

#### 4.4 CÁMARA DE CARGA

##### 4.4.1 Volumen de almacenamiento

La cámara de carga se diseñará de modo que su volumen sea suficiente como para almacenar el caudal que sigue entrando en el canal, entre la parada de las turbinas y el cierre total de las compuertas de la toma, y el volumen de agua existente en el canal por encima de la elevación máxima normal de la cámara de carga (nivel elástico).

De manera aproximada se comprobará cuánto tiempo tarda una partícula de agua en llegar desde la toma hasta la cámara de carga, y después se calculará el volumen necesario para almacenar la cantidad de agua que circula durante ese tiempo considerando el caudal de diseño. Puesto que se tienen dos tramos con secciones distintas, se calculará separadamente cuánto tiempo tarda una partícula de agua en recorrer cada uno de los dos tramos y luego se sumarán, obteniendo así el tiempo total que tarda el agua en llegar desde la toma hasta la cámara.

Para cada tramo se comenzará calculando la altura normal asociada al canal existente, partiendo de la ecuación de Manning. En segundo lugar se calculará la velocidad normal correspondiente a dicha altura, y por último el tiempo que tarda en recorrer dicho tramo.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} \times (R_h)^{\frac{2}{3}} \times l^{\frac{1}{2}}$$

Puesto que el rango del caudal de diseño es  $0,7-0,9m^3/s$ , se diseñará la cámara de carga para un caudal de  $0,7m^3/s$  y  $0,9m^3/s$  separadamente. Finalmente se escogerá el diseño que implique un mayor volumen de almacenaje. Resulta difícil predecir cuál de los dos caudales implica un mayor volumen de almacenaje, puesto que por un lado cuanto más agua circule, menos tiempo tardará dicha agua en llegar a la cámara de carga, y siguiendo el criterio de diseño descrito al inicio, cuanto menos tarde el agua en llegar a la cámara, menos agua tendrá que almacenar. Por otro lado, cuanto más agua circule, dicha cámara de carga se llenará más rápidamente.

Se comenzarán los cálculos suponiendo un caudal de  $0,7m^3/s$ . En función de la altura normal asociada al canal  $h_n$ , la expresión anterior queda de la siguiente manera para el

Tramo 1:

$$Q = \frac{D_o^2}{8} \times (\theta - \text{Sen}\theta) \times \frac{1}{n} \times \left( \frac{D_o}{4} \times \left( 1 - \frac{\text{Sen}\theta}{\theta} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- $Q(m^3/s) = 0,7 m^3/s$
- $n(adimensional) = 0,011$  para tubería Rib Loc<sup>1</sup>.
- $I(adimensional) = 0,001$
- $Do(m) = 1,1$
- $Y(m)$ : Calado

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$0,7 = \frac{1,1^2}{8} \times (\theta - \text{Sen}(\theta)) \times \frac{1}{0,011} \times \left( \frac{1,1}{4} \times \left( 1 - \frac{\text{Sen}(\theta)}{\theta} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \times 0,001^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta = 4,29 \text{ rad}$$

$$\theta = 2 \times \arccos \left( 1 - \frac{Y}{Do/2} \right)$$

$$\frac{Y}{Do} = \% \text{ llenado}$$

$$4,29 = 2 \times \arccos \left( 1 - \frac{1,1 \times (\% \text{ llenado})}{0,4} \right)$$

$$\% \text{ llenado} \approx 56,17 \%$$

---

<sup>1</sup> Según la Normativa para Obras de Saneamiento de la ciudad de Valencia (Año 2004), debería tomarse un Coeficiente de Manning de 0,010. Se ha decidido incrementar a 0,011 para estar del lado de la seguridad.

$$\frac{Y}{1,1} = 0,5617 ; Y = 0,617 \text{ m}$$

$$V_{T1} = \frac{1}{n} \times \left( \frac{D_o}{4} \times \left( 1 - \frac{\text{Sen}\theta}{\theta} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{T1} = \frac{1}{0,011} \times \left( \frac{1,1}{4} \times \left( 1 - \frac{\text{Sen}(4,29)}{4,29} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \times 0,001^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{T1} = 1,2736 \text{ m/s}$$

$$L_1 = 280 \text{ m}$$

$$T_{t2} = \frac{L_{T2}}{V_{T2}} = \frac{280}{1,2736} = 219,85 \text{ s}$$

Por último, para el tramo 2:

- $Q(\text{m}^3/\text{s}) = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- $n(\text{adimensional})$ : Puesto que el material del canal será hormigón, se tomará un valor de 0,015.
- $I(\text{adimensional}) = 0,001 \text{ m/m}$ .
- $Z$  (Talud pared vertical) =  $1H/5V = 0,2$
- $B$  (ancho de la solera) =  $1,2 \text{ m}$
- $h$  (m): Altura de la lámina de agua.

La fórmula de Manning para una sección trapezoidal puede expresarse en función de la altura del canal y el ancho de la solera:

$$Q = A \times \frac{1}{n} \times (R_h)^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$$A = (B + Z \times h) \times h$$

$$R_h = \frac{(B + Z \times h) \times h}{B + 2 \times h \times \sqrt{Z^2 + 1}}$$

Sustituyendo:

$$0,7 = (1,2 + 0,2 \times h) \times h \times \frac{1}{0,015} \times \left( \frac{(1,2 + 0,2 \times h) \times h}{1,2 + 2 \times h \times \sqrt{0,2^2 + 1}} \right)^{\frac{2}{3}} \times 0,001^{\frac{1}{2}}$$

$$h_{nT3} = 0,552 \text{ m}$$

A continuación se calcula el tiempo que tarda el agua en recorrer el tramo 3:

$$V_{T3} = \frac{Q}{A} = \frac{0,7}{(1,2 + 0,2 \times 0,552) \times 0,552} = 0,9677 \text{ m/s}$$

$$L_{T3} = 1040 \text{ m}$$

$$T_{t3} = \frac{L_{T3}}{V_{T3}} = \frac{1040}{0,9677} = 1074,71 \text{ s}$$

De tal modo que, el tiempo total que tarda el agua en llegar desde la toma hasta la cámara para un caudal de  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  es:

$$T_{t1} + T_{t2} = 219,85 + 1074,71 = 1294,56 \text{ s} \approx 22 \text{ minutos}$$

Los  $\text{m}^3$  necesarios de almacenaje de la cámara de carga serán:

$$1294,56 \text{ (s)} \times 0,7 \text{ (m}^3/\text{s)} = 906 \text{ m}^3$$



Si se repiten los mismos cálculos anteriores para un caudal de  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ , se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} V_{T1} &= 1,344 \text{ m/s} ; T_{t1} = 208,33 \text{ s} \\ V_{T2} &= 1,034 \text{ m/s} ; T_{t3} = 1005,8 \text{ s} \\ T_{t1} + T_{t2} &= 208,33 + 1005,8 = 1214,13 \approx 20 \text{ minutos} \\ 1214,13 \times 0,9 &= 1092 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Puesto que  $1092 \text{ m}^3 > 906 \text{ m}^3$ , la cámara de carga deberá ser capaz de almacenar  $1092 \text{ m}^3$  de agua, o lo que es lo mismo,  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 20 minutos.

#### 4.4.2 Diseño

Según el manual de pequeña hidráulica<sup>2</sup>, el cambio de una sección prismática en la rejilla a otra circular en la tubería forzada puede producir vórtices que afecten al funcionamiento de las turbinas. Los criterios para evitar dicha vorticidad no están bien definidos; su formación suele asociarse a la orientación y la profundidad de la toma bajo el agua; mientras más profunda esté la entrada a la tubería y cuanto mayor sea la simetría del flujo en la toma, habrá menos posibilidad de que se formen.

Según Gulliver, Rindels y Lindblom<sup>3</sup> no es previsible que se formen vórtices cuando:

$$\begin{aligned} S &> 0,7 \times D \\ N_F &= \frac{V}{\sqrt{g \times D}} < 0,5 \end{aligned}$$

Siendo  $S$  la profundidad a la que se encuentra la tubería sobre el nivel del agua en la cámara de carga, y  $N_F$  el número de Froude.

Tal y como se aconseja en el manual mencionado anteriormente, si al poner en marcha la planta se observa la formación de vórtices cuando ya no se puede variar la inmersión de

<sup>2</sup> Celso Penche, Manual de Pequeña Hidráulica (1998), 122. (Versión actualizada de "Layman's Handbook on how to develop a Small Hydro Syte", publicado en 1993 por la Dirección General de Energía de la Comisión de las comunidades Europeas).

<sup>3</sup> En los trabajos de 1986 llevados a cabo en los laboratorios de St Anthony Falls.

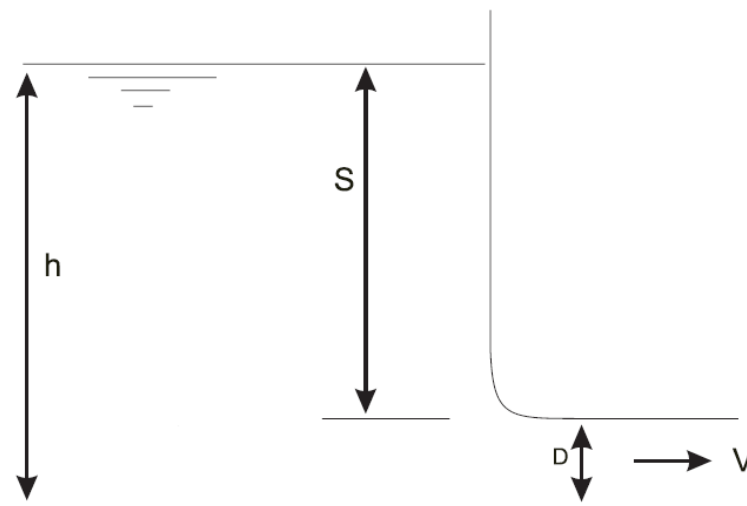
la tubería ni aumentar su diámetro, la situación se puede mejorar colocando una plataforma semi-flotante de madera por encima de la entrada.

Los criterios seguidos para el diseño de la cámara de carga son los siguientes:

- Se ha tenido en cuenta el volumen de almacenaje necesario calculado en el anejo 4.4.1:  $1092 \text{ m}^3$
- La parte inferior de la tubería se colocará 30 cm por encima de la losa inferior de la cámara de carga, para evitar la entrada de posibles sedimentos.
- Para evitar la formación de vórtices y cavitación la inmersión de la tubería será un valor por encima de 0,7 veces el diámetro.

Por lo tanto, la profundidad del agua en la cámara de carga será como mínimo:

$$S = 0,3 + 0,8 + 0,7 \times 0,8 + 0,4 = 1,66 \text{ m}$$



*Figura 19 – Esquema de la profundidad mínima del agua en cámara de carga*

Además, se colocarán 40 cm de resguardo; este resguardo será la diferencia entre el máximo nivel del agua de la balsa y la coronación. El máximo nivel de la balsa de agua viene determinado por la cresta del aliviadero. Tal y como se explica en el apartado 2.6.5, se ha escogido colocar el mismo en el PK 0+851 del canal de derivación de la alternativa

propuesta, a unos 200 metros de distancia, puesto que es el punto más cercano a la acequia del molino donde se pretende verter el exceso de caudal derivado, de tal manera que se aproveche esta estructura actualmente en desuso, convirtiéndola así en un elemento de seguridad de la central hidroeléctrica. Puesto que el canal tiene una pendiente de 0,001 y el aliviadero dista 200 metros, habrá que recrecer 0,2 metros la altura y además los 40 cm de resguardo. Gráficamente:

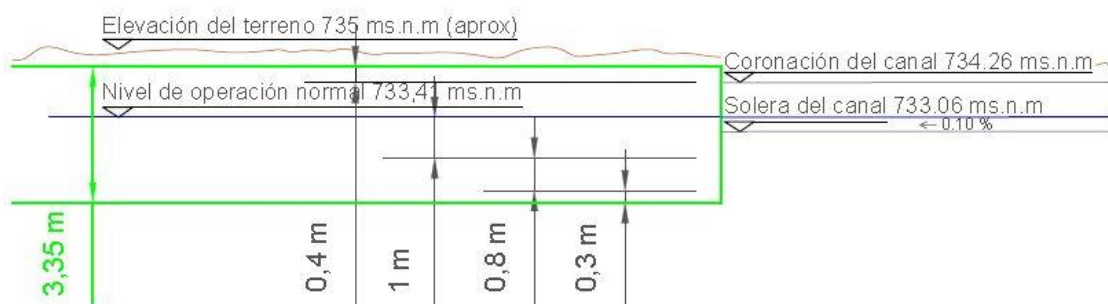


Figura 20 – Altura de la cámara de carga

Puesto que se dispone de espacio suficiente, se propone hacer un diseño tipo ‘basla de riego’ en vez de un diseñar una cámara de carga como si fuera un depósito de agua. De esta manera se excavará el terreno en función del ángulo de rozamiento del mismo hasta conseguir el volumen de almacenaje deseado. En la solera se colocarán 15 cm de hormigón y el resto se cubrirá con una capa de impermeabilización. Un aspecto positivo de esta solución es que, por el hecho de no tener que construir una estructura de hormigón resistente, las cargas transmitidas al terreno serán mucho menores. Además, puesto que la densidad del agua es menor a la del terreno natural que se excavará, cuando la cámara de carga se llene de agua, el peso resultante será inferior al inicial, por lo que no son esperables problemas de hundimiento. Tal y como se vio en el apartado 2.2.3, el terreno que se va a encontrar durante la excavación de toda la obra es una mezcla de gravas con arenas y arcillas. A partir de las tablas de factores de fricción de diferentes materiales publicados por “Fine, Software para Ingeniería Geotécnica”, para el caso de estudio se considera apropiado tomar un ángulo de rozamiento interno<sup>4</sup> de 30°, por lo tanto ésta será la inclinación máxima de los taludes.

<sup>4</sup> Relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de dicho material granular.

Puesto que la balsa tendrá una sección trapezoidal y su volumen de almacenaje debe de ser  $1092 \text{ m}^3$  sin contar con el resguardo, se pueden estimar sus dimensiones por tanteo con Excel y escoger las más adecuadas en función del espacio disponible:

Tomando una inclinación de los taludes 1:3 para una altura de agua de 2,5 m y un ancho de la solera de 5 m, la sección es:

$$5 \times 2,5 + 2,5 \times 7,5 = 31,25 \text{ m}^2$$

$$\frac{1092 \text{ m}^3}{31,25 \text{ m}^2} = 34,94 \text{ m}$$

Luego la longitud de la balsa es de 35 metros. Puesto que la altura de la cámara de carga tal y como se dijo en el apartado anterior, debe de ser de 3,35 m, hay que rectificar el ancho de los taludes y ahora estos serán de 10 m cada uno.

En resumen:

<b>Volumen de almacenaje</b>	$1092 \text{ m}^3$
<b>Inclinación del talud</b>	$\text{tg}(20,48^\circ) 1:3$
<b>Altura del agua en la balsa</b>	2,50 m
<b>Altura de la balsa</b>	3,35 m
<b>Ancho de cada talud</b>	10 m
<b>Ancho de la solera</b>	5 m
<b>Ancho total</b>	25 m
<b>Longitud de la cámara</b>	35 m

*Figura 21 – Diseño de la cámara de carga*