecho del río, para evitar la entrada de sedimentos y basura que podrían obstruir el flujo del agua.

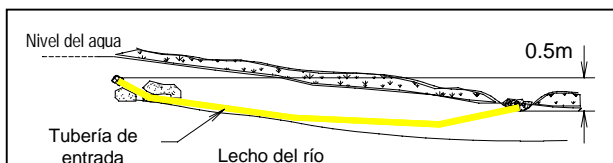


Figura 10-1 La toma más sencilla consiste en un tramo de tubería anclada en el río

Represa - para sitios con caudales pequeños

Se puede construir una pequeña presa de concreto para asegurar la captación de toda el agua disponible en la temporada seca. Esta puede ser la solución más práctica en ciertos sitios. La tubería flexible queda empotrada en el concreto de la presa. Los cimientos y estribos laterales de la presa deberán estar bien contruidos sobre roca firme, para evitar filtraciones de agua que podrían, con el tiempo, erosionar y socavar la estructura de la presa.

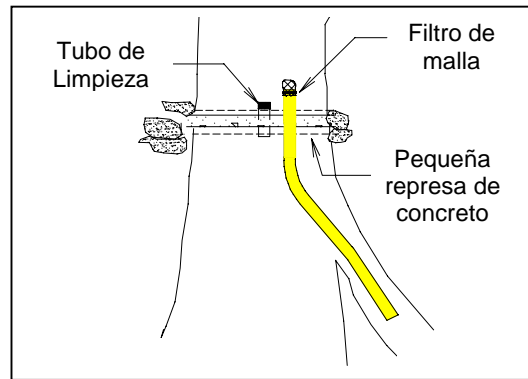


Figura 10-1 Una obra de toma que incluye una pequeña presa de concreto, es útil cuando hay caudales muy pequeños durante la temporada seca

## Construcción de Pequeñas Presas de Concreto

La forma recomendada y proporciones de pequeñas presas de concreto o mampostería son las que se demuestran en la Figura 10-3. Frecuentemente se pueden utilizar piedras grandes pegadas con mezcla de cemento. La resistencia mecánica de la estructura se mejora sustancialmente cuando se utiliza un gabión. El gabión es una jaula de malla de alambre que amarra y unifica la estructura. Es particularmente útil donde ocurran corrientes fuertes. La malla que se utiliza es usualmente de alambre de 2 o 3mm de diámetro, con aperturas de 50mm o hasta 100mm.

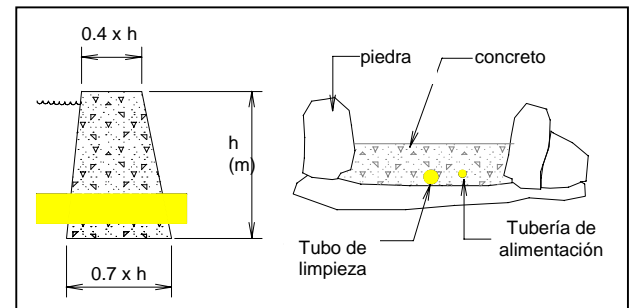


Figura 10-3 Las proporciones recomendadas para una pequeña presa / vertedero.



Figura 10-4 Se puede utilizar una represa/vertedero de concreto para formar un pequeño reservorio (Nepal).

Filtros

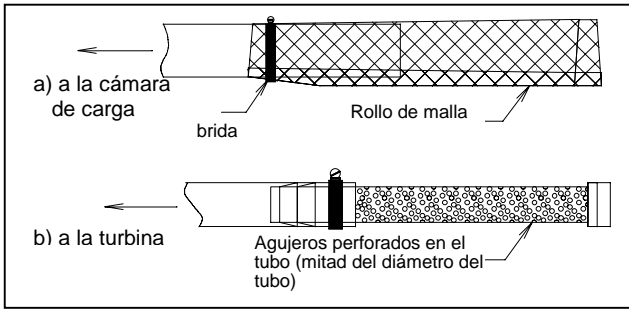


Figura 10-5 Diseños de Filtro para a) obra de toma y b) tubería forzada

Se requieren de filtros para evitar que las tuberías utilizadas en las centrales pico hidro se obstruyan con sedimentos, madera y hojas. Las dos situaciones en las cuales se requerirá de un filtro son:

1. en la toma que tiene un tubo que conduce el agua hacia un canal, cámara de presión o reservorio a como se ilustra arriba.
2. en la entrada a la tubería forzada (ver Section 11).

Para el caso primero, el tamaño de los agujeros del filtro no importa. La única consideración es como prevenir que se obstruya el tubo. Se puede hacer un filtro de malla metálica enrollada en forma tubular. Se puede sujetar el tubo de malla a la tubería PVC por ejemplo con una brida para manguera. En el segundo caso, cuando el filtro esté ubicado en la boca de la tubería forzada, es importante que los agujeros sean más pequeños que la apertura de la tobera de la turbina. Como regla, el diámetro de los agujeros del filtro deberían ser aproximadamente la mitad del diámetro de la tobera de la turbina, para asegurar que objetos que entren a la tubería forzada no causarán bloqueos de la tobera. (En caso de una obstrucción de la tobera, hay peligro que la tubería forzada explote por la repentina subida de presión.) Un filtro con hoyos pequeños puede hacerse de un tramo de tubo plástico o metálico, tapado a un extremo. Se perforan una gran cantidad de agujeros con una broca del diámetro adecuado. Es importante que el área total de los agujeros sea mayor que el área seccional del tubo, para asegurar la entrada al tubo de un caudal suficiente de agua. El tubo perforado se conecta a la tubería forzada mediante una unión roscada o una brida que garantiza un sello hermético.

10.2 Canales



Figura 10-6 Un canal instalado sobre terreno difícil abastece a una pequeña planta hidroeléctrica (Peru)

Un canal puede ser una manera barata de conducir el agua desde la fuente hacia un sitio más favorable para la toma de la tubería forzada. Para algunas plantas pico hidro, el canal puede mejorar la viabilidad económica del proyecto porque disminuye la longitud de la tubería forzada y de los cables eléctricos requeridos. En otros casos el canal es una obra cara que puede implicar futuros gastos en mantenimiento debido a fugas de agua, erosión del suelo, y deslizamientos del terreno.

El uso de un canal y la selección de la ruta para un canal, son decisiones que deberán de considerarse con cuidado. Los factores de importancia son:

- Experiencia local con la construcción y manejo de sistemas de transporte de agua parecidas, por ejemplo con canales para irrigación.
- Disponibilidad de mano de obra barata o gratis para la excavación y posterior mantenimiento del canal.
- Tipos de suelo, requerimientos de revestimiento, y el costo de transporte de materiales como el cemento.
- Costos de otras alternativas como por ejemplo una tubería forzada más larga / cable de distribución eléctrica más larga, comparados con el costo del canal. El uso de tubería de baja presión para conducir el agua hasta la toma de la tubería forzada puede ser una alternativa más barata.
- ¿ Podrá el canal servir un doble propósito, sirviendo para riego durante la temporada seca además de su función en suplir agua a la turbina ?
- ¿ Hay canales ya existentes (o abandonados), que podrían ser aprovechados?

Revestir el canal con concreto o mampostería aumentará su confiabilidad. Pero también aumentará considerablemente los costos. En muchas áreas alejadas, el revestimiento no será práctico debido a la dificultad de transportar los materiales. El revestimiento de un canal también aumenta su eficiencia hidráulica porque el agua

puede fluir a velocidades más altas sin erosionar los bordes, por ende se pueden reducir el ancho y el alto de un canal que tenga revestimiento (ver Tabla 10-1).

### 10.3 Diseño de Canales

El caudal del agua fluyendo por un canal depende de:

- La velocidad del agua
- El área seccional del agua

La ecuación del caudal es

$$Q = vA$$

donde:

Q = caudal (m<sup>3</sup>/s)

(multiplicar por 1000 para caudal en litros por segundo)

v = velocidad (m/s)

A = Area seccional del agua (m<sup>2</sup>)

1. La velocidad del agua fluyendo en el canal (v) depende del declive del canal y de la 'rugosidad' del material de revestimiento.

La velocidad tiene un límite superior, para cada tipo de material de revestimiento. A velocidades mayores de este límite, los lados del canal erosionarían rápidamente.

Material del canal	Velocidad máxima permisible para evitar la erosión, en canales de poca profundidad
Suelo arenoso	0.4 m/s
Suelo arcilloso	0.6 m/s
Concreto / mampostería	1.5 m/s

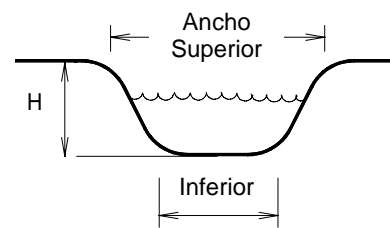
Tabla 10-1 Límites de velocidad para canales vadosos (profundidades menores de 0.3m)

De la Tabla 10-1 se aprecia que un buen revestimiento aumenta considerablemente la velocidad máxima permisible del agua. Cuando el agua contiene sedimentos, también hay un límite inferior a la velocidad, siendo de 0.3 m/s. Se respeta este límite inferior para prevenir que los sedimentos se depositen a lo largo del canal, causando obstrucciones. En caso que el agua esté siempre libre de sedimentos, este límite inferior no tiene importancia. Una velocidad baja significa un diseño con poco declive. Las dimensiones de canales dadas en la Tabla 10-2 han sido calculadas utilizando una velocidad de diseño de 0.3 m/s. Eso permite tener pérdidas de desnivel reducidas, y maximiza el desnivel disponible para la tubería forzada.

En los siguientes ejemplos de cálculos de dimensiones de canales, se supone una rugosidad de 0.07, la cual es apropiada para un canal de poca profundidad con algo de vegetación. Las raíces de la vegetación que crece a lo largo del canal causan cierta fricción, pero son útiles porque ayudan a sostener los lados del canal.

### 2. Diseño del área seccional del canal (A)

Naturalmente, el área seccional del canal debe ser mayor que el área seccional del agua necesaria para proporcionar el caudal requerido. La altura adicional del canal (a la que se le refiere como "borde franco") es usualmente de aproximadamente el 30%. Esto reduce el riesgo de daño a las paredes del canal si se desbordara. Los lados de un canal de tierra deberán de ser recostados hacia afuera. Eso reduce el riesgo de colapso de las paredes por erosión. Es posible construir un canal con paredes verticales, si el canal está reforzado con revestimiento de concreto o mampostería. En este caso el ancho inferior y superior del canal serían lo mismo. Sin embargo los revestimientos son caros, y raras veces son rentables para proyectos pico hidro.



Para simplificar el proceso de diseño de canales, las dimensiones apropiadas para el área seccional correspondientes a diversos caudales, están dadas en la siguiente tabla. Las "pérdidas de carga" son las pérdidas por cada 100 metros de longitud del canal. Si la longitud requerida del canal es de 200m, entonces se multiplicarían las pérdidas de carga por un factor de 2, y se construiría el canal con este desnivel total sobre el largo total del canal.

	Material del Canal y dimensiones mínimas		
	Suelo arenoso	Suelo arcilloso	Concreto/ mampostería
<b>10 l/s</b>			
Altura H	13 cm	15 cm	15 cm
Ancho Superior	59 cm	44 cm	29 cm
Ancho Inferior	6 cm	13 cm	29 cm
Pérdidas de carga por 100m longitud	1.6 m	1.3 m	1.4 m
<b>20 l/s</b>			
Altura H	19 cm	22 cm	21 cm
Ancho Superior	84 cm	62 cm	42 cm
Ancho Inferior	9 cm	18 cm	42 cm
Pérdidas de carga por 100m longitud	1.0 m	0.8 m	0.9 m
<b>30 l/s</b>			
Altura H	23 cm	27 cm	25 cm
Ancho Superior	103 cm	75 cm	51 cm
Ancho Inferior	11cm	22 cm	51 cm
Pérdidas de carga por 100m longitud	0.8 m	0.6 m	0.7m

Tabla 10-2 Dimensiones mínimas apropiadas para canales, para diversos caudales y materiales de revestimiento

### Infiltración

Los canales de tierra pierden una porción significativa del agua debido a infiltraciones. En tierras arenosas se prevén pérdidas de por lo menos el 5% por infiltración, por cada 100 metros de longitud del canal (es decir 0.5 l/s de pérdidas si el caudal es de 10 l/s)

Con tal que haya suficiente agua disponible, vale la pena dimensionar el canal para un caudal mayor del requerido por la turbina. Suponer que se requerirá de 10%-20% de caudal adicional. Eso compensará pérdidas por algunas fugas pequeñas que hay, además de las pérdidas por infiltración. A veces el agua fluyendo por el canal tendrá múltiples propósitos, como para riego o uso domiciliar. Estos requerimientos deberán de tomarse en cuenta durante la fase de diseño del canal.

### Construcción de Canales.

La ruta del canal deberá de escogerse con cuidado. Se intenta evitar rutas que pasen por ciertos tipos de terrenos, como:

- Tierras excesivamente porosas
- Areas rocosas donde serán imposibles las excavaciones
- Pendientes muy fuertes o inestables

En tierras porosas, puede ser posible sellar el canal con revestimiento de arcilla o de concreto. Las áreas rocosas realmente no tienen remedio y deberían de evitarse. Los tramos de pendientes fuertes y cruzadas de arroyos son difíciles, pero en muchas áreas rurales la gente ha encontrado formas de superar estos obstáculos. Se han construido canales en algunos lugares verdaderamente difíciles (ver Figura 10-6 y Figura 10-9). Estos requieren de planificación cuidadosa, motivación y persistencia, pero no necesariamente incurren grandes gastos de dinero.



Figura 10-7 Un tramo de tubería entre dos tramos de canales, puede solucionar la cruzada de un arroyo. El tubo se ancla en cada extremo con piedras.

En las cruzadas de arroyos, es particularmente importante dejar suficiente altura para permitir desalojo de las aguas de tormentas que de otra manera podrían destruir las paredes de un canal de tierra. Tramos cortos de tubo (Figura 10-7) o acueductos pequeños de madera (Figure 10-8) pueden servir para superar estas pasadas difíciles.



Figure 10-8 Un acueducto de madera sirve para conducir el agua a través de terreno disperejo

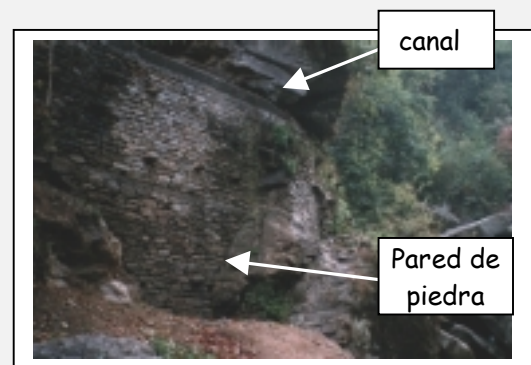


Figura 10-9 y Figura 10-10 demuestran un canal elevado que corre sobre un peinazo angosto, debajo de un paredón de roca. El canal tiene revestimiento de mampostería y está apoyado desde abajo sobre una pared alta hecha de piedras.

### Tubería de Baja Presión

Una alternativa para la conducción de agua hacia la boca de la tubería forzada, es el uso de tubería plástica de baja presión. Este tipo de tubería está disponible en algunos países, vendido como tubería de drenaje. Las tuberías de baja presión son más baratas que las tuberías para tubería forzada, visto que las paredes son más delgadas. Frecuentemente es una alternativa más barata que el canal revestido.



Figura 10-11 Tubería de drenaje

Requiere considerarse el diámetro óptimo y el declive del tubo de drenaje, visto que éstos afectan el caudal y las pérdidas de carga. Ver Sección 11.

### 10.4 Cámaras de Carga



Figura 10-12 Una cámara de carga pequeña es apropiada para sitios donde hay suficiente caudal todo el año

La cámara de carga (o cámara de presión) proporciona suficiente profundidad para garantizar que la boca de la tubería forzada esté siempre cubierta de agua. En algunos casos la tubería forzada está instalada directamente en la obra de toma de la captación de agua, y no se requiere de una cámara de carga. Se requiere de la cámara de carga cuando se utiliza un canal o cuando se recoge agua de más de una fuente.

El diseño de la cámara de carga varía dependiendo de varios factores, tales como:

- accesibilidad del lugar
- disponibilidad de materiales de construcción
- tipo de suelo
- costos de mano de obra calificada y no-calificada

Sin embargo, se recomienda que cualquier diseño incluya provisiones para el rebose de agua y para la limpieza de sedimentos del fondo del tanque.

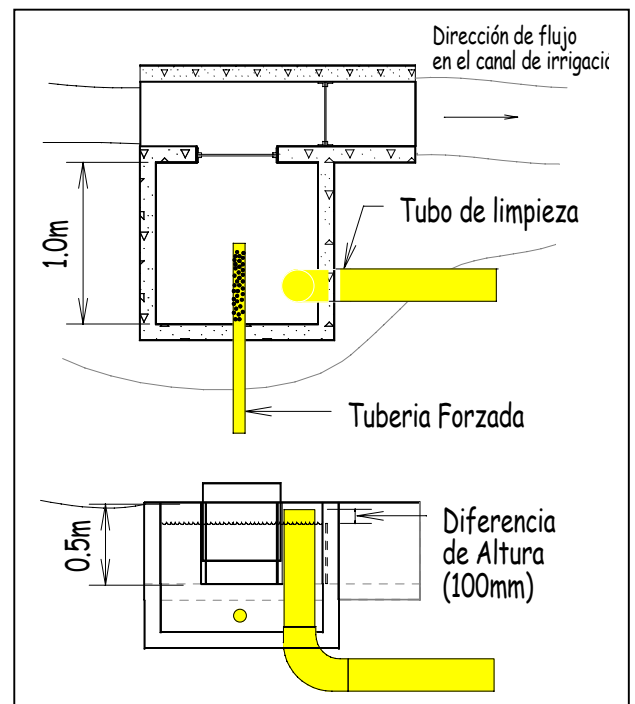


Figura 10-13 Diseño recomendado de una cámara de carga alimentado desde un canal de irrigación.

### Profundidad del Agua

La profundidad del agua en la cámara de carga deberá ser suficiente para cubrir la boca de la tubería forzada hasta 4 veces el diámetro del tubo. Deberá de dejarse espacio por debajo de la boca del tubo, equivalente a un diámetro.

### Ejemplo

¿ A qué profundidad deberá estar el rebose de la cámara de carga, cuando la tubería forzada tiene un diámetro de 75mm ?

Respuesta

Profundidad sobre la tubería =  $4 \times 75 = 300\text{mm}$

Profundidad debajo de la tubería = 75mm

Diámetro de la tubería = 75mm

Por lo tanto la altura aproximada desde el piso del tanque hasta elrebose

$$= 300 + 75 + 75 = 450\text{mm}$$

### Sedimentos

Visto que el agua en la cámara de carga fluye muy lentamente, el sedimento cae al fondo donde forma una capa gruesa de lodo. Si se deja acumular demasiado tiempo, los sedimentos pueden obstruir la tubería. Sistemas hidros más grandes a menudo tienen lagunas de sedimentación para eliminar los sedimentos. Eso no es necesario en los sistemas pico hidro, con tal que se incluya una compuerta de limpieza o tubo de limpieza en el diseño de la cámara de carga (ver Figura 10-13). para facilitar la limpieza del lodo del fondo del tanque.

### Rebose

En caso de llenarse la cámara de carga, es importante que el agua pueda derramarse sin causar daños. El rebose puede ser una melladura o canaleta cortada en la pared más baja de la cámara de carga (ver Figura 10-15). Una alternativa es el uso de un tubo que sirve como rebose y también para drenaje y limpieza. Eso se ve en la Figura 10.13.

Se quita el tubo vertical del codo para drenar y limpiar el tanque. Este ejemplo muestra una cámara de carga alimentada de un canal de irrigación, aunque el agua igualmente podría provenir de una línea de tubería de baja presión. Se desvía el agua hacia la cámara de carga cuando se requiera, y cuando no se requiera el agua sigue fluyendo por el canal. Cualquier método que se utiliza para el rebose, siempre se dirige el agua rebosada hacia un arroyo o zanja donde no erosione el terreno.

### Construcción de la Cámara de Carga

Con tal que haya mano de obra disponible, la construcción de una pequeña cámara de carga con piedras y arcilla no es cara. Es más fácil anclar la boca de la tubería forzada cuando se utilicen piedras en la construcción de las paredes. Si la cámara de carga tiende en rebosar con

frecuencia, paredes de arcilla se erosionarían, requiriendo de muchas reparaciones.

Se utilizan cemento y piedras para construir cámaras de carga de mayor durabilidad. En la Figura 10-14 se demuestra un método para cimentar piedras o ladrillos para revestir una cámara de carga, un canal, o un reservorio

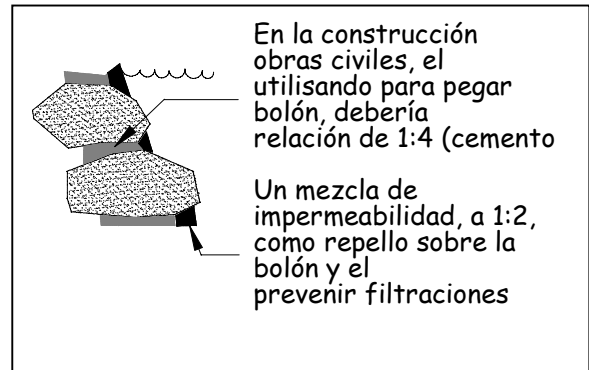


Figura 10-14 Técnica de mampostería para obras civiles de pico centrales hidros



Figura 10-15 Construcción de una cámara de carga (Kushadevi, Nepal)



Figura 10-16 El flujo del agua hacia la cámara de carga es controlado por una compuerta. Se ha hecho una canaleta de rebose en la pared de cuesta abajo para que el agua sobrante se retorne al arroyo sin socavar la mampostería. Un tubo de drenaje y limpieza, sellado con un tapón de madera, ha sido incorporado en la parte más baja del fondo del tanque.

### 10.5 Reservorios



Figura 10-17 Un pequeño reservorio proporciona almacenaje de energía a bajo costo, que puede ser útil durante la temporada seca. (Sankhuwa Sava, Eastern Nepal)

En caso que el caudal en temporada seca sea inadecuada para operar la turbina de manera continua, se puede ampliar la cámara de presión para formar un pequeño reservorio. Por ejemplo, el agua puede almacenarse durante el día y la noche cuando la turbina no esté operando continuamente, para utilizarse al anochecer para el alumbrado.

Capacidad de almacenamiento de agua puede ser útil para dar mayor flexibilidad y seguridad al proyecto, en los siguientes casos:

- 1) Cuando se recoge agua de varias fuentes, de las cuales algunas sean intermitentes.
- 2) Cuando se utiliza el agua para otros propósitos como para irrigación.

Los requerimientos de volumen de almacenamiento se calculan fácilmente si se conoce el caudal requerido por la turbina y el caudal mínimo de las fuentes. El fabricante deberá suplir la información pertinente al caudal requerido por la turbina. Se dimensiona la cámara de presión conforme el caudal mínimo esperado. El caudal mínimo deberá medirse durante la temporada más seca del año mediante uno de los métodos descritos en la Section 7. O se deberá estimar en base a la experiencia local.

#### Ejemplo : Capacidad de Almacenamiento de un Reservorio

Una turbina y generador de 1.5kW han sido seleccionados para un sitio en la parte Oeste de Nepal, descrito en el ejemplo de la página 7-1. El desnivel ha sido medido, encontrándose 70 metros netos (ya tomadas en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería forzada).

Para generar la potencia correspondiente, con este desnivel neto, el fabricante recomienda un caudal de 5 litros por segundo. Se han realizado aforos de otros arroyos cercanos a la aldea en el

tiempo más seco del año, después de varias semanas sin lluvia, encontrándose solamente 2 litros por segundo. Este también es el caudal mínimo que ha sido observado en el arroyo del proyecto, según los observadores locales (se consideran las observaciones confiables hasta 10 años atrás). Durante el resto del año, sin embargo, hay caudal disponible en exceso a los 5 l/s. Se requerirá de almacenamiento durante la temporada seca para permitir que el proyecto supla de electricidad a la aldea durante 5 horas para alumbrado en la noche y para suplir dos horas de potencia mecánica para operar una sierra en el taller cada mañana.

¿ Cuánta es la capacidad requerida del reservorio ?

Caudal durante la temporada más seca = 2 l/s  
 Caudal a la tubería forzada = 5 l/s  
 Período máximo de operación = 5 hras  
 Faltante de agua durante este período  
 = 5 - 2 = 3 litros por segundo

El reservorio deberá tener suficiente capacidad para suplir 3 litros por segundo durante el período de operación.

Volumen de almacenamiento requerido:

5hras = 5 x 60 x 60  
 = 18000 segundos

Volumen = 18000 s x 3 litros por segundo  
 = 54000 litros o = 54 m<sup>3</sup>  
 (1 metro cúbico = 1000 litros)

¿ Cuales son las dimensiones que deberá tener el reservorio para dar la capacidad de almacenamiento de los 54 m<sup>3</sup>?

Se dejará el reservorio llenandose durante la noche para poder operar la sierra en la mañana.

El terreno es rocoso en el sitio propuesto para el reservorio y no es factible excavar a profundidades mayores de 1.5 m. Entonces las dimensiones apropiadas serán 1.5 metros de profundidad x 6 metros de ancho x 6 metros de longitud.  
 $1.5 \times 6 \times 6 = 54 \text{ m}^3$

Una alternativa para esta aldea es traer agua adicional al reservorio desde un manantial a cierta distancia. Pueden conducir aproximadamente 1 litro por segundo utilizando una tubería barata desde el manantial durante la temporada seca. En este caso, ¿cuál sería la capacidad de almacenamiento requerido ?

[Respuesta = 36 m<sup>3</sup> , por lo cual las dimensiones apropiadas serían 1.5m x 6m x 4m]