



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA**

**CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**GENERACIÓN DE ESQUEMAS DE OBRAS PARA UN SITIO CON  
POTENCIAL HIDROENERGÉTICO A NIVEL DE PRE FACTIBILIDAD**

**T E S I N A**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA**

**P R E S E N T A :**

**ING. KARLA SEGURA GRANADOS**

**DIRECTOR DE TESINA: M.I. ALEJANDRO MAYA FRANCO**

**CIUDAD DE MÉXICO, 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Consejo Nacional y Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico y sobre todo humano, sin los cuales la realización de éste trabajo no hubiera sido posible.

A la Facultad de Ingeniería y al Programa Único de Especializaciones en Ingeniería por permitirme realizar un paso más en mi carrera académica.

A M.I. Alejandro Maya Franco y a la M.I. Claudia Edith López Fuentes, por su apoyo y consejos para la realización y dirección de éste trabajo.

A mis profesores e integrantes del jurado por brindarme su tiempo y dedicación al evaluar esta tesina.

## **DEDICATORIAS**

A mi familia, por su inmenso apoyo y confianza que siempre me han dado, en especial a mis padres María Elena y Carlos a quienes les dedico este trabajo.

A mi hermano, por su apoyo incondicional.

A Jorge, por todo el apoyo y amor que me ha brindado en cada momento que lo he necesitado.

A Tobo y Nala, por todo el amor que me han dado.

## ÍNDICE

Lista de Figuras.....	2
Lista de Tablas .....	4
INTRODUCCIÓN .....	5
OBJETIVO.....	6
CAPITULO I “Antecedentes generales” .....	9
1.1 Usos del agua .....	10
1.2 Fuentes de captación .....	10
1.3 Obras de conducción.....	11
1.4 Obras de control y excedencias .....	12
1.5 Presas derivadoras .....	15
1.6 Conducciones a superficie libre .....	17
1.7 Conducciones a presión .....	18
CAPITULO II “Dimensionamiento de las obras hidráulicas en el sitio” .....	22
2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	23
2.2 Obra de toma .....	24
2.2.1 Dimensionamiento de las rejillas .....	24
2.2.2 Abocinamiento de entrada .....	30
2.2.3 Diámetro económico.....	32
2.2.4 Transición .....	33
2.3 Obra de excedencias .....	36
2.3.1 Diseño del cimacio. ....	38
2.3.2 Estructura terminal .....	41
2.4 Obra de desvío .....	42
CAPITULO III “Conclusiones” .....	46
ANEXO .....	49
Referencias Bibliográficas .....	53

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Mapa conceptual, Centrales Hidroeléctricas en México.

Figura 2.1 Mapa conceptual, Usos del Agua.

Figura 2.2 Tipos de vertedores.

Figura 2.3 Criterio USBR.

Figura 2.4 Perfil del cimacio aguas arriba.

Figura 2.5 Mapa conceptual, Tipos de Presas Derivadoras.

Figura 2.6 Salto hidráulico.

Figura 2.7 Sección portal, con distintas rugosidades.

Figura 2.8 Características geométricas, sección portal.

Figura 2.9 Características geométricas compuestas, sección portal.

Figura 3.1 Localización de la zona, en la república mexicana.

Figura 3.2 Ubicación de presa y casa de máquinas.

Figura 3.3 Dimensiones propuestas de la bocatoma.

Figura 3.4 Corte transversal de inclinación de rejillas.

Figura 3.5 Dimensionamiento final de rejillas.

Figura 3.6 Dimensionamiento final de rejillas, tapa.

Figura 3.7 Dimensiones propuestas del abocinamiento.

Figura 3.8 Abocinamiento de entrada, corte lateral.

Figura 3.9 Abocinamiento de entrada, vista en planta.

Figura 3.10 Transición de sección rectangular a circular.

Figura 3.11 Transición longitudinal.

Figura 3.12 Transición en planta.

Figura 3.13 Obra de toma.

Figura 3.14 Perfil del cimacio aguas arriba.

Figura 3.15 Perfil del cimacio aguas abajo.

Figura 3.16 Perfil de vertedor.

Figura 3.17 Geometría obra de desvío.

Figura 3.18 Rugosidad para cada cara.

Figura 3.19 Área AOBE.

Figura 3.20 Área AOBC.

## Lista de Tablas

Tabla 1.1 Características principales de las presas de mayor capacidad de generación en México.

Tabla 2.1 Rugosidad por el tipo de acabado.

Tabla 3.1 Áreas para cada sección de las rejillas.

Tabla 3.2 Áreas de soleras.

Tabla 3.3 Área total de soportes.

Tabla 3.4 Cálculo de elipse superior.

Tabla 3.5 Cálculo de las elipses laterales.

Tabla 3.6 Transición longitudinal.

Tabla 3.7 Transición en planta.

Tabla 3.8 Parámetros para el diseño del cimacio, aguas abajo.

Tabla 3.9 Parámetros para el diseño del cimacio, aguas arriba.

Tabla 3.10 Parámetros del perfil del cimacio aguas arriba.

Tabla 3.11 Dimensionamiento de perfil del cimacio aguas abajo.

# INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se presentan algunos criterios aplicables para la generación de esquemas de diversas obras para una presa con fines de generación de electricidad, particularmente para esquemas a nivel de pre factibilidad.

## OBJETIVO

Realizar el dimensionamiento de las obras hidráulicas; como son, obra de toma, obra de excedencias, diámetro económico y obra de desvío, que son obras que dependen estrictamente de datos hidrológicos, obtenidos en un estudio previo, para un sitio con potencial hidroenergético a nivel de pre factibilidad.

## DESARROLLO DE LA HIDROENERGÍA EN MÉXICO

En respuesta a las necesidades industriales locales, México comenzó con el desarrollo de la industria eléctrica a finales del siglo XIX; aunque ésta estuvo condicionada a factores externos, como los procesos de producción, sus distintos implementos tecnológicos, obras de infraestructura, entre otros; ya que éstos se concibieron en países extranjeros, desde los cuales se tuvieron que importar al país.

La industria eléctrica se abrió camino en un periodo de tiempo relativamente temprano lo que provocó que en los primeros años tuviera una continua expansión y modernización que atrae continuamente innovaciones tecnológicas.

Fue hasta 1899 que la primera planta hidroeléctrica comenzó a operar en Batopilas, Chihuahua. Comenzaron las obras para aprovechar las aguas del río, (que lleva el mismo nombre de la planta), con la finalidad de generar energía para las instalaciones de la explotación minera. Gracias a las aportaciones de Alejandro R. Shepard fue que logran acoplar a los molinos de trituración, dos generadores de vapor movidos por otras turbinas hidráulicas (con una potencia de 15 HP). Por lo que se construyó una presa derivadora de 187 m de longitud con un canal de conducción de 3,800 m, de sección rectangular, con una bocatoma con rejillas y compuertas de control. Contando también con dos tuberías a presión de 1 m de diámetro y 22 m de longitud, que alimentaban a las turbinas con una caída de 16 m. Extendiendo sus redes de distribución hacia mercados urbanos y comerciales donde la población era de mayor capacidad económica.

Esto provocó que en México surgieran otras pequeñas plantas hidroeléctricas en diversas zonas del país. Todas con el objetivo de suministrar el recurso eléctrico a minas de trabajo durante los procesos de extracción, fundición y refinado de metales. Entre las empresas más importantes que pusieron centrales hidroeléctricas en servicio, en esos tiempos fueron: Textil San Ildefonso, Industrial de Orizaba, Luz y Potencia El Portezuelo, Mexicana de Electricidad, Segura y Braniff, entre otras.

Siendo que, por 48 años, empresas privadas extranjeras instalaron pequeñas hidroeléctricas y comercializaron la energía en territorio mexicano. Durante la presidencia de Lázaro Cárdenas, se creó la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el 14 de agosto de 1937, de tal forma que la generación de energía eléctrica pasó a ser del Estado. El recurrir al desarrollo sustentable, utilizando recursos renovables para garantizar la generación de energía eléctrica y así combatir el cambio climático es una necesidad que ha ido creciendo en todo el mundo; México cuenta con numerosos recursos como su geografía, topografía, relieve, entre otros, siendo el hídrico el que más le favorece.

*“El primer gran proyecto hidroeléctrico se inició en 1938 con la construcción de los canales, caminos y carreteras de lo que después se convirtió en el Sistema Hidroeléctrico Ixtapantongo, en el estado de México, que posteriormente fue nombrado Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. El 27 de septiembre de 1960, el presidente Adolfo López Mateos nacionalizó la industria eléctrica, a fin de aumentar el nivel de electrificación, ya que en ese año era del 44% (1).”*

Ya finalizada la década de los 60’s, se superó el reto del ritmo de crecimiento al instalarse centrales generadoras que dieron una capacidad instalada de 17,360 MW, entre los años de 1970 y 1980. Siendo que a inicios del año 2000, ya se tenía una capacidad instalada de generación de 35,358 MW, llegando a contar con una cobertura del servicio del 94.70% a nivel nacional. Hoy en día, el país cuenta con 64 centrales hidroeléctricas, en la Figura 1.1 se presenta un mapa conceptual sobre el estado de éstas.

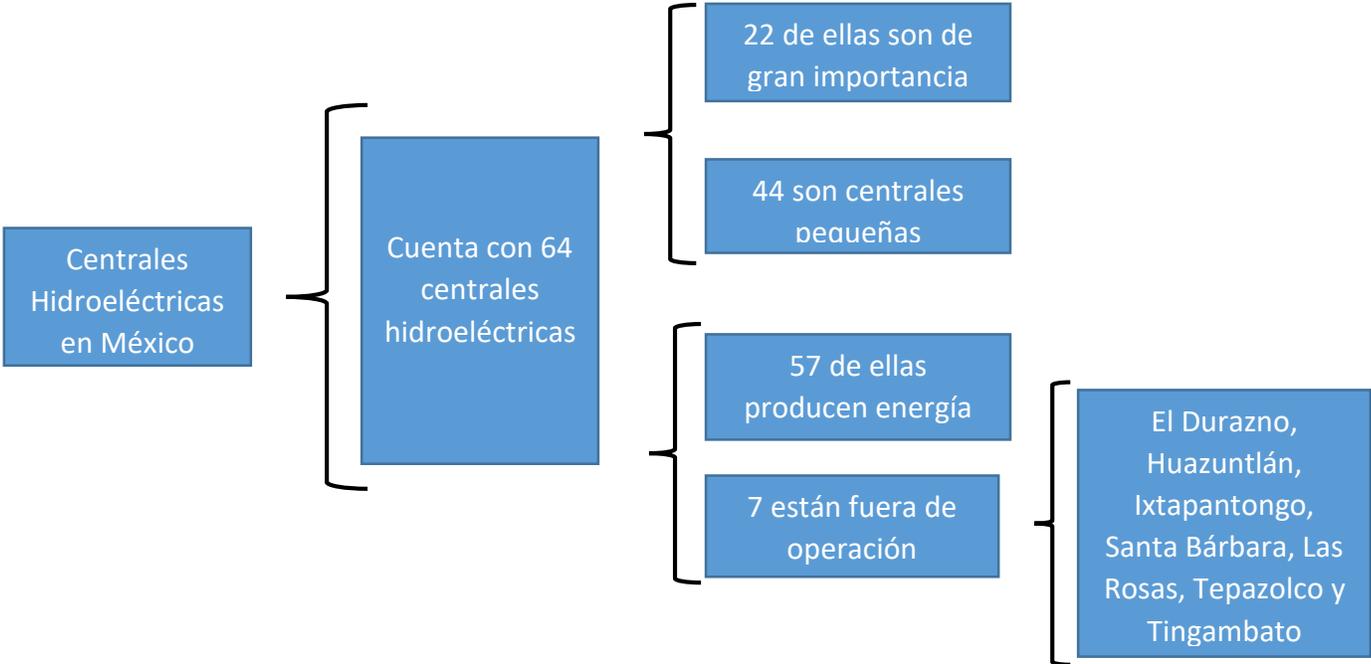


Figura 1.1. “Mapa conceptual, Centrales Hidroeléctricas en México”

En la Tabla 1.1, se muestra un listado de algunas de las presas de generación hidroeléctrica más importantes de México, con sus características más importantes.

*Tabla 1.1. "Características principales de las presas de mayor capacidad de generación en México"*

<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Año de Término de la Obra</b>	<b>Altura de Cortina (m)</b>	<b>Longitud de Cortina (m)</b>	<b>Capacidad Instalada (MW)</b>
Aguamilpa	Nayarit, Río Santiago	1994	187.00	660.00	960.00
Chicoasén	Chiapas, Río Grijalva	1980	261.00	485.00	2400.00
El Cajón	Nayarit, Río Grande de Santiago	2007	178.00	640.00	750.00
Huites	Sinaloa, Río Fuerte	1995	166.00	426.00	422.00
Malpaso	Chiapas, Río Grijalva	1966	138.00	480.00	1080.00
Zimapán	Hidalgo, Río Tula, Río San Juan	1995	203.00	130.00	292.00

# CAPITULO I

## “Antecedentes generales”

En el presente capítulo se desarrollarán los conceptos y criterios principales para el cálculo y desarrollo de un proyecto de una central hidroeléctrica.

### 1.1 Usos del agua

El uso del agua se encuentra clasificado en 5 grupos, los cuales pueden ser de uso consuntivo o no. El uso consuntivo es aquel en el que una vez usada el agua ya no se devuelve al medio de donde fue extraída, un ejemplo de esto es el uso agrícola. Cuando hablamos de usos no consuntivos nos referimos al agua que es devuelta al medio de donde fue extraída, después de ser usada para un fin, sin que su retorno tenga que ser del mismo lugar de donde fue extraída, un ejemplo claro es el uso del agua para una central hidroeléctrica. En la Figura 2.1, se presenta un mapa conceptual sobre los usos del agua.

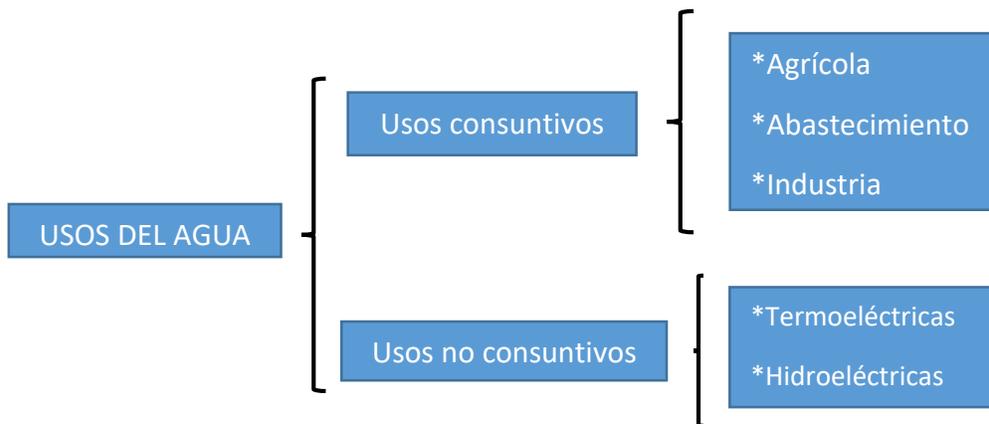


Figura 2.1. "Mapa conceptual, Usos del Agua"

### 1.2 Fuentes de captación

Las fuentes de captación superficiales, son volúmenes de agua que escurren sobre la superficie como ríos y arroyos, o bien depósitos de agua como lagunas, lagos y embalses. El aprovechamiento de la captación atmosférica, como la precipitación pluvial, nieve o granizo, es de gran importancia ya que en zonas áridas o secas es recomendable recolectar la precipitación para su almacenamiento.

Los volúmenes de agua que escurran sobre la superficie del terreno natural pueden ser flujos perenes (que se presentan todo el año, puede recibir escurrimientos que vengan desde zonas más altas de la cuenca de aportación), o intermitentes (se presentan con una duración limitada en la presencia de precipitaciones).

#### Obras de Captación

Las obras de captación para aguas superficiales pueden ser muy distintas, ya que la forma de captar agua de una corriente mediante una toma directa, varía en función del volumen de agua para captar y las características de la corriente, como es, el régimen de escurrimiento (si es permanente o variable), su caudal en época de estiaje y duración de

avenidas, velocidad, pendiente del cauce, topografía de la zona de captación, geología, material de arrastre, niveles máximos y mínimos, etc. Las características mencionadas tendrán que satisfacer las siguientes condiciones:

- La bocatoma se localizará en un tramo de la corriente que este a salvo de la erosión, de azolve y aguas arriba de cualquier descarga de tipo residual.
- La bocatoma llevará rejillas y la velocidad media a través de ella será de 0.10 a 0.15 m/s para evitar, en lo más posible, el paso de materiales.
- La velocidad mínima a través del conducto será de 0.6 m/s con el objetivo de evitar la acumulación de azolves.
- El límite máximo de la velocidad quedará establecido por las características del agua y el material del conducto.
- El proyecto de la obra de toma de captación se dispondrá de los elementos que permitan la operación, acceso, inspección y limpieza.
- Para la ubicación de la obra de toma es necesario definir; gasto promedio – nivel promedio, gasto máximo – nivel máximo, – gasto mínimo – nivel mínimo y la estación de arrastre de sedimentos.

### 1.3 Obras de conducción

La conducción del agua es una parte del sistema, que transporta el agua desde el sitio de la captación, ya sea por bombeo o por gravedad, hasta llegar a un depósito de regulación y/o distribución.

Las líneas de conducción deben ser de fácil inspección, preferentemente paralelas a algún camino, en caso necesario se deberá considerarse un camino de acceso.

Las conducciones por gravedad, en la mayoría de las obras de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se utilizan tuberías y el flujo se puede efectuar a superficie libre o funcionando a presión.

Las conducciones por bombeo, generalmente se relacionan, con un pozo o un cárcamo. Para definir las características de una línea de conducción, debe realizarse un análisis del diámetro económico. Se deben analizar los fenómenos transitorios en la línea de conducción, con el objetivo de revisar si la obra de conducción y los materiales de la tubería son los adecuados para la operación requerida para el objetivo y seguridad del proyecto; y

también definir si se requieren obras de protección como válvulas aliviadoras, pozos de oscilación, cámaras de aire, etc.

El sistema de conducción por canales de derivación son empleados, en su mayoría en los proyectos de riego, sin embargo, su empleo se puede observar en proyectos de abastecimiento, transporte y recreación. Los sistemas de canales se pueden clasificar en:

- Sistemas de entrega, donde el agua se transporta de una fuente de abastecimiento hasta un sistema de tomas o puntos de demanda, donde su uso puede ser para irrigación, industria, entre otros.
- Sistemas de recolección, el cual transporta el agua que se colecta por aportaciones provenientes de varias fuentes como pozos, descargas, lluvia, etc. Estos sistemas se asocian con proyectos de captación y disminución.

#### 1.4 Obras de control y excedencias

Es una obra que brinda seguridad a la presa, ya que regula los niveles de máximo almacenamiento en el vaso. Frente al paso de una avenida importante, es la estructura que permite su control y regulación.

Para el caso de presas derivadoras, estas aguas excedentes fluyen por medio de un vertedor y no son aprovechadas, siendo que regresan a la fuente de abastecimiento de la que fueron tomadas. Al contrario de una presa de almacenamiento, en la que se busca que ésta no tenga salidas de donde pudiera desaprovecharse el agua, mientras que las presas derivadoras pueden poner en funcionamiento las obras de excedencias frecuentemente o bien permanentemente.

Es de gran importancia proyectar correctamente el vertedor por el cual fluirá el agua excedente, ya que, de no ser así, el agua podría rebasar el nivel de la corona de la presa y derramar sobre ella, pudiendo ocasionar la falla de la estructura principal; sobre todo si se trata de presas de tierra, materiales graduados o de enrocamiento.

Generalmente los vertedores se clasifican de acuerdo con su rasgo más prominente como pueden ser la forma de la cresta, la forma como desfoga la corriente o alguna otra característica; la clasificación para vertedores más usuales en presas de almacenamiento es, vertedores de cresta de caída recta y vertedores de cimacio tipo Creager; los cuales pueden ser, vertedores de caída libre, vertedor con conducto de descarga, vertedor de embudo, vertedor de abanico, vertedor en rápida y vertedor escalonado.

En la Figura 2.2 se muestran los tipos de vertedores anteriormente mencionados.



Figura 2.2. "Tipos de vertedores"

Los parámetros de diseño a considerar para las obras de control y excedencias, son: tipo de obra de contención, altura de descarga, velocidad en el canal de llamada, carga hidráulica, paramento del cimacio (talud) y longitud de la cresta.

#### CRITERIO US BUREAU OF RECLAMATION PARA DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DEL CIMACIO

El criterio USBR (US Bureau of Reclamation) —se emplea para el diseño del cimacio, aguas arriba de la cresta y aguas abajo; el cual propone dividir a la sección del cimacio en cuadrantes, utilizando el tercer cuadrante para el diseño aguas arriba de la cresta del cimacio y el cuarto cuadrante para el diseño aguas abajo. En la Figura 2.3 se muestra el criterio USBR.

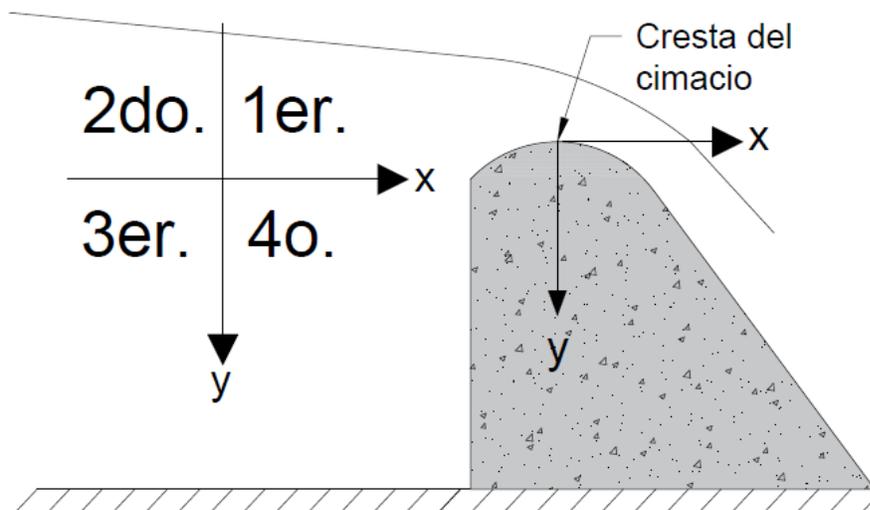


Figura 2.3. "Criterio USBR"

Las variables necesarias para definir el perfil del cimacio aguas arriba, se presentan a continuación en la Figura 2.4; por medio del método gráfico:

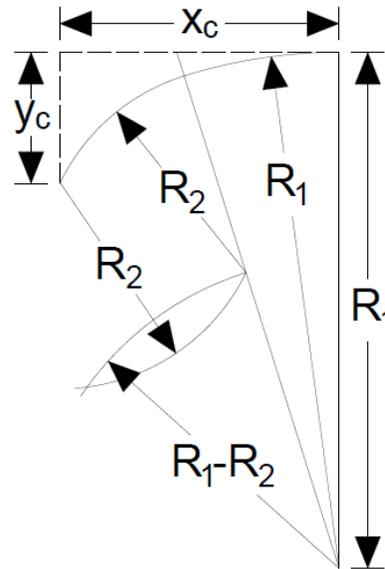


Figura 2.4. "Perfil del cimacio aguas arriba"

Las cuales se calculan por medio de las siguientes expresiones:

$$x_c = 0.27H_0 \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

$$y_c = 0.126H_0 \quad [\text{Ec.2.2}]$$

$$R_1 = 0.5H_0 \quad [\text{Ec.2.3}]$$

$$R_2 = 0.2H_0 \quad [\text{Ec.2.4}]$$

La ecuación que define la forma del cimacio en el cuadrante aguas abajo de la cresta es la siguiente:

$$\frac{y}{H_d} = -k \left( \frac{x}{H_d} \right)^n \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

Donde:

y ordenada al origen

x abscisas al origen

H<sub>d</sub> carga de diseño en el vertedor

$k$  y  $n$  constantes que dependen del paramento de la pared delgada y de la carga de velocidad, Figura 1 y Figura 2 respectivamente (mostradas en los anexos).

$H_a/H_0$  relación entre la carga de velocidad y la carga de diseño total.

El perfil del cimacio aguas arriba de la cresta se puede definir como una curva compuesta o como una curva simple y una tangente; se calculan las constantes  $x_c$  y  $y_c$  por medio de las Figuras 4 y 5 que se encuentran en los anexos del presente trabajo; con las cuales se puede definir el punto de tangencia entre la sección y el talud del paramento aguas arriba. Por último, se calcula el radio de la curva 1 y 2, con la Figura 3 ubicada en los anexos, y se traza sobre el eje de las ordenadas a partir del origen y hacia abajo, esto permite conocer el centro de la curva 2.

### 1.5 Presas derivadoras

Las presas derivadoras, son un conjunto de estructuras que tienen como objeto impedir el paso de una corriente para aprovecharla y/o proteger contra inundaciones y avenidas a poblaciones ubicadas en zonas cercanas a la corriente o para aprovechar el agua para satisfacer cierta demanda de la población e industria. En la Figura 2.5, se presenta un mapa conceptual con los tipos de presas derivadoras.

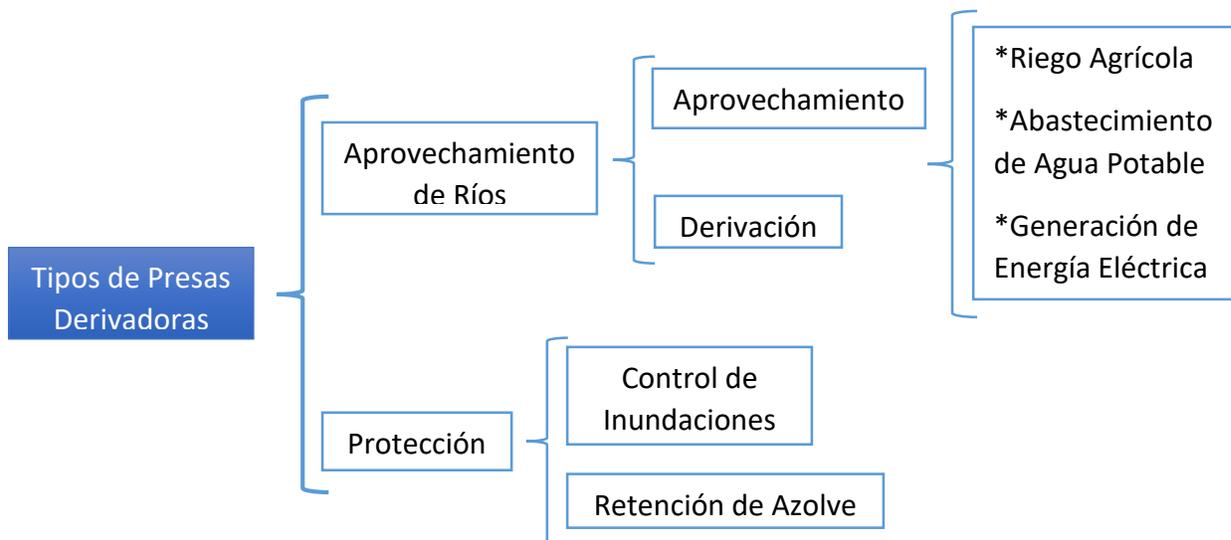


Figura 2.5. "Mapa conceptual, Tipos de Presas Derivadoras"

La principal función de las presas de aprovechamiento para riego agrícola es almacenar agua en época de lluvias para que no falte en épocas de estiaje, en este tipo de obras el agua es distribuida por medio de canales de riego a sectores, en los cuales se hace una distribución más equitativa del agua. Cuando el agua almacenada es para abastecimiento de agua

potable, esta es captada y conducida por medio de tuberías para realizarle un tratamiento previo a ser entregada la población (el agua del río debe de tener las condiciones necesarias para ser bebible).

Una presa para generación de energía eléctrica está constituida por un conjunto de instalaciones hidráulicas y equipos electromecánicos, necesarios para transformar la energía potencial en energía eléctrica disponible. La potencia eléctrica que se obtiene es proporcional al caudal de agua utilizado y a la altura del salto en un aprovechamiento.

Una central hidroeléctrica está constituida por varios elementos, los cuales se describen a continuación:

- Embalse: Para cualquier tipo de presa es de gran importancia el embalse, ya que aquí será donde el volumen de agua quedará retenido de una forma artificial, por la cortina de la presa.
- Toma de agua: Son construcciones que permiten captar el agua para llevarla hasta las turbinas por medio de tuberías o canales. Los canales se utilizan para llevar el agua desde la toma hasta las turbinas de la casa de máquinas, siendo que las tuberías generalmente son necesarias para hacer la entrada a las turbinas, ya que el agua se desplaza por presión y no por la pendiente. Cuenta con compuertas que regulan la cantidad de agua que llega a las turbinas y poseen rejillas metálicas que impiden el acceso de elementos extraños, como troncos o ramas.
- Tuberías: Las tuberías son diseñadas para reducir las pérdidas de energía que se producen en el recorrido que tiene el agua por ellas. Dependiendo de la topografía del terreno y de los factores ambientales, la colocación de la tubería será subterránea o en el exterior.
- Vertedores: Permiten el paso del agua desde el embalse hasta el cauce del río aguas abajo, para evitar el peligro por desbordamiento en caso de una avenida; al igual permiten regular y controlar los niveles en el vaso de almacenamiento.
- Casa de máquinas: Aquí se encuentran los equipos necesarios para la producción de energía eléctrica, como son las turbinas, los generadores, sala de control, etc.
- Turbinas: Son elementos que aprovechan la energía cinética y potencial que posee el agua para producir un movimiento de rotación, que es transmitido mediante un eje al generador produciendo así energía eléctrica, estas pueden ser de acción o de reacción.

- **Generador:** Es la máquina que esta unida al eje de la turbina que gira por la acción del agua y transforma la energía mecánica en eléctrica, se le conoce también como alternador por que produce corriente alterna.
- **Transformadores:** La transformación puede ser baja/media o media/alta tensión, esto dependerá de la tensión de trabajo del generador.

### 1.6 Conducciones a superficie libre

Los canales son conducciones artificiales a superficie libre que transportan el agua, la cual circula únicamente a presión atmosférica. El estudio hidráulico de estas conducciones se caracteriza porque el movimiento del agua se realiza por su propio peso, aprovechando la fuerza de la gravedad.

Los elementos básicos a considerar en el diseño de canales son, los topográficos, geotécnicos, hidráulicos, agrológicos, ambientales, hidrológicos y geológicos.

El reconocimiento del terreno es de gran importancia, este se puede hacer a pie en lo posible o bien apoyándose de tecnologías como fotografías aéreas, imágenes de satélite, etc. Se recorre la zona, anotándose todos los detalles que influyen en la determinación de un eje probable de trazo, determinándose el punto inicial y el punto final.

### ESTRUCTURAS AUXILIARES DE CONDUCCIÓN

La caída hidráulica tiene como objetivo evitar pendientes excesivas en el canal cuando las condiciones topográficas en el terreno sean superiores a la pendiente o rasante del canal. Es aquí donde se presenta el salto hidráulico (Figura 2.6) el cual, consiste en una elevación brusca de la superficie líquida, cuando el escurrimiento permanente pasa del régimen supercrítico al régimen subcrítico. Es un fenómeno local muy útil para disipar energía hidráulica. Produce una alteración rápida de la curvatura de las trayectorias del flujo, con vórtices (turbulencia) en el eje horizontal, ocasionando velocidades en dirección opuesta al flujo, choques entre partículas en forma caótica y por tanto, una gran disipación de energía.

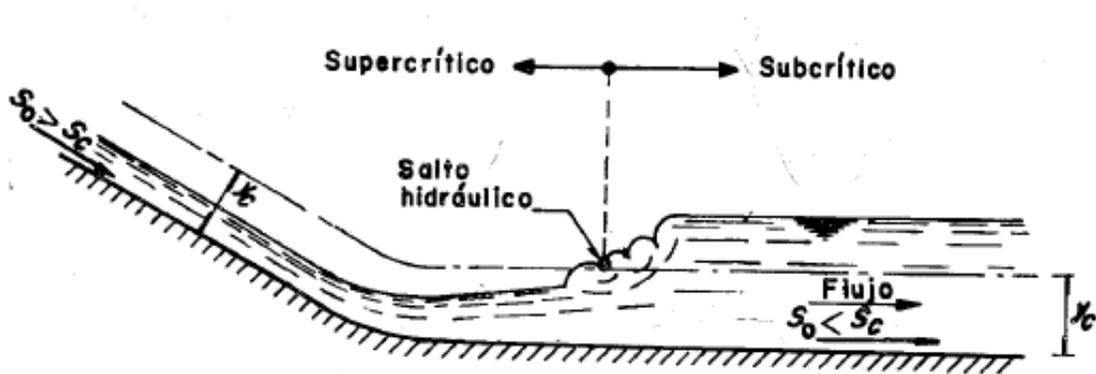


Figura 2.6. "Salto hidráulico, (3)"

De acuerdo al autor Silvester (1965) (3), se puede calcular la longitud del salto hidráulico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75(Fr_1 - 1)^{1.01} \quad [\text{Ec.2.6}]$$

Donde:

$L_j$  longitud del salto hidráulico.

$y_1$  tirante del conjugado menor.

$Fr_1$  número de Froude del conjugado menor.

### 1.7 Conducciones a presión

Las tuberías son necesarias para llevar el agua a la casa de máquinas, desde la obra de toma. El agua se desplaza por presión y no por la pendiente.

#### DIÁMETRO ECONÓMICO

El diseño de un sistema de tuberías tiene como objetivo ser óptimo, funcional y económico; al cumplir con dichos objetivos se asegura un correcto diseño. El cálculo del diámetro económico, se puede realizar por medio de los siguientes criterios:

#### CRITERIO CFE

$$D = 0.62Q^{0.48} \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

Donde:

$Q$  gasto de diseño que pasa por la obra de toma, en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

#### CRITERIO DE BUNDSCHU

Para  $H_M \geq 100$  m

$$D = \sqrt[7]{\frac{0.052Q_s^3(100)}{H_M}} \quad [\text{Ec. 2.8}]$$

Donde:

$Q_s$  gasto de diseño que pasa por la obra de toma, en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$H_M$  carga que depende de la carga bruta;  $H_M = 1.1H_{\text{bruta}} + 20$ .

Para  $H_M < 100$  m

$$D = \sqrt[7]{0.052Q_s^3} \quad [\text{Ec. 2.9}]$$

Donde:

$Q_s$  gasto de diseño que pasa por la obra de toma, en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$H_M$  carga que depende de la carga bruta;  $H_M = H_{\text{bruta}} + 20$ .

## TÚNELES

Los túneles son estructuras que nos permiten dirigir un cierto gasto, a través de obstáculos, con el objetivo de facilitar el traslado del caudal de un punto a otro. La opción de un túnel es ventajosa en áreas congestionadas por vialidades u otros servicios, donde un conducto superficial no sería funcional.

Algunas consideraciones para el diseño de túneles se presentan a continuación:

- Buscar que la longitud sea la más corta posible.
- Alojados en formaciones geológicamente sana y topográficamente convenientes.
- Portales de entrada y salida localizadas donde el túnel tenga un techo mínimo de 1.5 a 2 veces el diámetro.
- Separación en túneles paralelos de dos veces el diámetro, siempre con las opiniones y recomendaciones de especialistas en mecánica de rocas.
- Secciones más comunes: circular, herradura y portal.
- Las secciones herradura y portal poseen más área hidráulica en la parte inferior que la circular y por ende, mayor capacidad de conducción.
- El tamaño de la sección se define a partir del límite máximo correspondiente al equipo de construcción y características de las rocas.
- Rugosidad en función del tipo de acabado que se quiera implementar de acuerdo con el material en el que se encuentra el túnel.

## RUGOSIDAD COMPUESTA, EN UNA SECCIÓN PORTAL

Una sección puede estar compuesta por diferentes materiales, cuando esto sucede se puede determinar el coeficiente de rugosidad mediante la fórmula de Horton (1933) y Einstein (1934), la cual se presenta a continuación, Ec.2.10:

$$n_e = \left( \frac{\sum_1^N (P_N n_N^{3/2})}{P} \right)^{2/3} = \frac{(P_1 n_1^{3/2} + P_2 n_2^{3/2} + P_3 n_3^{3/2} + \dots + P_N n_N^{3/2})^{2/3}}{P^{2/3}} \quad [\text{Ec. 2.10}]$$

En la Figura 2.7 se observa una sección portal realizada con distintos materiales en cada cara.

Donde:

$P_N$     perímetro mojado en la sección.

$n_N$     rugosidad en la sección.

En la Tabla 2.1, se muestra el valor de la rugosidad de acuerdo con el acabado del túnel.

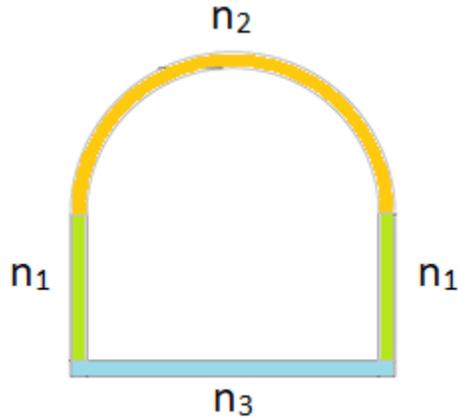


Figura 2.7. "Sección portal, con distintas rugosidades"

Tabla 2.1. "Rugosidad por el tipo de acabado"

Descripción	n
1. Cemento	
Superficies lisas	0.011
En montero	0.013
2. Concreto	
Acabado con llana metálica	0.013
Acabado con llana de madera	0.015
Acabado con grava en el fondo	0.017
Sin acabado	0.017
Gunitado (lanzado), buena sección	0.019
Gunitado (lanzado), sección ondulada	0.022
Sobre roca bien excavada	0.020
Sobre roca de excavado irregular	0.027

DIAGRAMA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (Figura 2.8, Figura 2.9)

Con los siguientes diagramas podemos obtener las principales características geométricas de la sección, como es el área y el perímetro. Lo cual nos ayudará para obtener el área total de la sección y así conocer la velocidad a la cual está pasando el gasto por el túnel.

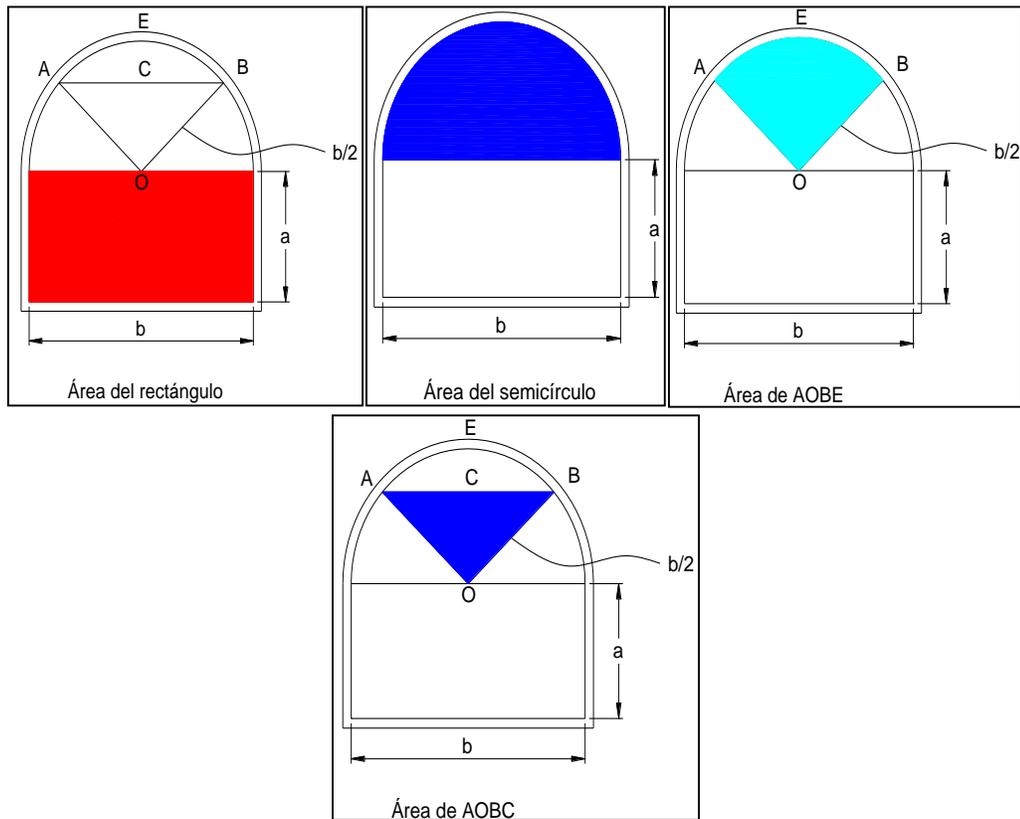


Figura 2.8. "Características geométricas, sección portal"

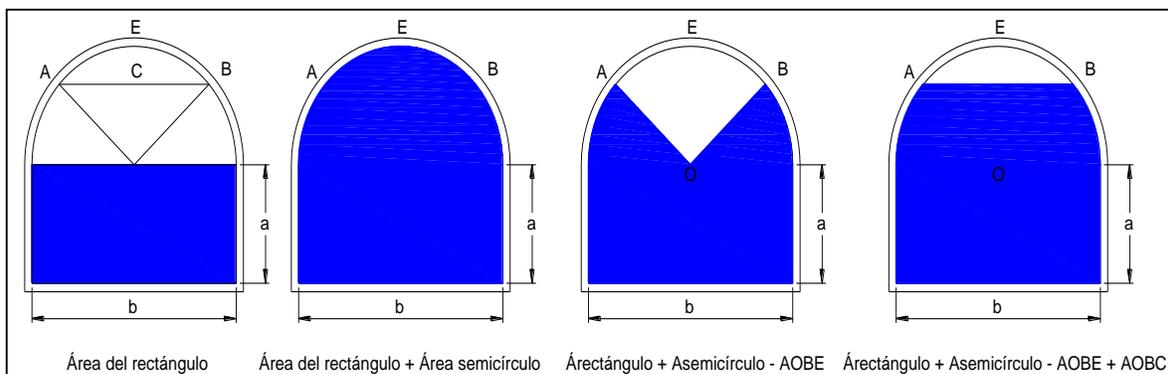


Figura 2.9. "Características geométricas compuestas, sección portal"

## CAPITULO II

# “Dimensionamiento de las obras hidráulicas en el sitio”

En este capítulo se mostrará la ubicación geográfica del sitio y sus coordenadas geográficas. Así como el dimensionamiento de las obras hidráulicas de una presa derivadora, las cuales son; obra de toma, diámetro económico, obra de excedencias y obra de desvío.

## 2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona donde se desarrolla el proyecto, se encuentra en el Río de Ajajalpan, en la cuenca de Ajajalpan, en el estado de Puebla. A continuación en la Figura 3.1, se muestra la localización espacial de la zona, en la república mexicana.

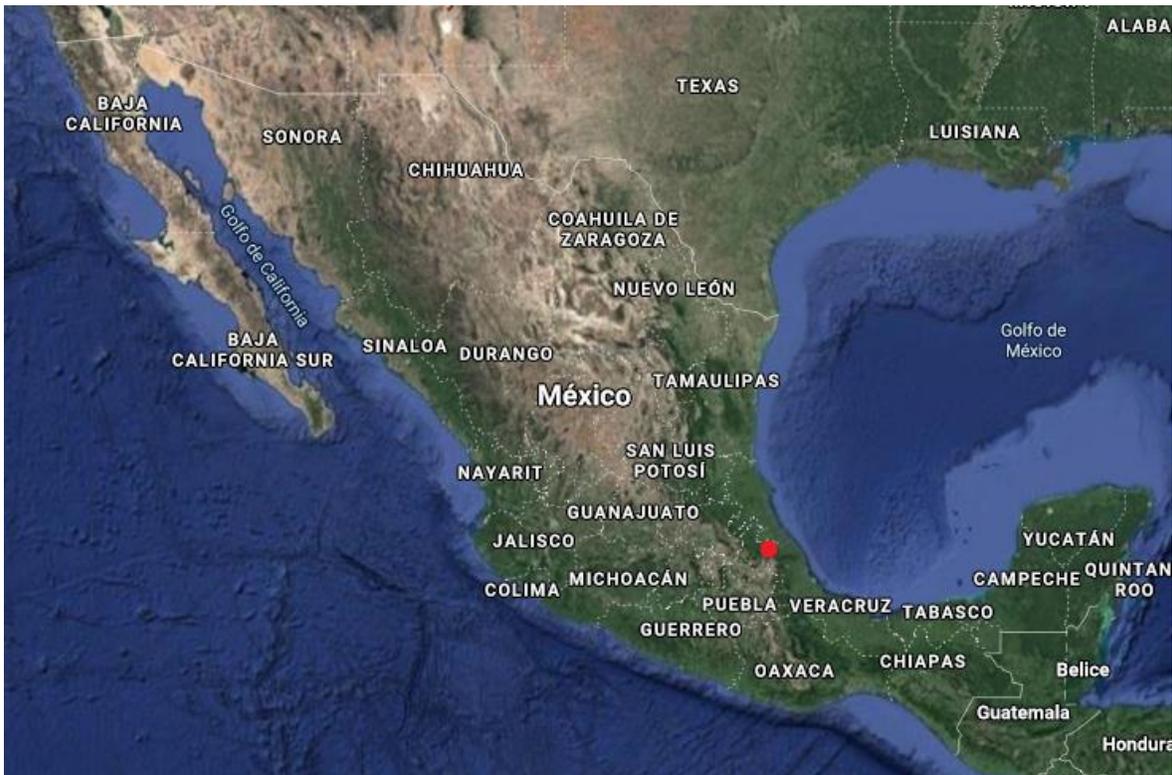


Figura 3.1. "Localización de la zona, en la república mexicana"

Para determinar la ubicación de la cortina, se eligió la zona donde la topografía de los taludes fuera más estrecha; a continuación, se describen las coordenadas geográficas del sitio.

Longitud: W 97° 41' 23''

Latitud: N 20° 07' 46''

Elevación del río: 200.00 msnm

Se consideró la casa de máquinas a pie de la cortina.

En la Figura 3.2, se observa la ubicación de la presa de derivación y de la casa de máquinas, sobre el río Ajajalpan.



Figura 3.2. "Ubicación de presa y casa de máquinas"

## 2.2 Obra de toma

Por medio de un estudio hidroenergético realizado con anterioridad, se obtuvo el gasto de diseño para la obra de toma, el cual es considerado de  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se propuso una velocidad del agua entre las rejillas de  $1 \text{ m/s}$ , para evitar en lo posible el paso de materiales.

### 2.2.1 Dimensionamiento de las rejillas

Para el dimensionamiento de las rejillas que impidan el paso a objetos hacia la obra de toma, se proponen y calculan los siguientes valores:

-Valores propuestos:

Separación entre rejillas: 12 cm.

Inclinación entre las rejillas:  $90^\circ$ .

Altura propuesta: 10 m.

Ancho de soleras: 1''.

Área de soleras, marco y taponamiento: 75%.

-Valores calculados

$$\text{Área neta} = \frac{Q_{\text{diseño}}}{V_{\text{propuesta}}} = \frac{60 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m/s}} = 60 \text{ m}^2$$

$$\text{Área total requerida} = \text{Área neta} \times (1 + \text{Área de sol, mar y tap.}) \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

$$\text{Área total requerida} = 60 \text{ m}^2 \times (1 + 75\%) = 105 \text{ m}^2$$

Se propone para el dimensionamiento de la bocatoma los siguientes valores que se muestran en la Figura 3.3 desde una vista en planta y en la Figura 3.4 desde un corte transversal. Y se calculan las dimensiones correctas para las rejillas, mediante las siguientes expresiones:

$$Base_{izq} = \sqrt{Largo_{izq}^2 + Ancho_{inq}^2} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

$$Base_{der} = \sqrt{Largo_{der}^2 + Ancho_{der}^2} \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

$$Base_{tapa} = Largo_{inq} + Largo_{centro} + Largo_{der} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

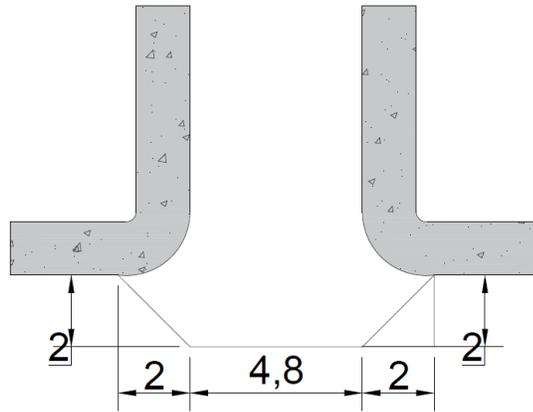


Figura 3.3. "Dimensiones propuestas de la bocatoma"

$$Base_{izq} = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2.83 \text{ m.}$$

$$Base_{der} = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2.83 \text{ m.}$$

$$Base_{tapa} = 2 + 4.8 + 2 = 8.8 \text{ m.}$$

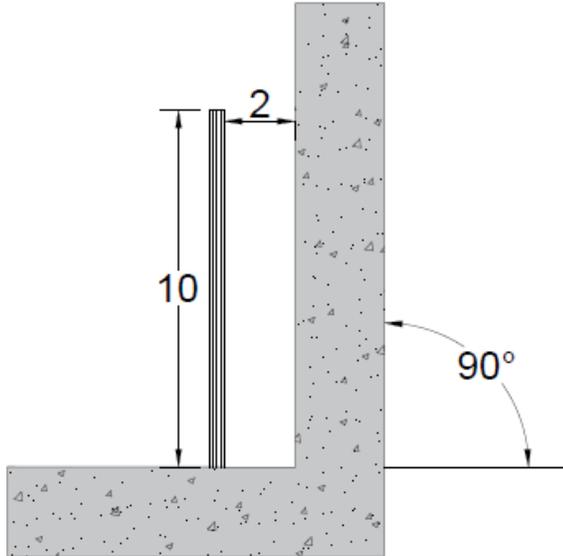


Figura 3.4. "Corte transversal de inclinación de rejillas"

Cálculo del área total de las rejillas. En la Tabla 3.1, se muestran los resultados de las áreas de cada sección.

$$\text{Área}_{\text{izq,centro,der}} = \text{Base} \times \text{Altura} \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

$$\text{Área}_{\text{Tapa}} = (\text{Base}_{\text{mayor}} + \text{Base}_{\text{menor}}) \times \left(\frac{\text{Altura}}{2}\right) \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Tabla 3.1. "Áreas para cada sección de las rejillas"

	Base	Base Menor	Altura	Área
Izquierda	2.83	-	10.00	28.28
Centro	4.80	-	10.00	48.00
Derecha	2.83	-	10.00	28.28
Tapa	8.80	4.80	2.00	13.60
			<b>Área total</b>	<b>118.17</b>

Ya que el área total obtenida es mayor al área total requerida, de la ecuación 3.1. El área total obtenida es adecuada.

Cálculo del número y área de soleras de las rejillas. Para ello se obtuvo el número de espacios, por medio de la siguiente expresión (redondeando el resultado):

$$N^{\circ} \text{ espacios} = \frac{\text{Base}}{(\text{Separación de la rejillas}/100)} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

$$N^{\circ} \text{ soleras} = N^{\circ} \text{ espacios} - 1 \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

$$\text{Área soleras} = N^{\circ} \text{ soleras} \times \left( \frac{\text{Ancho soleras}}{100} \right) \times \text{Altura} \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados para el cálculo del área de las soleras.

Tabla 3.2. "Áreas de soleras"

	Base	Base Menor	Altura	Área	N <sub>o</sub> . Espacios	Soleras	
						N <sub>o</sub> .	Área
Izquierda	2.83		10.00	28.28	24	23	5.84
Centro	4.80		10.00	48.00	40	39	9.91
Derecha	2.83		10.00	28.28	24	23	5.84
Tapa	8.80	4.80	2.00	13.60	73	72	3.66
			<b>Área total</b>	<b>118.17</b>		<b>Σ</b>	<b>25.25</b>

Para el dimensionamiento de los soportes verticales, horizontales y de tapa, se consideró un espesor para los soportes de 0.25 m. Y se propusieron 2 soportes verticales para cada sección (izquierda, derecha y centro). Siendo que para los horizontales, se propuso 4 soportes en cada sección (centrales, lateral izquierdo y lateral derecho). Para la tapa, se consideró 4 soportes longitudinales y 2 para el horizontal central, horizontal lateral e inclinación lateral. Cálculo del área en cada sección, se realizó con la siguiente expresión:

$$\text{Área}_{\text{soportes}} = N^{\circ} \text{ soportes} \times \text{Espesor} \times \text{Altura} \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

En la Tabla 3.3, se muestran los resultados de las áreas de los soportes verticales, horizontales y en tapa.

Tabla 3.3. "Área total de soportes"

Soportes verticales			
	Altura	NO.	Área
Izquierda	10.00	2	5.00
Centro	10.00	2	5.00
Derecha	10.00	2	5.00
<b>Área total de soportes verticales</b>			<b>15.00</b>

<b>Soportes horizontales</b>			
	Longitud	NO.	Área
Izquierda	4.80	4	4.80
Centro	2.83	4	2.83
Derecha	2.83	4	2.83
<b>Área total de soportes horizontales</b>			<b>10.46</b>
<b>Soportes en tapa</b>			
	Longitud	NO.	Área
Longitudinales	2.00	4	2.00
Hor. Central	4.80	2	2.40
Hor. Laterales	2.00	2	1.00
Incl. Laterales	2.83	2	1.41
<b>Área total de soportes en tapa</b>			<b>6.81</b>

Cálculo del área total de soportes.

$$\text{Área total de soportes} = \text{Área}_{s.vert.} + \text{Área}_{s.hori.} + \text{Área}_{s.tapa} \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

$$\text{Área total de soportes} = 15.00 + 10.46 + 6.81 = 32.27 \text{ m}^2$$

$$\text{Área total de soleras y soportes} = 32.27 + 25.25 = 57.52 \text{ m}^2$$

Cálculo del área total neta para el flujo de agua.

$$\text{Área}_{total \text{ neta para flujo}} = A_{total \text{ de rejillas}} - A_{total \text{ de soleras y soportes}} \quad [\text{Ec. 3.12}]$$

$$\text{Área}_{total \text{ neta para flujo}} = 118.17 \text{ m}^2 - 57.52 \text{ m}^2 = \mathbf{60.65 \text{ m}^2}$$

Ya que el área total neta para el flujo es mayor al área neta calculada, el arreglo de rejillas es adecuado.

En las Figuras 3.5 y 3.6, se muestra el dimensionamiento final de las rejillas en la obra de toma.

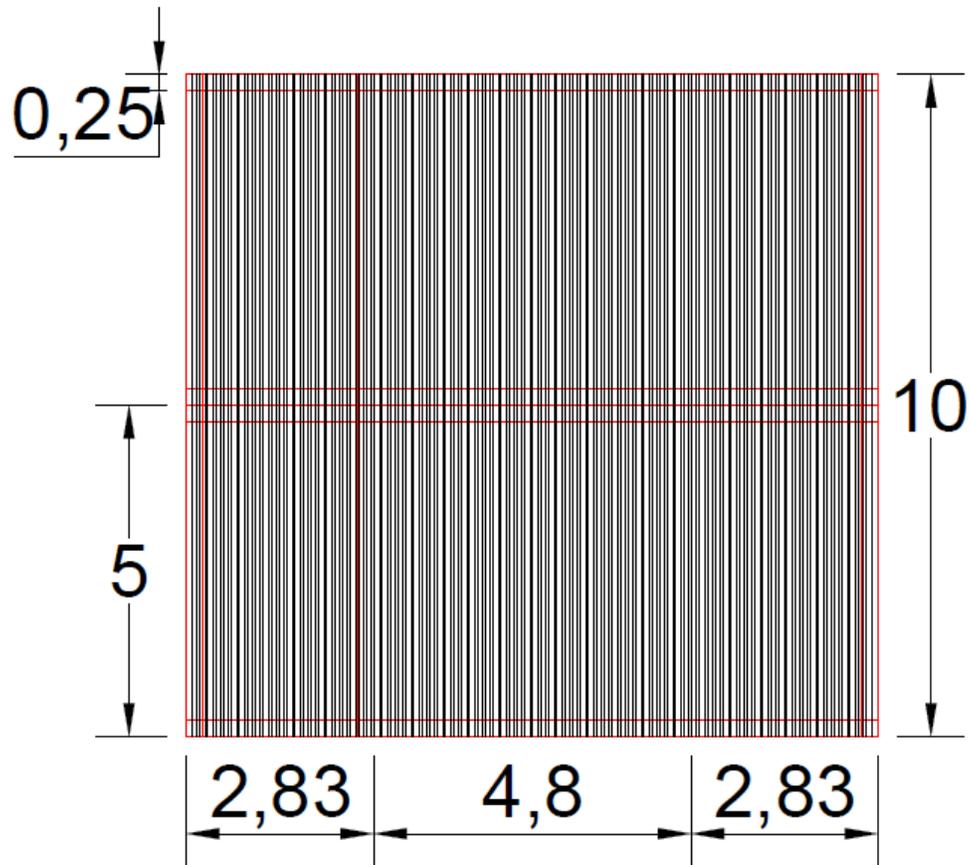


Figura 3.5. "Dimensionamiento final de rejillas"

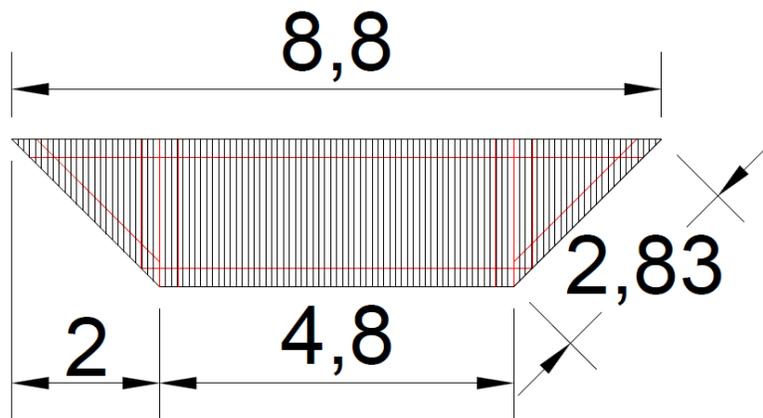


Figura 3.6. "Dimensionamiento final de rejillas, tapa"

### 2.2.2 Abocinamiento de entrada

Se consideró una sección rectangular, con las dimensiones propuestas que se muestran en la Figura 3.7:

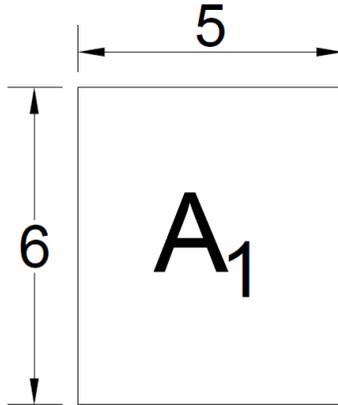


Figura 3.7. "Dimensiones propuestas del abocinamiento"

El cálculo de la elipse superior, se obtuvo con la siguiente expresión:

$$y = \sqrt{(0.33^2)(D^2 - x^2)} \quad [\text{Ec. 3.13}]$$

Donde:

D altura propuesta de la bocatoma, 6 metros.

En la Tabla 3.4, se observan los resultados para la elipse superior, en la bocatoma.

Tabla 3.4. "Cálculo de elipse superior"

x	y
0.00	1.98
0.50	1.97
1.00	1.95
1.50	1.92
2.00	1.87
2.50	1.80
3.00	1.71
3.50	1.61
4.00	1.48
4.50	1.31
5.00	1.09
5.50	0.79
6.00	0.00

En la Figura 3.8, se observan las dimensiones del abocinamiento de entrada, en un corte lateral.

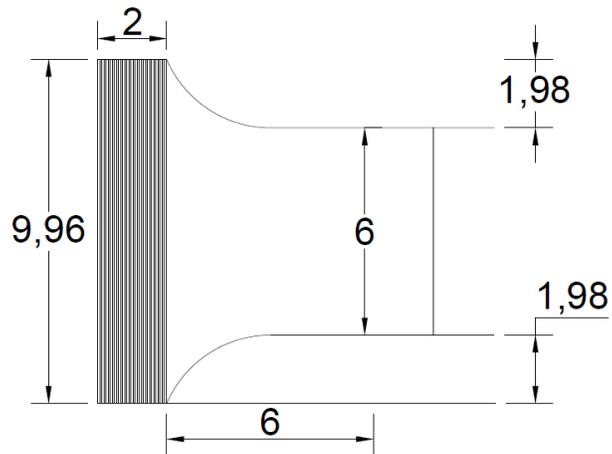


Figura 3.8. "Abocinamiento de entrada, corte lateral"

El cálculo de las elipses laterales, se obtuvo con la siguiente expresión:

$$x = \sqrt{D^2 - \frac{y^2}{0.33^2}} \quad [\text{Ec. 3.14}]$$

Donde:

D      ancho propuesto de la bocatoma, 5 metros.

En la Tabla 3.5, se observan los resultados para las elipses laterales, en la bocatoma.

Tabla 3.5. "Cálculo de las elipses laterales"

x	y
0.00	1.65
0.50	1.64
1.00	1.62
1.50	1.57
2.00	1.51
2.50	1.43
3.00	1.32
3.50	1.18
4.00	0.99
4.50	0.72
5.00	0.00

En la Figura 3.9, se muestran las dimensiones del abocinamiento de entrada, en una vista en planta.

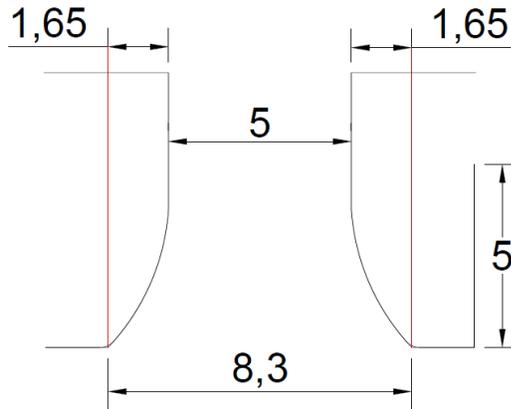


Figura 3.9. "Abocinamiento de entrada, vista en planta"

### 2.2.3 Diámetro económico

Se realizó el cálculo del diámetro económico por medio de dos criterios, de la CFE y de Bundschu, los cuales se presenta a continuación:

CRITERIO CFE

$$D = 0.62Q^{0.48}$$

$$D = 0.62 \times 60^{0.48} = 4.42 \text{ m}$$

CRITERIO DE BUNDSCHU

De acuerdo a la ecuación 2.9, se obtiene el diámetro para  $H_M < 100 \text{ m}$

$$H_M = H_{bruta} + 20 = 30 + 20 = 50 \text{ m}$$

$$D = \sqrt[7]{0.052 \times 60^3} = 3.79 \text{ m}$$

Se realizó un promedio de los diámetros obtenidos por los dos criterios, redondeando el resultado obtenido.

$$D_{promedio} = \frac{4.42 + 3.79}{2} = 4.10 \text{ m}$$

Por lo tanto el diámetro económico de la tubería es de 4.10 m, considerando esto se tendría que hacer un pedido especial para esas dimensiones.

### 2.2.4 Transición

Cálculo del diámetro equivalente para una sección rectangular, por medio de la ecuación 3.15:

$$D_{equi.} = \sqrt{\frac{4 \times (Altura_{propuesta} \times Ancho_{propuesto})}{\pi}} \quad [Ec. 3.15]$$

$$D_{equi.} = \sqrt{\frac{4 \times (6 \times 5)}{\pi}} = 6.18 \text{ m}$$

Para obtener el diámetro de la transición, se realizó un promedio del diámetro económico (sección circular) y el diámetro equivalente (sección rectangular).

$$D_{trans.} = \frac{4.10 + 6.18}{2} = 5.14 \text{ m}$$

Por lo tanto la longitud de la transición se obtiene multiplicando el diámetro de la misma por tres, dándonos así el siguiente resultado:

$$Long. \cdot trans. = 5.14 \times 3 = 15.42 \text{ m}$$

En la Figura 3.10 se muestra la transición de cada sección (rectangular a circular).

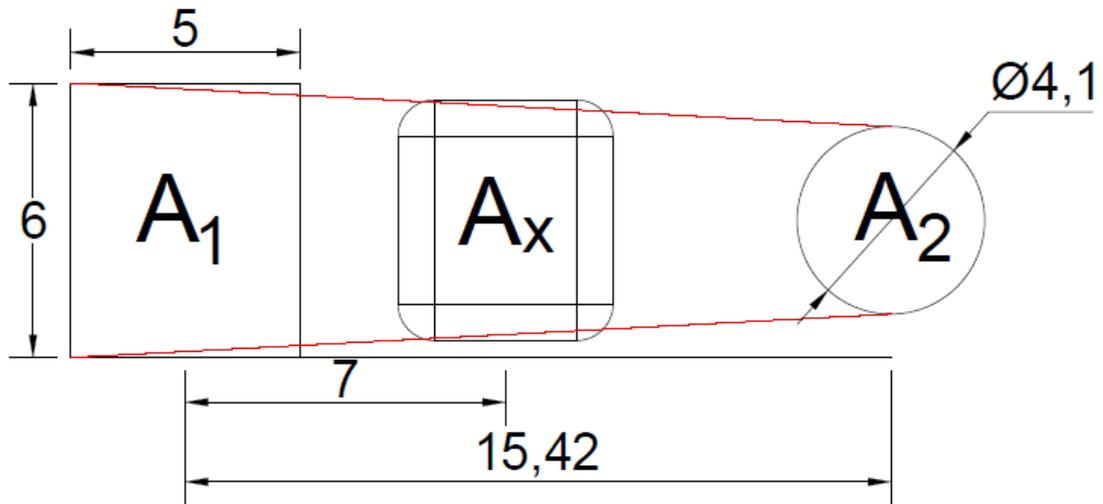


Figura 3.10. "Transición de sección rectangular a circular"

En la Tabla 3.6 se exponen los resultados para la transición longitudinal y en la Figura 3.11 se muestra la transición.

Tabla 3.6. "Transición longitudinal"

X	Fondo	Curva inferior	Curva superior	Techo
0.00	0.00	0.00	6.00	6.00
1.00	0.06	0.45	5.55	5.94
2.00	0.12	0.69	5.31	5.88
3.00	0.18	0.90	5.10	5.82
4.00	0.25	1.09	4.91	5.75
5.00	0.31	1.27	4.73	5.69
6.00	0.37	1.45	4.55	5.63
7.00	0.43	1.62	4.38	5.57
8.00	0.49	1.79	4.21	5.51
9.00	0.55	1.96	4.04	5.45
10.00	0.62	2.12	3.88	5.38
11.00	0.68	2.29	3.71	5.32
12.00	0.74	2.45	3.55	5.26
13.00	0.80	2.61	3.39	5.20
14.00	0.86	2.77	3.23	5.14
15.00	0.92	2.93	3.07	5.08
15.42	0.95	3.00	3.00	5.05

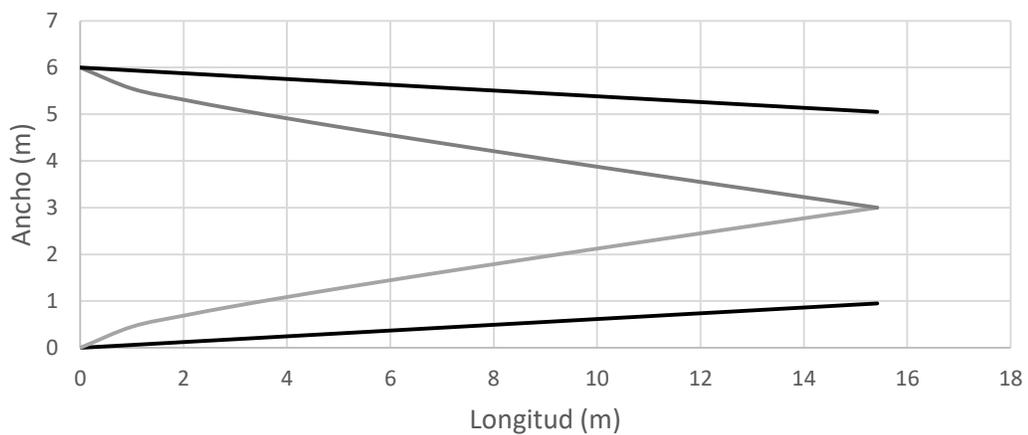


Figura 3.11. "Transición longitudinal"

En la Tabla 3.7 se exponen los resultados para la transición en planta y en la Figura 3.12 se muestra la transición.

Tabla 3.7. "Transición en planta"

X	Fondo	Curva inferior	Curva superior	Techo
0.00	0.00	0.00	5.00	5.00
1.00	0.03	0.42	4.58	4.97
2.00	0.06	0.62	4.38	4.94
3.00	0.09	0.80	4.20	4.91
4.00	0.12	0.96	4.04	4.88
5.00	0.15	1.11	3.89	4.85
6.00	0.18	1.25	3.75	4.82
7.00	0.20	1.39	3.61	4.80
8.00	0.23	1.53	3.47	4.77
9.00	0.26	1.67	3.33	4.74
10.00	0.29	1.80	3.20	4.71
11.00	0.32	1.93	3.07	4.68
12.00	0.35	2.06	2.94	4.65
13.00	0.38	2.19	2.81	4.62
14.00	0.41	2.32	2.68	4.59
15.00	0.44	2.45	2.55	4.56
15.42	0.45	2.50	2.50	4.55

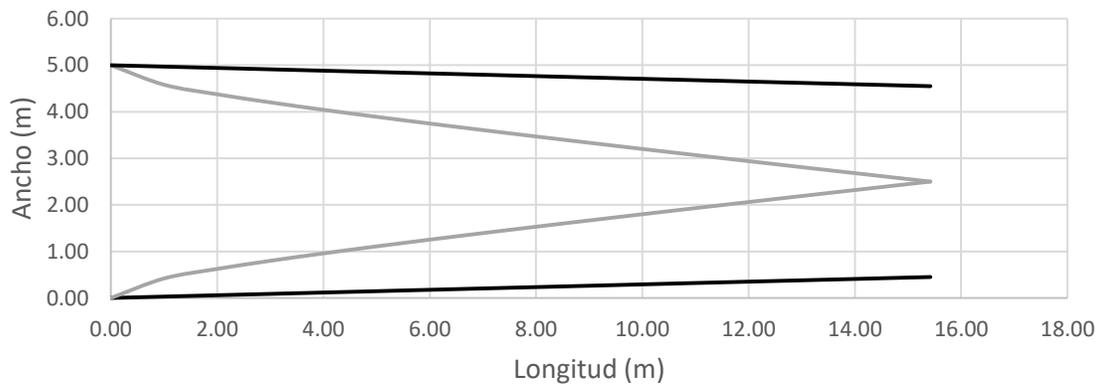


Figura 3.12. "Transición en planta"

A continuación en la Figura 3.13, se muestra el dimensionamiento total de la obra de toma.

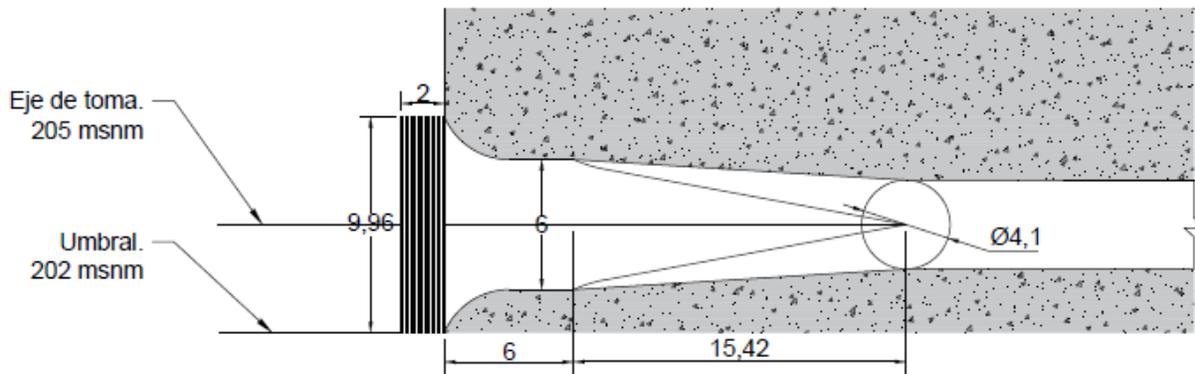


Figura 3.13. "Corte de la obra de toma"

### 2.3 Obra de excedencias

Por medio de un estudio hidrológico realizado con anterioridad, se obtuvo la avenida de diseño para un periodo de retorno de 10,000 años, el cual es considerado de 8,747.67 m<sup>3</sup>/s.

El nivel de desplante de la presa se encuentra a 195 msnm, mediante las características topográficas del sitio, se propone el nivel de cresta a 220 msnm, la longitud efectiva de cresta de 70 m y el talud de 0.89.

Cálculo del NAME, por medio de la siguiente expresión:

$$NAME = \left( \frac{Av.Diseño}{2 \times Long.efectiva\ de\ cresta} \right)^{2/3} + Nc \quad [Ec. 3.16]$$

$$NAME = \left( \frac{8747.67}{2 \times 70} \right)^{2/3} + 220 = 235.75$$

Cálculo del paramento, por medio de la siguiente expresión:

$$Paramento = Nc - Ndesplante \quad [Ec. 3.17]$$

$$Paramento = 220 - 195 = 25\ m$$

### CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Tirante

$$y = NAME - Ndesplante = 235.75 - 195 = 40.75\ m$$

Área

$$A = Tirante \times Long.\ efec.\ cresta = 40.75 \times 70 = 2852.23\ m^2$$

Velocidad

$$V = \frac{Av. \text{ Diseño}}{\text{Área}} = \frac{8747.67}{2852.23} = 3.07 \text{ m/s}$$

Carga de velocidad

$$ha = \frac{V^2}{2g} = \frac{3.07^2}{2 \times 9.81} = 0.48 \text{ m}$$

Carga de diseño

$$hd = NAME - Nc = 235.75 - 220 = 15.75 \text{ m}$$

Carga de diseño total

$$Hd = ha + hd = 0.48 + 15.75 = 16.23 \text{ m}$$

Relación entre carga de velocidad y carga de diseño total

$$\frac{ha}{Hd} = \frac{0.48}{16.23} = 0.029$$

Se obtienen los parámetros para definir el perfil del cimacio, aguas arriba y aguas abajo; por medio de las Figuras 1, 2, 3, 4 y 5 que se encuentran en el anexo del presente trabajo. En la Tabla 3.8 y 3.9 se muestran los valores.

Tabla 3.8. "Parámetros para el diseño del cimacio, aguas abajo"

Aguas abajo	
k	0.505
n	1.858

Tabla 3.9. "Parámetros para el diseño del cimacio, aguas arriba"

Aguas arriba	
$X_c/H_d$	0.269
$Y_c/H_d$	0.114
$R_1/H_d$	0.514
$R_2/H_d$	0.215

2.3.1 Diseño del cimacio.

A continuación se realiza el cálculo de los parámetros para definir el diseño del cimacio aguas arriba, se despeja cada valor, lo que da como resultado la siguiente Tabla 3.10:

Tabla 3.10. "Parámetros del perfil del cimacio aguas arriba"

$X_c=$	4.36
$Y_c=$	1.85
$R_1=$	8.34
$R_2=$	3.49
$R_1-R_2=$	4.85

Por medio del método gráfico se realiza el perfil del cimacio aguas arriba, que se presenta a continuación en la Figura 3.14.

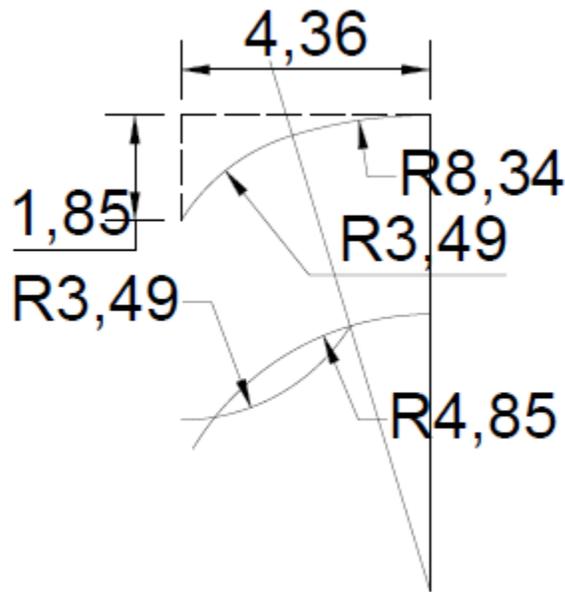


Figura 3.14. "Perfil del cimacio aguas arriba"

Para el cálculo del punto de tangencia del perfil del cimacio aguas abajo, se utiliza la siguiente ecuación 3.18.

$$X_T = \frac{H_d}{[k \times a \times n]^{1/(n-1)}} \quad [\text{Ec. 3.18}]$$

$$X_T = \frac{16.23}{(0.505 \times 0.89 \times 1.858)^{1/(1.858-1)}} = 20.02 \text{ m}$$

Para el cálculo de la distancia que va de la cresta del cimacio hacia el perfil del mismo, aguas abajo, en dirección del eje de las “x” se utiliza la siguiente ecuación:

$$X = X_T \times \left( \frac{N^{\circ} \text{Dato}_{n-1}}{\text{Ultimo } N^{\circ} \text{ Dato} - 1} \right) \quad [\text{Ec.3.19}]$$

Para el cálculo de la distancia que va de la cresta del cimacio hacia el perfil del mismo, aguas abajo, en dirección del eje de las “y” se usa la siguiente ecuación:

$$y = k \times H_d \times \left( \frac{x}{H_d} \right)^n \quad [\text{Ec. 3.20}]$$

A continuación en la Tabla 3.11 se presentan los resultados obtenidos mediante las expresiones anteriores:

*Tabla 3.11. “Dimensionamiento de perfil del cimacio aguas abajo”*

N° Dato	X(m)	Y (m)
1	0	0
2	1.05	-0.05
3	2.11	-0.18
4	3.16	-0.39
5	4.21	-0.67
6	5.27	-1.01
7	6.32	-1.42
8	7.38	-1.89
9	8.43	-2.43
10	9.48	-3.02
11	10.54	-3.67
12	11.59	-4.39
13	12.64	-5.15
14	13.70	-5.98
15	14.75	-6.86
16	15.80	-7.80
17	16.86	-8.80
18	17.91	-9.85
19	18.96	-10.95
20	20.02	-12.11

En la Figura 3.15 se muestra la gráfica del perfil del cimacio aguas abajo.

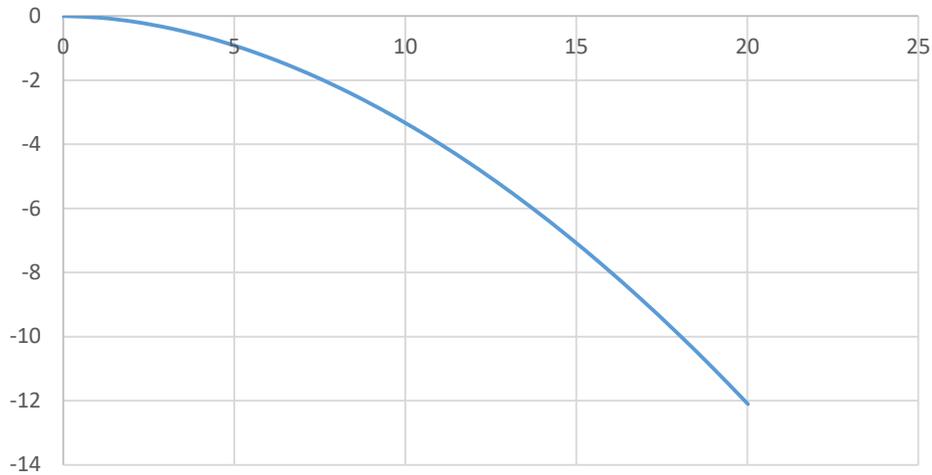


Figura 3.15. "Perfil del cimacio aguas abajo"

A continuación en la Figura 3.16 se observa el perfil del vertedor y los niveles conocidos en el embalse. Donde el NAMINO se estableció a 214 msnm para protección de la conducción, el NAMO al nivel del vertedor (ya que no se consideró alguna compuerta) y la obra de toma a dos metros sobre el nivel del río.

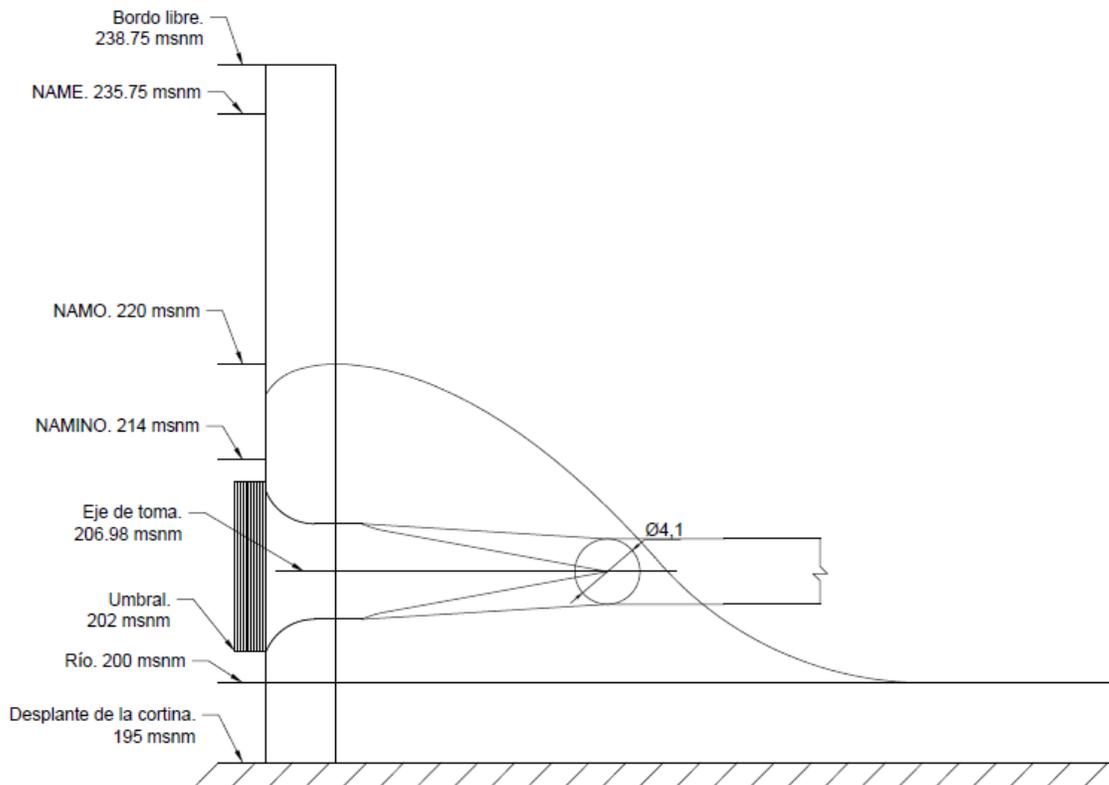


Figura 3.16. "Perfil de vertedor"

### 2.3.2 Estructura terminal

Se realizó el cálculo de las características hidráulicas del salto hidráulico, el nivel de plantilla propuesto de 182 msnm, ancho de plantilla de 70 m, el nivel de terreno a 195 msnm y el nivel de la superficie del agua en el río, como se muestran a continuación:

Para el conjugado mayor

Tirante

$$y_2 = Nivel_{Sup.Agua\ del\ Río} - Nivel_{plantilla} = 200 - 182 = 18\ m.$$

Área

$$A_2 = y_2 \times Ancho\ de\ plantilla = 18 \times 70 = 1260\ m^2$$

Velocidad

$$V_2 = \frac{Av.\ Diseño}{A_2} = \frac{8747.67}{1260} = 6.94\ m/s$$

Número de Froude

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{y_2 \times g}} = \frac{6.94}{\sqrt{18 \times 9.81}} = 0.52$$

Para el conjugado menor

Tirante

$$y_1 = \left(\frac{y_2}{2}\right) \times \left(\sqrt{1 + (8 \times Fr_2^2)} - 1\right) = \left(\frac{18}{2}\right) \times \left(\sqrt{1 + (8 \times 0.52^2)} - 1\right)$$
$$y_1 = 7.06\ m$$

Área

$$A_1 = y_1 \times Ancho\ de\ plantilla = 7.06 \times 70 = 494.10\ m^2$$

Velocidad

$$V_1 = \frac{Av.\ Diseño}{A_1} = \frac{8747.67}{494.10} = 17.70\ m/s$$

Número de Froude

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{y_1 \times g}} = \frac{17.70}{\sqrt{7.06 \times 9.81}} = 2.13$$

El criterio para el cálculo de la longitud del tanque amortiguador, se realizó mediante la relación de  $L_1/y_2$  y el número de Froude del conjugado menor, que fue obtenido mediante la Figura 6 que se encuentra en el anexo, dando como resultado:

$$\frac{L_1}{y_2} = 4.4$$

Se despeja  $L_1$

$$L_1 = 4.4 \times 18 = 79.2 \text{ m}$$

#### 2.4 Obra de desvío

Por medio de un estudio hidrológico realizado con anterioridad, se obtuvo la avenida de diseño para un periodo de retorno de 50 años, el cual es considerado de  $3,117.74 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el dimensionamiento de la obra de desvío se consideró un túnel con las siguientes características geométricas propuestas (Figura 3.17).

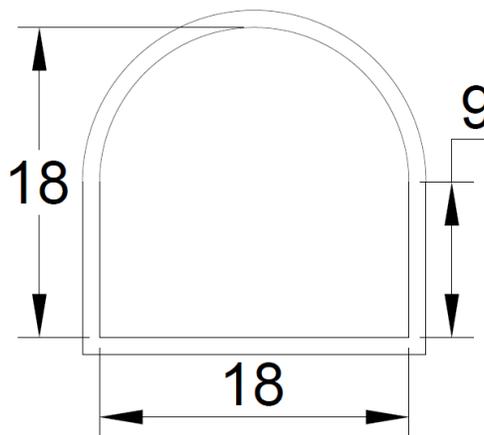


Figura 3.17. "Geometría obra de desvío"

Al ser una sección portal se consideraron los siguientes acabados para cada cara de la sección:

Pared izquierda y derecha – Concreto, acabado con grava en el fondo, con  $n_1= 0.017$

Plantilla – Concreto, acabado con llana metálica, con  $n_2= 0.013$

Semicírculo – Concreto lanzado, con  $n_3=0.019$

En la Figura 3.18, se muestra lo anteriormente mencionado.

Se calcula la  $n$  promedio, por medio de la expresión de Horton (1933) y Einstein (1934).

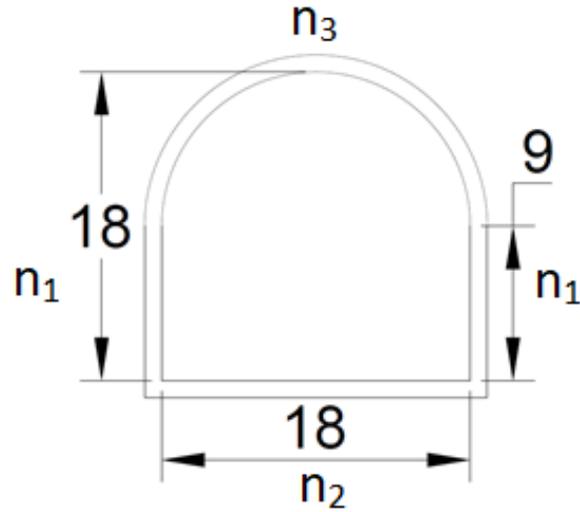


Figura 3.18. "Rugosidad para cada cara"

$$P_1 n_1^{3/2} = 9 \times 0.017^{3/2} = 0.019$$

$$P_2 n_2^{3/2} = 18 \times 0.013^{3/2} = 0.026$$

$$P_3 n_3^{3/2} = \left( \frac{2\pi \times 9}{2} \right) \times 0.019^{3/2} = 0.074$$

$$\text{Perímetro total} = \left( \frac{2\pi \times 9}{2} \right) + 9 + 18 = 64.27 \text{ m}$$

$$n_e = \frac{(0.019 + 0.026 + 0.074)^{2/3}}{64.27^{2/3}} = 0.015$$

Cálculo del tirante crítico en la sección rectangular.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} = \sqrt[3]{\frac{3117.74^2}{18^2 \times 9.81}} = 14.515 \text{ m}$$

Cálculo del tirante crítico en la sección combinada.

$$y_c = \frac{0.561 Q^{0.503}}{d^{0.258}} = \frac{0.561 \times 3117.74^{0.503}}{18^{0.258}} = 15.223 \text{ m}$$

Obtención de áreas para la sección portal.

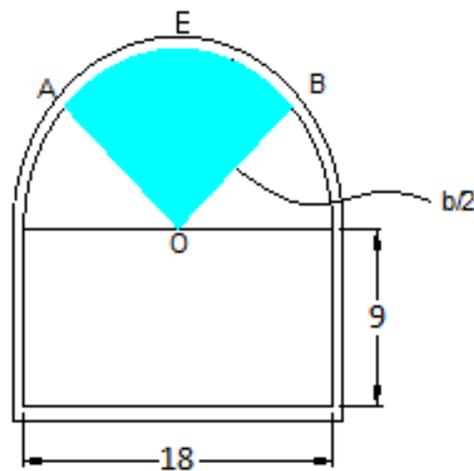
Área del rectángulo

$$\text{Área} = b \times l = 18 \times 9 = 162 \text{ m}^2$$

Área del semicírculo

$$\text{Área} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 18^2}{4} = 254.47 \text{ m}^2$$

DIAGRAMAS DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS (Figura 3.19 y Figura 3.20)



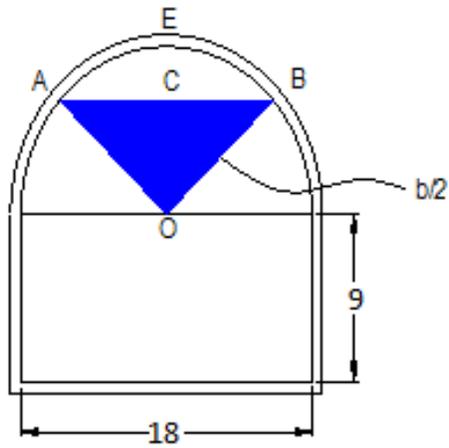
Área de AOB

Figura 3.19. "Área AOB"

Área para AOB

$$\text{Área} = 2 \times \left( \frac{\arccos\left(2 \times \frac{y_c - r}{D}\right)}{2\pi} \right) \times \left( \frac{\pi \times D^2}{4} \right)$$

$$\text{Área} = 2 \times \left( \frac{\arccos\left(2 \times \frac{15.223 - 9}{18}\right)}{2\pi} \right) \times \left( \frac{\pi \times 18^2}{4} \right) = 65.390 \text{ m}^2$$



Área de AOBC

Figura 3.20. "Área AOBC"

Área para AOBC

$$\text{Área} = (y_c - r)^2 \times \tan\left(\text{arc cos}\left(2 \times \frac{y_c - r}{D}\right)\right)$$

$$\text{Área} = (15.223 - 9)^2 \times \tan\left(\text{arc cos}\left(2 \times \frac{15.223 - 9}{18}\right)\right) = 40.461 \text{ m}^2$$

Obtención del área total

$$\text{Área}_{total} = \text{Área}_{rectangulo} + \text{Área}_{semicírculo} + \text{Área}_{AOBE} + \text{Área}_{AOBC}$$

$$\text{Área}_{total} = 162 + 127.235 + 65.390 + 40.461 = \mathbf{264.305 \text{ m}^2}$$

# CAPITULO III

## “Conclusiones”

El dimensionamiento de las obras hidráulicas requiere de estudios previos, como estudios hidrológicos e hidroenergéticos. Con los cuales se obtienen características necesarias para el dimensionamiento adecuado de las obras. Para el presente trabajo se requirió del gasto de diseño para la obra de toma ( $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ), la avenida de diseño para la obra de excedencias ( $8,747.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ), considerando un periodo de retorno de 10,000 años y la avenida de diseño para la obra de desvío ( $3,117.74 \text{ m}^3/\text{s}$ ), con un periodo de retorno de 50 años. Los cuales fueron obtenidos mediante dichos estudios que se realizaron previamente a este trabajo.

Para el cálculo de la obra de toma, se propusieron algunas dimensiones que fueron de apoyo para obtener la geometría de la obra. Se propuso que la obra de toma tuviera una inclinación de  $70^\circ$  y para el diseño de las rejillas, se consideró una separación entre ellas de 12 cm con un espesor de soportes de 0.25 m; y por medio de los cálculos realizados se obtuvo el ancho de las rejillas de 10.16 m y de altura 10.64 m. Las rejillas cuentan con una tapa con forma trapecial, con una base mayor de 8.5 m y una base menor de 4.5 m; y se encuentran separadas a 2 m de la bocatoma.

Para el abocinamiento de entrada se propuso una sección rectangular de 6 m de alto por 5 m de ancho y se calculó el diseño de la elipse superior en la entrada de la obra de toma; por lo que la altura total de la bocatoma fue de 9.96 m. Del mismo modo se obtuvo el diseño de las elipses laterales a la entrada de la obra, con un ancho de la bocatoma de 8.3 m.

Para la transición de la sección rectangular a la circular, se calculó el diámetro económico para la tubería por medio del criterio de la CFE y de Bundschu, dando un diámetro promedio de los dos criterios de 4.10 m. Mediante este resultado se dimensionó la longitud de transición que es de 15.42 m y se obtuvo la transición longitudinal y en planta. El eje de la obra de toma se encuentra a 205 msnm.

Al dimensionar la obra de excedencias se propuso una longitud efectiva de cresta de 70 m, con la que se pudo encontrar el nivel del NAME, el cual se encuentra a 235.75 msnm. Y por medio del nivel de cresta (220 msnm) y del nivel de desplante (195 msnm) se obtuvo el paramento de 25 m. Realizando los cálculos para los parámetros hidráulicos (tirante, área, velocidad, carga de velocidad, carga de diseño), se obtiene la carga de diseño total que es de 16.23 m.

Mediante la relación de la carga de velocidad y de diseño total, se encuentran los valores de los parámetros de diseño del cimacio aguas arriba y aguas abajo; con el método gráfico y el criterio USBR se dimensiona el perfil total del cimacio (Figura 3.14 y 3.15 respectivamente).

Para obtener la longitud total del tanque amortiguador, se calcularon el conjugado mayor y menor (18 m, 7.06 m respectivamente), al igual que el área, la velocidad y el número de Froude. Y mediante la Figura 6 que se encuentra en el anexo del presente trabajo, se encontró la longitud del tanque amortiguador de 79.2 m.

El dimensionamiento de la obra de desvío, se realizó proponiendo la geometría del túnel, se consideró una sección portal donde la base del rectángulo es de 18 m y la altura de 9 m. Para el semicírculo de la sección se considera un radio de 9 m. Utilizando la ecuación de Horton (1933) y Einstein (1934) se calculó la rugosidad para la sección portal, siendo de 0.015; y se obtuvo el tirante crítico para la sección rectangular y combinada (14.515 m y 15.223 m respectivamente). De acuerdo a los diagramas para las características geométricas del túnel, se calcularon las áreas para la sección AOB E y AOB C (Figura 3.17 y 3.18); al igual para la sección rectangular y del semicírculo, dando como resultado un área final de 264.305 m<sup>2</sup>.

ANEXO

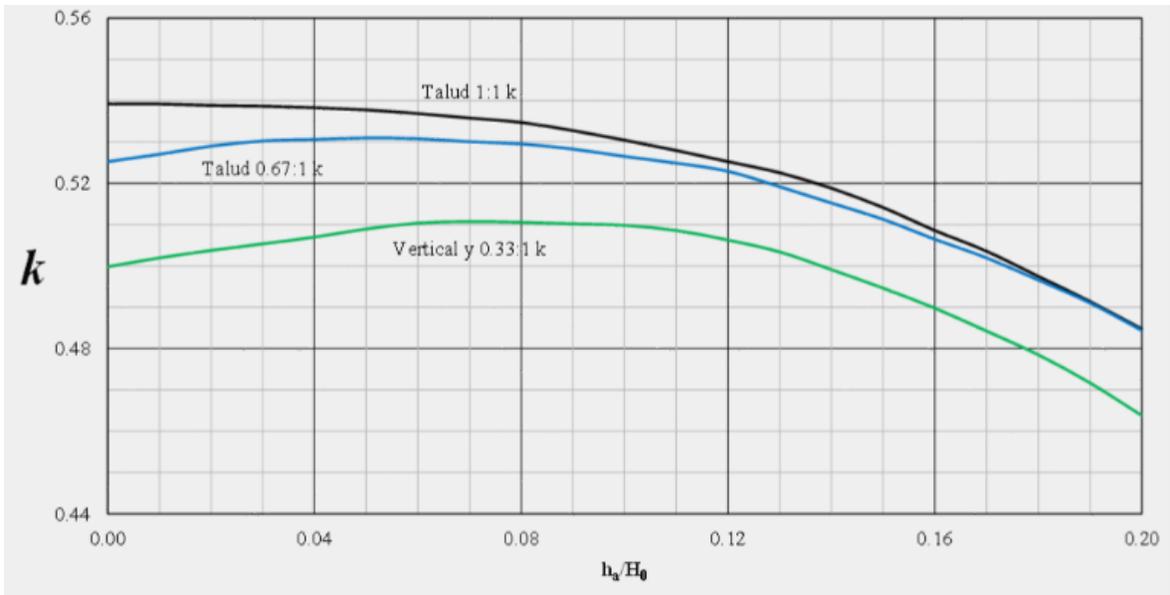


Figura 1." Parámetro  $k$ " (7).

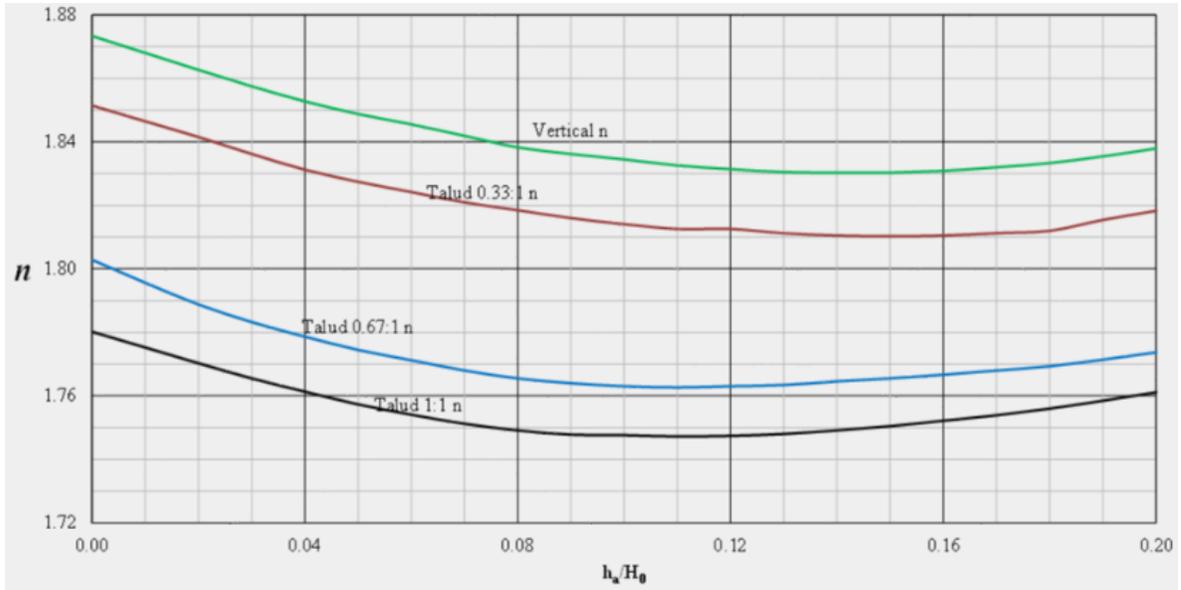


Figura 2." Parámetro  $n$ " (7).

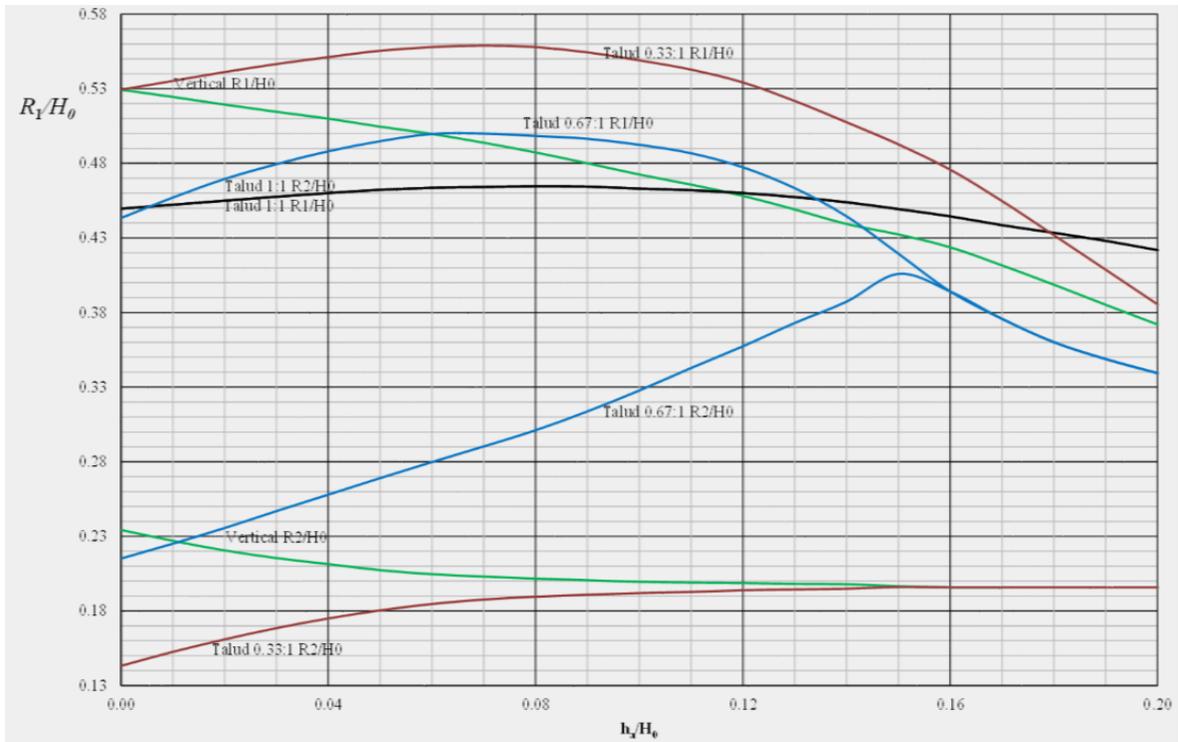


Figura 3. "Parámetro  $R_1/H_0$  y  $R_2/H_0$ " (7).

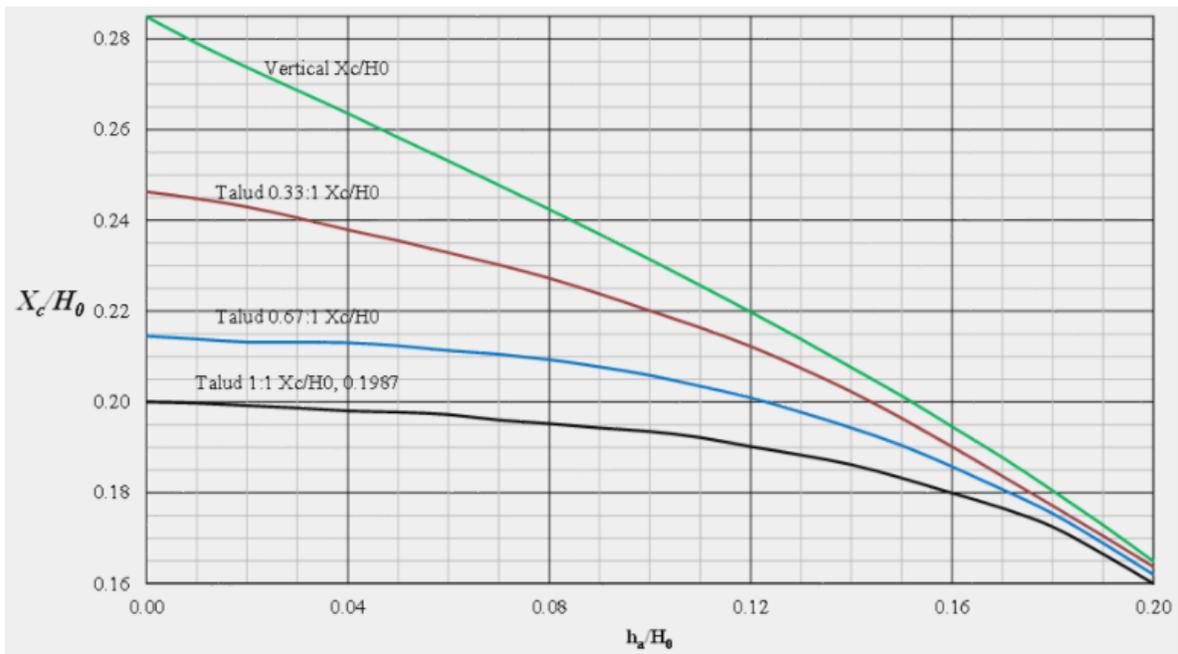


Figura 4. "Parámetro  $X_c/H_0$ " (7).

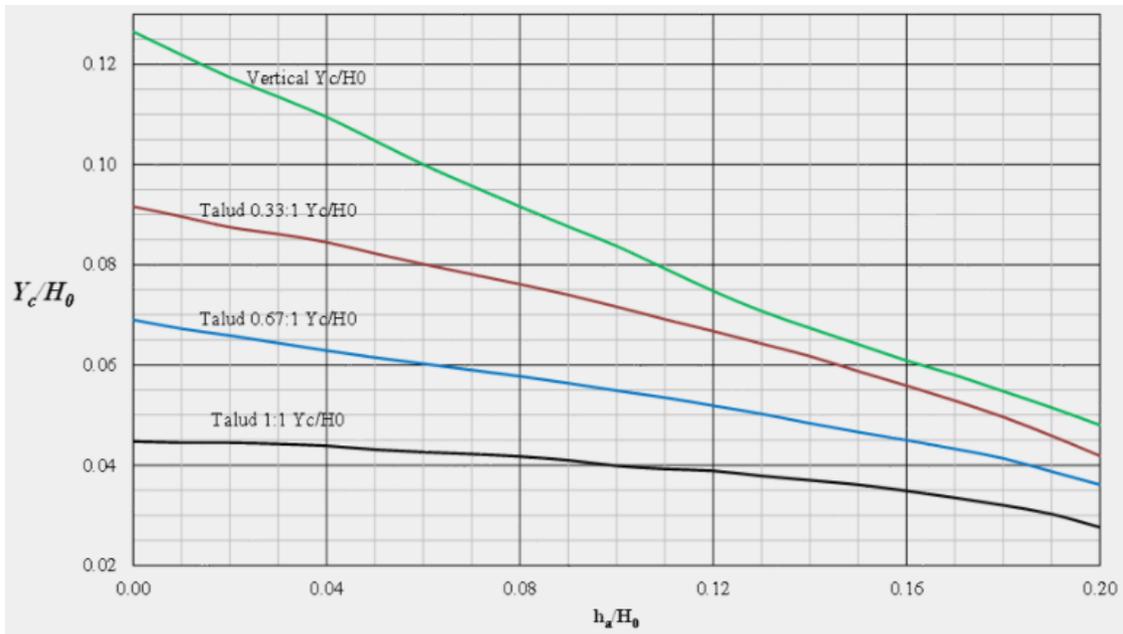


Figura 5. "Parámetro  $Y_c/H_0$ " (7).

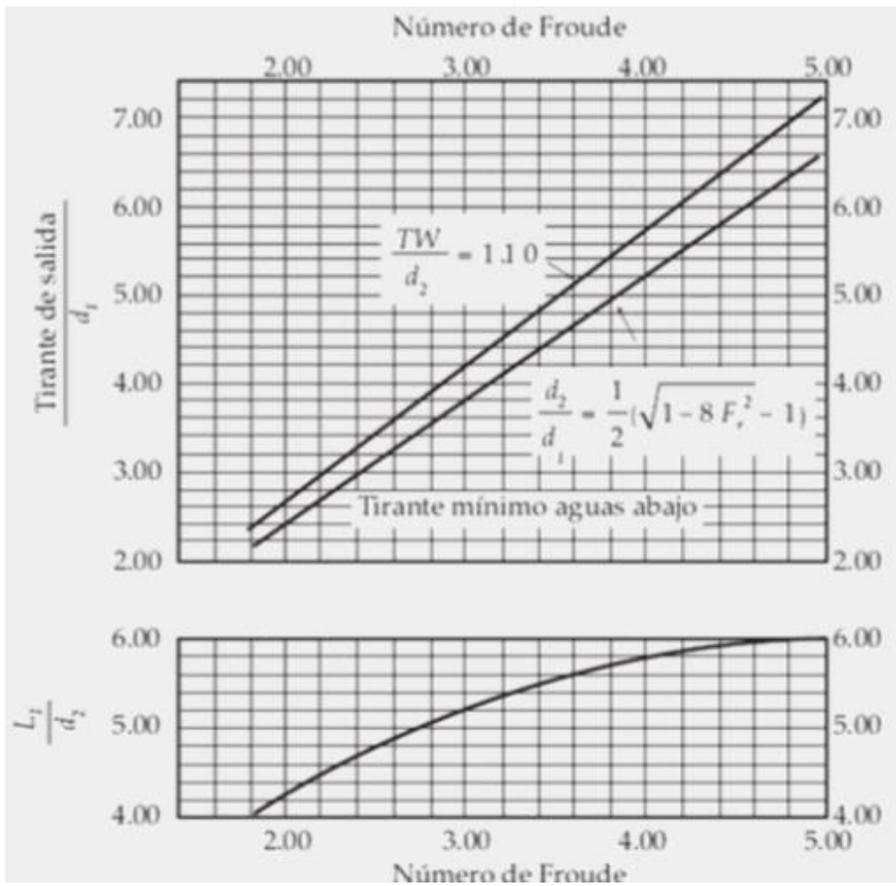


Figura 6. "Criterio para el cálculo de la longitud del tanque amortiguador" (7).

## Referencias Bibliográficas

1. Acerca de CFE. (2015). Comisión Federal de Electricidad. <https://www.cfe.mx/acercacfe/Quienes%20somos/Pages/historia.aspx>
2. Sotelo, A. G. (1999). *Hidráulica General (Vol.1)*. Ciudad de México, México: Limusa Noriega.
3. Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales (Primer edición ed.)*. UNAM, Facultad de Ingeniería.
4. Obras de Excedencias. (2010). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [https://www.researchgate.net/publication/303856169\\_Obras\\_de\\_excedencia](https://www.researchgate.net/publication/303856169_Obras_de_excedencia)
5. Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
6. Marengo Mogollón, H. (2019). *Obras de Desvío en Proyectos Hidráulicos, Aspectos de Diseño y Construcción (Primer edición ed.)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Sotelo Ávila, G. (1994). *Diseño hidráulico de estructuras (1.ª ed.)*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.