

Toma de datos en el lugar

4

Antes de ir al lugar, además de tener el mapa, es muy importante proveerse del mínimo equipo para hacer las evaluaciones con la mejor precisión, así como también informarse del acceso y otras características del lugar. La visita se recomienda que sea en el mes de máximo estiaje.

4.1 Medición de la altura

Existen varios métodos para medir la altura. Entre ellos los más usados son el método del alfiler, de la manguera de nivelación, recomendable para pequeñas alturas. Nivel de carpintero, apropiado para pendientes intermedias y longitudes cortas. Del Eclímetro y wincha, recomendable para toda pendiente y longitud, es rápido. Del nivel topográfico es rápido y es el más costoso.

De todos ellos el que tiene mayor precisión es el nivel topográfico. La precisión del eclímetro puede variar hasta el 5%, depende de la habilidad y destreza del operador, la ventaja es que emplea menos tiempo, no es caro y para un estudio de prefactibilidad es muy aceptable.

De todos estos métodos, explicaremos el método del eclímetro, ya que con los datos obtenidos en el campo además de obtener la altura, permite además, dibujar el perfil del terreno para entrar al diseño de la tubería de presión.

Método del eclímetro:

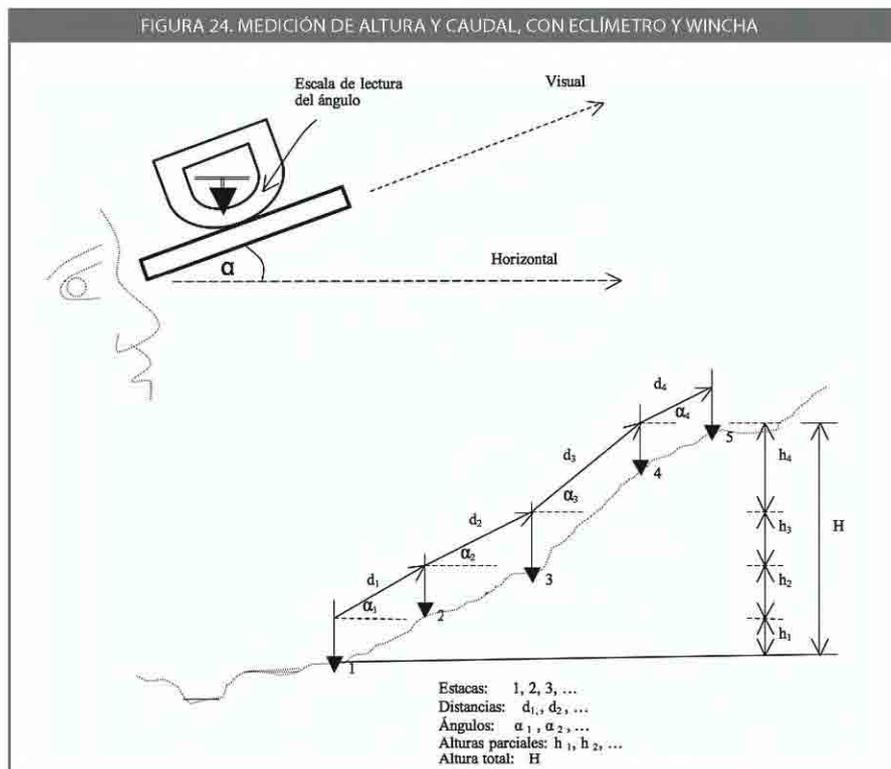
Equipo:

- ✓ 1 eclímetro
- ✓ 1 wincha de 30 a 50 m
- ✓ 1 calculadora
- ✓ 1 libreta de notas
- ✓ 1 lapicero
- ✓ 1 machete o calabozo
- ✓ Estacas de madera
- ✓ 3 personas (mínimo), incluido el operador

El método consiste en medir ángulos verticales con el eclímetro, y las distancias con la wincha, para obtener alturas parciales. La altura total será igual a la suma de todas las alturas parciales.

El ángulo medido es el ángulo formado por la horizontal y la visual en dirección de la medida. La lectura del ángulo se obtiene en la escala angular en grados sexagesimales del eclímetro.

Se puede iniciar de la casa de máquinas hacia la cámara de carga o viceversa y para registrar los datos, se recomienda tener preparada la siguiente tabla, y anotar de cada tramo el perfil del suelo.



Para el caso de un estudio definitivo, el método que se debe emplear es con el nivel topográfico, o con teodolito con la finalidad de obtener también curvas a nivel con mejor detalle para la ubicación exacta de la cámara de carga, de la casa de fuerza, del canal de descarga y diseño completo de la tubería de presión.

Ejemplo numérico:

ESTACAS	DISTANCIA d (m)	ANGULO α	ALTURA PARCIAL (m) $h = d \times \text{Sen}$	ALTURA ACUMULADA (m)
1-2	19.50	38	12.05	12.05
2-3	25.75	36.5	15.31	27.36
3-4	20.44	42.5	13.51	40.87
4-5	15.80	29	7.65	48.52

La altura total es igual a la suma de las alturas parciales o la última altura acumulada 48.52 m

4.2 Medición del caudal

La medición del caudal en el río se realiza aguas arriba del lugar donde será la bocatoma y de preferencia en la temporada de seca. Existen varios métodos de medición del caudal, tales como del correntómetro, de la solución de sal, de vertedero, del flotador, del recipiente, etc. La aplicación de uno u otro método está en función de la disponibilidad del equipo, de la habilidad, destrezas, experiencia de las personas que intervienen y de las condiciones técnicas que recomienda cada método.

Método del recipiente: Es muy útil para pequeños caudales, menores a 30 o 40 l/s. Su aplicación requiere provocar un chorro en el curso de río. Todo el caudal debe pasar por el chorro y receptionarlo en un recipiente de capacidad conocida en litros. El tiempo que demora en llenarse se registra con el cronómetro. Se debe repetir 3 veces mínimo. El caudal medido será la capacidad del recipiente en litros, entre el tiempo promedio en segundos. Para provocar el chorro, se puede aprovechar los saltos que tienen el río o quebrada, si tienen pendiente fuerte. En el caso que no tenga saltos, entonces se aplicará otro método.

Equipo:

- ✓ 1 recipiente de capacidad conocida en litros
- ✓ 1 cronómetro
- ✓ 1 manta plástica de 1m x 2 m
- ✓ Herramientas básicas (pico, lampa)

Método del flotador: Consiste en medir en un tramo recto y uniforme del río la velocidad superficial del agua en m/s y determinar el área de la sección transversal en m². El caudal aforado es igual al producto del área de la sección por la velocidad superficial y por un coeficiente de corrección de velocidad. El coeficiente generalmente es de 0.60

Equipo:

- ✓ 1 pico
- ✓ 1 lampa
- ✓ 6 estacas
- ✓ 30 m de cordel
- ✓ 1 regla graduada de 1.20 m, de madera o metálica
- ✓ 1 wincha de 20 m
- ✓ 1 libreta de notas
- ✓ 1 flotador (envase vacío de botella)
- ✓ 1 cronómetro
- ✓ 1 par de botas de jebe
- ✓ 1 calculadora
- ✓ 3 personas (mínimo)
- ✓ 1 machete

Procedimiento

- a) Seleccionar un tramo recto del río y uniforme
- b) Limpiar la maleza y retirar piedras móviles del cauce
- c) Tomar una distancia L y marcar con estacas en la ribera del río
- d) Determinar la sección del río y del área mojada, midiendo el ancho del río a nivel del espejo de agua y varias profundidades a distancias iguales. Luego tomar un área equivalente (en forma), para facilitar el uso de fórmulas de áreas
- e) Medir la velocidad superficial del agua del río en el tramo considerado, tomando el tiempo que emplea el flotador en recorrer la distancia seleccionada (mínimo 3 veces)
- f) El caudal aforado se calcula aplicando la fórmula:

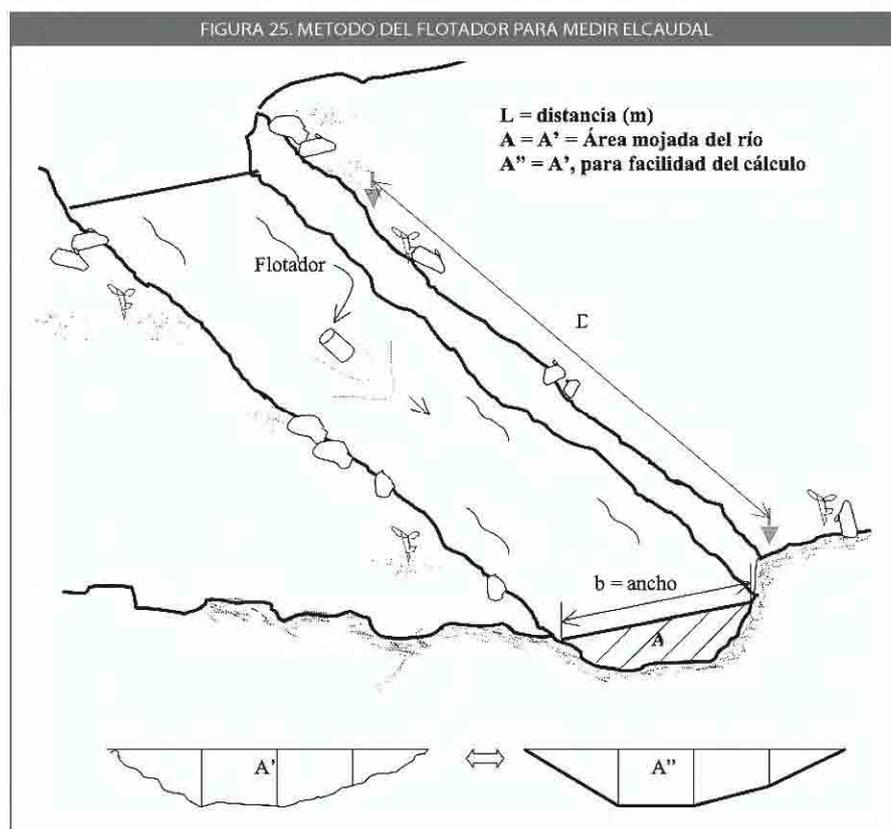
$$Q = A \times V \times K$$

Donde

A = área mojada del río

V = velocidad superficial del agua del río

K = factor de corrección de velocidad = 0.60



En el siguiente esquema se explica todo el proceso del cálculo.

Ejemplo numérico:

$D = 10 \text{ m}$

Tiempos en recorrer la distancia L:

$T_1 = 15.44 \text{ seg}$

$T_2 = 16.10 \text{ seg}$

$T_3 = 15.92 \text{ seg}$

Tiempo promedio $T = 15.82 \text{ seg}$

Velocidad superficial = 0.63 m/s

$b = 6.80 \text{ m}$

Profundidades:

$d_1 = 0.00 \text{ m}$

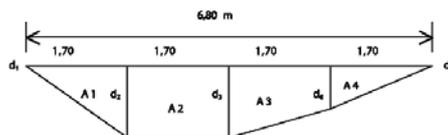
$d_2 = 0.25 \text{ m}$

$d_3 = 0.26 \text{ m}$

$d_4 = 0.18 \text{ m}$

$d_5 = 0.00 \text{ m}$

Cálculo del área:



$$A1 = (1.70 \times 0.25) / 2 = 0.21 \text{ m}^2$$

$$A2 = ((0.25 + 0.26) / 2) \times 1.70 = 0.43 \text{ m}^2$$

$$A3 = ((0.26 + 0.18) / 2) \times 1.70 = 0.37 \text{ m}^2$$

$$A4 = (0.18 \times 1.70) / 2 = 0.15 \text{ m}^2$$

$$A = 1.16 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal } Q = 1.16 \text{ m}^2 \times 0.63 \text{ m/s} \times 0.60 = 0.438 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este caudal corresponde al río en tiempo de estiaje, medido en el lugar.

Estimación del máximo caudal: En el mismo lugar se evaluará otros parámetros, tales como la pendiente del río, el ancho del espejo de agua con el nivel que alcanza en época de lluvias. Esto se puede obtener observando en ambas márgenes la huella que deja en la ribera y/o consultando a los pobladores que conocen y viven en el lugar. Entre otros datos también se anotará la calidad de suelos en cuanto a estabilidad para fines de diseño de la bocatoma.

El procedimiento a seguir es:

- Calcular la pendiente del río, con el eclímetro y la wincha
- Calcular el área de la sección del río a base del nuevo espejo de agua y profundidades anotadas.
- Aplicar la fórmula de Manning, para encontrar la velocidad, teniendo en cuenta los parámetros que intervienen: Área, perímetro, radio hidráulico (Rh), la pendiente del río (s) y el coeficiente de rugosidad (n) de acuerdo al material que conforma el río.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}$$

- Aplicar la formula del caudal como en el caso anterior.

$$Q = A \times V \times K$$

4.3 Cálculo de la generación de energía (capacidad instalada)

Con los resultados de los datos reales de altura y caudal obtenidos en campo, se realiza el cálculo de la generación eléctrica, para ello ya hemos hecho un dimensionamiento preliminar por lo que ya tenemos idea del tipo de turbina a utilizar, asimismo tenemos datos de la demanda con la que hacemos la comparación. Para obtener la capacidad de potencia se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_E = \eta \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_G \cdot \gamma \cdot QH$$

Donde:

PE = Potencia eléctrica en los baners del generador

P = Potencia al eje la turbina, kW

Q = Caudal de la turbina, m³/s

H = Salto neto en m

γ = Peso específico del agua, 1 000 kg/m³

η = Eficiencia de la turbina, adimensional

η_{TR} = Eficiencia de la transmisión, adimensional

η_G = Eficiencia del generador, adimensional

4.4 Encuesta *in-situ* para la línea de distribución

Consistirá en el estudio de cargas y proyección para establecer la demanda eléctrica. El objeto básico es el de analizar el consumo y luego la previsión de la demanda para lograr la buena adaptación, entre la oferta y la demanda; no se trata de evaluar en forma exacta y definitiva cuanto ha de ocurrir en el futuro, sino mas bien hipótesis de trabajo razonables con el propósito de calcular los valores que probablemente adoptara la localidad implicada.

4.4.1 Estudio de cargas

Sectorización de las cargas existentes de acuerdo a sus consumos domiciliarios, comercial, artesanal, industrial, y cargas especiales, las que serán ubicadas en el plano respectivo.

4.4.2 Proyección de la demanda eléctrica

La proyección a realizarse será para un periodo de 15 años

- a) Se efectúa la proyección del número de habitantes en base a datos censales, a fin de obtener las tasas de crecimiento, pudiéndose adoptarse las tasas de la entidad de estadística.

Para la proyección se empleara la fórmula:

$$P_f = P_o(1 + t)^n$$

Donde:

- P_f = población final
- P_o = Población en año inicial
- t = Tasa de crecimiento
- n = Número de años desde el inicial

- b) A Base de la información estadística se calcula el número promedio de habitantes por vivienda, obteniéndose luego el número de viviendas de la localidad.
- c) El número de abonados se calcula considerando una relación N° de abonados por N° de viviendas

$$\text{Coeficiente de electrificación} = \frac{N^\circ \text{ de abonados}}{N^\circ \text{ de casas}}$$

En la localidad que tiene servicio eléctrico, el coeficiente de electrificación inicial puede determinarse dividiendo en N° de abonados existentes/ N° de viviendas obtenidos de la encuesta. En las localidades que no tengan servicio eléctrico se puede estimar un coeficiente de electrificación de 0.10 y 0.20, siempre que sea justificada.

- d) Cargas Especiales.- determinada a base de la encuesta realizada: postas medicas, escuelas iníciales, colegios primaria secundaria, puesto policial, centro comunal, municipio, iglesias, etc.
- e) Para determinar el consumo domestico se utiliza el siguiente cuadro referencial: pueden ser mayores o menores de acuerdo con los hábitos de consumo de los usuarios y del tiempo efectivo de funcionamiento de los artefactos
- f) La carga neta es la suma de las cargas obtenidas en los puntos anteriores.
- g) La carga bruta es el resultado de agregar a la carga neta total, las pérdidas del sistema de distribución, estimadas en 10% del consumo neto total.
- h) La máxima demanda, cuyo valor que determinada al dividir el consumo bruto y el número de horas de utilización de máxima demanda, estos se estiman considerando un servicio continuo.
- i) El consumo total estimado para la localidad se obtiene multiplicando el número de abonados proyectado para cada año por el consumo unitario por abonado.

4.4.3. Metodología de proyección de la demanda

La metodología se basa en la proyección de consumo de energía y de la máxima demanda, que para el caso de pequeños y medianos centros poblados se basa en el establecimiento de una relación funcional creciente entre el consumo de energía por abonado doméstico (kWh/abonado) y el número de abonados estimados para cada año. Esta relación considera que la expansión urbana a consecuencia del crecimiento poblacional está íntimamente vinculada con el desarrollo de actividades productivas que conducen a mejorar los niveles de ingreso y por ende, el crecimiento per cápita del consumo de energía eléctrica.

Principales factores que deben ser considerados:

- 1.- Porcentaje de la tasa de crecimiento
- 2.- Coeficiente de electrificación inicial
- 3.- Coeficiente de electrificación final
- 4.- Consumo unitario domiciliario inicial (kWh-mes)
- 5.- Tasa de crecimiento del consumo, por año
- 6.- Tasa de crecimiento del consumo, por año
- 7.- Tasa de crecimiento del consumo, por año
- 8.- Factor de AP en kWh/usuario-mes
- 9.- Porcentaje de consumo de uso general
- 10.- Porcentaje de pérdidas
- 11.- HUEB (Horas de utilización de la Energía Bruta)
- 12.- Incremento HUEB

Tabla 8-1 Formulario 1

Página N°		Hecho por	
Proyecto		Fecha	

INFORMACIÓN SOBRE SISTEMAS EXISTENTES

UBICACIÓN:

Departamento		Provincia	
Distrito		Localidad	

DATOS TÉCNICOS:

	Servicio		Tipo de consumo
	Público		Doméstico
	Privado		Comercial
			Industrial

MÁQUINA PRIMA DE GENERACIÓN:

Hidráulica / turbina	
Otros	

DATOS:

De placa	
Sin placa	

Marca		Tipo	
Año de fabricación		Potencia nominal	
RPM		msnm	

Estado	<input type="checkbox"/>	Bueno	<input type="checkbox"/>	Regular	<input type="checkbox"/>	Malo	<input type="checkbox"/>
--------	--------------------------	-------	--------------------------	---------	--------------------------	------	--------------------------

GENERADOR:

De placa	
Sin placa	

Marca		Serie		Número	
-------	--	-------	--	--------	--

Año de fabricación		Potencia nominal	
Tensión nominal		Factor de potencia	
RPM:		msnm	

Estado	<input type="checkbox"/>	Bueno	<input type="checkbox"/>	Regular	<input type="checkbox"/>	Malo	<input type="checkbox"/>
--------	--------------------------	-------	--------------------------	---------	--------------------------	------	--------------------------

Tabla 8-2 Formulario 2

Página N°		Hecho por	
Proyecto		Fecha	

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA

UBICACIÓN:

Departamento		Provincia	
Distrito		Localidad	
Población		N° de familias	

N° de casas habitadas	N° de casas Deshabitadas	Total
Longitud estimada de calles	Principal (km)	
	Secundarias (km)	

N° de manzanas	
Área total estimada del pueblo Ha	
N° tiendas comerciales	
Pequeñas industrias	
Instituciones	

	N° de instituciones	N° de ambientes	N° de horas de uso
Concejo municipal			
Escuelas			
Colegios			
Centro educativo inicial			
Posta médica			
Centro comunal			
Juzgados			
Institutos técnicos			
Comisaría			

CARGAS ESPECIALES

DATOS TÉCNICOS:

Servicio	Tipo de consumo
Público	Doméstico
Privado	Comercial
	Industrial

Diseño preliminar 5

5.1 Diseño de obras civiles

5.1.1 Diseño de bocatoma

Se recomienda que la bocatoma se ubique en un tramo recto del río. Este tramo debe ser lo más uniforme posible con pendiente y ancho uniformes, y la rivera del río en ambos márgenes deben ser estables. No seleccionar en tramo curvo porque en la parte convexa la velocidad del río es mayor y mucho más en época de crecida, y en la parte cóncava se llena de sedimentos no conveniente para la ventana de captación. El diseño de la bocatoma, consiste en dimensionar cada uno de los elementos de acuerdo al caudal de diseño y características del proyecto.

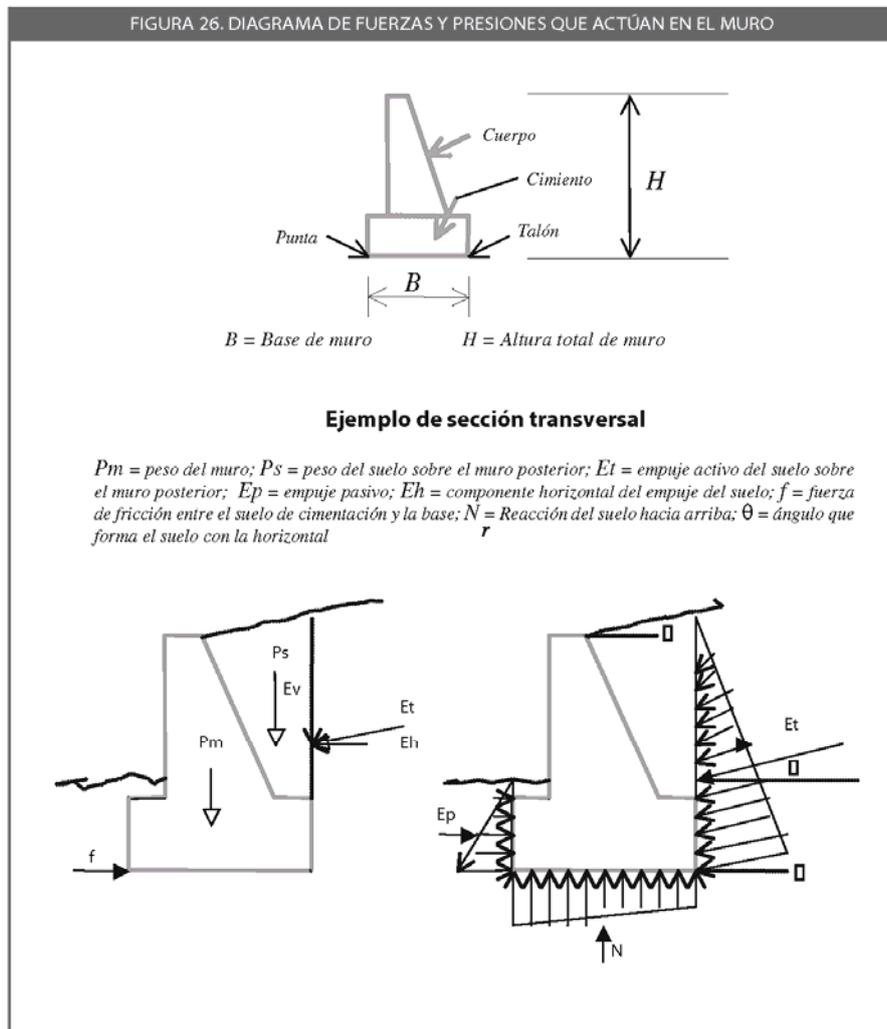
En los proyectos de microcentrales hidroeléctricas, donde el caudal de captación no supera a $0.600 \text{ m}^3/\text{s}$ los tipos de bocatomas más utilizadas son las barraje mixto, cuando las condiciones topográficas y características del río son favorables.

(1) Muros de encauzamiento:

El material convencional es de concreto simple con adición de piedra grande hasta un 40% de piedra grande.

El diseño de los muros de encauzamiento para su construcción, debe cumplir tres condiciones de estabilidad. Ver tabla 9.

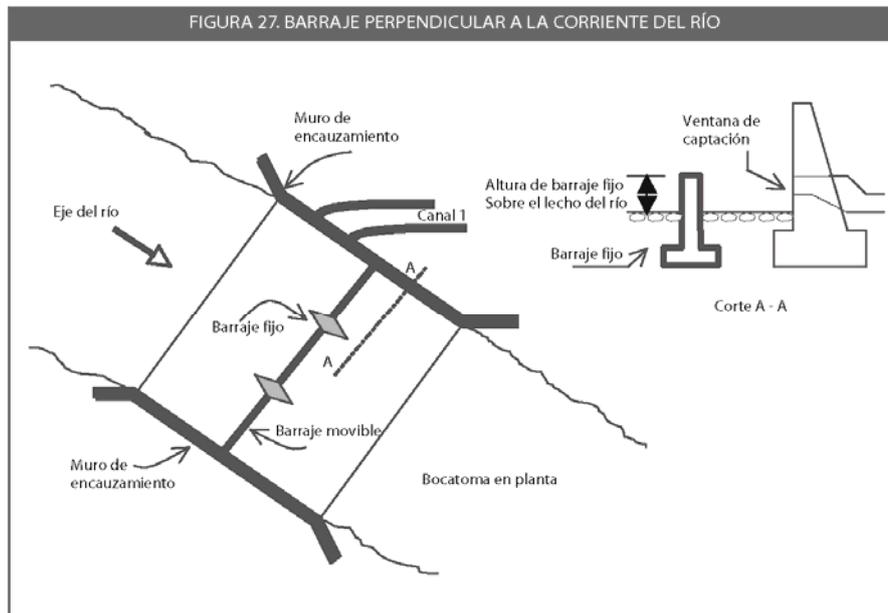
TABLA 9. DISEÑO DE LOS MUROS DE ENCAUZAMIENTO	
ESTABILIDAD	CONDICIONES DE ESTABILIDAD
1. Al volteo	$\frac{\sum Me}{\sum Mv} \geq 2$ <p> $\sum Me$ = Suma de momentos de fuerzas estabilizadoras $\sum Mv$ = Suma de momentos de fuerzas que originan el volteo </p>
2. Al deslizamiento	$\frac{f}{Et} \geq 2$ <p> $f = \mu N$ f = Fuerza de fricción entre el suelo de cimentación y la base de concreto del muro μ = Coeficiente de fricción N = Reacción total del suelo en la base del muro </p> $Et = \frac{1}{2} \times Ka \times \gamma \times H^2$ <p> Et = Empuje activo del suelo a favor del deslizamiento Ka = Coeficiente de empuje del suelo </p> $\frac{\cos\theta - \sqrt{\cos^2\theta - \cos^2\phi}}{\cos\theta + \sqrt{\cos^2\theta - \cos^2\phi}}$ <p> θ = Ángulo que forma la inclinación del suelo con la horizontal (talud); en algunos casos este valor es cero ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo (ensayos de laboratorio) γ = Peso específico del suelo; puede ser en T/m³ O en kg/m³ H = Altura total del muro (en m) </p>
3. Al asentamiento	<p>Consiste en verificar: σ admisible del suelo > $\sigma_{m\acute{a}x}$ > $\sigma_{m\acute{i}n}$</p> $\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{N}{B} \left[1 - \frac{6 \times e}{B} \right] \quad \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N}{B} \left[1 + \frac{6 \times e}{B} \right]$ <p> $\sigma_{m\acute{i}n}$ = Esfuerzo m\acute{i}nimo que transmiten el muro y parte del suelo sobre la zapata al suelo de cimentaci3n en kg/cm². $\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo m\acute{a}ximo que transmiten el muro y el suelo en su conjunto al suelo de cimentaci3n en kg/cm² B = Base del muro en metros E = excentricidad en metros </p> <p> $\sum Mo$ = Suma de momentos con respecto al centro de la base de todas las fuerzas que intervienen: estabilizadores y de volteo N = Reacci3n total del suelo sobre la base del muro </p>



(2) Barraje mixto:

El barraje mixto comprende dos partes. Una de las partes es fija y la otra es móvil. La parte fija, por lo general son columnas o placas de concreto armado, empotrados en el lecho del río. La parte móvil son tabloncillos de madera y se aloja en las canaletas del barraje fijo. Son móviles para facilitar la limpieza del material que arrastra el río.

Para el diseño, debemos conocer el tirante del río en tiempo de estiaje y en tiempo de crecida. Los ríos que tienen agua todo el tiempo, su tirante varía de 0.20 a 0.70 m. Por lo tanto la altura del barraje puede variar desde 0.40 a 0.60 m de altura.



El barraje en su conjunto forman una estructura perpendicular a la corriente del río.

(3) Ventana de captación:

Se ubica en uno de los muros de encauzamiento. El borde inferior debe estar mínimo a 15 cm por encima del lecho del río. Este desnivel, depende del tamaño de la piedra que arrastra el río en tiempo de crecida. Debe llevar una rejilla de seguridad para evitar que las piedras mayores a 3" ingresen al canal. La forma de la ventana por lo general es de forma rectangular. En el tiempo de estiaje, se comporta como un orificio parcialmente sumergido o de descarga libre y en tiempo de crecida como un orificio sumergido.

Para calcular las dimensiones de la ventana de captación, se emplea la siguiente fórmula:

$$Q = C \times L \times h^{1.5} \quad (5.a)$$

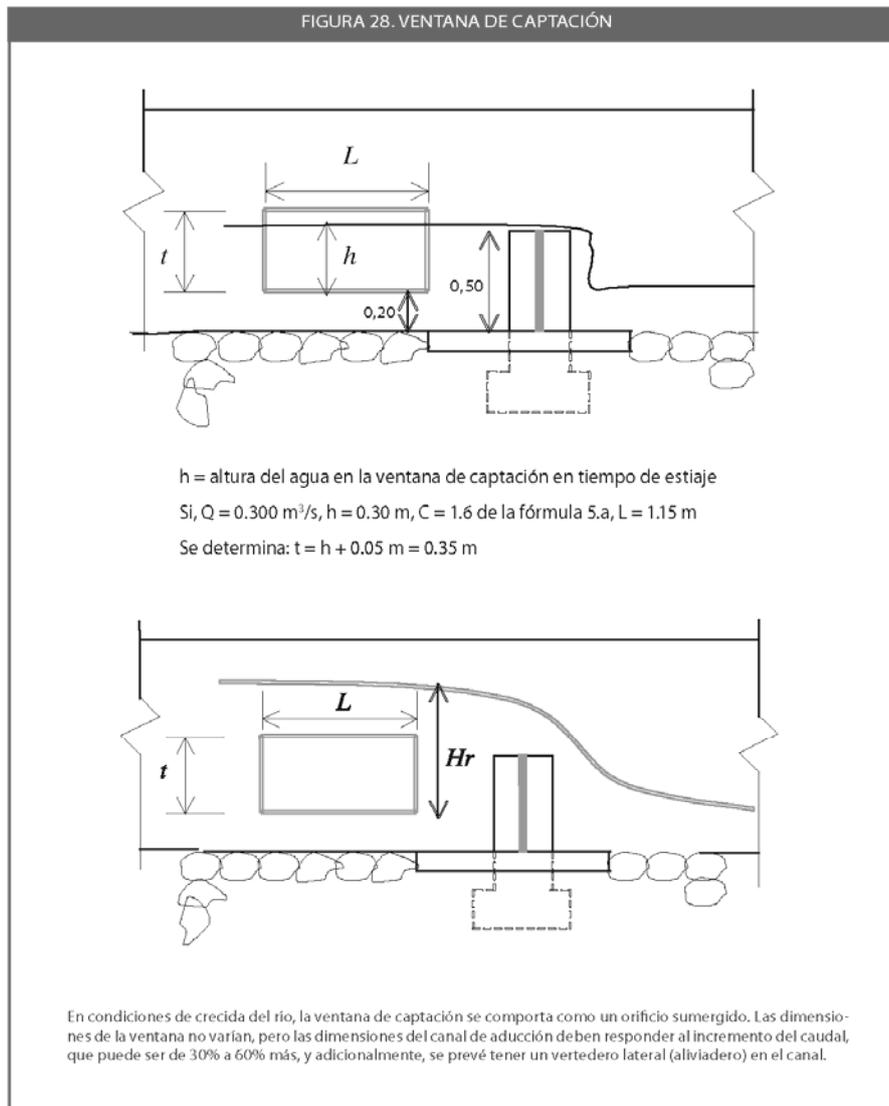
Donde

Q = Caudal de diseño

C = Coeficiente de descarga igual a 1.6

L = longitud de la ventana

h = la altura del agua con el que ingresa el caudal a la ventana de captación en condiciones normales. Ver figura 28.

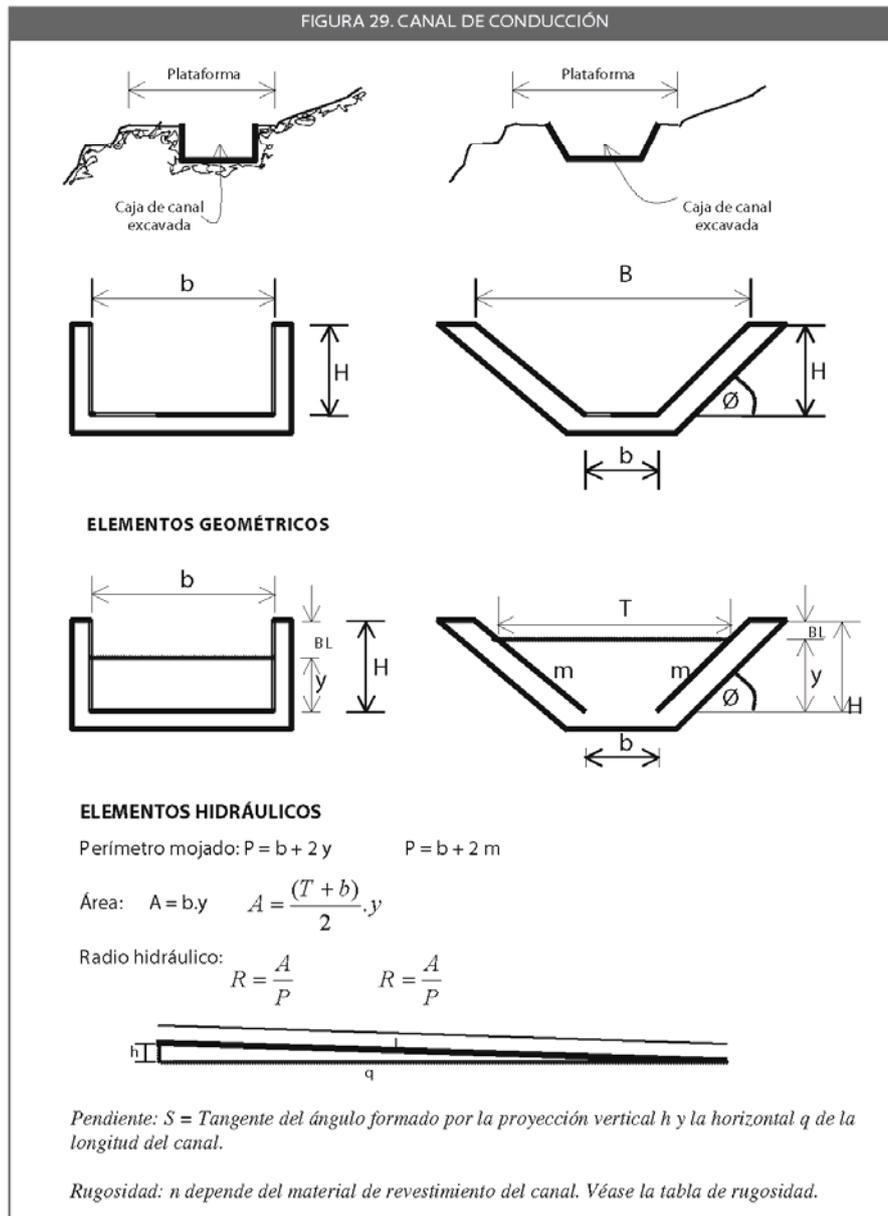


(4) Protección del lecho del río:

La protección del lecho del río en la zona de la bocatoma se realiza con una losa de concreto que a la vez asegura la estabilidad del barrage. Aguas arriba y aguas abajo de esa losa, lleva un emboquillado de piedra asentado en una capa de solado de cemento y hormigón 1:6 y asentado y fraguado con mortero de cemento y arena 1:3.

5.1.2 Canal de conducción

Tiene la función de conducir el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga. Pueden ser abiertos o cerrados, por lo general son de sección rectangular, trapezoidal o circular. Las características de todo canal se explican en el cuadro siguiente.



El caudal que conduce un canal, es igual al producto del area mojada por la velocidad del agua.

La fórmula general es: $Q = AxV$

Donde:

A = área mojada en m²

V = velocidad en m/s

Q = caudal en m³/s

La velocidad del agua se calcula con la fórmula de Maning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

n = Coeficiente de rugosidad del material de revestimiento

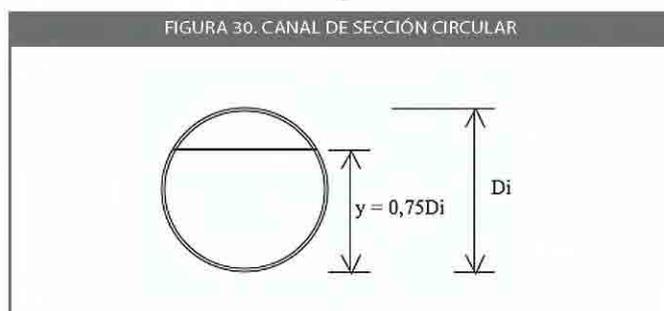
R = Radio hidráulico

S = la pendiente del canal expresado en su equivalente como número decimal (tanto por ciento o en tanto por mil)

Los canales de sección circular, por lo general son de tubería plástica que trabajan con un tirante 0.75D.

El caudal que conduce se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q = 28,4 \times D_i^{8/3} \times S^{1/2}$$



Donde:

D_i = diámetro interior (m)

y = tirante del agua (m)

n = 0.01

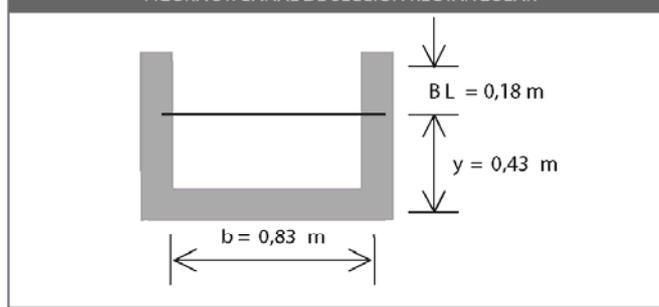
S = pendiente

TABLA 10. COEFICIENTES DE RUGOSIDAD: N

Revestimiento de superficie	N
Arcilla	0.013
Arena y grava	0.021
Roca irregular	0.045
Mampostería de piedra y cemento	0.020
Concreto acabado enlucido	0.010
Concreto no enlucido	0.014
Concreto irregular	0.020
Madera cepillada	0.011
Madera sin cepillar	0.0125
Tubería de PVC	0.010

Ejemplo: Calcular la sección de un canal de sección rectangular para conducir 0.400 m³/s, con una pendiente de 2 por mil, revestido con concreto de acabado pulido.

FIGURA 31. CANAL DE SECCIÓN RECTANGULAR



Intento	B (m)	y (m)	A(m²)	P (m)	R (m)	R ^{2/3}	n	1/n	S	S ^{1/2}	V(m/s)	Q (m³/s)
1	0.80	0.40	0.320	1.60	0.20	0.342	0.014	71.42	0.002	0.044	1.07	0.343
2	0.86	0.43	0.369	1.72	0.214	0.362	0.014	71.42	0.002	0.044	1.13	0.419

Los datos que se muestran en esta tabla, se va obteniendo en cada intento, hasta obtener el caudal de diseño, aplicando las fórmulas respectivas.

Se inicia asumiendo un valor de $b = 0.80$. El valor del tirante y , se recomienda que sea la mitad de b , (canal rectangular de máxima eficiencia hidráulica), luego se calcula P , A , R , V y Q .

Los valores conocidos son S y el valor de n , se extrae de la tabla de coeficientes de rugosidad.

En el primer intento nos da un valor de 0.343 m³/s. Entonces hacemos un segundo intento, asumiendo un valor de $b = 0.86$, entonces de acuerdo a la recomendación, $y = 0.43$ m, así sucesivamente, llegando a obtener el valor de $Q = 0.419$ m³/s, muy cercano al caudal de diseño de 0.400 m³/s. Finalmente el borde libre, se recomienda que sea mayor a 0.15 m y el espesor del canal no menos de 0.10 m.

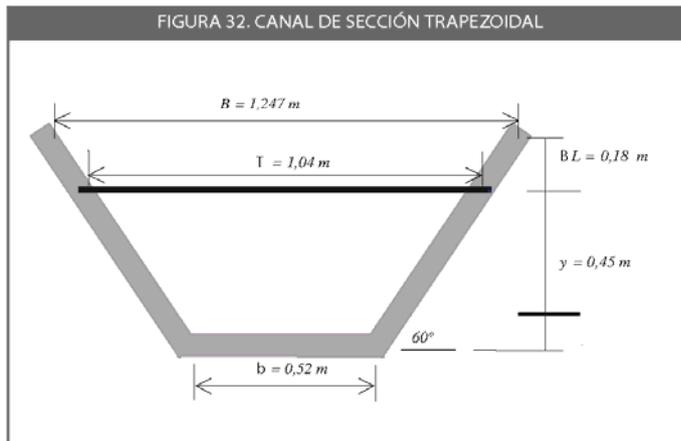
Como ejemplo 2, si quisiéramos calcular una sección de canal de sección trapezoidal, seguimos los mismos pasos cuyos datos anotamos en la siguiente tabla, teniendo en cuenta que el canal de máxima eficiencia hidráulica de sección trapezoidal, es cuando el ángulo que forma la pared del canal con la horizontal es de 60°. Por razones geométricas cuando $\theta = 60^\circ$, el tirante $y = 0.866 b$; $T = 2b$; $b = m$.

Datos:

$$Q = 0.400 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 0.002$$

$n = 0.014$ coeficiente de rugosidad del concreto pulido



Intento	B (m)	y (m)	T(m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	R ^{2/3}	n	1/n	S	S ^{3/2}	V(m/s)	Q (m ³ /s)
1	0.48	0.415	0.96	0.298	1.44	0.206	0.353	0.014	71.42	0.002	0.044	1.10	0.330
2	0.52	0.450	1.04	0.351	1.56	0.225	0.373	0.014	71,2	0.002	0.044	1.178	0.413

En el segundo intento, observamos que obtenemos un caudal de 0.413 m³/s. El borde libre, se asume igual que en el caso anterior y el valor de B = 1.247m se obtiene de acuerdo al valor asumido al borde libre y por las relaciones con respecto al ángulo de 60°.

Ejemplo 3. Calcular el diámetro interior del tubo canal que conducirá los 0.400 m³/s, con la pendiente del 2 por mil.

De la fórmula $Q = 28,4 \times Di^{8/3} \times S^{1/2}$

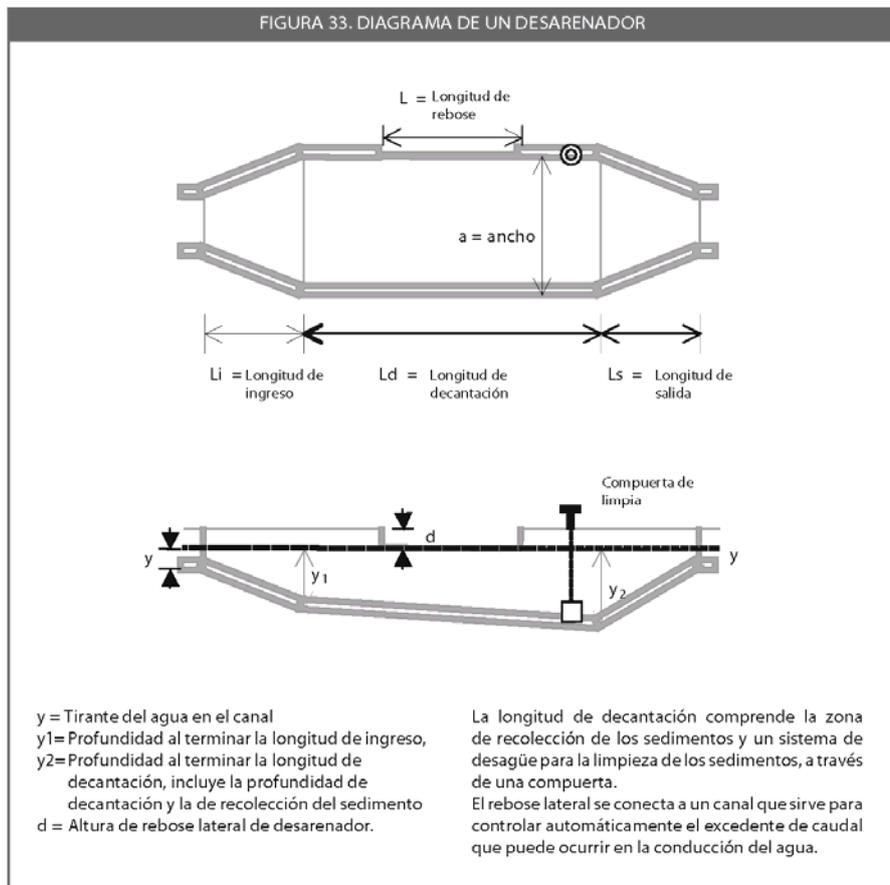
$$Di = \frac{0,400}{28,40 \times 0,002^{1/2}}^{3/8} = 0,65 \text{ m} = 26''$$

De estas tres opciones, se escogerá la que represente menor costo en su construcción.

5.1.3 Desarenador

Tiene la función de sedimentar las partículas que lleva el agua, de tal forma que estas no se sedimenten a lo largo del canal de conducción.

Se ubica por lo general después de la bocatoma y juntos con la cámara de carga.



Las partículas de arena, limos, arcillas, etc. que sedimenta el desarenador, tienen una velocidad de decantación (V_d) y una velocidad horizontal (V_h). Investigadores en la materia, nos proporcionan los siguientes valores dados en la siguiente tabla:

Diámetro de la partícula en mm	V_d en m/s
0.1	0.02
0.3	0.03
0.5	0.1
1.0	0.4



Para que las partículas lleguen a sedimentar, se recomienda que la velocidad horizontal del agua en el desarenador no sea menor a 0.2 m/s y no mayor a 0.4 m/s. Esto se consigue al cambiar de sección del canal al desarenador, a través de la longitud de ingreso, y por la ley de continuidad en la longitud de salida el agua adquiere su velocidad al continuar en el canal.

Las fórmulas que nos permiten calcular las dimensiones del desarenador son:

$$a = \frac{Q}{V_h \times y}$$

Donde:

Q = El caudal de diseño (igual al caudal del canal de conducción), en m³/s

V_h = Velocidad horizontal de la partícula en m/s

y = Tirante del agua en el canal en metros

a = Ancho del desarenador en la longitud de sedimentación

$$L_d = \frac{V_h}{V_d} \times y \times F$$

Donde:

L_d = Longitud de decantación, en m

V_h = Velocidad horizontal del agua en el desarenador, en m/s

V_d = Velocidad de decantación de la partícula, en m/s

y = Profundidad de decantación, por lo general el mismo valor del tirante del agua en el canal, o ligeramente mayor.

F = Factor de seguridad. Varía entre 2 y 3

Por razones prácticas, la longitud de ingreso y de salida se da el mismo valor que el ancho a del desarenador.

La profundidad $y_1 = y + (\text{del } 40\% \text{ al } 60\% \text{ de } y)$

La profundidad $y_2 = y_1 + (\text{del } 4\% \text{ al } 5\% \text{ la longitud de decantación})$

En casos especiales, habrá que determinar el arrastre de material del río en época de crecida, luego estimar la cantidad de material fino que ingresa al canal, el periodo de limpieza del desarenador y las dimensiones mínimas del tanque recolector de sedimentos.

Estas profundidades es con respecto al nivel del espejo de agua que está controlado por el rebose lateral. Las profundidades totales del desarenador será igual a las calculadas, más la altura del rebose lateral, incluido su borde libre.

Ejemplo: Calcular las dimensiones del desarenador, para el caudal de diseño indicado para el caso del canal de conducción de $Q = 0.400 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando que las partículas más grandes a sedimentar son de 0.2 mm de diámetro, y se ha escogido como sección de canal rectangular, donde $y = 0.43 \text{ m}$

Datos:

$$Q = 0.400 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Vh = 0.3 \text{ m/s (asumido de acuerdo a la recomendación)}$$

$$y = 0.43 \text{ m}$$

Fórmula:
$$a = \frac{Q}{Vh \times y}$$

Cálculo de a,
$$a = \frac{0.400}{0.3 \times 0.43} = 3.10 \text{ m}$$

Cálculo de longitud de decantación y profundidades:

Datos:

$$Vh = 0.3 \text{ m/s}$$

$$Vd = 0.03 \text{ m/s (de la tabla de velocidades de decantación, según del diámetro de la partícula de 0.3 mm)}$$

$$y = 0.43 \text{ m}$$

$$F = 2 \text{ (asumido de acuerdo al rango recomendado)}$$

Fórmula:
$$Ld = \frac{Vh}{Vd} \times y \times F$$

Cálculo de Ld:

$$Li = a = 3.10 \text{ m} = Ls$$

$$y_1 = 1.5y = 1.5 \times 0.43 = 0.645 \text{ m}$$

$$y_2 = 0.645 + 0.04 \times 8.60 = 0.989 \text{ m}$$

Cálculo de la altura de rebose lateral del desarenador, incluido el borde libre.

En este caso, el rebose lateral se previene para alguna emergencia donde el desarenador tenga que evacuar el total del caudal en forma automática, sin abrir la compuerta de limpia. Entonces aplicamos la fórmula del vertedero libre de pared ancha:

$$Q = C \times L \times h^{1.5}$$

Datos:

$$Q = 0.400 \text{ m}^3/\text{s}$$

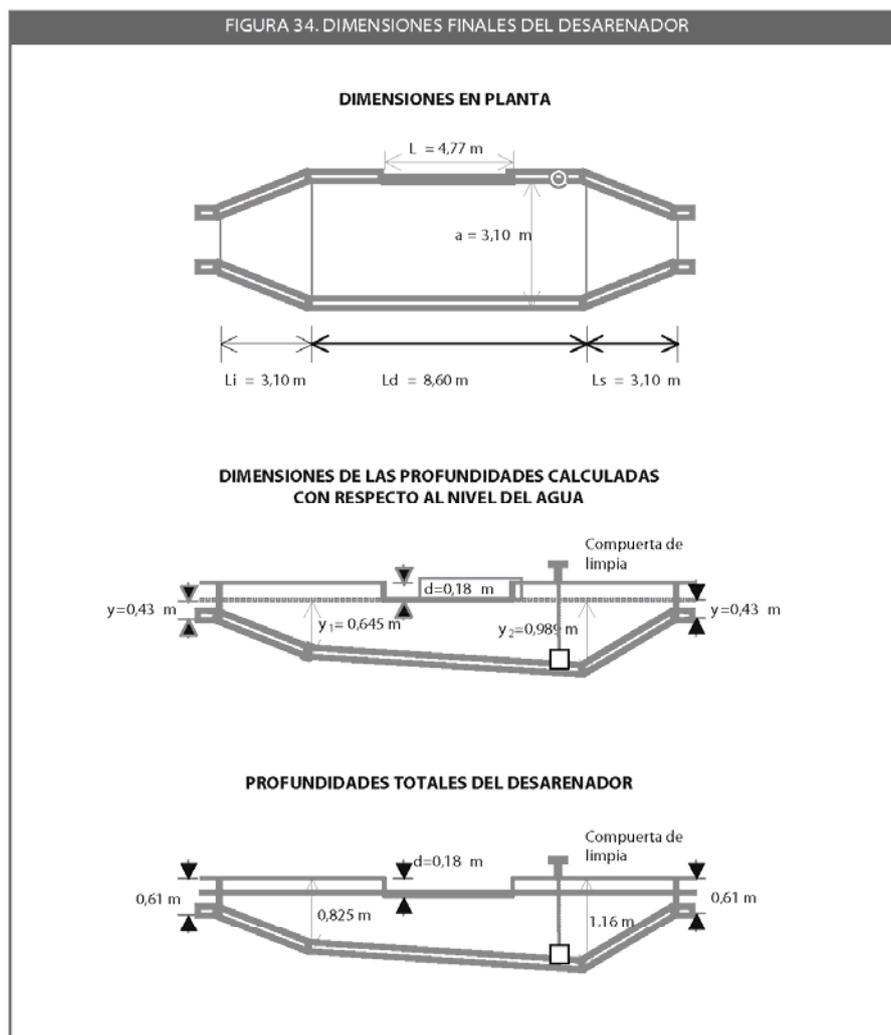
$$h = 0.14 \text{ m (asumido)}$$

$$C = 1.6 \text{ (Coeficiente de descarga)}$$

Cálculo de L =

$$L = \frac{Q}{C \times h^{1.5}} = \frac{0.400}{1.6 \times 0.14^{1.5}} = 4.77 \text{ m}$$

En el siguiente esquema, se detalla las dimensiones finales del desarenador. Las profundidades incluye la altura total del rebose y el borde libre. $d = h + BL = 0.14 + 0.04 = 0.18 \text{ m}$



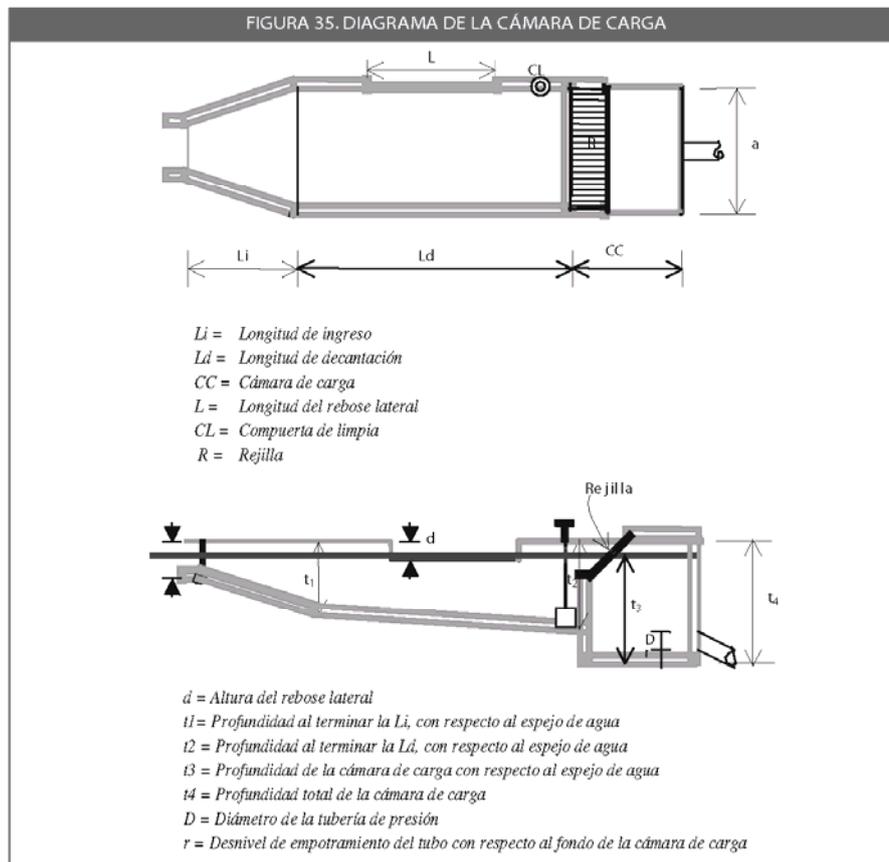
Para el sistema de limpieza y de evacuación del caudal en caso de emergencia, el desarenador debe estar acompañado de compuerta de interrupción antes del ingreso, de la compuerta de limpia y de una canal de rebose, debidamente acondicionado.

5.1.4 Cámara de carga

Se ubica al final del canal de conducción. La cámara de carga también tiene su desarenador, con la finalidad que el agua ingrese a la tubería de presión, sin partículas de arena que puedan disminuir la vida útil de la tubería de presión y de la turbina.

Elementos de la cámara de carga:

Además de los elementos del desarenador, la cámara de carga tiene la forma de un prisma. En una de sus caras se aloja la tubería de presión y el acceso del agua es a través de una rejilla de seguridad que no permite ingresar elementos en suspensión que trae el agua tal como la hojarasca, pedazos de madera, envases de plástico, etc., y por seguridad, lleva un techo fijo.



Dimensiones de la cámara de carga:

Las dimensiones que se refieren a la parte del desarenador ya se trataron en el capítulo anterior. Las demás dimensiones se determinan siguiendo los siguientes criterios prácticos:

$$t_3 = r + 4.5D$$

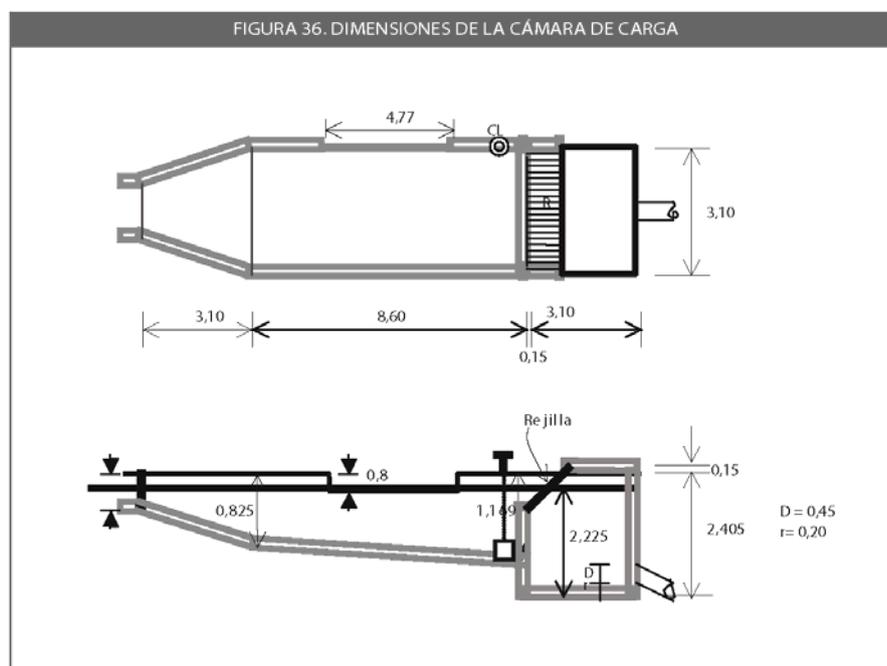
$$t_4 = t_3 + d$$

D = diámetro de tubo de presión, se determina en el diseño de la tubería

r = entre 0.15 m a 0.30 m, de acuerdo al menor o mayor diámetro del tubo

El ancho y largo de la CC, es igual al ancho del desarenador.

Para el caso del ejemplo anterior, las dimensiones de la cámara de carga, se detalla en el siguiente esquema, considerando que el diámetro de la tubería, mínimo es 0.45 m.



Características de la rejilla

Se ubica sobre el muro que divide el desarenador de la cámara de carga, y se apoya en el techo. En el apoyo lleva bisagras y en techo un elemento de seguridad y además debe permitir el acceso a la cámara de carga para realizar el mantenimiento y limpieza.

El material de fabricación, por lo general es un marco de acero y transversalmente va platinas de acero, separadas entre sí una distancia en centímetros menor al diámetro del inyector de la turbina si es tipo Pelton, o la recomendada por el fabricante de la turbina.

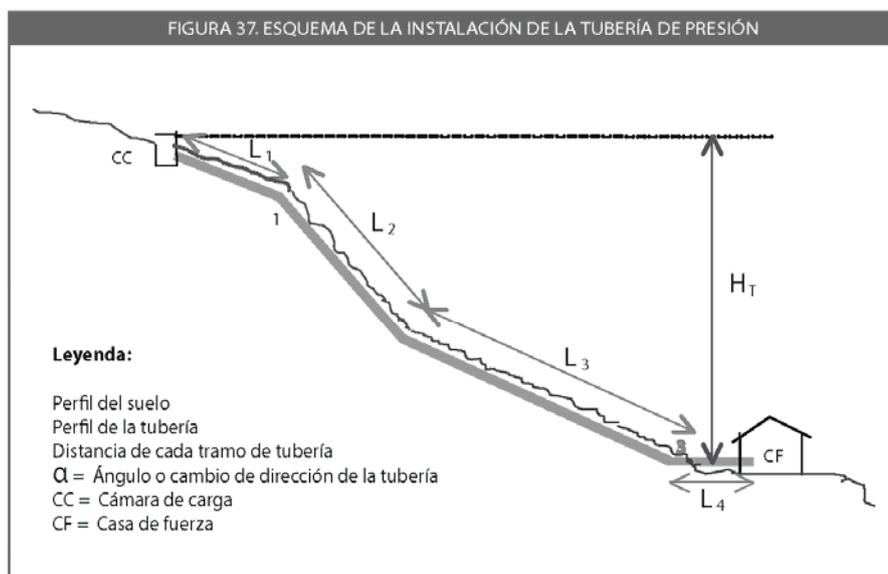
5.1.5 Tubería de presión

Llamada también tubería forzada, por ser un conducto cerrado que transporta el agua a presión desde la cámara de carga hasta la turbina ubicada en la casa de máquinas.

La sección es circular y actualmente en mini centrales hidroeléctricas se viene utilizando tubería de material PVC de alta presión, por ser de menor peso, fácil de instalar y de menor costo que la tubería de acero. En los casos donde la altura supera los 150 m de presión es necesario utilizar tubería de acero en la parte más baja.

En el trazo de la tubería de presión se recomienda que sea una sola línea recta. El cambio de dirección en el sentido vertical, depende de la topografía del terreno.

La tubería de presión PVC va enterrada y en los cambios de dirección se acoplan con curvas PVC fabricados según los ángulos del perfil de la tubería.



(1) Diseño de la tubería de presión:

Consiste en determinar:

- a) El perfil de la tubería, de acuerdo a los datos del terreno donde se ubicarán la cámara de carga, la casa de fuerza y el perfil del terreno.
- b) Calcular el diámetro de la tubería, y el espesor que responda a todas las exigencias de la presión y sobrepresiones que debe soportar.

Para obtener el perfil de la tubería de presión, primero se dibuja el perfil del terreno, luego se traza la tubería de presión, de acuerdo al tipo de material seleccionado. Si se determina que sea de material PVC, esta va enterrada a 0.80 m de profundidad según recomendaciones del fabricante. Si es de acero, esta va sobre el terreno, apoyada en soportes de concreto, y en ambos casos fijada al terreno con anclajes (bloques de concreto).

En el perfil de la tubería de presión se obtiene datos muy importantes, tales como:

- Cambios de dirección, expresados en ángulos y medidos en grados sexagesimales para determinar las curvas necesarias
- Longitud de cada tramo de tubería
- Ubicación de los anclajes y/o de los apoyos
- Ubicación de la cámara de carga y de la casa de fuerza
- El desnivel existente entre la cota de la casa de fuerza y el espejo del agua del río en época de crecida
- La altura bruta (desnivel entre el espejo de agua de la cámara de carga y el eje de la turbina)
- La altura parcial y/o la altura acumulada para cada tramo de tubería
- El ángulo aguas arriba y aguas abajo que forma la tubería con la horizontal en cada cambio de dirección (anclajes)

En el cálculo de tubería de presión seguimos los siguientes pasos:

- a) Diámetro interior de la tubería

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}}$$

Asumimos un valor para la velocidad del agua en la tubería entre 2 y 3 (m/s)

Calculado d_i , pasamos al catálogo de los fabricantes de tubería (garantizados con certificado de calidad), anotamos el diámetro exterior y el espesor del tubo, para comprobar si el diámetro previamente calculado será el definitivo para cada tramo, continuando con los siguientes cálculos.

- b) Cálculo de pérdida de carga en cada tramo de la tubería: h_p

$$h_p = h_f + h_t$$

1) h_f = pérdida de altura por fricción en la pared interna de la tubería, en m

2) h_t = pérdida de altura por turbulencia, a la entrada del agua al tubo, en cada cambio de sección (curvas, válvulas, etc.)

$$h_f = 0,08 \times \frac{f \times L_i \times Q^2}{d_i^5}$$

f = factor de fricción
 L_i = Longitud del tramo de la tubería (m)
 Q = Caudal de diseño (m³/s)
 d_i = diámetro interior de la tubería (tentativo)

$$hf = 0,08 \times \frac{f \times L_i \times Q^2}{d_i^5}$$

Cálculo del factor de fricción (f)

Se usa el diagrama de Moody para pérdidas por fricción en tuberías de acero o de PVC

Para usar el diagrama de Moody, se entra con los valores de:

$$1.27 \times \frac{Q}{d_i} \text{ y } K/d_i$$

K = rugosidad absoluta de las paredes interiores del tubo, en mm (ver tabla)

El diámetro interior d_i = Diámetro interior, en m.

Para obtener la relación indicada, ambos deben estar en la misma unidad de medida.

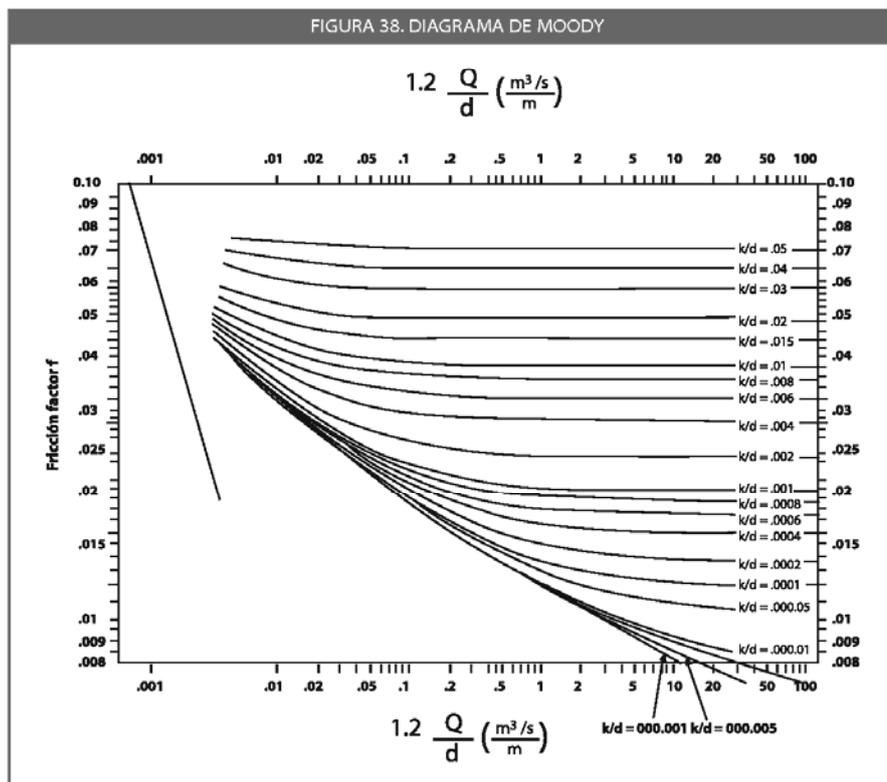


TABLA 11. VALORES DE RUGOSIDAD ABSOLUTA K EN MM			
Material de la tubería	Estado y edad de la tubería		
	Bueno < 5 años	Normal 5-15 años	Malo < 15 años
PVC, polietileno, resina de poliéster con fibra de vidrio	0.003	0.01	0.05
Concreto	0.06	0.15	1.5
Acero suave:			
a) No pintadas	0.01	0.1	0.5
b) Galvanizadas	0.06	0.15	0.3
Hierro fundido			
a) Nuevas	0.15	0.3	0.6
b) Viejas			
b.1 Corrosión leve	0.6	1.5	3.0
b.2 Corrosión moderada	1.5	3.0	6.0
b.3 Corrosión severa	6	10	20

Fuente: Adam Harvey. *Micro-hydro design manual*. 1993.

El diagrama de Moody, puede ser reemplazado con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log} \left(\frac{K}{d_i} + \frac{5.74}{\left(\frac{V \times d_i}{\mu} \right)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

K = Rugosidad absoluta de acuerdo con el material, en mm

d_i = Diámetro interior del tubo, en la misma unidad de K

V = Velocidad del agua en el tramo (m/s)

μ = Viscosidad cinemática del agua en m^2/s

Cálculo pérdidas de altura por turbulencia:

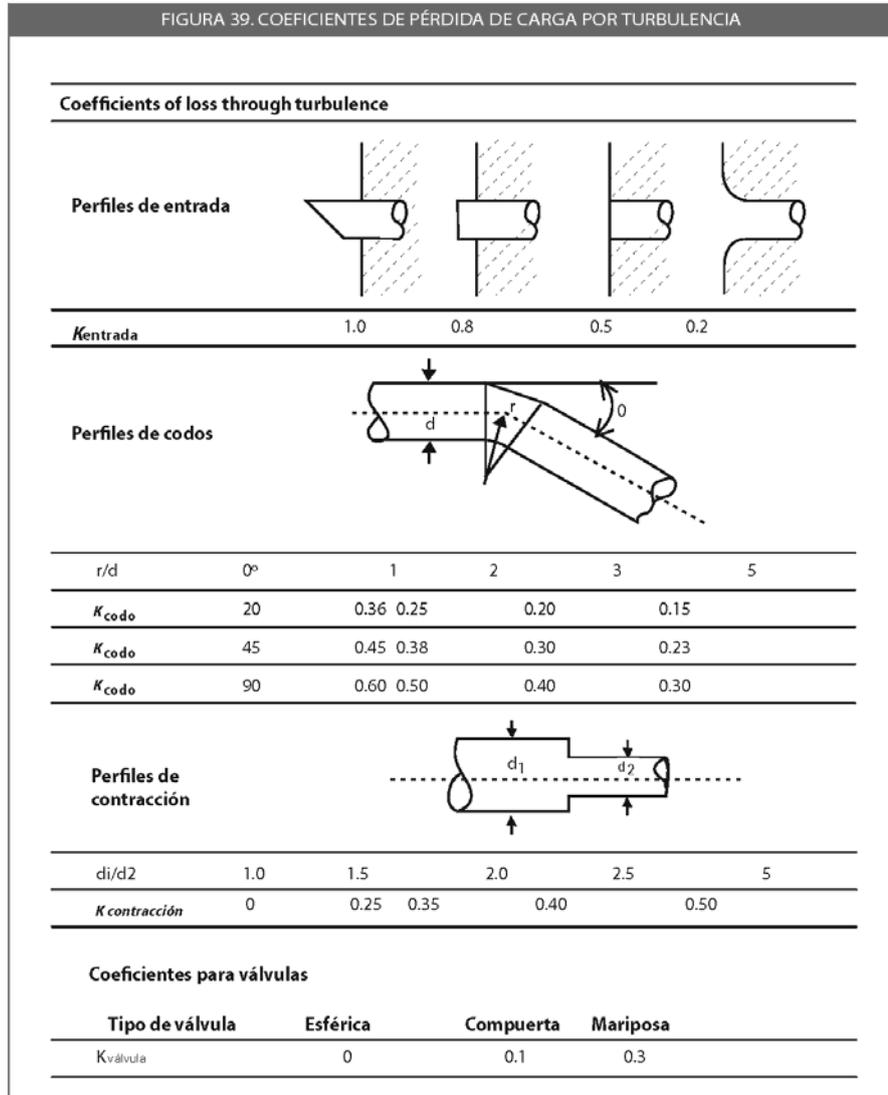
$$h_t = \frac{V^2}{2g} (K_1 + K_2 + \dots + K_n)$$

V = Velocidad del agua en el tramo considerado

$K_i = K_1, K_2, \dots, K_n$ es un factor asociado a codos, curvas, válvulas, cambios de dirección, etcétera (véase la tabla de coeficientes de pérdida de carga por turbulencia).

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

Este paso se puede obviar, si los valores calculados son menores comparando con los valores de pérdida por fricción.



Fuente: Adam Harvey. *Micro-Hydro Design Manual*. 1993

Calculando dichos valores, hallamos $h_p = h_f + h_t$

c) Cálculo de la pérdida de carga por fricción, en porcentaje

$$Pérdida = \frac{h_p}{H_B} \times 100$$

Este resultado, según la calidad de los materiales, longitud de la tubería, presiones, etc. por lo general es menor al 10%, caso contrario, se debe calcular otro diámetro y espesor diferentes y repetir estos pasos.

d) Cálculo del espesor de pared de tubería de presión, en cada tramo

El espesor de pared, también debe responder a:

- 1) Las presiones más altas: Δh

Son presiones transitorias o temporales, ocasionadas por el cierre de la válvula y en algunos casos por el golpe de Ariete, suceden en tiempo corto, a veces décimos de segundo cuando la turbina tiene un solo inyector, como en el caso de la turbina tipo Pelton.

- 2) A la disminución del espesor o grosor de las paredes internas de la tubería, durante su tiempo de servicio, ocasionadas por corrosión, desgaste, o por defectos de fabricación.

La presión transitoria en m, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta h = \frac{a \times V}{g}$$

Donde:

V = velocidad del agua en el tramo de la tubería

a = velocidad propagación de la onda de presión, en m/s

g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²

La velocidad de propagación de la onda de presión a, depende del diámetro, espesor y material del tubo. Para una aproximación referencial se puede emplear los siguientes valores:

Tubería de acero blando a = 900 m/s

Tubería de hierro fundido a = 1250 m/s

Tubería PVC a = 350 m/s

Para cálculos más exactos, empleamos la siguiente fórmula:

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \left(\frac{E_{ag} \times d_t}{E_{pvc} \times t} \right)}}$$

Donde:

E_{ag} = Módulo de elasticidad del agua, en kg/cm²

E_{pvc} = Módulo de elasticidad del PVC, en kg/cm²

d_i = Diámetro interior en m

t = Espesor del tubo en m

Para el caso, que la tubería es de acero o de otro material, usar el módulo de elasticidad que le corresponde, de acuerdo a la tabla de valores que dan los fabricantes (catálogos).

- 3) El espesor teórico T, ó espesor esperado, se calcula con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{5 \times f_s \times h_r \times d_i \times K_j}{\sigma} + K_c$$

T = Espesor teórico o esperado en mm

f_s = Factor de seguridad de acuerdo al material de la tubería

Si el material es PVC, se recomienda f_s = mayor a 2

$$h_r = H_t + \Delta h$$

h_r = Es la altura de máxima presión en m, en el tramo considerado

H_t = La altura bruta o de presión en el tramo, en m

Δh = La presión transitoria más alta, en m, en el tramo considerado.

d_i = diámetro interior de la tubería, en m

σ = Esfuerzo máximo de tracción del material considerado en N/m²

K_j = Factor de corrección de espesor, según el tipo del material de la tubería

Para tuberías de acero:

K_j = 1.1 mm, Factor de tipo de unión por soldadura

K_j = 1.2 mm, Factor de plancha rolada y soldada

K_c = 1.0 mm, Factor por corrosión (1 mm. cada 10 años)

Para tubería PVC

K_j = 1.0 mm

K_c = 1 mm cada 10 años, es el Factor de desgaste

El resultado obtenido, deberá ser comparado para determinar el diámetro y espesor requerido, caso contrario hacer de nuevo los cálculos.

Esta fórmula puede simplificarse, tomando las siguientes deducciones lógicas:

$$T = \frac{5 \times f_s \times h_r \times d_i \times K_j}{\sigma} + K_c$$

Para el caso del PVC: $K_j = 1$
 Entonces: $T - K_j = t$

Por lo tanto la fórmula equivalente para el PVC, es:

$$t = \frac{5 \times fs \times h_T \times d_i}{\sigma}$$

Esta fórmula es usada para determinar es el factor de seguridad

$$fs = \frac{t \times \sigma}{5 \times h_T \times d_i}$$

con la condición que en cada tramo que se aplica, $fs \geq 2$; y las unidades a utilizar, son:

t (mm), σ en N/m^2 , h_T en m, y d_i en m

Nota: En ambos casos, si las unidades de σ , se expresan en $kg-f/cm^2$, la fórmula equivalente es:

Para el PVC:

$$fs = \frac{t \times \sigma}{5 \times h_T \times d_i \times 10}$$

Para el acero:

$$fs = \frac{t \times \sigma}{5 \times h_T \times d_i \times K_j \times 10}$$

4) Datos tomados de tablas y catálogos de fabricantes de tubería de acero y PVC

E_{AG} = Módulo de elasticidad o de expansión del agua = 21,000 Kg-f/cm²

μ = Viscosidad cinemática del agua (15°C) = 1.14 x 10⁻⁶ Kg-f/cm²

E_{AC} = Módulo de elasticidad del acero = 2'000,000 Kg-f/cm²

E_{PVC} = Módulo de elasticidad del PVC = 28,000 Kg-f/cm²

σ_{AC} = Esfuerzo máximo de tracción del acero (rotura) = 3500 Kg-f/cm²

σ_{PVC} = Esfuerzo máximo de tracción del PVC (rotura) = 560 Kg-f/cm²

K_{AC} = Rugosidad absoluta o tamaño de la rugosidad del acero = 0.1 mm

K_{PVC} = Rugosidad absoluta o tamaño de la rugosidad del PVC = 0.01 mm

d_e = Diámetro nominal exterior de tubo (m)

d_i = Diámetro interior del tubo (m)

t = Espesor del tubo (mm)

A continuación se presentan tablas referenciales de catálogos

TABLA 12. SISTEMAS DE TUBERÍAS DE PRESIÓN, UNIÓN RIEBER. NORMA NPT ISO 4422															
Unión flexible Rieber				Serie 6.6 (Clase 15) Presión de trabajo a 20 °C: 15 bares			Serie 10 (Clase 10) Presión de trabajo a 20 °C: 10 bares			Serie 13.3 (Clase 7.5) Presión de trabajo a 20 °C: 7.5 bares			Serie 20 (Clase 5) Presión de trabajo a 20 °C: 5 bares		
Diámetro nominal		Longitud (m)		Diám. int. mm	Espes. pared mm	Peso aprox. kg/U	Diám. int. mm	Espes. pared mm	Peso kg/U	Diám. int. mm	Espes. pared mm	Peso kg/U	Diám. int. mm	Espes. pared mm	Peso kg/U
mm	pulg	Útil	Total												
63	2	5.90	6.00	54.20	4.40	7.32	57.00	3.00	5.13	58.40	2.30	3.99	59.80	1.60	2.83
75	2.5	5.89	6.00	64.40	5.30	10.48	67.80	3.60	7.32	69.40	2.80	5.78	71.20	1.90	4.00
90	3	5.89	6.00	77.40	6.30	14.96	81.40	4.30	10.50	83.40	3.30	8.18	85.60	2.20	5.56
110	4	5.88	6.00	94.60	7.70	22.35	99.40	5.30	15.81	102.00	4.00	12.13	104.60	2.70	8.34
140	5.5	5.87	6.00	120.40	9.80	36.06	126.60	6.70	25.21	129.80	5.10	19.42	133.00	3.50	13.48
160	6	5.85	6.00	137.60	11.20	47.28	144.60	7.70	33.42	148.40	5.80	25.58	152.00	4.00	17.96
200	8	8.84	6.00	172.00	14.00	73.88	180.80	9.60	52.09	185.40	7.30	40.24	190.20	4.90	27.53
250	10	5.81	6.00	215.00	17.50	115.44	226.20	11.90	80.75	231.80	9.10	62.71	237.60	6.20	43.52
315	12	5.77	6.00	271.00	22.00	182.89	285.00	15.00	128.25	292.20	11.40	99.01	299.60	7.70	68.15
355	14	5.75	6.00	305.40	24.80	231.07	321.20	16.90	161.23	329.20	12.90	124.52	337.60	8.70	85.01
400	16	5.74	6.00	344.00	28.00	293.92	361.80	19.10	205.28	371.00	14.50	157.72	380.40	9.80	107.90

Fuente: Catálogo de la fábrica Amanco del Perú S.A.

TABLA 13. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PVC			
Físicas		Mecánicas	
Peso específico	1,41 g/cm ³ a 25 °C	Tensión de diseño	100 kg/cm ²
Absorción del agua	<40 g/m ²	Resistencia a la tracción	560 kg/cm ²
Estabilidad dimensional	a 150 °C < 5%	Resistencia a la flexión	750 – 780 kg/cm ²
Coefficiente de dilatación térmica	0.06 mm/m/°C	Resistencia a la compresión	610 – 650 kg/cm ²
Constante dieléctrica	A 103-106 Hz: 3-3,8	Módulo de elasticidad	≈ 30.000 kg/cm ²
Inflamabilidad	Autoextinguible		
Coefficiente de fricción	n = 0,009 Manning C = 150 Hazen-Williams		
Punto Vicat	≥80 °C para acueducto		

Fuente: Catálogo de la fábrica Amanco del Perú S. A.

TABLA 14. TUBERÍAS DE PVC RÍGIDO						
Diámetro nominal (ASTM)	Diámetro exterior mm	Clase 15 (215) RDE-14.3 Espesor mm EC	Clase E 10 (145) RDE-21 Espesor mm EC	Clase 7.5 (108) RDE-27-7 Espesor mm EC	Clase 5 (72) RDE-41 Espesor mm EC	Largo incluye EC m
2"	60	4,2	2,9	2,2	1,8	5
2 1/2"	73	5,1	3,5	2,6	1,8	5
3"	88,5	6,2	4,2	3,2	2,2	5
4"	114	8,0	5,4	4,1	2,8	5
6"	168	11,7	8,0	6,1	4,1	5
8"	219	15,3	10,4	7,9	5,3	5
10"	273	---	13,0	9,9	6,7	5
12"	323	---	15,4	11,7	7,9	5

Fuente: Catálogo de la fábrica Interquímica S. A., Perú

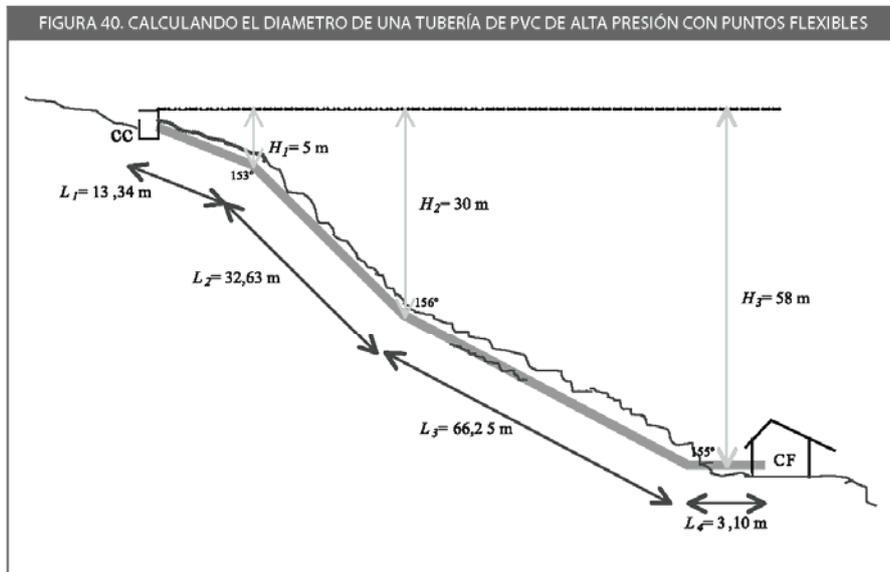
TABLA 15. SISTEMAS DE TUBERÍAS DE ACERO

Medida nominal pulg.	Programa 40				Programa 80				Programa 160			
	Diám. exterior pulg.	Espesor pared pulg.	Diám. interior pulg.	Peso lib/pie	Diám. exterior pulg.	Espesor pared pulg.	Diám. interior pulg.	Peso lib/pie	Diám. exterior pulg.	Espesor pared pulg.	Diám. interior pulg.	Peso lib/pie
2	2.375	0.154	2.067	3.66	2.375	0.218	1.939	5.03	2.375	0.343	1.689	7.45
2 1/2	2.875	0.203	2.469	5.80	2.875	0.276	2.323	7.67	2.875	0.375	2.125	10.00
3	3.500	0.216	3.068	7.58	3.500	0.300	2.900	10.30	3.500	0.437	2.626	14.30
3 1/2	4.000	0.226	3.548	9.11	4.000	0.318	3.364	12.50	4.000	---	---	---
4	4.500	0.237	4.026	10.80	4.500	0.337	3.826	15.00	4.500	0.531	3.438	22.60
5	5.563	0.258	5.047	14.70	5.563	0.375	4.813	20.80	5.563	0.625	4.313	33.00
6	6.625	0.280	6.065	19.00	6.625	0.432	5.761	28.60	6.625	0.718	5.189	45.30
8	8.625	0.322	7.981	28.60	8.625	0.500	7.625	43.40	8.625	0.906	6.813	74.70
10	10.750	0.365	10.02	40.50	10.750	0.593	9.564	64.40	10.750	1.125	8.500	116.00
12	12.750	0.406	11.938	53.60	12.750	0.687	11.376	88.60	12.750	1.312	10.126	161.00
14 OD	14.000	0.437	13.126	63.30	14.000	0.750	12.500	107.00	14.000	1.406	11.188	190.00
16 OD	16.000	0.500	15.000	82.80	16.000	0.843	14.314	137.00	16.000	1.562	12.876	241.00
18 OD	18.000	0.562	16.876	105.00	18.000	0.937	16.126	171.00	18.000	1.750	14.500	304.00

Fuente: Catálogo de la fábrica Metales Andinos S.A., Perú.

Todos estos cálculos se puede abreviar haciendo uso de una hoja de cálculo, tal como se muestra en la siguiente página, donde los datos que se ingresan son los de color verde, y azul para las fórmulas preestablecidas.

Ejemplo: Tomando datos del perfil de la tubería de presión del esquema anterior, y como caudal de diseño 0.400 m³/s, calcule el diámetro de la tubería, considerando que la elección del material es PVC de alta presión y de unión flexible.



Datos:

a) Longitudes de tramos de tubería

$$L_1 = 13.34 \text{ m}$$

$$L_2 = 32.63 \text{ m}$$

$$L_3 = 66.25 \text{ m}$$

$$L_4 = 3.10 \text{ m}$$

b) Altura de presión

$$H_1 = 5.00 \text{ m}$$

$$H_2 = 30.00 \text{ mm}$$

$$H_3 = 58.00 \text{ m} = \text{HT}$$

c) Caudal de diseño

$$Q = 0.400 \text{ m}^3/\text{s}$$

a) Cálculo del diámetro interior (tentativo), asumimos $V = 3 \text{ m/s}$

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.400}{3.14 \times 3}} = 0.41 \text{ m}$$

b) De acuerdo al diámetro tentativo, colocamos los datos en la sección A de datos de la hoja de cálculo (color verde).

En la sección B, introducimos la longitud de tubería y la altura de presión de cada tramo, el diámetro exterior y el espesor correspondiente en mm para cada clase o resistencia del tubo en metros de presión (clase 5, clase 7.5 y clase 10).

La elección de las clases se hace considerando que la clase 5 resiste hasta 50 m de presión. La clase 7.5 hasta 75 m de presión y la clase 100 hasta 100 m de presión, de tal manera que las fórmulas introducidas con los valores descritos evalúan inmediatamente la resistencia del espesor del tubo seleccionado. En el ejemplo señala que el factor de seguridad para el diámetro y espesor escogido, todos son mayores a 2, por lo tanto el diámetro y el espesor escogido son válidos para el proyecto.

TABLA 16. HOJA DE CÁLCULO DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN					
A. Datos					
Caudal de diseño		m ³ /s	0,4		
Salto bruto		M	58		
Longitud total de la tubería		M	115,32		
Número de cambios de dirección			3		
Número de cambios de sección			3		
Módulo de expansión del fluido		kgf/cm ²	21 000		
Viscosidad cinemática del agua (15 C)		m ² /s	1,14E-06		
Módulo de elasticidad del acero		kgf/cm ²	2 500 000		
Módulo de elasticidad PVC		kgf/cm ²	24 700		
Esfuerzo máximo de tracción del acero		kgf/cm ²	3 500		
Esfuerzo máximo de tracción PVC		kgf/cm ²	400		
Coefficiente de rugosidad del acero		Mm	0,1		
Coefficiente de rugosidad PVC		Mm	0,009		
B. Evaluación de la resistencia de la tubería					
			PVC UF	PVC UF	PVC UF
			Clase 5	Clase 7.5	Clase 10
Longitud del tramo		M	13,34	32,63	69,35
Altura de carga en el tramo		M	5	30	58
Diámetro nominal		pulg.	15,74	15,74	15,74
Diámetro exterior		M	0,4	0,4	0,4
Diámetro interior		M	0,3804	0,371	0,3618
Espesor (considerar la corrosión, etc.)		Mm	9,8	14,5	19,1
Velocidad del agua		m/s	3,52	3,70	3,89
Velocidad de onda		m/s	243,52	297,69	343,34
Tiempo crítico de cierre		S	0,11	0,22	0,40
Máxima presión transitoria		M	87,37	112,28	136,17
Máxima presión en la tubería		M	92,37	142,28	194,17
Factor de seguridad por espesor			2,23	2,20	2,18
C. Cálculo de la altura de pérdidas					
Rugosidad relativa			2,37E-05	2,43E-05	2,49E-05
Número de Reynolds			1 174 420,80	1 204 177,02	1 234 797,33
Factor de fricción			0,01	0,01	0,01
Altura de pérdidas por fricción		M	0,26	0,73	1,75
Coefficiente de pérdidas secundarias			1,20	1,20	1,20
Altura de pérdidas secundarias		M	0,76	0,84	0,93
Altura de pérdidas en el tramo		M	1,02	1,57	2,68
Altura total de pérdidas		M	4,25		
Porcentaje de pérdidas		%	7,32		
Salto neto		M	53,75		
Potencia mecánica en el eje		kW	158,04		
Pot. eléctrica en los bornes del alternador		kW	135,12		

Para el cálculo de la tubería de presión de acero, los pasos son iguales, y la hoja de cálculo también está preparada para este caso.

La curva para cada cambio de dirección, se recomienda que sea una clase mayor al de la tubería seleccionada, para seguridad. Estas curvas deben ser fabricadas por el mismo fabricante proveedor.

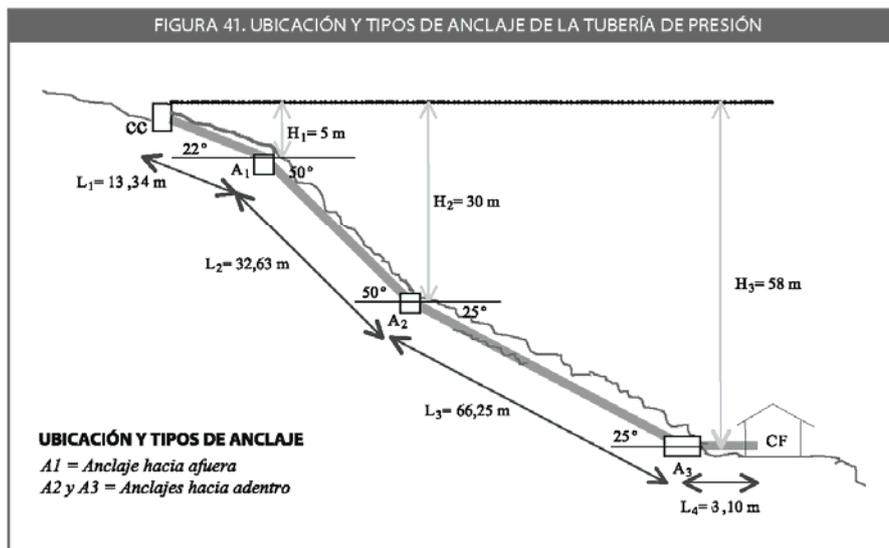
El peso del tubo PVC UF, se indican en el catálogo, por cada unidad por diámetro y espesor, que comparando con el peso de los tubos de acero, estos son muy pesados y dificultan su traslado. La instalación del tubo PVC UF es fácil de transferir a los beneficiarios de la minicentral, en cambio los de acero requiere

de personal calificado, el costo es más alto y requiere invertir en otros costos adicionales como por ejemplo el de pruebas protocolares de Rayos X que garantiza que han sido bien soldados y no va a tener fugas, sin embargo para alturas mayores a 150 m. la tubería de acero es indispensable y se coloca en la parte más baja, donde la presión pasa de los 150 m.

(2) Anclajes

Son bloques de concreto que fijan a la tubería hacia el suelo. Se ubica en cada cambio de dirección de la tubería, destacándose dos tipos de anclajes, el anclaje hacia adentro y el anclaje hacia fuera.

Observando el perfil de la tubería de presión, es anclaje hacia adentro cuando la curva es cóncava y hacia hacia fuera cuando la curva es convexa. El más peligroso es el anclaje hacia fuera ya que las fuerzas del agua que intervienen es como si quisiera levantar a la tubería.



(3) Diseño de anclajes

Consiste en dimensionar el tipo de anclaje que llevará la tubería de presión para ser fijada al suelo.

Los datos que se necesita para el diseño del anclaje, algunos de ellos se obtiene del perfil de la tubería tales como:

- Los ángulos β y el α formado por el tubo y la horizontal (α = aguas arriba, β = aguas abajo) en anclaje en estudio
- La altura de presión
- La longitud de tubería, para cada fuerza que interviene

Luego se determina cada una de las fuerzas que intervienen

Verificamos las tres condiciones de estabilidad del anclaje, a l volteo, al deslizamiento y al asentamiento del suelo, teniendo en cuenta dos casos: 1, cuando la tubería está sujeta a dilatación y 2, a la contracción:

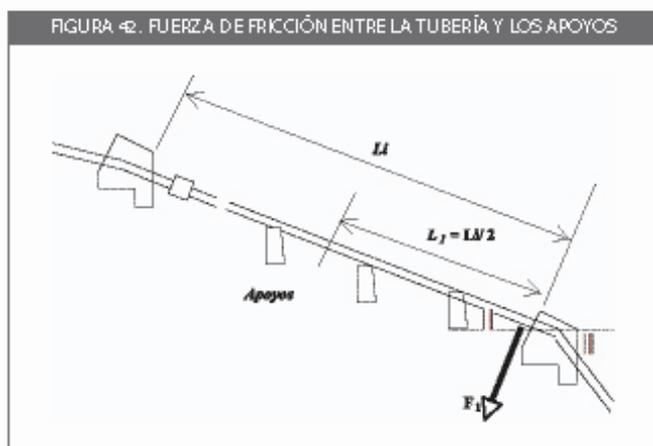
Fuerzas que intervienen en los anclajes (Tubería de acero)

F_1 = Componente del peso de la tubería + del peso del agua

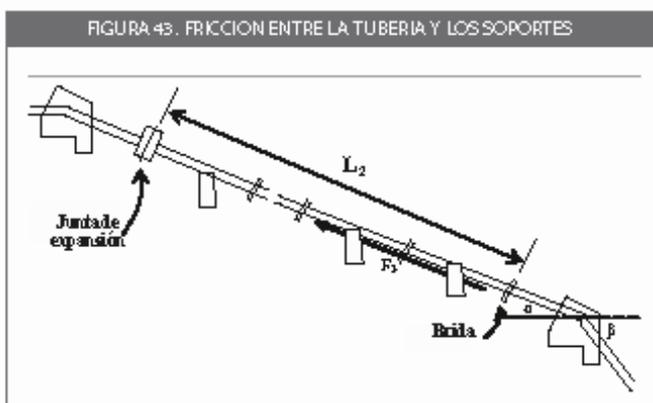
$$F_1 = W \times L_1 \times \cos\alpha$$

W = en Kg-f/m. = (Peso del tubo + peso del agua) por 1 m de longitud

L_1 = $L/2$, en m



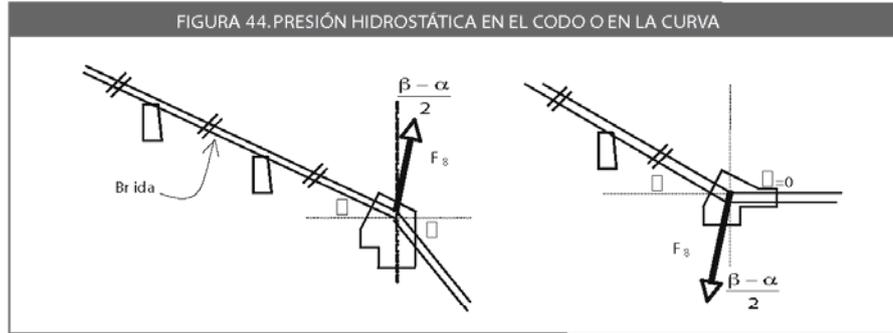
F_2 = Fuerza de fricción entre la tubería y los apoyos. Para que esta fuerza exista, mínimo debe haber un apoyo de la ranura hacia arriba



μ = Coeficiente de fricción entre el concreto y el acero = 0.5

W = en Kg-f/m. = (Peso del tubo + peso del agua) por 1 m de longitud

L_2 = Longitud entre la primera brida cerca al anclaje y la junta de expansión, cerca a los anclajes superior



F_3 = Por la presión hidrostática en el codo, o en la curva, al cambiar de dirección.

$$F_3 = 1,6 \times 10^3 \times H_i \times d_i^2 \times \text{Sen} \frac{\beta - \alpha}{2}$$

H_i = Altura de presión en el anclaje, en m

d_i = Diámetro interior de la tubería

F_3 en kg-f

F_4 = Componente del peso de la tubería paralela al tubo

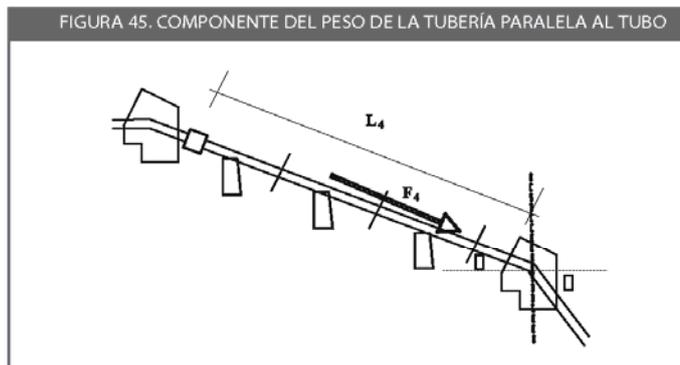
$$F_4 = W_t L_4 \times \text{Sen} \alpha$$

F_4 en kg-f

W_t = peso del tubo en kg-f/m

L_4 en m (prácticamente es la longitud total del tramo, menos la mitad de la longitud de un tubo)

F_5 = Fuerza por cambios de temperatura en la tubería



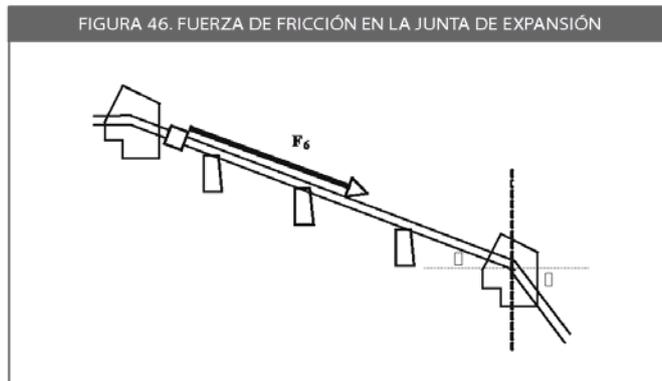
Esta fuerza se genera cuando la tubería está en la superficie, y no está prevista de una junta de expansión.

$$F_5 = 31 \times d_i \times t \times E \times a \times \Delta T$$

- F_5 , en kg-f;
- d_i , en m
- t , en mm (espesor de tubo)
- E , módulo de elasticidad del material del tubo, en kg-f/cm²
- α' = Coeficiente de dilatación lineal de la tubería, en °C-1

Esta fuerza es = 0, cuando en el tramo de la tubería de acero lleva junta de expansión.

La tubería PVC, va enterrada, por lo tanto no está expuesta a cambios de temperatura, entonces $F_5 = 0$



- F_5 = Fuerza de fricción en la junta de expansión
- Se origina entre la empaquetadura y las partes de la junta de dilatación.
- Tiene doble sentido, cuando la tubería se dilata, y cuando se contrae.

$$F_6 = 3,1 \times d_i \times C$$

- d_i = Diámetro interior de la tubería, en m
- C = Fricción en la junta de expansión, expresado en kg-f/unidad de longitudud de circunferencia

Aproximadamente:

$$F_6 = 10 \times d_i$$

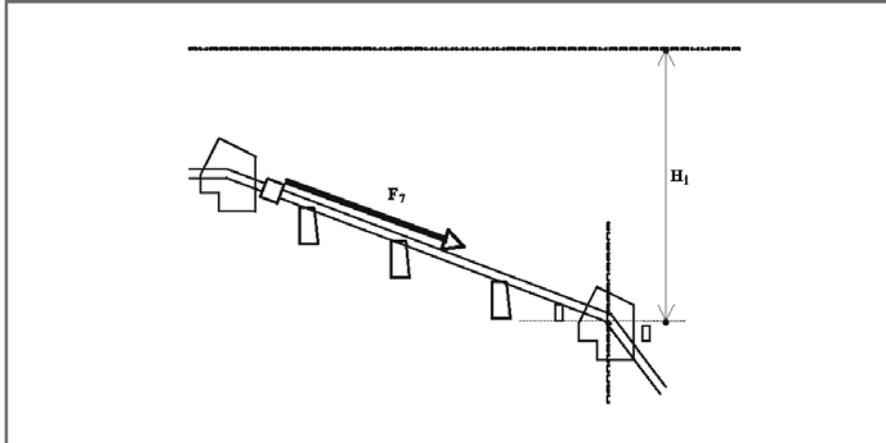
- d_i , en mm
- F_6 , en kg-f
- En tubería de PVC, $F_6 = 0$, no lleva junta de expansión
- F_7 = Fuerza debida a la presión hidrostática dentro de la junta de expansión.
- Trata de separar la tubería en dos tramos unidos por la junta

$$F_7 = 3,1 \times H_i \times d_i \times t$$

- H_i = Altura de presión en la tubería, a la altura del anclaje, en m

- d_i = Diámetro interior de la tubería, en m
- t = Espesor del tubo en mm
- $F_7 = 0$ en la tubería de PVC; no lleva junta de expansión

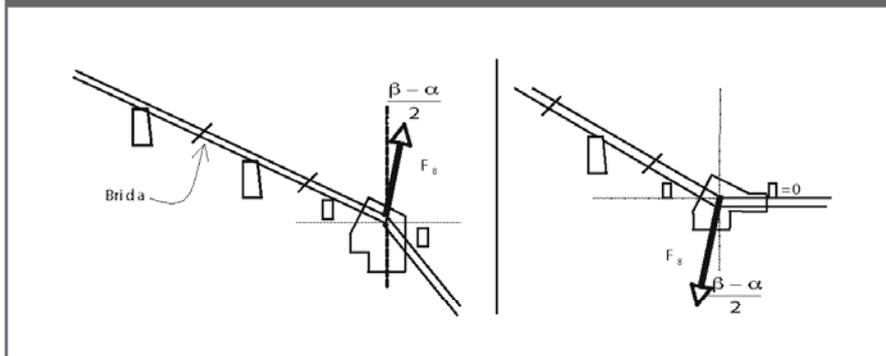
FIGURA 47. FUERZA DEBIDA A LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA DENTRO DE LA JUNTA DE EXPANSIÓN



F_8 = Fuerza por el cambio de dirección del movimiento del agua en el codo o en la curva. La dirección es la misma que F_3 .

$$F_8 = 250 \frac{Q^2}{d_i} \times \text{Sen} \left(\frac{\beta - \alpha}{2} \right)$$

FIGURA 48. FUERZA POR EL CAMBIO DE DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL CODO O CURVA



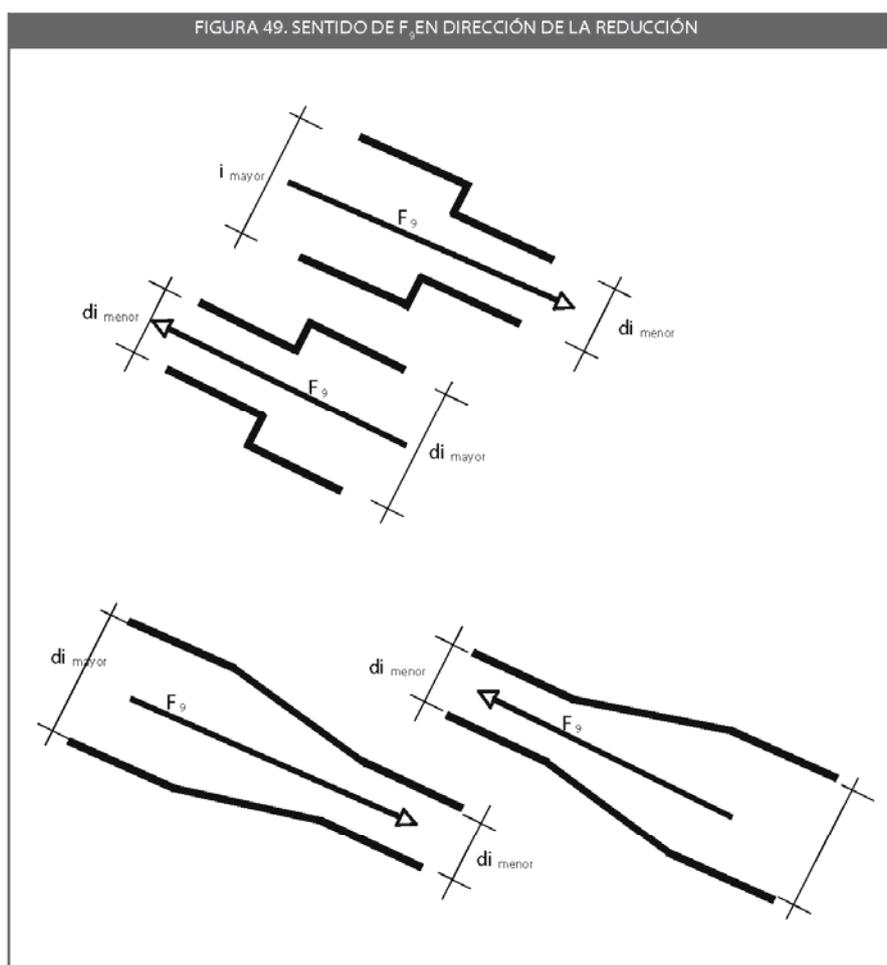
Esta fuerza es pequeña en comparación con las otras: por lo tanto, se puede obviar.

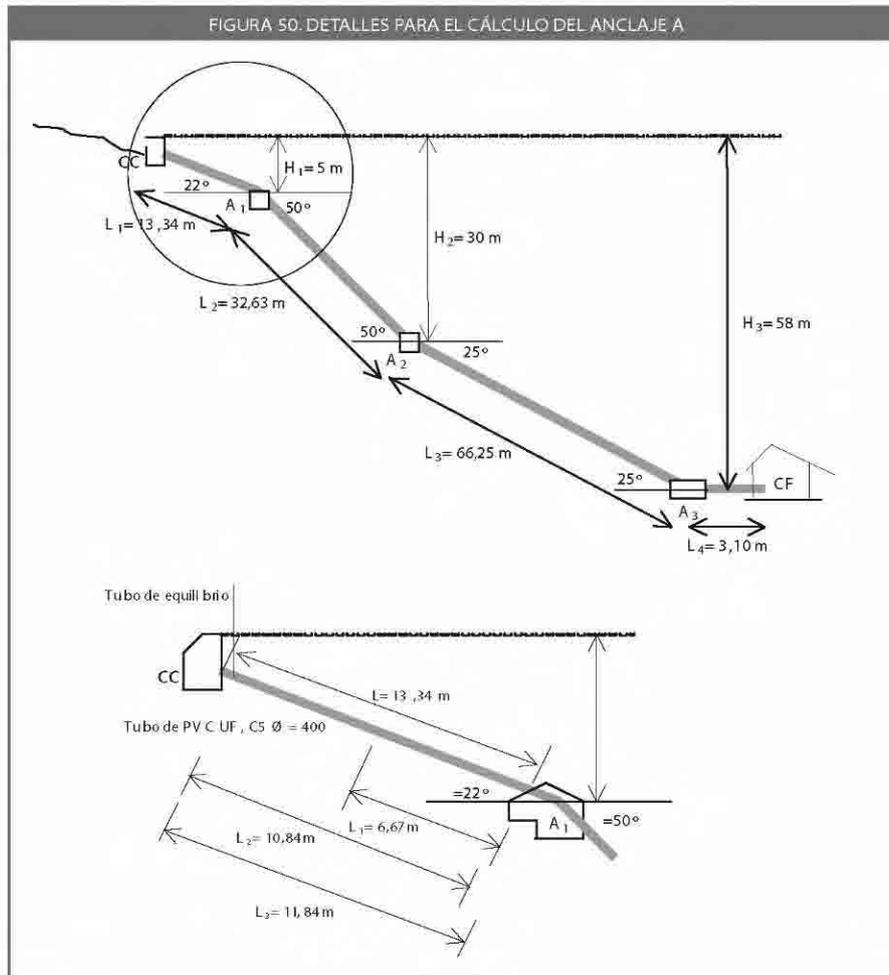
F_9 = Fuerza por el cambio del diámetro interior, con reducción. Actúa en dirección de la reducción, paralela a la tubería.

$$F_9 = 1 \times 10^3 \times H_i \times (d_i^2 \text{ mayor} - d_i^2 \text{ menor})$$

- H_i = Altura de presión sobre la reducción, en m
- $d_{i\text{ mayor}}$ = Diámetro de la tubería mayor, en m
- $d_{i\text{ menor}}$ = Diámetro de la tubería menor, en m

Ejemplo: Calcule el anclaje A1 (tipo hacia fuera), tomando datos del perfil de la tubería del esquema anterior y considerando que el caudal de diseño es 0.400 m³/s, el material de la tubería es PVC, cuyo diámetro y espesor se calculó anteriormente.





Datos:

$$Q = 0,400 \text{ m}^3/\text{s}$$

Del perfil de la tubería:

$$H = 5,00 \text{ m}$$

$$L = 13,34 \text{ m}$$

$$L_1 = 0,5L = 6,67 \text{ m}$$

$$L_2 = L - 2,50 \text{ m} = 10,84 \text{ m};$$

(2,50 m = 1 m de acoplamiento con la curva y 1,50 m antes del empotramiento a la cámara de carga va una te con el tubo de ventilación)

$$L_3 = L - 1,50 = 11,84 \text{ m}$$

$$\alpha = 22^\circ;$$

$$\beta = 50^\circ$$

De las características de la tubería calculada:

$$d_i = 0,38 \text{ m}$$

$$D_o = 0,40 \text{ m}$$

$$t = 9,8 \text{ mm}$$

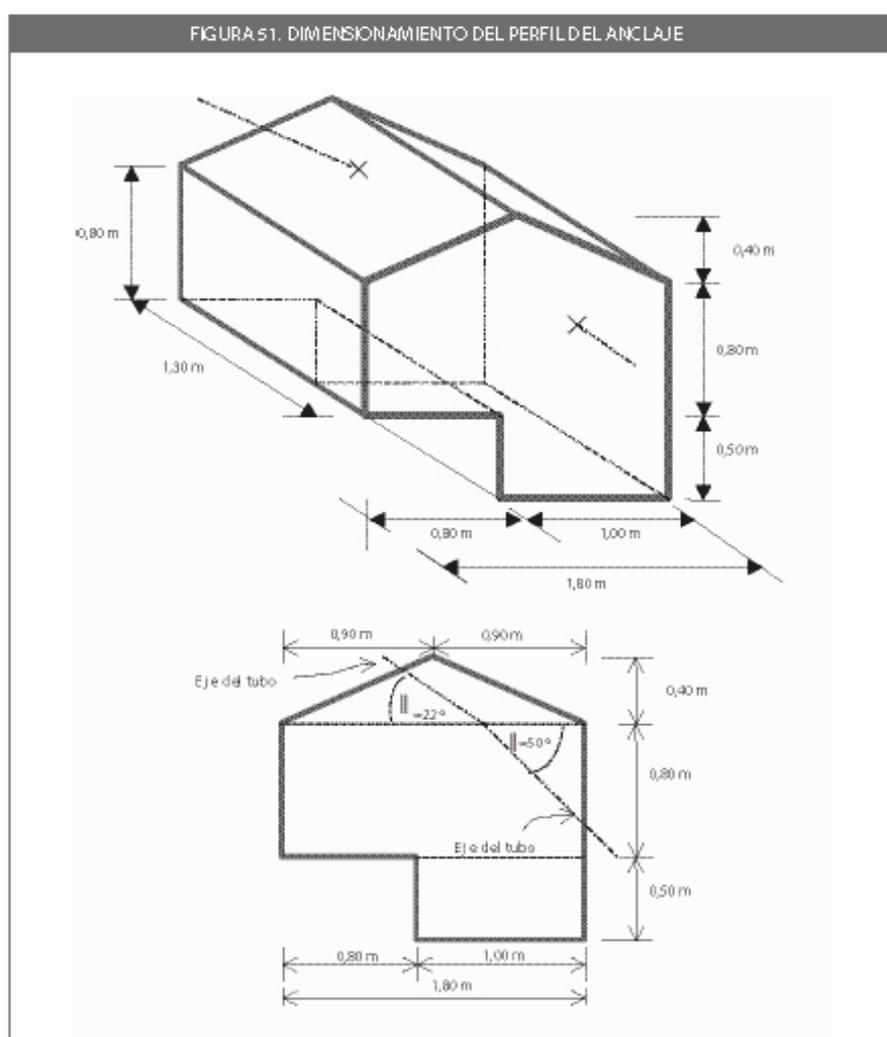
$$\gamma_t = 1450 \text{ kg-f/m}^3 \text{ altura específica de la tubería}$$

$$\mu = 0,4 \text{ coeficiente de fricción entre PVC y suelo}$$

Características del suelo:

$$C_s = 1 \text{ kg-f/cm}^2$$

a) Seleccionamos la forma y dimensionamos el anclaje. Véase la figura 51.



b) Verificamos que el anclaje predimensionado, cumpla las tres condiciones de equilibrio

Cálculo del peso de la tubería y del agua por metro lineal:

$$W = W_t + W_{aa}$$

$$a) \quad W_t = \gamma_c \times \frac{\pi}{4} [d_e^2 - d_i^2] = 1.450 \times \frac{3,1416}{4} [0,40^2 - 0,38^2] = 17,75 \text{ kg-f/m}$$

$$b) \quad W_a = \gamma_a \times \frac{\pi}{4} \times d_i^2 = 1.000 \times \frac{3,1416}{4} \times 0,38^2 = 113,35 \text{ kg-f/m}$$

$$W = 131,10 \text{ kg-f/m}$$

Cálculo de las fuerzas que actúan en el anclaje (en kg-f)

$$F_1 = W \cdot L_1 \cdot \cos 22^\circ = 131,10 \times 6,67 \times \cos 22^\circ = 810,76$$

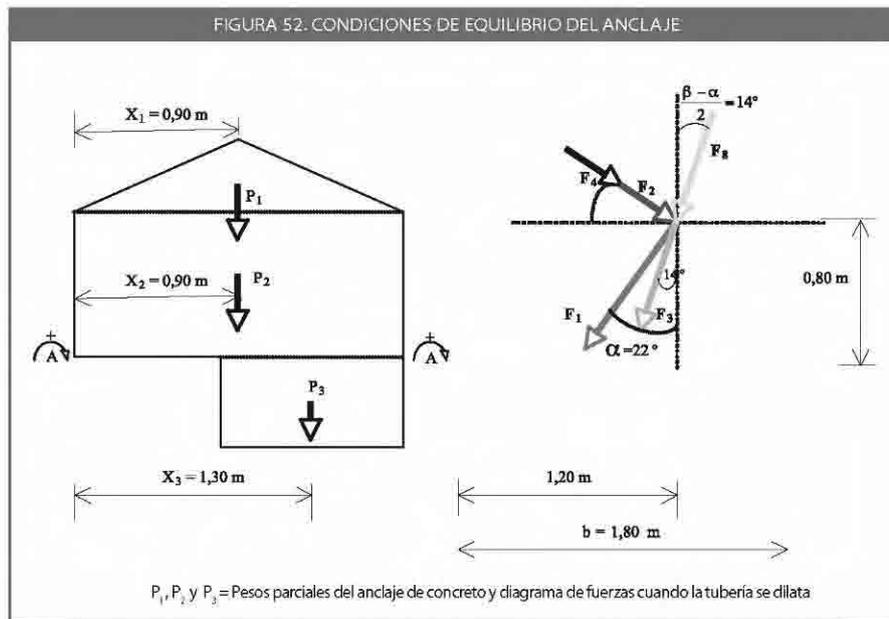
$$F_2 = \mu \cdot W \cdot L_2 \cdot \cos 22^\circ = 0,4 \times 131,10 \times 1,084 \times \cos 22^\circ = 527,05$$

$$F_3 = 1,6 \times 10^3 \times H_i \times d_i^2 \times \frac{\sin(50^\circ - 22^\circ)}{2} = 1.600 \times 5 \times 0,38^2 \times \frac{\sin 14^\circ}{2} = 279,46$$

$$F_4 = W_t \times L_1 \times \sin 22^\circ = 17,75 \times 11,84 \times \sin 22^\circ = 78,72$$

$$F_8 = 250(Q/d_i)^2 \times \frac{\sin(50^\circ - 22^\circ)}{2} = 250(0,40/0,38)^2 \times \frac{\sin 14^\circ}{2} = 67$$

Por tratarse de una tubería de PVC, las fuerzas F_7, F_6, F_7 y $F_9 = 0$



- 1) El codo, o el punto de cambio de dirección, donde actúan las fuerzas, se ubica horizontalmente a (2/3)b, y verticalmente a la distancia d, con respecto al punto A.
- 2) Los cálculos auxiliares, del bloque de concreto, para la verificación de la estabilidad, se resume en el siguiente cuadro:

TABLA 17. CÁLCULOS AUXILIARES PARA VERIFICAR LA ESTABILIDAD DEL BLOQUE DE CONCRETO						
N.º	Área m ²	Volumen m ³	Pesos: Pi Kg-f	Xi m	Ai.Xi m ² .m	Pi.Xi kg-f.m
1	0,36	0,468	1029,6	0,90	0,324	926,64
2	1,44	1,872	4118,4	0,90	1,296	3.706,56
3	0,50	0,65	1430,0	1,30	0,65	1.859,0
Total	2,30	2,99	6578,0		2,27	6.492,2

Ejemplo 1: cuando la tuberías se dilatan

Verificación de la estabilidad:

$$1) \text{ Al volteo: } \Sigma M_{\text{estabilizador}} / \Sigma M_{\text{volteo}} > 2$$

$$\Sigma M_{\text{estabilizador}} \text{ en A} = P_1 \cdot X_1 + P_2 \cdot X_2 + P_3 \cdot X_3 + F_1 \cdot \text{Cos } 22^\circ \times 1,20 +$$

$$(F_3 + F_8) \text{Cos } 14^\circ \times 1,20 + (F_2 + F_4) \text{Sen } 22^\circ \times 1,20 = 8.069,74 \text{ kg-f.m}$$

$$\Sigma M_{\text{volteo}} = -F_1 \cdot \text{Sen } 22^\circ \times 0,80 - (F_3 + F_8) \text{Sen } 14^\circ \times 0,80 + (F_2 + F_4) \text{Cos } 22^\circ \times 0,80 = 138,43 \text{ kg-f/m}$$

$$8.069,74 / 138,43 > 258 > 2 \dots \text{Ok}$$

$$2) \text{ Al deslizamiento: } \Sigma F_x < \mu \cdot \Sigma F_y$$

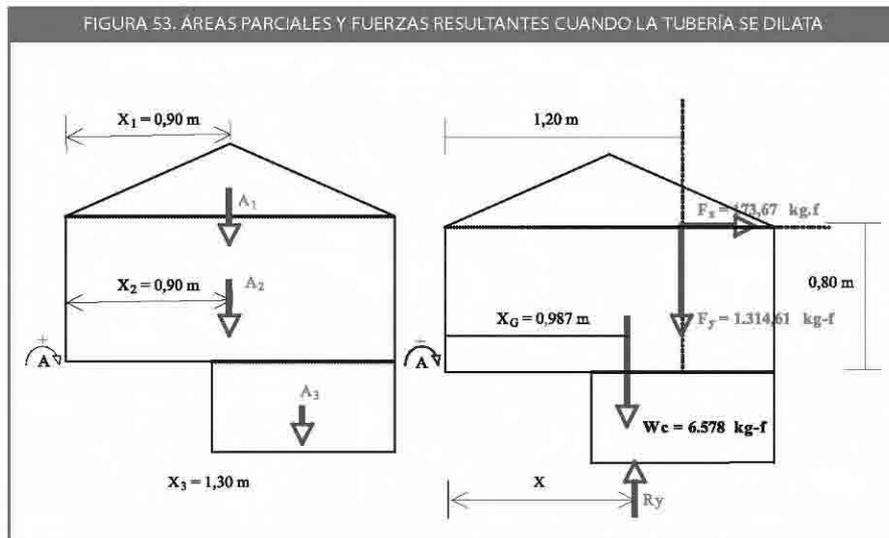
$$\Sigma F_x = -F_1 \cdot \text{Sen } 22^\circ - (F_3 + F_8) \text{Sen } 14^\circ + (F_2 + F_4) \text{Cos } 22^\circ = 173,67 \text{ kg-f}$$

$$\Sigma F_y = -P_1 - P_2 - P_3 - F_1 \cdot \text{Cos } 22^\circ - (F_3 + F_8) \text{Cos } 14^\circ - (F_2 + F_4) \text{Sen } 22^\circ = -7.892,61 \text{ kg-f}$$

Verificando:

$$173,67 < 0,5 \times 7.892,61 \text{ kg.f}$$

$$173,67 < 3.946,30 \dots \text{Ok}$$



3) Estabilidad del suelo

Cálculo de X_g para el bloque de concreto, por el método de las áreas

$$X_g = \frac{A_1 \times X_1 + A_2 \times X_2 + A_3 \times X_3}{\sum A_i} = \frac{2,27}{2,30} = 0,987m$$

Cálculo de X y de R_y

$$\text{Aplicamos } \sum M_A: -R_y \cdot X + 6.578 \times 0.987 + 173.67 \times 0.80 + 1.314.61 \times 1.20 = 0$$

$$R_y \cdot X = 8.208,9 \text{ kg-f} \cdot \text{m} \dots (1)$$

$$R_y = W_c + F_y = 6.578 + 1.314.61 = 7.892.61 \text{ kg.f}$$

$$X = 8.208,9 / 7.892.61 = 1.04 \text{ m}$$

Cálculo de la excentricidad $e = X - b/2$

$$e = 1.04 - 1.80/2 = 0.14 \text{ m}$$

Cálculo de la capacidad portante, máxima y mínima al suelo:

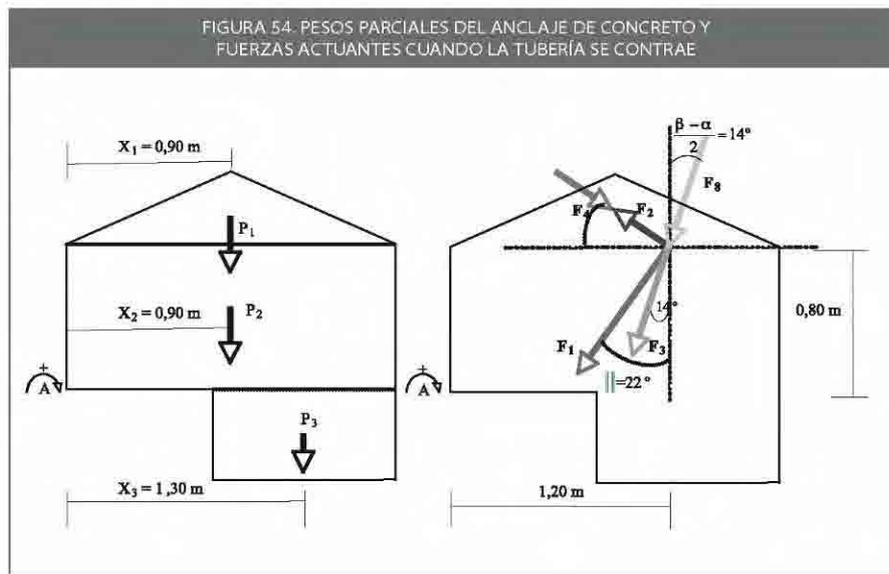
$$\sigma = \frac{R_y}{A} \left[1 \pm \frac{6xe}{b} \right] = \frac{7.892,61}{180 \times 130} \left[1 \pm \frac{6 \times 0,14}{1,80} \right] = 0,3372 [1 \pm 0,46]$$

$$\sigma_{\max} = 0,3372(1,46) = 0,49 \text{ kg-f/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = 0,3372(0,54) = 0,18 \text{ kg-f/cm}^2$$

Comprobamos que: $1 \text{ kg-f/cm}^2 > 0,49 \text{ kg-f/cm}^2 > 0,18 \text{ kg-f/cm}^2 \dots \text{Ok}$

Estos cálculos, nos demuestran que el anclaje es estable, ahora nos falta comprobar que también lo es para el segundo caso, es decir cuando la tubería se contrae.



Ejemplo 2: cuando la tubería se contrae

Las fuerzas que intervienen son las mismas. Solo cambia de sentido la fuerza F_2 .

Verificación de la estabilidad

Se siguen los mismos pasos del caso anterior. Los resultados son:

$$1) \text{ Al volteo} \quad \frac{\sum \text{Mestabilizador}}{\sum \text{Mvolteo}} > 2$$

$$11,83 > 2$$

$$2) \text{ Al deslizamiento:} \quad \sum Fx < \mu \cdot \sum Fy$$

$$802,92 < 0,5 \times 7496,18$$

$$802,92 \text{ kg-f} < 3748,09 \text{ kg-f}$$

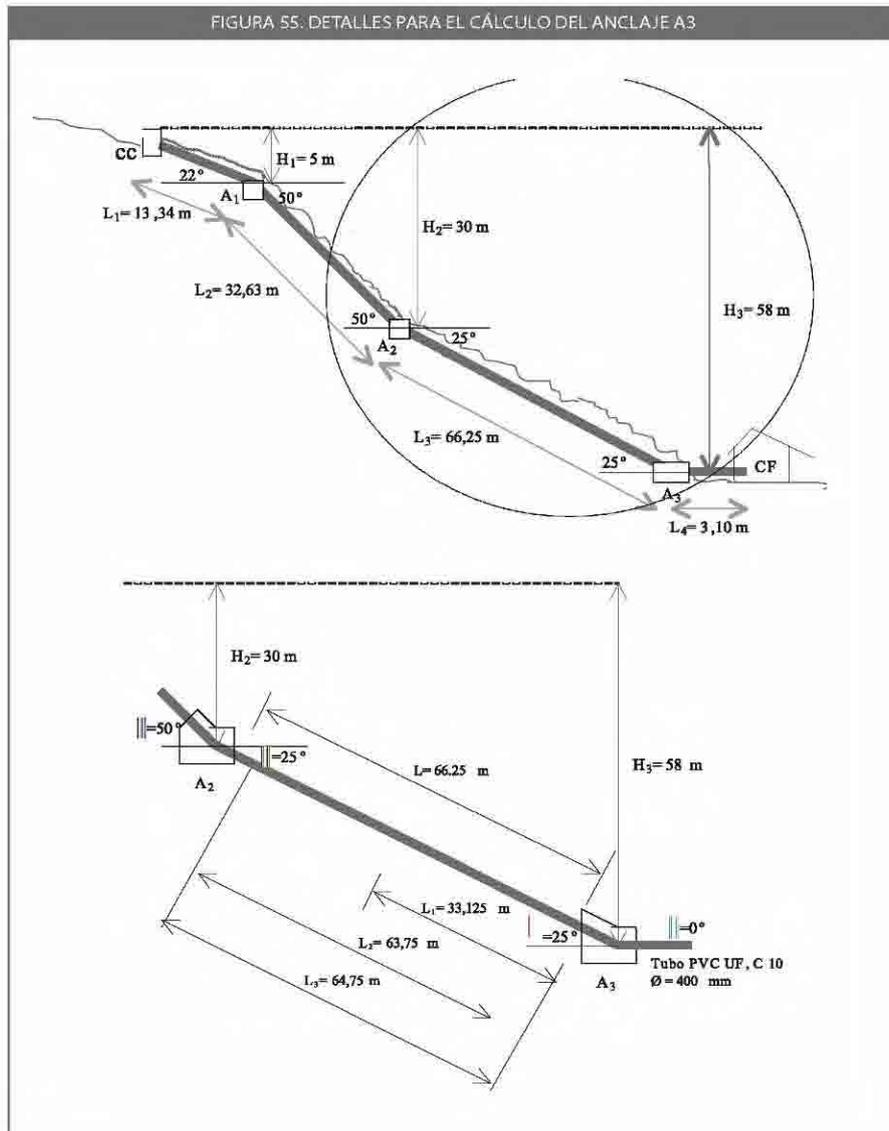
3) Estabilidad del suelo: $R_y = 7,496,15$
 $X = 0,93$

$e = X - b/2 = 0,927 - 0,90 = 0,027 \text{ m}$

$\sigma_{\text{máx}} = 0,35 \text{ kg-f/cm}^2$

$\sigma_{\text{mín}} = 0,29 \text{ kg-f/cm}^2$

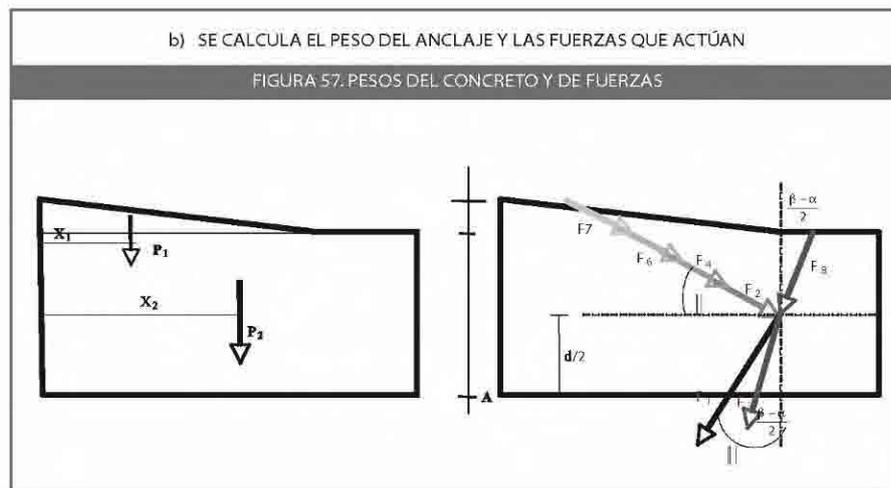
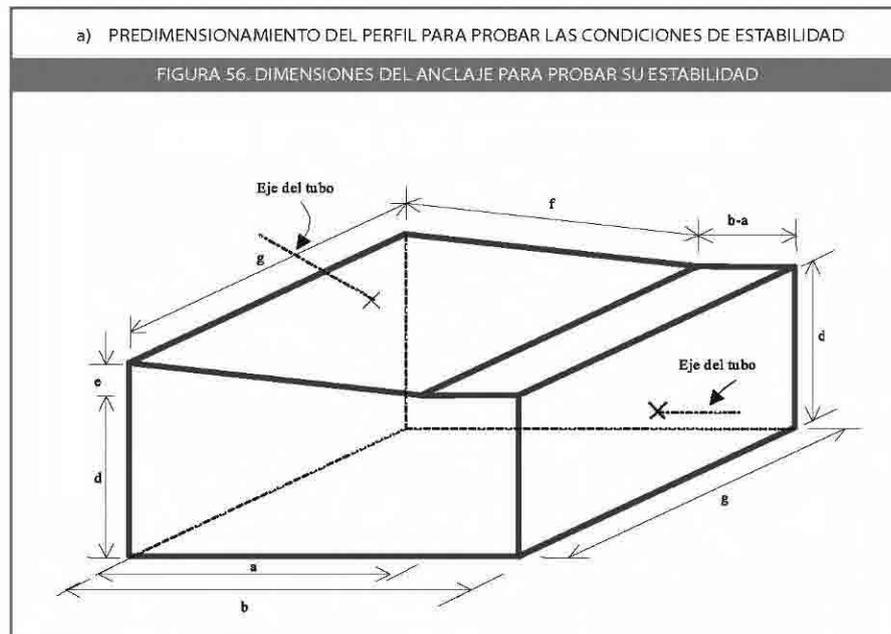
Comprobamos que $1 \text{ kg-f/cm}^2 > 0,35 \text{ kg-f/cm}^2 > 0,29 \text{ kg-f/cm}^2 \dots \text{Ok}$

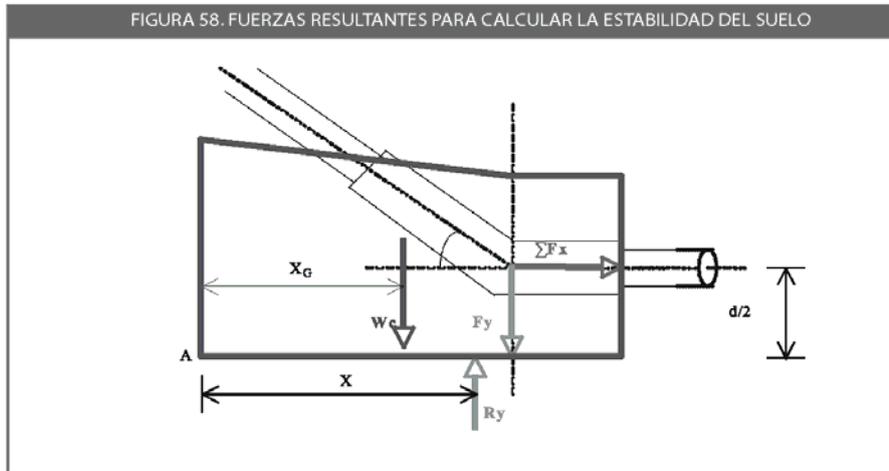


Anclaje hacia adentro

El anclaje 2 y 3, del esquema del perfil de la tubería son anclajes del tipo hacia adentro del esquema del perfil de la tubería.

El cálculo de su estabilidad, es en forma similar como en el caso del anclaje hacia fuera, aplicando las mismas fórmulas, para ambos casos, cuando se dilata y cuando se contrae.

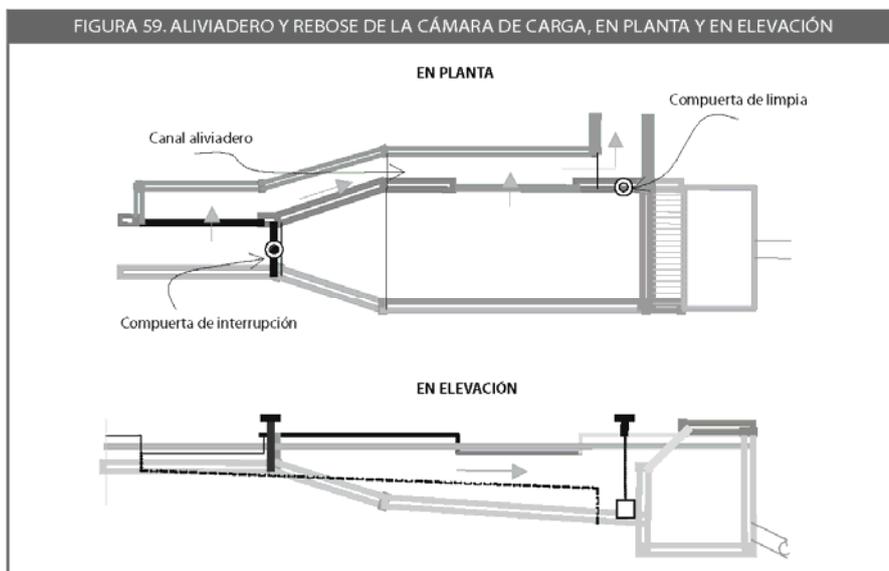




5.1.6 Aliviadero de la cámara de carga

Es la estructura que evacua en condiciones normales el excedente de agua de la cámara de carga, o el total de agua que llega a tener la cámara de carga cuando por alguna emergencia se paraliza la turbina.

El aliviadero consta de un canal que recibe el agua de la cámara de carga en las condiciones indicadas a través del rebose de la cámara de carga y/o del rebose del canal de conducción. Este canal es conectado hacia un lugar seguro evitando el desborde y erosión de suelos adyacentes a la cámara de carga. Generalmente el agua lo evacua hacia el mismo río.



El cálculo del canal del aliviadero, se hace siguiendo el procedimiento desarrollado en capítulo de canales, con la diferencia que la pendiente puede ser variable, de acuerdo a la pendiente del terreno.

El siguiente esquema, indica la ubicación del canal aliviadero, como obra complementaria y necesaria a la cámara de carga.

5.1.7 Canal de descarga

Conduce el agua desde la base de la turbina hasta el río. En el casos que el agua turbinada no es devuelta al río, podemos hacerlo a un lugar adecuado sin que erosione suelos adyacentes, puede ser a una quebrada o a un canal que previamente es diseñado por ejemplo para riego u otros usos como piscigranja, agua potable, etc.

En todos estos casos para el normal funcionamiento del canal de descarga, debemos elegir adecuadamente las cotas del fondo de la solera, al inicio y al finalizar, de tal manera que el nivel del espejo de agua del río en época de crecida esté siempre más bajo que el nivel de la cota final del fondo del canal.

El diseño del canal de descarga, puede ser igual al canal de conducción, ya que el es mismo caudal que descargará, pero en la mayoría de casos la sección puede ser menor que del canal de conducción, aprovechando favorablemente la topografía del terreno para darle mayor pendiente, donde la velocidad del agua debe ser menor de 3 m/s.

El material a emplear se recomienda sea de concreto para que resista mayor velocidad y no sea erosionado. En otros casos se recomienda emplear el tubo como canal, trabajando con un tirante igual a $0.75D_i$, recomendado por los fabricantes.

Ejemplo:

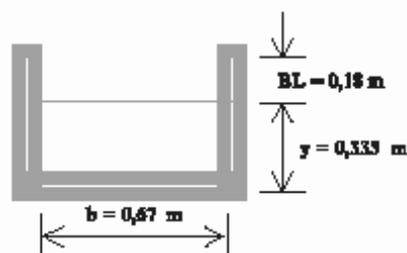
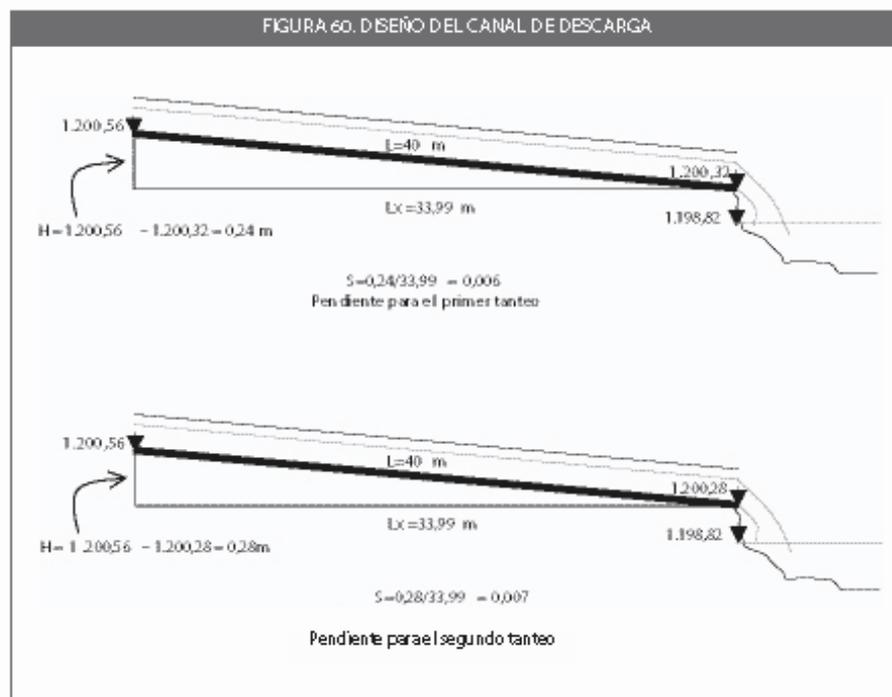
Caudal a descargar: $0.400 \text{ m}^3/\text{s}$

Cota de fondo del canal de descarga: 1 200.56 m

Cota de fondo del canal de descarga al finalizar: 1 200.32 m

Cota del nivel del agua de río en tiempo de crecida: 1 198.82 m

Longitud del fondo de canal = 40 m



Solución:

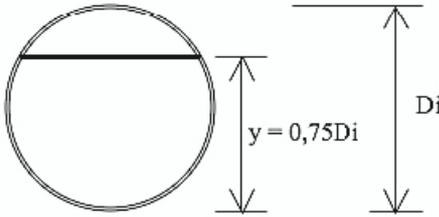
El primer tanteo se hace, considerando que la pendiente aprovechable puede ser 0.7 por mil y el segundo tanteo, considerando una pendiente del 7 por mil, para obtener mínimo $0.400 \text{ m}^3/\text{s}$ y porque la cota de crecida del río no se permite.

Escogemos el segundo cálculo como válido para un canal rectangular como se muestra en la figura, el que transporta al mínimo $407 \text{ m}^3/\text{s}$.

Intento	b (m)	y (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	R ^{2/3}	n	1/n	S	S ^{1/2}	V (m/s)	Q (m ³ /s)
1	0.67	0.325	0.224	1.34	0.168	0.304	0.014	71.42	0.006	0.077	1.68	0.377
2	0.67	0.335	0.224	1.34	0.168	0.304	0.014	71.42	0.007	0.0836	1.81	0.407

En el caso que se quiera emplear tubería PVC como canal de descarga, el diámetro será:

$Q = 28,4 \times D_i^{4/3} \times S^{1/2}$



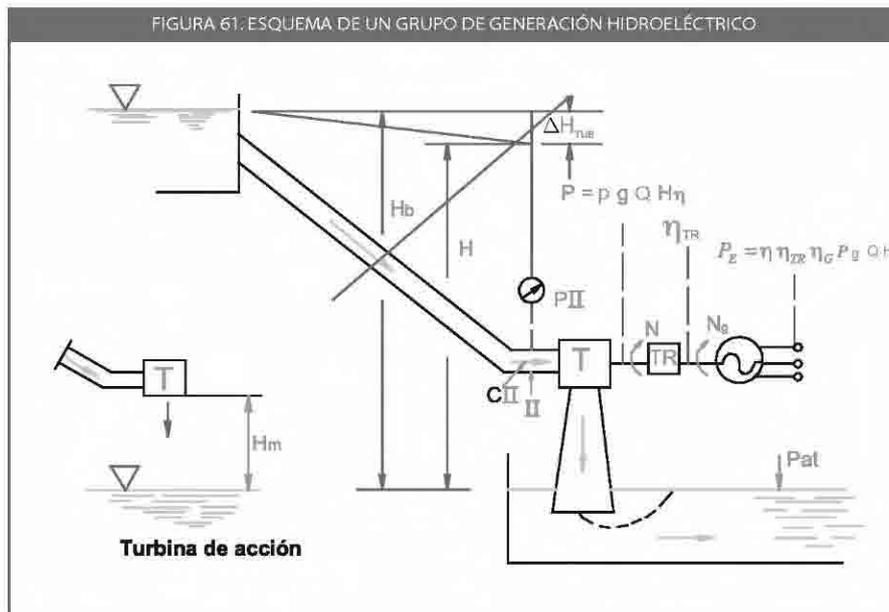
$D_i = (Q / 28,4 \times S^{1/2})^{3/8}$
 $D_i = (0,400 / 28,4 \times 0,007^{1/2})^{3/8}$
 $D_i = 51,12 \text{ m}$

5.2 Diseño electromecánico

5.2.1 Diseño preliminar de turbinas

(1) Selección de la turbina

En esta segunda etapa de selección, teniendo los datos del lugar, se realiza una comparación con los datos preliminares, donde ya se tiene una idea del tipo de turbina que se va a utilizar. Luego se procede a realizar el dimensionamiento de la turbina bajo las consideraciones siguientes.



(2) Potencia de la turbina

Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_E = P \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_G$$

$$P = \frac{\gamma Q H \eta}{K} = \frac{P_E}{\eta_{TR} \cdot \eta_G} = \frac{Q H \eta}{102}$$

$$\eta_{GR} = \eta \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_G$$

Donde:

η_{GR} = Eficiencia del grupo de generación, adimensional

K = Constante K = 1000 W/kW

H = Altura en metros

Q = Caudal en L/s

En relación con la determinación del salto neto, se puede proceder del siguiente modo:

Turbinas de reacción: $H = H_T - H_m$

Turbinas de acción: $H = H_b - H_T - H_m$

Donde:

H_b = Salto bruto, m

ΔH_T = Altura de pérdidas en la tubería de presión, m

H_m = Altura de montaje de la turbina

En el caso de no tener información directa de las eficiencias de la turbina o del generador, pueden usarse los valores de la siguiente tabla para eficiencias del grupo de generación

TABLA 18. EFICIENCIA DE DISTINTOS TIPOS DE TURBINA				
Potencia (kW)	TIPO DE TURBINA			
	Pelton	Michell-Banki	Francis	Axial
<50	58-65%	54-62 %	59-65%	58-66 %
51-500	65 -69	62 - 65	66 - 70	66 - 70
501-5000	69 - 73	65*	70 - 74	70 - 74

(3) Número específico de revoluciones

El diseño y la construcción de las turbinas hidráulicas requieren la solución de una serie de problemas, que no siempre pueden afrontarse matemáticamente y que deben resolverse más bien en forma experimental mediante la utilización de modelos. El modelo permite reducir el costo de los ensayos experimentales y mayor control y precisión de los costos. Como fluido de ensayo se puede usar agua o aire. El modelo permitirá verificar los cálculos teóricos antes de construir el prototipo (turbina real) y señalar las mejoras necesarias para obtener el comportamiento deseado. Las relaciones entre el modelo y el prototipo requieren el establecimiento de las leyes de semejanza (geométrica, cinemática y dinámica), de cuyos análisis se obtienen cifras características. Entre ellas, los llamados números específicos de revoluciones son los que mejor expresan la semejanza entre un modelo y el prototipo.

Estos números son los siguientes:

Número específico de revoluciones de caudal o número de Brauer (N_q)

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Número específico de revoluciones de potencia o número de Camerer (N_s)

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Donde:

N_q y N_s = Número específico de revoluciones, RPM

N = Velocidad de rotación de la turbina, RPM

Q Caudal de la turbina, m³/s

H Salto neto, m

P Potencia al eje de la turbina, HP o kW

Ambos números pueden usarse indistintamente, pero para las turbinas hidráulicas se prefiere continuar el uso del número N_s .

$$N_s = N \cdot \sqrt{\frac{\rho g Q H \eta}{K}} \cdot H^{5/4}$$

La relación con el N_q es la siguiente:

$$N_s = N \cdot \sqrt{\frac{\rho g Q H \eta}{K}} \cdot H^{5/4} \times N_q$$

Para las turbinas grandes:

$$N_s = 3,040 N_q$$

Para las turbinas pequeñas:

$$N_s = 3,03 N_q$$

Los números específicos pueden definirse como las velocidades de rotación de una turbina prototipo, cuyo modelo semejante opera bajo parámetros unitarios.

De este modo, el número N_q representa la velocidad de rotación en RPM del modelo cuando:

$$Q = 1 \frac{m^3}{s} \text{ y } H = 1.0 \text{ m}$$

De modo similar, N_s representa la velocidad de rotación RPM del modelo, cuando:

$$P = 1 \text{ HP o } 1 \text{ kW y } H = 1 \text{ m}$$

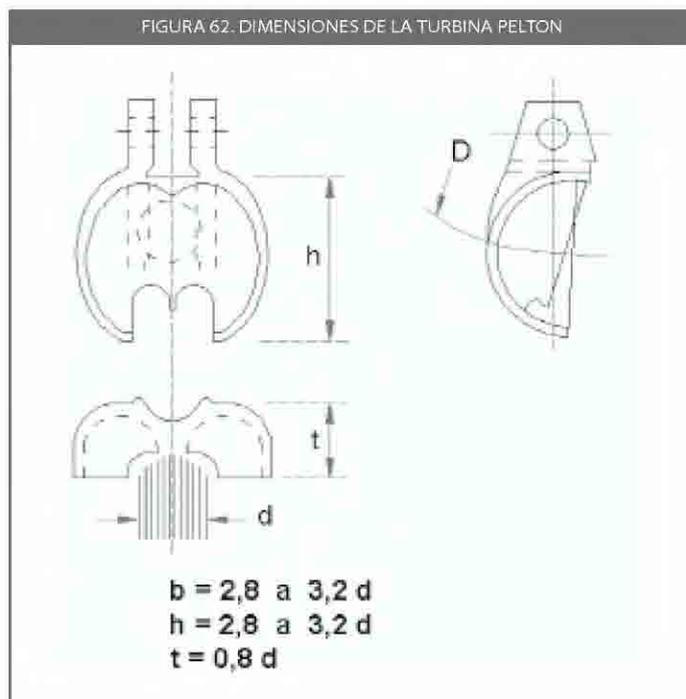
Es importante resaltar que el valor N_q o N_s dependerá del sistema de unidades que se use, pues en el sistema inglés, en el sistema internacional SI o en cualquier otro, los valores diferirán entre sí.

Dado que los números específicos de revoluciones representan una velocidad de rotación, es costumbre calificar a las turbinas de «lentas», «normales» o «rápidas»; sin embargo, hay que tener claro que estos términos no están vinculados con la velocidad real de rotación del eje de la turbina, sino con las condiciones de altura y caudal.

(4) Turbina Pelton

Las dimensiones principales de la turbina se muestran a continuación:

Velocidad de chorro a la salida del inyector. Tratándose de una turbina de acción donde todo el salto neto se convierte en energía cinética, la velocidad será:



$$C = \phi \sqrt{2gH}$$

Siendo:

$$\phi = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_i}{H}}$$

En estas relaciones, C está en m/s. ϕ es el coeficiente de velocidad que depende de las pérdidas del inyector ΔH_i en m; su valor varía entre 0.95 y 0.99.

Diámetro del chorro. Este valor se mide en la ventana contracta:

$$d = 0,55 \left(\frac{Q}{\sqrt{H}} \right)^{1/2}$$

El diámetro d está dado en m, y Q en m³/s. Esta relación es válida para un coeficiente de velocidad promedio de $\phi = 0,97$.

Diámetro Pelton. Este diámetro corresponde a la circunferencia media de las cucharas, tangente a la línea media del chorro:

$$D = (37 \text{ a } 39) \frac{\sqrt{H}}{N}$$

En esta expresión, D está en m, N en RPM y es válida para $\theta = 0,97$ y una eficiencia total promedio de $\eta = 0,88$. Los valores bajos del coeficiente se asumen para turbinas de alto N_s y los valores altos, para las de bajo N_s .

Relación D/d para un chorro:

$$D/d = 7,0 \text{ para } N_s = 30$$

$$D/d = 15,0 \text{ para } N_s = 15$$

Para valores intermedios pueden interpolarse asumiendo una variación aproximadamente lineal. Cabe comentar aquí que en las turbinas Turgo la relación D/d es del orden de 4,0, lo cual le permite trabajar con mayores caudales y constituye una de las ventajas respecto a la turbina.

Velocidad específica. Esta relación es válida para $\theta = 0,97$ y $\eta = 0,88$

$$N_s = 240 \left(\frac{d}{D} \right)$$

Número de cucharas:

$$Z = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{d} \right) + 14 \text{ a } 16$$

Altura de montaje mínima:

$$H_m = 10d + \frac{H}{200}$$

Donde d y H están en m.

Dimensiones básicas de la cuchara: los valores bajos se emplean cuando la máxima eficiencia se da a cargas parciales y los valores altos si se desea que la máxima eficiencia ocurra a plena carga (ver figura 62).

(5) Turbina Michell Banki

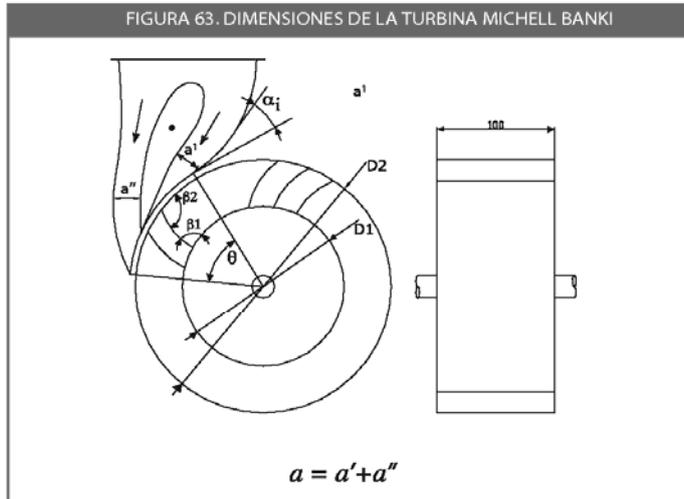
Las dimensiones principales de la turbina se muestran a continuación:

Velocidad del chorro. dada la cercanía entre el inyector y el rodete, existe una pequeña sobre presión despreciable en el intersticio comprendido bajo el arco de admisión dado por el ángulo θ . Luego:

$$C = \phi \sqrt{2gH}$$

El coeficiente ϕ tiene el mismo significado que en las turbinas Pelton y puede tomarse alrededor de 0,95

Espesor del chorro: $a = K_a D_2$



Donde a está en m. K_a es un coeficiente que depende del ángulo del inyector α_i y el ángulo de admisión θ . Para $\alpha_i = 16^\circ$, se pueden tomar los siguientes valores:

θ°	60°	90°	120°
K_a	0.1443	0.2164	0.2886

En el caso de utilizar un álabe directriz central:

$$a = a' + a''$$

Diámetro externo e interno:

$$D_2 = (37 a 39) \frac{\sqrt{H}}{N}$$

$$D_1 = 0,66 D_2$$

Los valores bajos del coeficiente corresponden a las turbinas rápidas (de rodete ancho) y los valores altos a las turbinas lentas (de rodete angosto). Se recomienda escoger rodetes de 200, 300 y 400 mm de diámetro.

Ancho del rodete ($\alpha_i = 16^\circ$):

$$B = 98,8 \frac{Q}{D_2 \sqrt{H} \theta}$$

Ángulo del inyector: $\alpha_i = 15^\circ$ a 20°

Número de álabes. Varía entre 24 y 30 álabes según el tamaño del rodete.

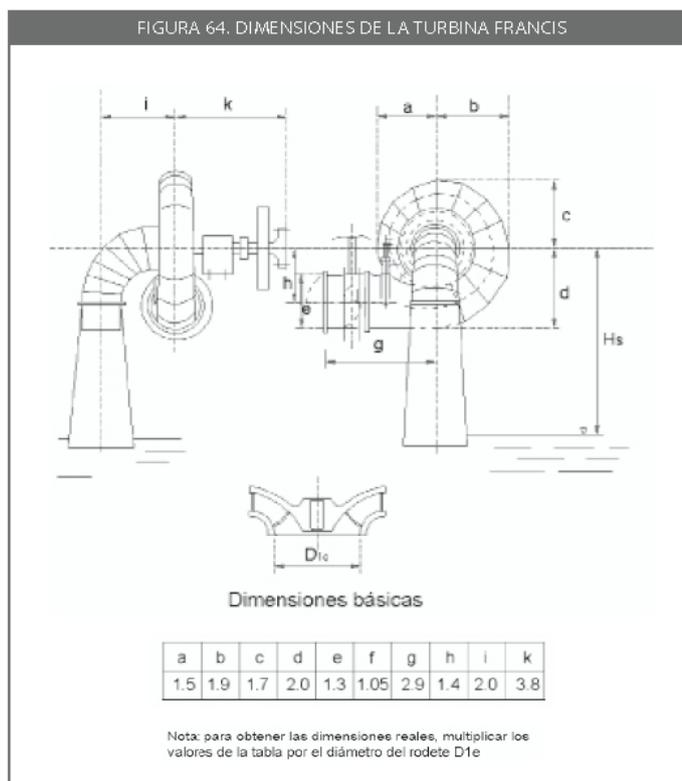
(6) Turbina Francis

En el caso de las turbinas Francis, el dimensionamiento es más laborioso. Sin embargo, podemos estimar las dimensiones generales de acuerdo a la siguiente figura:

5.2.2 Selección del generador

Como se mencionó líneas arriba los generadores eléctricos recomendados para microcentrales hidroeléctricas son los de 1800, 1200 y 900 RPM, siendo los más costosos los de menos RPM. Asimismo para realizar el pedido hay que hacer las especificaciones al fabricante:

- ✓ La potencia al eje de la turbina
- ✓ Operación con turbina hidráulica. Tiene que llevar 2 cojinetes
- ✓ Altitud de trabajo en m s nm
- ✓ Número de polos
- ✓ Frecuencia de 60 Hz para el Perú
- ✓ Número de fases
- ✓ Voltaje de operación
- ✓ Tipo de conexión



Para el caso de las minicentrales, dependiendo de la potencia y haciendo una evaluación de costos, se seleccionará el generador adecuado, teniendo en cuenta además la información de las potencias estándar solicitada a los fabricantes.

Para potencias menores a 100 kW que es el rango de las microcentrales, si la velocidad de rotación de la turbina no coincide con la velocidad de rotación del generador se puede utilizar generadores de 1800 RPM que son los que tienen menor costo, utilizando transmisión con multiplicadores de velocidad, que pueden ser con poleas y fajas, engranajes, etc. para los rangos de potencias mayores a los 200 kW, hay que analizar el tipo de transmisión haciendo los cálculos de resistencia respectivos, de lo contrario se tiene que hacer el diseño de la turbina acorde con la velocidad de sincronismo del generador y selección del generador adecuado.

Para la generación del voltaje adecuado, los generadores modernos, vienen con los terminales para hacer los cambios según el voltaje convenido, ya sea en conexión estrella o conexión triángulo.

5.2.3 Selección del regulador de velocidad

Para la selección del regulador de velocidad se tiene que tener en cuenta lo siguiente. El regulador de velocidad tiene que ser adecuado para las características de la generación. En las minicentrales para potencias inferiores a 200 kW, se recomienda la utilización de los reguladores electrónicos de carga ficticia, tal es así que la energía que no es consumida por la carga primaria, es derivada a la carga secundaria, donde es disipada a través de resistencias que generalmente son refrigeradas al agua y en los casos de pico turbinas estas resistencias pueden ser aéreas.

Como se vio en el capítulo anterior la utilización de la regulación electrónica de carga tiene sus ventajas para el caso de las microcentrales. Para hidroeléctricas mayores a 200 kW de potencia, el sistema de regulación de velocidad recomendable es el sistema mixto, esto quiere decir una regulación gruesa de caudal con una regulación electrónica de carga de una manera sincronizada, de acuerdo a la evaluación de la carga principal (demanda de energía), si la variación de la demanda no es significativa durante las 24 horas del día, la capacidad de la regulación electrónica sería menor que para el caso de variaciones de demanda mayores. Por ejemplo, si tenemos una potencia instalada de 300 kW y la demanda de energía varía de 200 a 300 kW, la regulación fina (regulación electrónica) sería de 100 kW o un poco más y la regulación de caudal accionará al disminuir la demanda por debajo de los 200 kW, que para un caso extremo accionaría disminuyendo el caudal hasta llegar a los 100 kW, que serían derivados a la carga secundaria a través del regulador electrónico de carga.

Para la selección del regulador electrónico de carga tiene que tenerse en cuenta el voltaje de generación del generador, así como también el tipo de conexión y si es generación monofásica o trifásica.

