

# Diseño hidráulico óptimo y diseño estructural de obras de toma con galería y circulación forzada

## INTRODUCCIÓN

La obra de toma es esencial en las presas, porque sus estructuras permiten la regulación y control de extracciones de agua -eficientemente- para satisfacer las necesidades de la humanidad. Los problemas fundamentales al diseñar la obra de toma -sobre todo para un ingeniero novel- consisten en: la poca experiencia del proyectista en algunos casos y en otros la adopción de esquemas preconcebidos, son factores que pueden llevar a un diseño nada satisfactorio; también se tiene la repetición continua de cálculos laboriosos, hasta satisfacer el diseño en cuanto a seguridad, funcionalidad y economía; adicionalmente ocurre que en la literatura especializada es prácticamente imposible encontrar al menos un texto que brinde una orientación lógica de la forma de diseñar este tipo de estructuras, es decir, los conceptos están, pero dispersos, mientras que falta la guía para la imprescindible secuencia de cálculos. En este trabajo se exponen esquemas típicos, metodología y criterios que facilitan el diseño de las obras de toma con galería para presas y régimen de circulación forzada.

En las obras de toma existen tres tipos de estructuras para conducir el flujo desde la boca de entrada aguas arriba, hasta la descarga aguas abajo de la cortina de la presa y son canales abiertos, túneles y galerías (conductos soterrados) <sup>1,2</sup>. Los objetivos de este estudio serán referidos a galerías.

En esta categoría se tienen conducciones a través, debajo, o alrededor de la cortina, por medio de tuberías y/o galerías <sup>1</sup>. Si la cortina es de tipo rígido, sea mampostería o concreto (hormigón), se recomienda la conducción con conductoras metálicas embebidas en el cuerpo de la cortina; si es de tipo flexible, tierra y/o enrocamiento, de-

## Resumen / Abstract

*El presente trabajo expone una metodología para desarrollar diseños seguros y eficientes en este tipo de obras, teniendo gran aplicación en México y cualquier país. Es bien conocido por los proyectistas, la existencia de divulgaciones para hacer diseños generales apoyados en información dispersa e incompleta y en algunos casos con criterios inadecuados, resultando de ello incertidumbre, tardanza, ineficiencia y altos costos. Por tanto, en este artículo se proponen esquemas típicos para las obras de toma en cuanto a las diversas funciones que pueden tener, se analiza y define una metodología de diseño con rigor científico-técnico, incluyendo técnicas de optimización.*

*Palabras clave: Obras de toma, régimen de circulación forzada, diseño hidráulico, esquemas típicos.*

*This work presents a methodology allowing safe and efficient designs in this type of works, with wide application in Mexico and any other country. It is well known by practitioners the existence of procedures to make general designs based on disperse and incomplete information and in some cases with inadequate criteria, resulting in uncertainty, delay, inefficiency and high costs. Therefore, in this article typical schemes are proposed for outlet works as for the diverse functions that can have, is analyzed and defines a methodology of design with scientist-technical rigor, including optimization techniques.*

*Key Words: Outlet works, forced regime of circulation, hydraulic design, typical schemes.*

ben usarse galerías o también tuberías dentro de galerías para mantenimiento e inspección 1-3; por tanto, para cortinas flexibles se recomienda el uso de galerías en todos los casos, exceptuando las presas pequeñas justificadas económicamente, protegiendo de corrosión a la tubería metálica, embebiéndola en concreto 1-3.

Las presas de regulación de avenidas en general, no usan mecanismos de control en la extracción del agua a través de la obra de toma, mientras las de almacenamiento sí los usan porque ocupan regular los gastos de extracción dependiendo del uso del agua. La ubicación del control en la obra de toma es de suma importancia; los conductos sin mecanismos de control pueden funcionar con régimen de circulación libre o forzado, dependiendo de la forma en la entrada 1; si el régimen de circulación es forzado, la localización del control resulta de poca importancia 1,2,4. Así se tienen las siguientes características:

◆ **Régimen de circulación libre:** el análisis del flujo se rige por los principios usados en canales abiertos; el perfil longitudinal de la superficie libre del agua es determinado por la descarga, geometría, rugosidad y pendiente del conducto 4.

◆ **Régimen de circulación forzado:** el análisis del flujo establece la relación entre descarga-carga hidráulica y deduce presiones en lugares críticos; la carga hidráulica total es disminuida por las pérdidas debidas a fricción, locales y carga de velocidad cuando la salida de la conductora es a la atmósfera; los resultados se obtienen auxiliándose con la solución simultánea de la ecuación de continuidad y fórmulas de pérdidas de carga 4.

## ESQUEMAS TÍPICOS

El entorno social, medio ambiente y economía, producen gran influencia en el diseño de la obra de toma; por ello es importante conocer las diversas funciones que tienen 4:

◆ **Control de Avenidas:** la bocatoma se diseña con gran capacidad y el cierre para regulación de flujos resulta de poca importancia.

◆ **Navegación:** para uso recreativo, se aprovecha el almacenamiento de agua que posteriormente es liberado aguas abajo en descargas de baja capacidad.

◆ **Irrigación:** necesita controles para regular el flujo; normalmente son descargas más pequeñas que las de control de avenidas y se hacen a un canal o un conducto, con nivel superior al cauce de la corriente de agua.

◆ **Suministro de Agua a Población:** seguridad en el servicio y calidad de agua son de primordial importancia, por ello requiere entradas múltiples y selección de niveles en el vaso de almacenamiento.

◆ **Producción de Energía:** la obra de toma deberá producir la menor pérdida de energía posible y cuidar de acciones que puedan perjudicar la operación de las turbinas.

◆ **Requerimientos de Escaso Flujo:** para satisfacer objetivos del medio ambiente, suministro y derechos de agua, etc.; ello puede requerir entradas de múltiple nivel.

◆ **Desvíos:** pueden usarse en el desvío total o parcial

de la corriente de agua en su cauce, durante la construcción de la presa.

◆ **Vaciado del Vaso:** facilidad de descarga en bajo nivel, para vaciado del vaso en caso de reparación de la estructura, control del medio ambiente, o cambios en la reglamentación del cuerpo de agua almacenado.

◆ **Propósitos Múltiples:** se realiza la combinación de salidas en una misma estructura con propósito de usos múltiples, buscando economizar proyectos.

Los diversos aspectos socio-económicos, ambientalistas, etc., que influyen en la confección de un proyecto único y específico para resolver las necesidades particulares de una región, producen incontables obras de toma con gran diversidad de especificidades que sería imposible considerarlas todas para esquematizar prototipos; no obstante, agrupando las obras de toma por su operación hidráulica, funciones comunes y simplificando, se pueden formar los siguientes esquemas típicos.

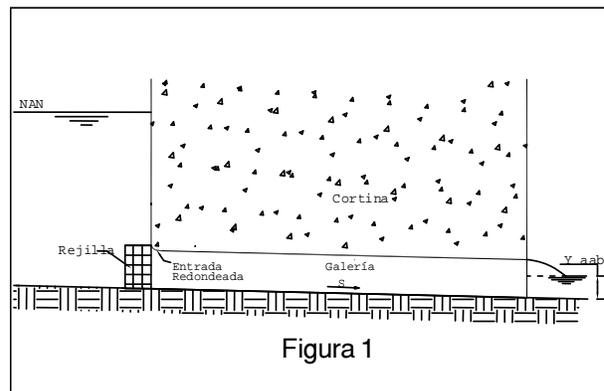


Figura 1

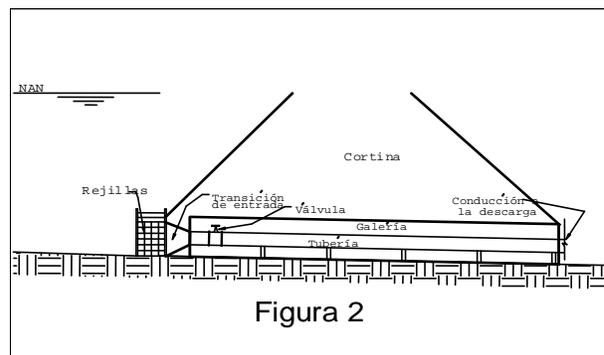


Figura 2

**Esquema 1-** Régimen de circulación forzado sin mecanismo de control: para requerimientos de escaso flujo; la galería trabaja llena, con entrada sumergida de aristas redondeadas y corta longitud. Ver Figura 1.

**Esquema 2-** Régimen de circulación forzado con mecanismo de control: para control de avenidas, navegación, irrigación, suministro de agua, producción de energía, desvíos, vaciado del vaso y propósitos múltiples; las tuberías o conductos, trabajan llenos y a presión en toda su longitud. Ver Figura 2.

## ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LOS ESQUEMAS PROPUESTOS

Las obras de toma del esquema típico uno consisten en general de una entrada vertical o inclinada, sección circular, cuadrada, rectangular, etc., conducto sencillo de pendiente uniforme, descarga libre o ahogada, cuyo funcionamiento depende de la localización del control hidráulico y características físicas, teniendo circulación libre en ocasiones -baja carga hidráulica- y circulación forzada como principal forma de trabajo. El control hidráulico puede localizarse en la entrada o la salida, dependiendo de la geometría en la entrada, su relación con la carga hidráulica y condiciones de escurrimiento a la salida. En el esquema típico dos, el control se logra mediante mecanismos; el funcionamiento hidráulico no depende de las características físicas, pero éstas sí, influyen en la descarga final; la circulación del flujo es forzada en todo momento.

El esquema típico uno requiere observar dos casos 1:

◆ 1a: Obra de toma con entrada redondeada, pendiente suave en la galería, control hidráulico a la salida, carga efectiva de  $HT - \Sigma$  pérdidas, y carga mínima en la entrada de  $H/D > 1,2$ . Si el nivel de la descarga provoca salida ahogada, el conducto funciona lleno en toda su longitud y por tanto su entrada se ahoga también. Al inicio, mientras funciona parcialmente lleno el conducto (sin cumplir la carga mínima), el régimen de circulación es subcrítico y su descarga es variable; al funcionar lleno, las relaciones carga-descarga se obtienen con Bernoulli, iniciando cálculos a la salida.

◆ 1b: Obra de toma con entrada redondeada, pendiente mayor a la crítica en la galería, control hidráulico a la salida, carga efectiva de  $HT - \Sigma$  pérdidas, y carga mínima en la entrada de  $H/D > 1,5$ . Mientras la carga hidráulica sea mayor a la mínima establecida, el conducto funciona estable a tubo lleno, ya sea descarga libre o ahogada y el gasto se obtiene mediante Bernoulli, iniciando cálculos a la salida.

Ambos casos, mientras no cumplan la relación  $H/D$  para el nivel mínimo de vaso establecido, tendrán un régimen de circulación libre con funcionamiento errático y descarga inestable. En el esquema típico dos, se tienen condiciones similares a las descritas para el esquema típico 1b, ubicándose el control donde son emplazados los mecanismos para ello.

## ANÁLISIS DE LA OBRA DE TOMA

La estructura de entrada a una obra de toma puede tener diversas formas dependiendo de las funciones que vaya a desempeñar, además puede servir de apoyo para alojar mecanismos de control, rejillas para basuras y peces, derivaciones, etc. De acuerdo al USBR 1 las **rejillas** para un conducto pequeño con válvulas de control, deben tener las barras muy juntas para eliminar pequeñas basu-

ras y si el conducto es grande con compuertas deslizantes (control) grandes, las barras pueden quedar más separadas, siempre y cuando el tipo de basuras pequeñas que pasan, no produzcan daños más adelante. Con la necesidad de cuidar la ecología, diversos investigadores<sup>5-7</sup> han propuesto soluciones a base de conductos especiales, cajones, rejillas inclinadas con tamiz chico, anteponiendo bloques a las rejas, etc., para resolver el problema de los peces. En rejillas inaccesibles para su limpieza, la velocidad a través de ellas debe estar entre un mínimo de 0,60 m/s y un máximo de 1,50 m/s<sup>1</sup>, tomando en cuenta para cuando es necesario retener objetos que puedan dañar turbinas, la colocación de tamices y en estos casos, la velocidad máxima debe ser de 0,90 a 1,20 m/s<sup>4</sup>. Cuando la separación entre barras de rejillas es grande-para retener troncos de árboles o ramas grandes-las pérdidas de carga no se evalúan y cuando no son tan grandes, pero mayores que 15cm de vano entre ellas, se recomienda usar un coeficiente  $K = 0,2$  en la ecuación general (1) para calcular las pérdidas de carga locales:

$$h = K \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

$h$  = pérdida de carga, m

$K$  = coeficiente adimensional

$V$  = velocidad de referencia, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

Para las rejillas acompañadas de tamices que retienen objetos chicos, la EPA<sup>8</sup> recomienda en general, el uso de mallas con abertura de 4 a 8 cm. de forma circular o rectangular y con inclinación de 0 a 30° respecto a la vertical. Usar la ecuación (2):

$$h_l = \frac{1}{0,7} \left( \frac{V^2 - v^2}{2g} \right) \quad (2)$$

Donde:

$h_l$  = pérdida de carga, m

0,7 = coeficiente de descarga debido a turbulencia y remolinos

$V$  = velocidad a través de las aberturas de rejillas, m/s

$v$  = velocidad de llegada antes de las rejillas, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

En el caso general de rejillas para basura, las pérdidas se obtienen con las ecuaciones (3) y (4), de acuerdo con los criterios del CIH<sup>2</sup> y la SARH<sup>9</sup>:

$$h_{f-r} = \left[ \beta \left( \frac{S}{B} \right)^{4/3} \operatorname{sen} \alpha \left( \frac{V_t^2}{2g} \right) \right] \quad (3)$$

$$V_t = \frac{V_r}{1 + \frac{S}{B}} \quad (4)$$

Donde:

$h_{f-r}$  = pérdida de carga, m

$\beta$  = coeficiente que depende de la forma de las barras

$S$  = separación entre las barras, m

$B$  = espesor de las barras, m

$\alpha$  = ángulo que forma el plano de las rejillas con la horizontal

$V_t$  = velocidad del flujo frente a la rejilla, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$V_r$  = velocidad a través de la rejilla, por norma menor o igual a 1 m/s

Los valores del coeficiente  $\beta$  son: 2,42 para rejillas de sección rectangular y aristas vivas; 1,83 si es rectangular con extremo de aguas arriba redondeado; 1,67 si es rectangular con ambos extremos redondeados; 0,76 para configuración hidrodinámica; 1,79 para circular.

En la **entrada** de conductos se producen pérdidas de carga por efecto de contracción en la vena líquida y la formación de zonas de separación; ellas dependen de la brusquedad de la contracción del chorro y la entrada elíptica es la que produce el mínimo de pérdidas 4,10,11. Si el tubo es de sección circular, la ecuación (5) es la elipse de entrada y si es rectangular o cuadrada, se usa la ecuación (6).

$$\frac{x^2}{(0,5D)^2} + \frac{y^2}{(0,15D)^2} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{x^2}{H^2} + \frac{y^2}{(0,33H)^2} = 1 \quad (6)$$

Donde:

$x$  e  $y$  = coordenadas, m

$D$  = diámetro del conducto, m

$H$  = es la dimensión vertical del conducto para definir la forma del perfil superior e inferior, o la dimensión horizontal para la forma de las entradas laterales, m

El eje  $x$  es paralelo al eje del conducto, a una distancia de  $0,65D$  del mismo, mientras que el eje  $y$  es normal a dicho eje del conducto, a una distancia  $0,5D$  aguas abajo de la sección en que se inicia el redondeo.

Para calcular las **pérdidas de carga por entrada**, se usa la ecuación (1) con el valor del coeficiente  $K_E$  que corresponda al tipo de entrada, el cual varía de  $0,05$  en entradas abocinadas hasta  $0,5$  o más para entradas con aristas vivas. Tablas y gráficas con los valores de  $K_E$  se pueden consultar en el USBR 1, CFE 11, USACE 4; se presenta la Tabla 1 del CIH 2:

Tabla 1

TIPO DE ENTRADA	COEFICIENTE $K_E$		
	Máx.	Med	Mín.
Aristas rectangulares	0,70	0,50	0,40
Aristas ligeramente redondeadas	0,60	0,10	0,18
Aristas redondeadas $r/d \geq 0,15$	0,27	0,10	0,08
Forma de bocinas rectangulares	0,20	0,16	0,07
Forma de bocinas circulares	0,10	0,05	0,04
Bordos sobresaliendo hacia adentro	0,93	0,80	0,56

Aspecto importante para el funcionamiento adecuado de una obra de toma es determinar la **sumergencia mínima**, sobre todo cuando se trata de hidroenergía.

Existen diversas fórmulas para el cálculo y de ellas la más popular es la de Gordon<sup>12</sup>, ecuación (7) y una nueva y más precisa, obtenida experimentalmente para bocatomas de doble entrada con la mínima sumergencia, sin introducir aire por vórtices, con resultados confiables para el diseño de plantas de hidroenergía es la de Jiming<sup>13</sup>, ecuaciones (8).

$$h_r = CV\sqrt{a} \quad (7)$$

$$h_r/a = kF - 0,01 = 2,39F - 0,01 \quad (8a)$$

$$h_r/a = \alpha kF - 0,01 = 3,17F - 0,01 \quad (8b)$$

Donde:

$h_r$  = profundidad mínima de sumergencia medida hasta la parte superior del vano frente a la compuerta de entrada, m

$a$  = altura del vano frente a la compuerta de entrada, m

$C$  = coeficiente con valor de  $0,55$  si el canal de acercamiento del flujo es simétrico al eje del conducto y de  $0,73$  si es lateral.

$V$  = velocidad del flujo antes de entrar, m/s

$k$  = coeficiente experimental vinculado al Número de Froude, con valor de  $2,39$  si el canal de acercamiento del flujo es simétrico al eje del conducto y si es lateral, afectado por el valor de  $\alpha$ .

$\alpha$  = coeficiente con valor de  $1,327$ , resultado de relacionar los dos valores del coeficiente  $C$  de la ecuación (7),  $\alpha = 0,73/0,55$ .

$F$  = Número de Froude obtenido para el flujo mediante la ecuación:  $V/\sqrt{ga}$   
 $g$  = aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>

Las **pérdidas de carga en los cambios de dirección**, se producen cuando existe un cambio en la circulación del flujo entre la entrada a la toma y la sección de los mecanismos de control y se deben a la modificación de velocidades en el flujo, produciendo zonas de separación en el lado interior de la curva y aumentos de presión en el exterior, con movimiento espiral que se prolonga en distancias de hasta 50 veces el diámetro o la altura del conducto. El valor de la pérdida de carga se obtiene mediante la ecuación (1), usando el coeficiente  $K_C$ . Existen diferentes fórmulas, tablas y gráficas para obtener valores del coeficiente  $K_C$  como son las de *USBR 1*, *CIH 2*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*, etc. La ecuación (9) y la gráfica de Hoffman de la Figura 3 permiten obtener el valor del coeficiente  $K_C$  para curvas de diámetro constante y  $Re > 2,2 \times 10^5$ .

$$K_c = C_c \frac{\theta^0}{90^0} \quad (9)$$

Donde:

$C_c$  = coeficiente obtenido de la Figura 3

$R$  = radio de la curva, m

$D$  = diámetro del conducto, m

$\theta$  = ángulo de la curva, grados (°)

$\epsilon$  = rugosidad absoluta del material del conducto

En el cálculo de las **pérdidas por ampliación** de acuerdo al *CIH 2* se utiliza la ecuación (10), donde el coeficiente  $K_a$  depende de la brusquedad de la ampliación y para obtener su valor se usa la ecuación (11) y los valores de la Tabla 2. La pérdida de carga mínima se tiene para ángulos de difusión  $\theta = 80^\circ$ ; para  $\theta \geq 50^\circ$  la ampliación brusca es tan confiable como la gradual. Existen otras tablas y gráficas que se pueden consultar en *USBR 1*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

$$h_a = K_a \left( \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (10)$$

$$\theta = \text{arc tang} \frac{\sqrt{gD}}{2V} \quad (11)$$

Tabla 2

$\theta$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$K_a$	0	0,12	0,16	0,27	0,4	0,55	0,66	0,73	0,9	0,95	1

Donde:

$h_a$  = pérdida de carga por ampliación, m

$K_a$  = coeficiente de pérdidas por ampliación

$V_1$  y  $V_2$  = velocidades en los diámetros inicial y final respectivamente, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$\theta$  = ángulo de la ampliación, grados (°)

$D = (D_1 + D_2)/2$  = diámetros al inicio y final de la ampliación respectivamente, m

$V = (V_1 + V_2)/2$

Las **pérdidas de carga por fricción** se deben al rozamiento del fluido con las paredes del conducto. En tuberías la fórmula más usada es la de Darcy-Weisbach, ecuación (12); cuando el conducto no es de sección circular, se recomienda usar la ecuación (13) de Manning y para conductos circulares donde el radio hidráulico vale  $R=D/4$ , usar la ecuación (14). Para mayores detalles de éstas y otras ecuaciones, consultar en *USBR 1*, *CIH 2*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (12)$$

$$h_f = n^2 L V^2 / R^{4/3} \quad (13)$$

$$h_f = 6,35 n^2 V^2 L / D^{4/3} \quad (14)$$

Donde:

$h_f$  = pérdidas de carga por fricción en el conducto, m

$f$  = coeficiente de fricción que varía con la rugosidad y diámetro del tubo, velocidad, viscosidad y densidad del fluido; tablas y gráficas con sus valores se pueden consultar en manuales y libros de hidráulica y en *USBR 1*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*

$L$  = longitud de la tubería o del conducto, m

$D$  = diámetro de la tubería, m

$R$  = radio hidráulico del conducto, m

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning, consultar en manuales y libros de hidráulica

$V$  = velocidad del fluido en el conducto, m/s

$g$  = aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>

En las **pérdidas de carga por reducción** se produce un fenómeno de reducción semejante al de ampliación y también se procura sea gradual; las pérdidas son menores que las de ampliación y el coeficiente  $K_r$  depende del ángulo  $\theta$  de contracción, de acuerdo con la Tabla 3. En la determinación del valor de pérdidas se usa la ecuación (15). Otras tablas y gráficas se pueden consultar en *USBR 1*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

Tabla 3

$\theta$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75
$K_r$	0,06	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34

$$h_r = K_r \left( \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (15)$$

Donde:

$h_r$  = pérdida de carga por reducción, m

$K_r$  = coeficiente de pérdidas por reducción

$V_1$  y  $V_2$  = velocidades en los diámetros inicial y final respectivamente, m/s

$g$  = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$\theta$  = ángulo de la reducción, grados ( $^\circ$ )

Las **pérdidas de carga en mecanismos de control**

$h_g$ , se calculan con la ecuación (16) y el coeficiente  $K_g$  se obtiene experimentalmente, por lo que sus valores son dados por el fabricante. Tablas y gráficas de diferentes mecanismos como son válvulas y compuertas, se pueden consultar en *USBR 1*, *CIH 2*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

$$h_g = K_g \frac{V^2}{2g} \quad (16)$$

Donde:

$h_g$  = pérdida por válvulas o compuertas, m

$K_g$  = coeficiente de pérdidas del control

$V$  = velocidad de circulación del fluido en el control, m

$g$  = aceleración gravitacional, m

Las **pérdidas de carga en la salida** son función de la carga de velocidad y forma de salida; las pérdidas se calculan con la ecuación (17). Cuando la salida es libre, el coeficiente de salida  $K_s$  es igual a uno y si se quiere recobrar parte de la carga de velocidad se deben usar formas divergentes. Si la salida es ahogada, se debe tomar en cuenta la ecuación (18).

En la Tabla 4 se presentan valores de  $K_s$ . Consultar más detalles en *USBR 1*, *CIH 2*, *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

Tabla 4

$A_s/A_1$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$K_s$	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94	0,965	1,0

$$h_s = K_s \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

$$h_s = K_s \frac{(V - V_c)^2}{2g} \quad (18)$$

Donde:

$h_s$  = pérdida de carga en la salida, m

$K_s$  = coeficiente de pérdida por salida

$V$  = velocidad en la sección antes de la salida, m/s

$V_c$  = velocidad en el cuerpo de agua que ahoga la salida, m/s

$g$  = aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>

Las **pérdidas en bifurcaciones** dependen de la relación del ángulo y los diámetros entre las tuberías, así como la dirección de la corriente; las pérdidas se determinan con la ecuación (1) y los valores de los coeficientes  $K_{bif}$  son muy variados ya sea para tuberías circulares o conductos de diferentes formas, por lo que se recomienda consultar en *USACE 4*, *SARH 9*, *CFE 11*.

## METODOLOGÍA DE DISEÑO

Con base en experiencias y bibliografía recopiladas se presenta el siguiente ordenamiento de trabajo para el diseño de una obra de toma con galería y circulación forzada. En ésta se encuentra implícito un análisis de optimización en redes y secuencias.

1. Deben calcularse y determinar los siguientes datos: el gasto de diseño  $Q$ , la carga hidráulica máxima  $HT_{m\acute{a}x}$ , la carga hidráulica mínima  $HT_{m\acute{i}n}$ , la carga hidráulica de diseño  $HT$ , longitud del conducto de la obra de toma  $L$ , el porcentaje de pérdidas de energía permitido de acuerdo al uso de agua por extraer, niveles de agua o presión de entrega y cualquier otra restricción impuesta al proyecto.

2. Determinar el diámetro o dimensiones mínimas del conducto a usar, proponiendo el material del mismo para conocer su rugosidad. Si es una tubería circular, se puede

usar la ecuación (19) <sup>11</sup> y si es un conducto diferente a la forma circular, o circular, usar la ecuación (20) <sup>2</sup>:

$$D = \sqrt[5]{\frac{8 f L Q^2}{g \pi^2 H_T}} \quad (19)$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{Q^2}{158 H_T} \frac{0,077 n^2 L}{R^{4/3}}} \quad (20)$$

a. Usando la ecuación (19) se estima un valor del coeficiente de fricción  $f$  y se calcula el diámetro  $D$ ; con el diámetro obtenido se calcula el Número de Reynolds y con él, se busca un nuevo valor de  $f$  en el Diagrama de Moody; el cálculo termina cuando  $f$  no cambia en dos iteraciones consecutivas; el diámetro se aproxima al comercial inmediato superior.

b. Usando la ecuación (20) se propone un valor del radio hidráulico de la sección  $R$  y con él se calcula un valor de ecuación; si son iguales el valor propuesto con el obtenido por la ecuación, se toma como correcto y si no, se continúa iterando hasta que se igualen ambos valores; obtenido  $R$  se determina el valor del diámetro o el área y dimensiones de la sección.

3. Una vez definida la sección transversal del conducto en su primera dimensión, se procede a calcular las pérdidas de carga provocadas por la extracción de agua del vaso, al circular ésta por cada uno de los elementos componentes y mecanismos de la obra de toma, hasta el punto de salida o entrega a otra estructura; para ello se usarán las ecuaciones y complementos revisados en este artículo. A continuación se revisa si la sumatoria de pérdidas de carga es menor que el porcentaje de pérdidas de energía permisible, o cualquier restricción impuesta a la entrega del agua, de ser así, se aceptan como buenas las dimensiones o el diámetro del conducto obtenidos en el inciso 2; si no se cumple, proponer un nuevo diámetro o dimensiones del conducto, para realizar la segunda iteración, calculando nuevamente todas las pérdidas de carga y sumándolas, para volver a verificar el cumplimiento de las restricciones impuestas; cuando se de cumplimiento a estas últimas, se detiene el proceso iterativo y se dan por buenas las estructuras de la obra de toma propuestas en la última iteración.

4. Con la información obtenida se está en condiciones de obtener la curva de operación del embalse para diferentes cargas y diferentes aberturas de los mecanismos de control, usando las ecuaciones de Continuidad y Bernoulli, expresadas por (21), (22) y (23), en función de la carga de velocidad afectada por un coeficiente totalizador de la resistencia hidráulica en todo el trayecto  $K_L$  (para mayores detalles consultar en *USBR 1*, *CIH 2*, *CFE 11*):

$$H_T = K_L \frac{V_1^2}{2g} \quad (21)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 g H_T}{K_L}} \quad (22)$$

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2 g H_T}{K_L}} \quad (23)$$

5. Por recomendaciones al inicio del escrito, si se tiene una tubería como conducción a través del cuerpo de una presa flexible, ésta debe ir dentro de una galería para inspección y mantenimiento. El diseño para obtener las dimensiones de la galería se hace de acuerdo con las siguientes expresiones recomendadas por el *CIH 2*:

$$Area = b y \quad (24)$$

$$b \geq (D * ramas) + 0,7(ramas + 1) \quad (25)$$

$$y \geq 1 + (2D) \quad (26)$$

Donde:

$b$  = ancho de la galería, m

$y$  = altura de la galería, m

$D$  = diámetro de la tubería, m

$ramas$  = número de tuberías

## CONCLUSIONES

En las obras de toma y principalmente las de hidroenergía, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

◆ Para prevenir la formación de vórtices en la boca de entrada, conviene colocar dispositivos tales como flotadores o rejas localizados en la parte superior de la entrada del agua, además de calcular y respetar la sumergencia mínima.

◆ Posterior a la entrega del fluido por la obra de toma, habrá de considerarse también las pérdidas de carga provocadas por la línea de conducción y bifurcaciones necesarias para su distribución al llegar a la zona de turbinas, así como los chiflones o válvulas de salida.

◆ En el estudio económico para la central hidroeléctrica, resulta vital la consideración del costo de la energía no generada por las pérdidas de carga habidas en la obra de toma, conducción a la central y distribución a turbinas, por lo que ello puede ser factor de rediseño de todas las estructuras que intervienen, para disminuir estas pérdidas, ya que pueden hacer incosteable un proyecto (ve más detalles en *CFE 11*).

## REFERENCIAS

1. *USBR, Diseño de Presas Pequeñas*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Quinta edición en español. Ed., Compañía Editorial Conti-

- mental, SA, México, DF, 1976
2. **CIH**, *Apuntes para el Diseño Hidráulico de Aliviaderos y Obras de Toma para Presas Pequeñas*, Tomo II, *Obras de Toma*. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Ciudad de La Habana, 1997
  3. **Dilla S., F. y Cano C., J.**, *Estructuras Hidráulicas*. "Apuntes para un Libro de Texto", Departamento de Textos y Materiales Didácticos, Ministerio de Educación Superior. Editado por Combinado Poligráfico de la Empresa de Producción de la Educación Superior, Ciudad de La Habana, 1996
  4. **USACE**, *Engineering and Design, Hydraulic Design of Reservoir* [en línea]. Texto analizado de: Engineer Manual No. 1110-2-1602, Outlet Works, 15 octubre de 1980, Department of the Army, Corps of Engineers, U.S.A. [citado en octubre de 2003]. Disponible en World Wide Web: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1602/toc.htm>
  5. **Johnson, Perry L.**, *Hydro-Power Intake Design Considerations*, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering. Junio de 1988, Vol. 114, No. 6, pp. 651-661
  6. **Edwards, Stephen J., et al.**, *Effectiveness of Angled-screen Intake System*. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering. Junio de 1988, Vol. 114, No. 6, pp. 626-640
  7. **Khan, Liaqat A., et al.**, *Computational Fluid Dynamics Modeling of Turbine Intake Hydraulics at a Hydropower Plant* [en línea]. Texto editado en el Vol: 42/Issue: 1, de la revista Journal of Hydraulic Research, International Association on Hydraulic Research, enero-febrero de 2004 [citado en abril de 2004]. Disponible en World Wide Web: <http://www.iahr.net/site/index.html>
  8. **EPA**, *Combined Sewer Overflow Technology Fact Sheet Screens*, [en línea]. Texto analizado de: US, Environmental Protection Agency No. EPA 832-F-99-040, de Sep. 1999, Washington, DC [citado en mayo de 2004]. Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/owm/mtb/floatctrl.pdf>
  9. **SARH**, *Obras de Toma para Presas de Almacenamiento*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección General de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural, México, DF, 1984
  10. **De Azevedo N., J.M. y Acosta A., G.**, *Manual de Hidráulica*. Sexta edición. Editorial Harla, México, DF, 1976
  11. **CFE**, *Conducciones a Presión*, Tomo 2.3, *Hidrotecnia*. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Manual de Diseño de Obras Civiles. México, DF, 1983
  12. **Gordon, J.L.**, *Vortices at intakes*, *Water Power*. Abril de 1970, pp. 137-138
  13. **Jiming, Ma, et al.**, *Minimum Submergence before Double-Entrance Pressure Intakes*, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering. Agosto de 2000, Vol. 126, No. 8, pp. 628-631

Recibido: enero del 2008  
Aprobado: febrero del 2008