



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta de práctica en el  
Laboratorio de Hidráulica,  
para la obtención de  
generación eléctrica en un  
modelo de presa**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

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

Karla Segura Granados

**ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO**

M. en I. Alejandro Maya Franco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

## Contenido

Lista de Figuras .....	4
Lista de Tablas.....	6
“Introducción” .....	8
1.1 Objetivo general.....	9
1.2 Antecedentes históricos de los laboratorios de hidráulica .....	9
1.3 Importancia de los laboratorios en el ámbito académico .....	9
1.3.1 Importancia del proceso de certificación del laboratorio .....	10
1.4 Importancia de los laboratorios de hidráulica en el desarrollo de obras hidráulicas. 10	
Capítulo I “Generalidades” .....	12
2.1 Ciclo hidrológico.....	13
2.2 Vaso de almacenamiento.....	13
2.2.1 Componentes principales de un vaso de almacenamiento .....	14
2.2.2 Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes (Capacidades) .....	16
2.3 Características de la obra de toma .....	17
2.4 Funcionamiento de vaso.....	18
2.5 Centrales hidroeléctricas .....	19
2.5.1 Antecedentes de centrales hidroeléctricas.....	19
2.5.2 Primer método desviación de corriente.....	19
2.5.3 Segundo método intercepción de la corriente con un dique o presa .....	20
2.5.4 Principales componentes y funcionamiento de una central hidroeléctrica.....	21
2.5.5 Potencia media .....	26
2.5.6 Unidades generadoras .....	27
2.5.7 Generación media mensual y media anual .....	27
Capítulo II “Descripción del modelo de vaso” .....	29
3.1 Descripción del modelo de presa del laboratorio.....	30
3.2 Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes.....	32
3.3 Gasto de la obra de toma .....	36
3.4 Similitud hidráulica.....	38
3.4.1 Condición de similitud de Froude.....	39
Capítulo III “Verificación de la propuesta de práctica” .....	42
4.1 Desarrollo de la práctica para los equipos piloto A, B y C .....	47

4.2 Análisis del funcionamiento hidráulico del modelo de presa para los equipos piloto A, B y C .....	50
Capítulo IV “Conclusiones” .....	75
Anexo .....	78
Referencias Bibliográficas.....	93

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Ciclo hidrológico.

Figura 2.2. Hidrograma anual de escurrimientos.

Figura 2.3. Componentes principales de un vaso.

Figura 2.4. Curva elevaciones – áreas – capacidades.

Figura 2.5. Desviación de la corriente.

Figura 2.6. Intercepción de la corriente con un dique o presa.

Figura 2.7. Componentes de una central hidroeléctrica.

Figura 2.8. Chimenea de equilibrio.

Figura 2.9. Turbina Kaplan.

Figura 2.10. Turbina Francis.

Figura 2.11. Turbina Pelton.

Figura 3.1. Tanque de aproximación al vertedor.

Figura 3.2. Obra de excedencias.

Figura 3.3. Vista frontal del modelo de presa.

Figura 3.4. Planos del modelo de presa.

Figura 3.5. Planos del modelo de presa.

Figura 3.6. Digitalización de los planos del modelo de presa.

Figura 3.7. Digitalización de los planos del modelo de presa.

Figura 3.8. Digitalización de los planos del modelo de presa.

Figura 3.9. Obtención del volumen.

Figura 3.10. Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes.

Figura 3.11. Limnómetro de punta.

Figura 3.12. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto, con el número de Reynolds en un orificio circular.

Figura 3.13. Esquema de la carga sobre la obra de toma.

Figura 4.1. Épocas de lluvia y estiaje.

Figura 4.2. Equipo piloto A.

Figura 4.3. Equipo piloto A.

Figura 4.4. Equipo piloto B.

Figura 4.5. Equipo piloto B.

Figura 4.6. Equipo piloto C.

Figura 4.7. Equipo piloto C.

Figura 4.8. Ubicación de hoja milimétrica, cerca al piezómetro.

Figura 4.9. Selección de turbinas.

Figura 4.10. Selección de turbinas, equipos piloto A, B y C.

Figura 4.11. Tiempo vs Generación media.

Figura 4.12. Tiempo vs Generación media, equipo piloto A.

Figura 4.13. Tiempo vs Generación media, equipo piloto B.

Figura 4.14. Tiempo vs Generación media, equipo piloto C.

Figura 4.15. Tiempo vs Volúmenes de entrada.

Figura 4.16. Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto A.

Figura 4.17. Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto B.

Figura 4.18. Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto C.

## Lista de Tablas

Tabla 2.1. Características principales de las turbinas hidráulicas.

Tabla 3.1. Curva E – A – V.

Tabla 3.2. Condición de similitud de Froude.

Tabla 4.1. Mediciones en el modelo de presa.

Tabla 4.2. Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto A.

Tabla 4.3. Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto B.

Tabla 4.4. Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto C.

Tabla 4.5. Registro de gastos.

Tabla 4.6. Registro de gastos, equipo piloto A.

Tabla 4.7. Registro de gastos, equipo piloto B.

Tabla 4.8. Registro de gastos, equipo piloto C.

Tabla 4.9. Registro de volúmenes.

Tabla 4.10. Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto A.

Tabla 4.11. Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto B.

Tabla 4.12. Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto C.

Tabla 4.13. Funcionamiento de vaso, equipo piloto A.

Tabla 4.14. Funcionamiento de vaso, equipo piloto B.

Tabla 4.15. Funcionamiento de vaso, equipo piloto C.

Tabla 4.16. Similitud hidráulica, equipo piloto A.

Tabla 4.17. Similitud hidráulica, equipo piloto B.

Tabla 4.18. Similitud hidráulica, equipo piloto C.

Tabla 4.19. Potencia media, equipo piloto A.

Tabla 4.20. Potencia media, equipo piloto B.

Tabla 4.21. Potencia media, equipo piloto C.

Tabla 4.22. Generación media.

Tabla 4.23. Generación media, equipo piloto A.

Tabla 4.24. Generación media, equipo piloto B.

Tabla 4.25. Generación media, equipo piloto C.

# “Introducción”

En este trabajo se presentan los resultados del proceso empleado para generar una propuesta de práctica de laboratorio de hidráulica, específicamente, para la asignatura de Obras Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería. Para lo cual, esta propuesta se ajusta a la infraestructura del laboratorio, haciendo uso del modelo de la presa de almacenamiento.

En el capítulo I se presentan los conceptos generales que se ocuparan para poder generar la propuesta de práctica. El capítulo II describe el modelo de presa que se utilizó en el presente trabajo. En el capítulo III se presenta la verificación de la propuesta de práctica, al igual que los resultados obtenidos en la memoria de cálculo. El capítulo IV se encuentra las conclusiones del presente trabajo. Por último en el anexo se encuentra la propuesta de práctica con el formato del laboratorio de hidráulica.

### 1.1 Objetivo general

Generar una propuesta de práctica para el laboratorio de hidráulica, donde los alumnos podrán estimar la generación eléctrica apoyándose en el modelo de presa del laboratorio de hidráulica de la FI UNAM, así como seleccionar, de manera preliminar la turbina más conveniente para las características de carga – caudal – potencia.

### 1.2 Antecedentes históricos de los laboratorios de hidráulica

En 1795 fue construido el primer modelo físico hidráulico, hecho por el ingeniero Luís Jerónimo Fargue, sobre un tramo del río Garona. Podemos partir diciendo que estos fueron los inicios de los modelos, que dieron pauta a los laboratorios de hidráulica, donde, con ayuda de modelos hidráulicos e instrumentos de medición, se realizan diversas pruebas, que pueden tener objetivos tanto académicos, de investigación o de solución de problemas en obras.

Siendo así que hasta el año de 1891, fue fundado el primer laboratorio de hidráulica en Dresden Alemania por el profesor Engels, para que después muchos países de todo el mundo contemplaran el fundar un laboratorio de hidráulica, por lo que hoy en día existen varios por todo el mundo, de tal manera, que en la UNAM se tienen varios de ellos.

### 1.3 Importancia de los laboratorios en el ámbito académico

El laboratorio representa una herramienta necesaria para poder materializar conceptos teóricos, es un apoyo básico, necesario, para comprender que son diversas, pero importantes las utilidades de éste; tanto para un investigador, como para el docente y el alumno.

Por otra parte, en el ámbito académico, donde se requiere mostrar la aplicación de conceptos teóricos en la vida práctica a los alumnos, resulta de suma importancia el apoyo del laboratorio, ya que será el lugar donde se terminen de comprender los conocimientos ya adquiridos en las clases de teoría.

Finalmente, otro punto importante para la generación de un proyecto en laboratorio, específicamente de una práctica, se debe analizar en diversas ocasiones, bajo diferentes esquemas y mediciones, con el fin de encontrar las características necesarias para demostrar diferentes conceptos y elegir los resultados que los instrumentos instalados en el laboratorio arrojen.

### 1.3.1 Importancia del proceso de certificación del laboratorio

Con la certificación se reconoce nacional e internacionalmente la capacidad de proporcionar un servicio que cumple con los estándares de la norma ISO 9001, se menciona esta ya que es la norma de mayor renombre y la más utilizada alrededor del mundo.

La norma ISO 9001, es una norma internacional que toma en cuenta las actividades de una organización. Esta norma se concentra en la satisfacción del cliente y en la capacidad de proveer productos y servicios que cumplan con las exigencias internas y externas de la organización.

La importancia del proceso de certificación en un laboratorio, no radica únicamente en la calidad que puede ofrecer, también en la seguridad interna del laboratorio, para todas las personas que trabajan en él o tengan acceso al mismo, que cuente con extinguidores, líneas de precaución, letreros que adviertan algún peligro y salidas de emergencia bien señaladas, entre otros.

## 1.4 Importancia de los laboratorios de hidráulica en el desarrollo de obras hidráulicas

La vida profesional de un ingeniero, busca dar soluciones óptimas a problemas que mejoren la calidad de vida de algún sector de la población, aprovechando los recursos que se tengan disponibles para ella. Éste tendrá que evaluar las técnicas necesarias para analizar el problema y dar la mejor solución.

En algunas ocasiones, las obras están limitadas, tanto económica, como prácticamente, y en su mayoría, por el tiempo, por lo que se realizan mediante ingeniería de gabinete. Y en otros casos, en los que los problemas que se presenten pueden ser más complejos, conllevan un mayor análisis e incluso el uso de diversos métodos matemáticos y de modelos hidráulicos físicos.

Tales modelos se realizan en los laboratorios de hidráulica, donde se puede simular un fenómeno real que se esté presentado en un prototipo, dándonos así la

información necesaria para optimizar el funcionamiento y operación de las obras, mediante una obra a escala, analizada en laboratorio realizando las pruebas que sean identificadas como posibles escenarios de operación, para obtener un panorama más claro de funcionamiento, y con ello se logre reducir riesgos en costos, construcción, operación, mantenimiento, etc..

En el ámbito práctico, como ingenieros, se tiene el compromiso de optimizar recursos, empleando métodos más rápidos, menores costos y factibles en su aplicación, pero para llegar a estas condiciones, en algunas ocasiones que lo ameriten, es necesario realizar una investigación en laboratorio para reducir la incertidumbre en los resultados finales, a fin de identificar posibles esquemas que nos brinden una opción óptima.

# Capítulo I

## “Generalidades”

En este capítulo, se presentarán los conceptos teóricos que aplicaremos en la generación de la práctica, para facilitar la comprensión del objetivo de ésta.

## 2.1 Ciclo hidrológico

*Todo comienza cuando el sol calienta las masas de agua, de su evaporación se forman nubes y eventualmente lluvia que fluye a través de caudalosos ríos. El agua en estos ríos tiene una enorme cantidad de energía mecánica potencial, y para aprovechar esta energía se seleccionan cauces de ríos que tienen algunas características importantes que incluyen amplio caudal de agua y diferencias importantes de altura en corta distancia [2].*

El ciclo hidrológico continúa formando ríos que van descendiendo por montañas o brechas, llegando al mar, lagunas e inclusive estructuras de regularización como son las presas, figura 2.1.

Con el recorrido del agua es posible aprovechar a energía potencial que alberga en ella, cuidado que las pérdidas de energía sean las menos posibles.

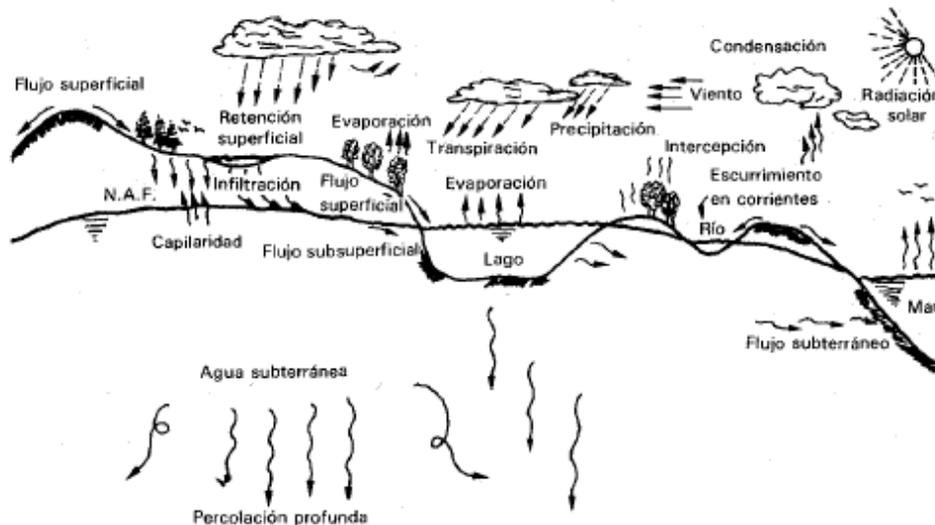


Figura 2.1 “Ciclo hidrológico, [1]”

## 2.2 Vaso de almacenamiento

*Un vaso de almacenamiento, como se puede comprender, además de almacenar, permite regular los escurrimientos de un cauce, es decir, para almacenar el volumen de agua que escurre en exceso en las temporadas de lluvia para posteriormente usarlo en las épocas de sequía, cuando los escurrimientos son escasos [1]. Este concepto es fundamental para el dimensionamiento de presas y otras obras de aprovechamiento y protección contra inundaciones.*

La demanda de agua corresponde a la cantidad o volumen de agua que se necesita para satisfacer uno o varios propósitos de la presa. De los cuales pueden ser irrigación, generación de energía eléctrica, control de avenidas, abastecimiento de agua potable, navegación, acuicultura, recreación y retención de sedimentos.

El hidrograma es un gráfico que muestra la variación entre el tiempo y los gastos presentados en un lugar.

En la figura 2.2, se ejemplifica el hidrograma anual de escurrimiento de un río y una demanda constante durante todo el año; para este caso, se muestra de manera definida la época de lluvias (avenidas) y la época de secas (estiaje). En la figura 2.2, podemos observar como en los meses de diciembre a junio la demanda es mayor que la aportación por el río, en cambio en los meses de julio a noviembre la demanda es menor que la aportación. Por lo tanto el volumen excedente de los meses de julio a noviembre tendrá que ser almacenado para que en los próximos meses donde la aportación del río no es suficiente pueda cubrir la demanda.

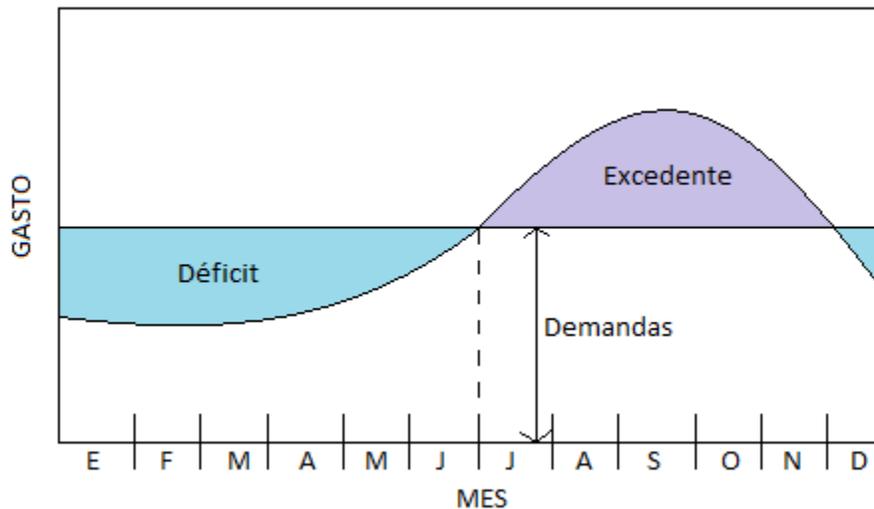


Figura 2.2 “Hidrograma anual de escurrimientos, elaborada por el autor”

### 2.2.1 Componentes principales de un vaso de almacenamiento

Un vaso de almacenamiento se define mediante diferentes niveles, los cuales se presentan en la figura 2.3. El NAMINO es el nivel de aguas mínimas de operación, este es el nivel más bajo con el que puede operar la obra de toma de la presa; y para el caso de presas para la generación de energía eléctrica, se fija este nivel de acuerdo con la carga mínima que necesitan las turbinas para que estas operen correctamente sin dañarse.

Cuando el uso de la presa es para irrigación u otros usos, el NAMINO también es conocido como NAMIN es el nivel de aguas mínimas, que coincide con el

nivel de la obra de toma, en éste se encuentra el volumen muerto, que es del que no se puede disponer y, debajo de éste, se halla el volumen de azolves, correspondiente al volumen que recibe el vaso, mediante el acarreo de sólidos por el río durante la vida útil de la presa.

El NAMO es el nivel de aguas máximas de operación, éste se define mediante el análisis de varios esquemas de operación, hasta identificar el nivel que proporciona un beneficio mayor que el costo, tanto técnico como económico; y la obra de excedencias (estructura que sirve para desalojar los volúmenes excedentes de agua que pueden poner en peligro la seguridad de la obra) se ajustara al nivel del NAMO.

En el caso que el vertedor de excedencias no esté controlado por una compuerta, el NAMO coincide con su cresta, siendo el punto más alto. En el caso contrario, éste se puede encontrar por arriba de la cresta, así en épocas de estiaje el NAMO puede alcanzar un valor mayor que en épocas de lluvia.

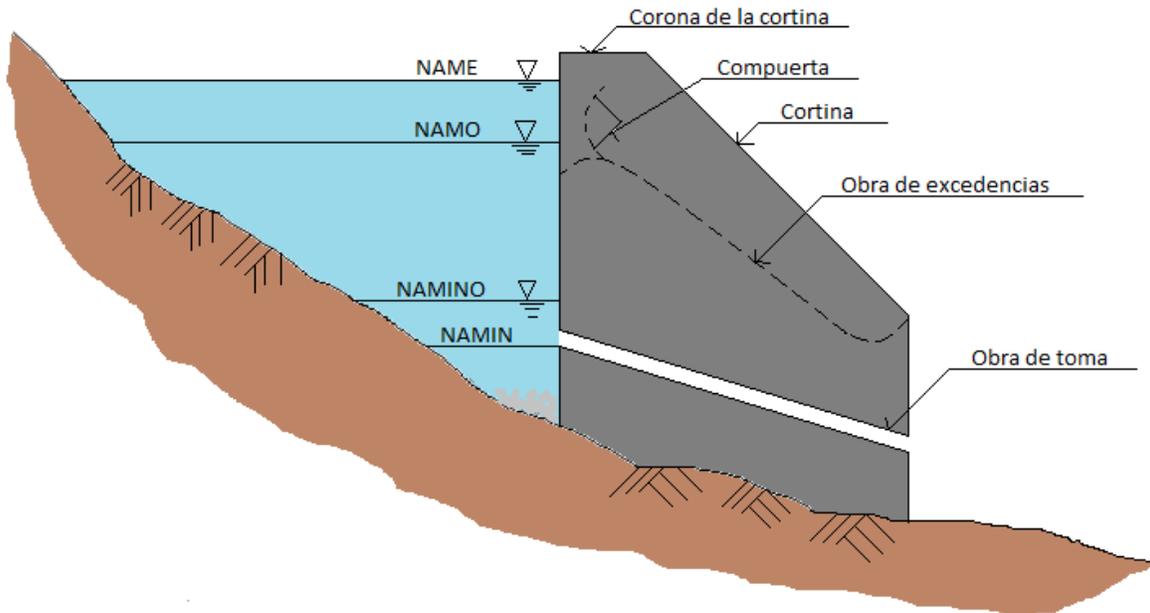


Figura 2.3 “Componentes principales de un vaso, elaborada por el autor”

El volumen útil o también conocido como capacidad útil, es aquel con el que se satisfacen las demandas de agua, éste se encuentra entre el NAMO y el NAMIN.

El NAME es nivel de aguas máximas extraordinarias y este es el nivel más alto que puede de alcanzar el vaso bajo cualquier condición.

El volumen entre el NAME y el NAMO se llama superalmacenamiento, es la capacidad que tiene una presa para controlar las avenidas que se presenten cuando el nivel del agua está cercano al NAMO.

Por último, el bordo libre es el espacio que existe entre el NAME y la corona de la cortina, sirve para contener el oleaje y la marea producida por el viento, al igual que compensar las reducciones en la altura provocado por los asentamientos que se encuentran en el fondo del vaso.

Así que, podemos decir que es necesario determinar el volumen de azolves, el volumen muerto, el volumen útil y el volumen de superalmacenamiento para poder dimensionar el vaso de una presa.

### 2.2.2 Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes (Capacidades)

Para cualquier proyecto se debe conocer la topografía de detalle del lugar, mediante mapas topográficos, los cuales muestran un sitio en planta con curvas de nivel referidas a su elevación correspondiente.

Por lo que, para la estimación de la curva E – A – V, se requiere de una topografía reciente y confiable; esta curva proporciona la relación que existe entre los volúmenes, áreas y elevaciones del vaso; su importancia radica en conocer el volumen de agua que se almacenaría para cada altura o elevación en la cortina, así como el área de embalse que tendría para una dicha elevación en el vaso.

En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de una curva de elevaciones – área – capacidades (volúmenes).

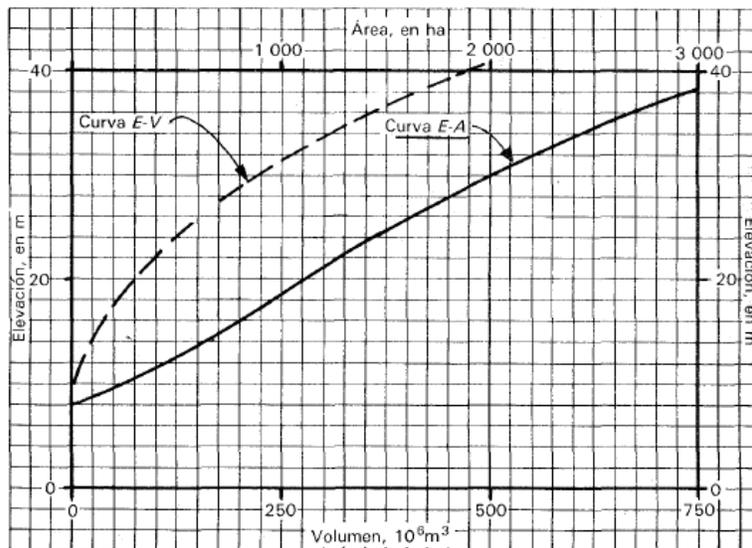


Figura 2.4 “Curva elevaciones – áreas – capacidades, [1]”

### 2.3 Características de la obra de toma

El principal objetivo de la obra de toma es extraer el agua almacenada del vaso de una forma controlada y ser destinada a uno o varios propósitos como se mostró en el apartado 2.1 de este capítulo.

Por lo tanto se tienen que tomar en cuenta diversas características de la obra de toma, las cuales se mencionaran a continuación.

#### Carga Bruta

Para análisis de generación hidroeléctrica, se considera como la carga bruta es la diferencia de elevaciones que existe entre el nivel máximo de operación y el eje del equipo turbogenerador.

#### Perdidas de energía

Estas ocurren en el traslado del agua por la conducción, y suelen generarse por la fricción entre el fluido y el tubo. De igual forma se presentan al pasar por conexiones o cambios súbitos de dirección.

#### Carga Neta

La carga neta es la diferencia entre la carga bruta y las pérdidas totales producidas a lo largo de la tubería.

#### Nivel máximo de operación

Es el máximo nivel estacional que puede presentarse en el vaso en condiciones normales de operación, es decir, sin avenidas.

#### Nivel normal de operación

Este nivel corresponde a la capacidad máxima que tiene el vaso.

#### Nivel mínimo de operación

Es el nivel mínimo que puede presentarse en el vaso, para que cumpla con la demanda a la que está destinada sin afectar el funcionamiento del equipo turbogenerador.

## 2.4 Funcionamiento de vaso

Partiendo de la ecuación de la continuidad, que es expresada en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  [1]:

$$X - D = \Delta V \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

Donde:

$X$  volumen de entradas al vaso durante el intervalo  $\Delta t$

$D$  volumen de salidas del vaso durante el mismo intervalo

$\Delta V$  es el cambio de volumen almacenado en el vaso durante el intervalo  $\Delta t$

$\Delta t$  es el intervalo de tiempo, su valor depende del tamaño del vaso, generalmente  $\Delta t = 1 \text{ mes}$ , en vasos muy grandes puede valer varios meses pero nunca más de 1 año, al contrario en vasos pequeños  $\Delta t = \text{semanas}$ .

Las entradas al vaso son:

$$X = E_{cp} + E_t + E_{ll} \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

Donde:

$E_{cp}$  entradas por cuenca propia

$E_t$  entradas por transferencia desde otras cuencas

$E_{ll}$  entradas por lluvia directa sobre el vaso

Las salidas se conforman de la siguiente manera:

$$D = S_d + S_e + S_i + S_{de} \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

Donde:

$S_d$  volumen extraído para satisfacer la demanda

$S_e$  volumen evaporado

$S_i$  volumen infiltrado en el vaso

$S_{de}$  volumen derramado

## 2.5 Centrales hidroeléctricas

Estas utilizan la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica, aprovechando los caudales y las caídas del agua.

*El agua de los ríos es retenida por medio de presas y luego es conducida por túneles y tuberías de alta presión hacia terrenos más bajos, al llegar a la planta generadora, el agua lleva ya una enorme cantidad de energía, la que se aprovecha para hacer girar turbinas que accionan el alternador y produce la corriente eléctrica. Las turbinas a su vez hacen girar un generador que produce la electricidad, esta pasa a los transformadores y luego es transportada a los sitios de consumo a través de las líneas de transmisión [2].*

En el curso natural del agua se encuentra con remolinos, piedras y diferentes obstáculos que aumentan las pérdidas de energía, se ha mencionado que para las centrales hidroeléctricas se tiene que aprovechar al máximo la energía potencial por lo que existen dos métodos que ayudan a reducir al mínimo las pérdidas de energía, por lo que se aprovecharía al máximo la energía potencial disponible del agua para después ser transformada en energía mecánica por medio de máquinas como son las turbinas.

### 2.5.1 Antecedentes de centrales hidroeléctricas

Con el surgimiento de las primeras ruedas hidráulicas surgió el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica que se remonta a 3500 años en el pasado. Los griegos y los romanos empleaban estas ruedas para moler granos y con la energía producida se elevaba el agua por encima del río siendo utilizada para riego. En 1866 Werner von Siemens sentó las bases para la obtención de energía eléctrica con el principio dinamoeléctrico. Para 1880 surgió en Northumberland, Gran Bretaña la primera planta hidroeléctrica.

### 2.5.2 Primer método desviación de corriente

Este método consiste en llevar el caudal del río de un punto A (toma de agua), a lo largo del perímetro de este considerando una pendiente pequeña respecto a las curvas de nivel hasta llegar a un punto B, en donde inician unas tuberías que llegan hasta la central situada en el punto C. En el caso del vaso de una presa el recorrido que hace el agua va desde el punto A por toda la superficie de la laguna, hasta el punto B´ (toma de agua cerca de la presa), de aquí el agua se dirige a las turbinas que se encuentran en el punto C (casa de máquinas o central). Esto se puede visualizar en la figura 2.5.

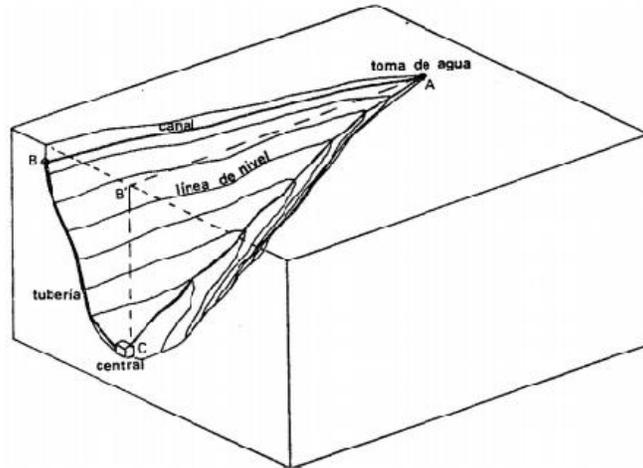


Figura 2.5 “Desviación de la corriente, [2]”

### 2.5.3 Segundo método intercepción de la corriente con un dique o presa

Este método consiste en bloquear la corriente del río con una presa, provocando así que el nivel del agua suba y por lo tanto la velocidad media y las pérdidas disminuyan. La localización de la presa se elige aprovechando las zonas angostas del río, cerrando así el vaso de almacenamiento, reservorio o lago artificial. En la figura 2.6 se puede visualizar lo anterior.

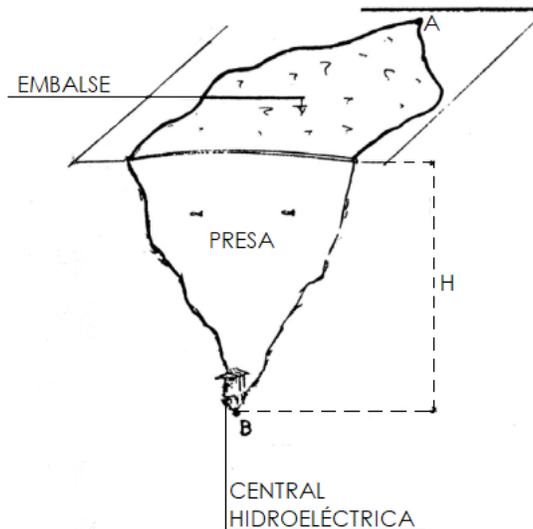


Figura 2.6 “Intercepción de la corriente con un dique o presa, [2]”

### 2.5.4 Principales componentes y funcionamiento de una central hidroeléctrica

En la figura 2.7 se muestra un esquema de los componentes y funcionamiento de una central hidroeléctrica.

El tipo de turbinas dependen de las condiciones, por ejemplo y a reserva de considerar con más detalle otras características, de manera preliminar se puede identificar que si la caída del agua es importante se utilizan turbinas Pelton, pero si la caída del agua es mediana se seleccionan turbinas Francis y si son pequeñas turbinas Kaplan.

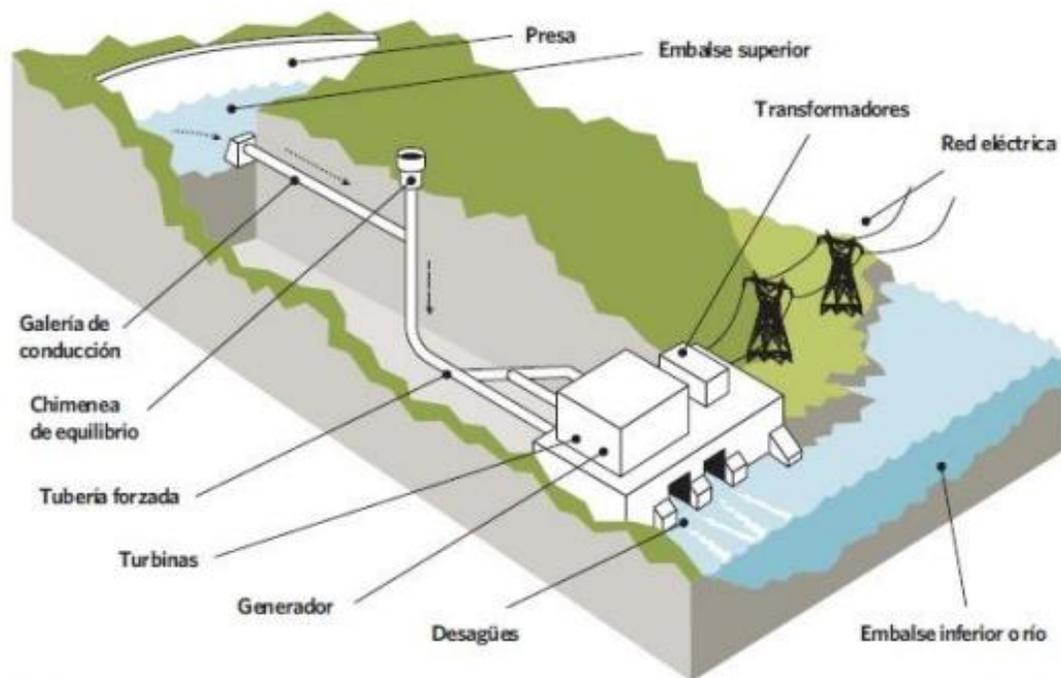


Figura 2.7 “Componentes de una central hidroeléctrica, [3]”

#### Toma de agua y compuertas

Es el área de la obra donde se toma el agua requerida para accionar las turbinas, está diseñada para que las pérdidas de carga producidas sean mínimas. Además de unas compuertas que regulan la cantidad de agua que les llega a las turbinas, estas poseen rejillas metálicas que impiden el acceso a troncos, ramas, etc., que puedan dañar los alabes.

### Conducciones (canales de derivación y tuberías forzadas)

El canal de derivación se utiliza para llevar el agua desde la toma hasta las turbinas de la central. Las tuberías forzadas generalmente son necesarias para hacer la entrada a las turbinas, ya que el agua se desplaza por presión y no por la pendiente.

### Chimeneas de equilibrio

Consiste en un pozo vertical situado lo más cerca de las turbinas, que evita las sobrepresiones o golpes de ariete en estas. Cuando se llega a presentar una sobre presión de agua encuentra menor resistencia para penetrar el pozo que a la cámara de presión de las turbinas, esto provoca que el nivel del agua en la chimenea suba.

En el caso contrario cuando se llega a presentar depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajara, de esta forma se evita el golpe de ariete. En la figura 2.8 se pueden observar los casos anteriores.

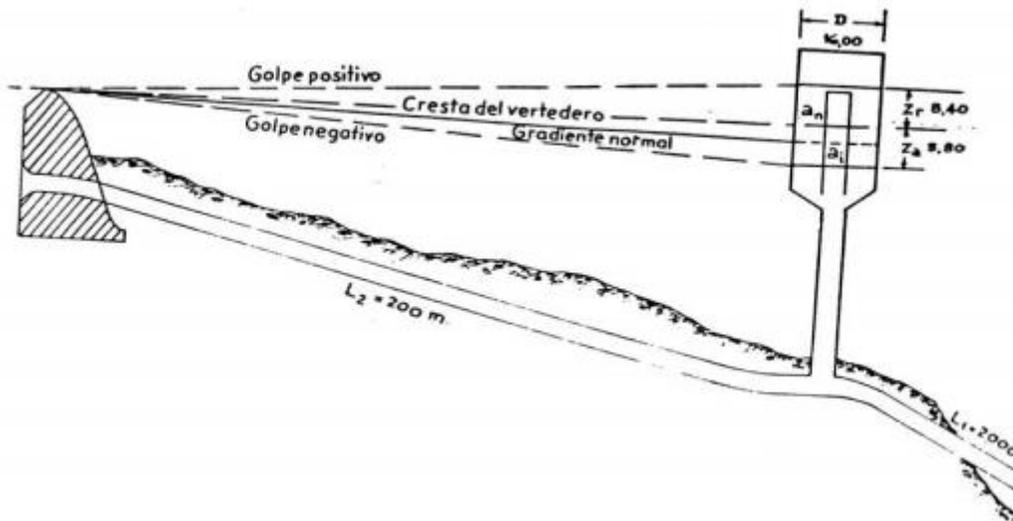


Figura 2.8 “Chimenea de equilibrio, [2]”

### Casa de maquinas

En esta se produce la energía eléctrica, consta de varias partes, como son las turbinas, los generadores, sala de control, etc.

## Turbinas

Son los 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. Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grupos, turbinas de acción y turbinas de reacción. Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad de flujo de agua para hacerlas girar, o bien utilizan únicamente la altura hasta el eje de la turbina. Las turbinas de reacción aprovechan la altura total disponible hasta el nivel de desagüe.

### Turbina tipo Kaplan

Debe su nombre a su inventor austriaco Viktor Kaplan, es ideal para centrales con un caudal muy grande y un salto de pequeña altura, es uno de los tipos más eficientes de turbinas. Los grandes alabes de la turbina son impulsados por agua a alta presión liberada desde una compuerta. En la figura 2.9 se puede observar una imagen de una turbina tipo Kaplan.

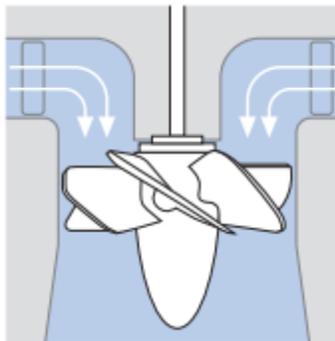


Figura 2.9 “Turbina Kaplan, [4]”

### Turbina tipo Francis

Fue desarrollada por James B. Francis, se puede diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, estas son capaces de operar en saltos muy pequeños desde hasta 2 metros hasta saltos grandes de cientos de metros. Su gran eficiencia ha hecho que esta turbina sea la más utilizada en el mundo, principalmente en centrales hidroeléctricas. En la figura 2.10 se observa una imagen de una turbina tipo Francis.

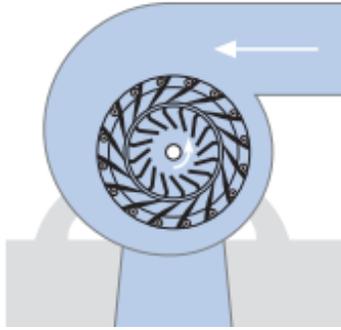


Figura 2.10 “Turbina Francis, [4]”

### Turbina tipo Pelton

Fue desarrollada por el estadounidense Lester Allan Pelton, está diseñada para grandes saltos hidráulicos con caudales pequeños. En las centrales hidroeléctricas se cuenta con una larga tubería llamada galería de presión, esta transporta el caudal desde grandes alturas, hasta los 1500 metros, hasta la turbina por medio de una o varias válvulas inyectoras, que sirven para aumentar la velocidad del flujo que incide sobre las cucharas de la turbina. En la figura 2.12 se muestra una turbina tipo Pelton.

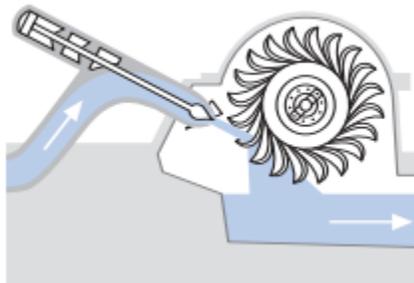


Figura 2.12 “Turbina Pelton, [4]”

### Generador

Es la máquina que está acoplada al eje de la turbina que gira por la acción del agua y transforma la energía mecánica en eléctrica, se le llama también alternador porque produce corriente alterna. Está formado por dos elementos el estator y el rotor. El rotor debe crear un campo magnético, alimentado por una corriente directa y está formado por un conjunto de bobinas. El estator actúa como receptor de corrientes inducidas, a él están unidas las barras de salida de la corriente.

## Transformadores

La transformación puede ser baja/media o media/alta tensión, esto depende de la tensión de trabajo del generador.

A continuación en la tabla 2.1 se muestran las características principales de las turbinas hidráulicas, siendo que con anterioridad en este apartado se mencionaron únicamente las tres turbinas más utilizadas.

*Tabla 2.1. “Características principales de las turbinas hidráulicas, [9]”*

Turбина		Inventor y año de patente	$N_s$ (rpm, HP, m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	P (KW)	$H_{m\acute{a}x}$ (%)
ACCIÓN	PELTON	Lester Pelton EEUU 1880	1 Ch: 30 2 Ch: 30-50 4 Ch: 30-50 6 Ch: 50-70	0.05-50	30-1800	2-3000000	91
	TURGO	Eric Creudson (Gran Bretaña) 1920	60-260	0.025-10	15-300	5--8000	85
	MICHELL - BANKY	A.G. Michell (Australia) 1903 D. Banky (Hung.) 1917-1919	40-160	0.025-5	1-50 (200)	1-750	82
REACCIÓN	FRANCIS	James Francis (Gran Bretaña) 1848	L: 60-150 N: 150-250 R: 250-400	1-500	2-750	2-750000	92
	DERIAZ	P. Deriaz (Suiza) 1956	60-400	500	30-130	100000	92
	KAPLAN y de Hélice	V. Kaplan (Austria) 1912	300-800	1000	may-80	2-200000	93

### 2.5.5 Potencia media

En hidráulica la potencia media se puede expresar en función de las características hidroenergéticas del aprovechamiento, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Pot_{media} = \frac{\eta \times g \times \rho \times Q_{eq} \times H_B}{1000} \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

Donde:

$Pot_{media}$	potencia media, en KW
$g$	aceleración de la gravedad, en $m/s^2$
$\rho$	densidad del agua, $kg/m^3$
$Q_{eq}$	gasto equipado, en $m^3/s$
$H_B$	carga bruta, en m
$\eta$	eficiencia del equipo turbogenerador

#### Eficiencia del equipo turbogenerador

La eficiencia del equipo turbogenerador es el producto de las eficiencias hidráulica, mecánica y eléctrica. Cabe mencionar que en la operación de una central hidroeléctrica ocurren pérdidas a través de sus diferentes transformaciones, las cuales se tienen que tomar en cuenta para determinar la eficiencia de cada una, se puede obtener la eficiencia global con la siguiente expresión:

$$\eta_G = \eta_h \times \eta_{mec} \times \eta_{elec} \quad [\text{Ec. 2.5}]$$

Donde:

$\eta_h$	eficiencia hidráulica
$\eta_{mec}$	eficiencia mecánica
$\eta_{elec}$	eficiencia eléctrica

En la operación de una central hidroeléctrica ocurren varias transformaciones, en cada una de estas ocurren pérdidas de energía. Para las pérdidas de energía hidráulica, estas se producen por el paso del agua en las diferentes estructuras hidráulicas, se propone una eficiencia del 0.92. Al transformar la energía

hidráulica a mecánica y posteriormente a energía eléctrica, se producen pérdidas principalmente por fricción y calor causado por los componentes del equipo turbogenerador; se propone una eficiencia mecánica del 0.945 y una eficiencia eléctrica de 0.985.

*Las eficiencias propuestas para este estudio son las utilizadas por la CFE en los estudios de identificación, las cuales han sido probadas con resultados satisfactorios en este tipo de estudio [7].*

$$\eta_h = 0.92$$

$$\eta_{mec} = 0.945$$

$$\eta_{elec} = 0.985$$

Por lo tanto:

$$\eta_G = 0.92 \times 0.945 \times 0.985 = 0.856$$

### 2.5.6 Unidades generadoras

Estas tienen el objetivo de mejorar la seguridad energética y al mismo tiempo tener una mayor maniobrabilidad en las centrales hidroeléctricas. Para esto el gasto de equipamiento se divide entre las unidades generadoras que se contemplen en el proyecto, por lo que para cada unidad generadora tendrá una potencia instalada, lo anterior se puede obtener con la siguiente expresión.

$$Q_U = \frac{Q_{eq}}{n} \quad [\text{Ec. 2.6}]$$

Donde:

$Q_U$  gasto de equipamiento de la unidad generadora, en m<sup>3</sup>/s

$n$  número de unidades generadoras que se consideren en el proyecto

### 2.5.7 Generación media mensual y media anual

La generación media mensual se obtiene de la potencia media mensual y el tiempo de operación. Se puede obtener con la siguiente expresión:

$$Gen_{men} = Pot_{media} \times t$$

Donde:

$t$  tiempo en horas en el que opere la central hidroeléctrica

Generación media anual

Es la suma de la generación media mensual, se expresa de la siguiente forma:

$$Gen_{anual} = \sum_{i=1}^{12} Gen_{men}$$

# Capítulo II

## “Descripción del modelo de vaso”

### 3.1 Descripción del modelo de presa del laboratorio

El modelo de presa consta de un tanque de aproximación al vertedor, con muros estabilizadores que tienen como objetivo disipar la energía del agua y un tubo alimentador que está controlado por una válvula. Enseguida se encuentra un vertedor triangular de aforo con vértice de  $60^\circ$ ; A un costado del tanque de aproximación se halla un limnómetro de gancho utilizado para medir el nivel de cresta y el nivel de superficie del agua en el vertedor triangular. Como se observa en el figura 3.1.

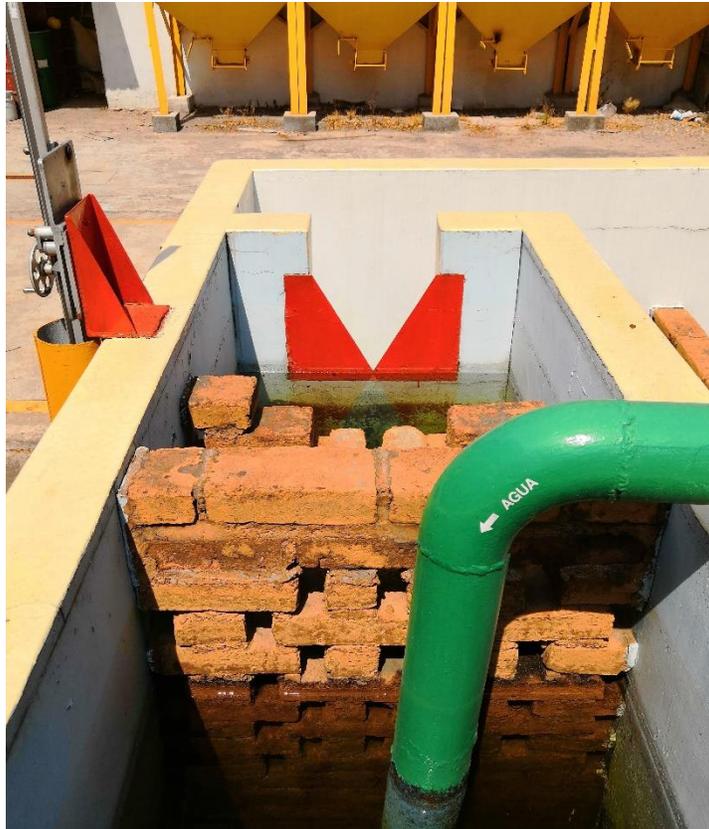


Figura 3.1 “Tanque de aproximación al vertedor, tomada por el autor”

Para que el modelo de presa se acerque más a la realidad, al caer el agua por el vertedor triangular, llega a otro tanque que tranquilizará el agua, evitando así movimientos que inquieten el espejo de agua en él vaso.

A un costado del tanque amortiguador se encuentra el vaso de almacenamiento del modelo de presa, el cual tiene una obra de toma que se localiza a 0.31 m del nivel de piso. Cuenta con una obra de excedencias, siendo éste un vertedor con canal lateral y cubeta de lanzamiento, la cresta del vertedor se encuentra a 0.57 m desde el nivel de piso, con un ancho de plantilla de 0.14 m y una pendiente inicial de

0.0334 para después aumentar a 0.1698. En la figura 3.2 se puede observar una vista aérea de la obra de excedencias.

La corona de la cortina se encuentra a una altura de 0.63 m al igual que el muro de enlace entre esta y la obra de excedencias. Por último la obra de toma cuenta con dos tuberías de salida que se hallan al final del modelo, la figura 3.3 muestra una vista frontal del modelo de presa.



*Figura 3.2 “Obra de excedencias, tomada por el autor”*



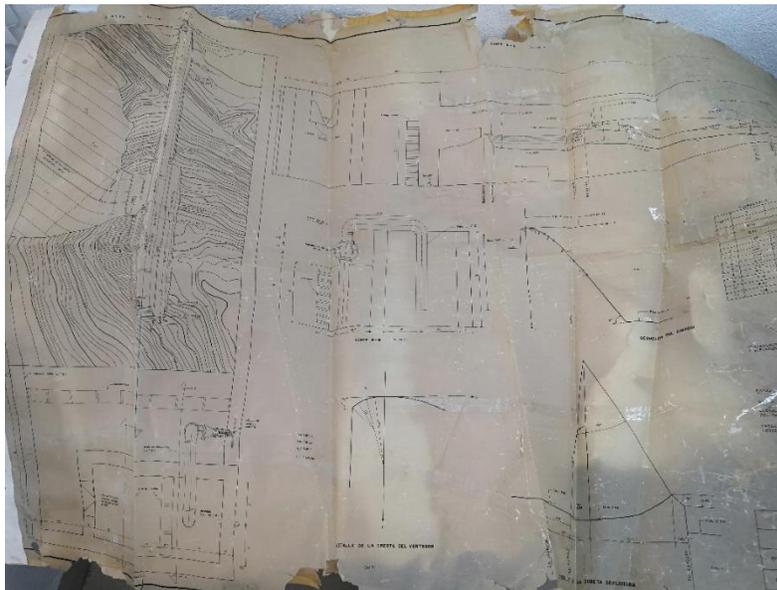
*Figura 3.3 “Vista frontal del modelo de presa, tomada por el autor”*

### 3.2 Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes

Para poder realizar esta curva, se tuvo que digitalizar el plano de la presa ya que el original se encuentra en malas condiciones. A continuación, en la figura 3.4 y 3.5, se muestra el estado físico de los planos del modelo de presa, así como su digitalización correspondiente en las figuras 3.6, 3.7 y 3.8.



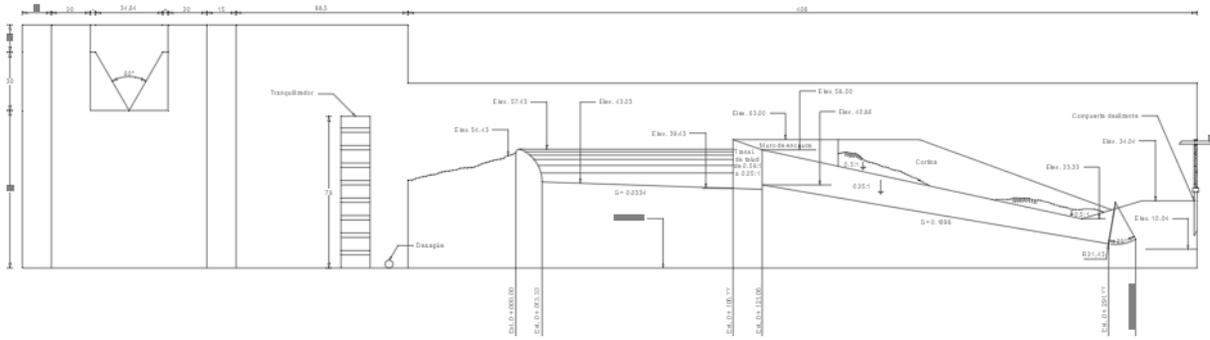
*Figura 3.4 “Planos del modelo de presa, tomada por el autor”*



*Figura 3.5 “Planos del modelo de presa, tomada por el autor”*



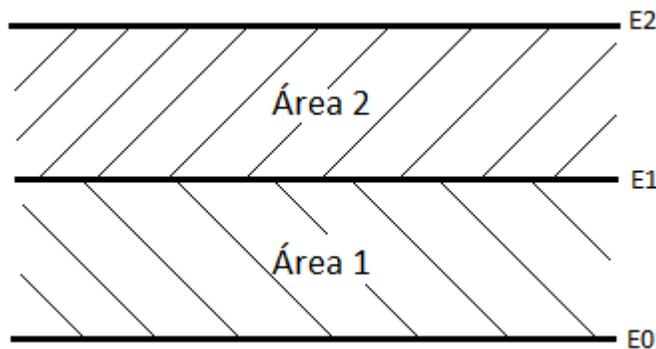
## CAPÍTULO II “DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VASO”



*Figura 3.8 “Digitalización de los planos del modelo de presa”*

En los planos se encuentran las curvas de nivel, con las que se obtuvieron los niveles en el vaso de almacenamiento, estas curvas están referidas desde el nivel de piso; por lo que al conocer las elevaciones, se lograron obtener las áreas de cada una de estas, y con ayuda de AutoCad se dibujaron las áreas para cada elevación del vaso.

Para conocer los volúmenes en cada nivel, se calculó el volumen entre curvas de nivel, se realizó un promedio de áreas entre cada par de curvas consecutivo y éste se multiplica por la diferencia de alturas entre curvas, obteniéndose como resultado el volumen entre cada par de curvas. Por último, se realizó una suma acumulativa, donde se fue adicionando el volumen anterior con el volumen entre cada par de curvas. Lo anterior se puede visualizar en la figura 3.9 y se expresa como:



*Figura 3.9 “Obtención del volumen, elaborada por el autor”*

$$Prom = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad [Ec. 3.1]$$

$$Int. Volumen = Prom \times (E_2 - E_1) \quad [Ec. 3.2]$$

CAPÍTULO II “DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VASO”

$$Volumen_{E_n} = Volumen_{E_{n-1}} + Int.Volumen_{E_n} \quad [Ec. 3.3]$$

Los resultados de estas operaciones se muestran en la tabla 3.1 y en la figura 3.10.

Tabla 3.1 “Curva E – A – V”

Datos obtenidos por medio de planos			
Elevaciones (m)	Áreas (m <sup>2</sup> )	Int. Volumen (m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
0.1427	0.00883	0.00000	0.00000
0.1927	0.03536	0.00110	0.00110
0.2427	0.10258	0.00345	0.00455
0.2927	0.44214	0.01362	0.01817
0.3427	0.79227	0.03086	0.04903
0.3927	1.12915	0.04804	0.09707
0.4427	1.46911	0.06496	0.16202
0.4927	1.84299	0.08280	0.24483
0.5427	2.21938	0.10156	0.34639
0.5678	2.32200	0.05699	0.40338
0.5771	2.35989	0.02177	0.42515
0.5867	2.39932	0.02284	0.44799

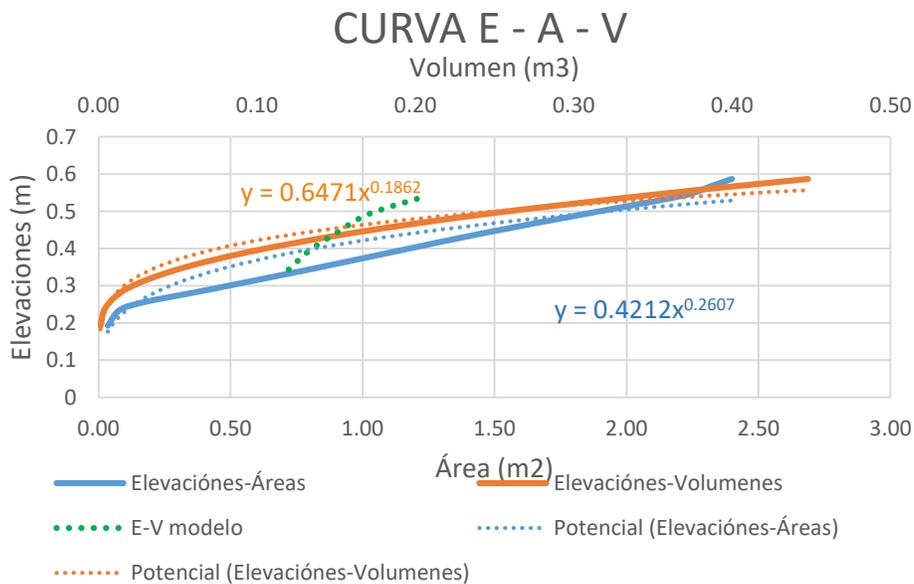


Figura 3.10 “Curva Elevaciones – Áreas – Volúmenes”

Igualmente se obtuvo la curva E – V de manera experimental, para así poder comparar las curvas con diferentes metodologías. Se colocó un limnómetro sobre el muro perforado del vaso para poder efectuar así las mediciones, como se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11 “Limnómetro de punta”

Para obtener los diferentes volúmenes se realizaron diversos pasos. Como mantener un gasto constante en el modelo, se estableció una elevación inicial y se propuso un intervalo de 5 centímetros entre cada elevación, de modo que se contaría el tiempo que tardara en llegar de una elevación a otra con ayuda de un cronómetro. Teniendo ya el tiempo de una elevación a otra, se multiplica por el gasto para obtener los diferentes volúmenes que necesitamos para realizar la curva E – V. En la figura 3.10 se muestra la curva obtenida experimentalmente, en comparación a la de los planos.

### 3.3 Gasto de la obra de toma

Para conocer el gasto que sale por la obra de toma, se considerara a la misma como un orificio, por lo tanto se utilizara la siguiente expresión:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde:

$C_d$  coeficiente de gasto

$A$  área del orificio (en este caso la obra de toma), en  $m^2$

$H$  es la diferencia, del nivel de la obra de toma y el nivel del NAMO en el modelo

$g$  aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

Con ayuda de la figura 3.12, obtenida en el libro de Hidráulica General de Gilberto Sotelo Dávila, se obtendrá el valor del coeficiente del gasto.

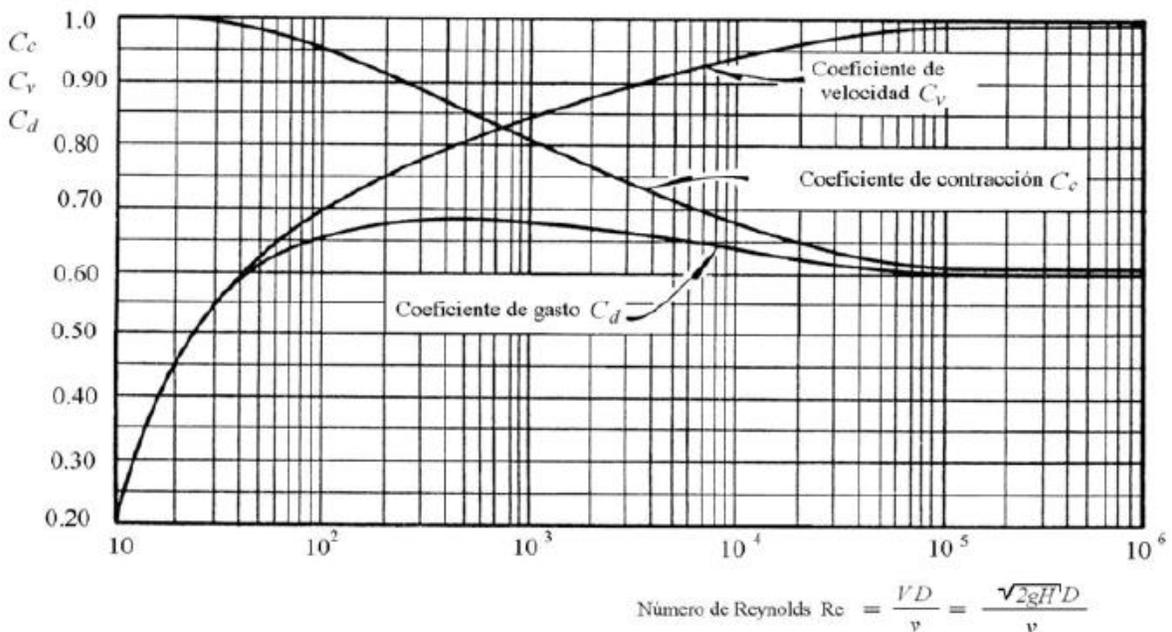


Figura 3.12 “Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto, con el número de Reynolds en un orificio circular, [5]”

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\sqrt{2gHD}}{\nu} \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Donde:

$\nu$  es la viscosidad cinética del agua,  $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$D$  es el diámetro de la obra de toma,  $0.0254 \text{ m}$

En la figura 3.13 se muestra con más claridad el valor de la carga sobre la toma de agua,  $H$  en m, siendo una constante el nivel de la obra de toma.

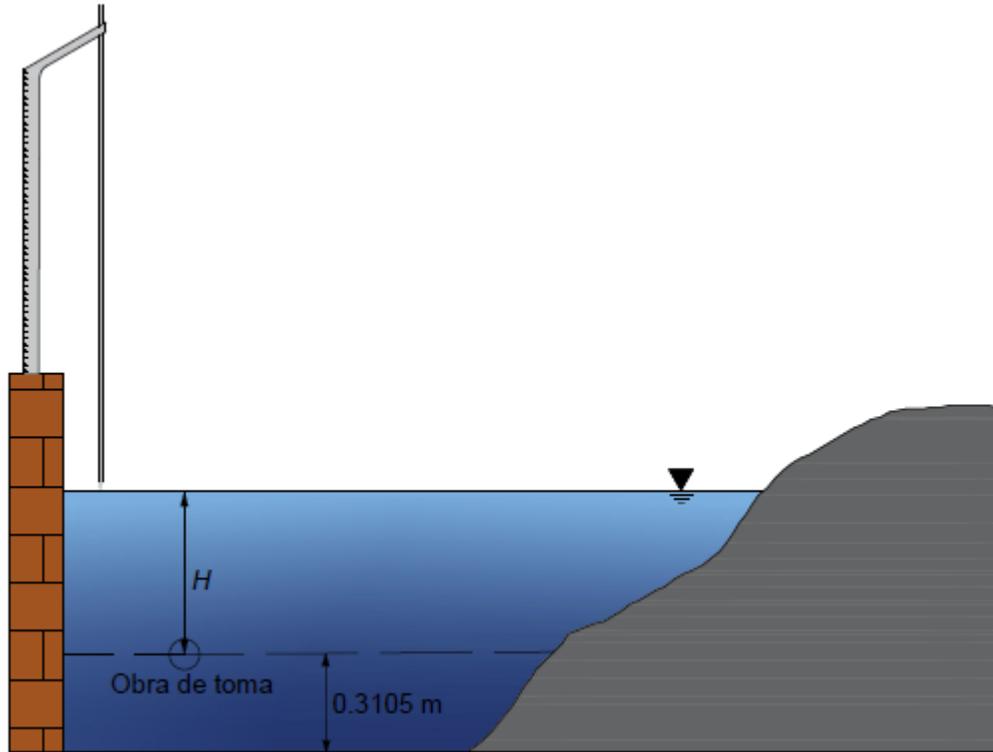


Figura 3.13 “Esquema de la carga sobre la obra de toma, elaborada por el autor”

Por lo tanto:

$$H_{BRUTA} = 0.57 \text{ m} - 0.3105 \text{ m} = 0.2595 \text{ m} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

### 3.4 Similitud hidráulica

Con fines de acercar el modelo de presa a un escenario real, se utilizó una escala de longitudes que, a través de las fórmulas de similitud, nos proporcionarían datos de una obra cercana a la realidad.

La condición de similitud que se ajusta mejor al modelo físico del laboratorio, es la del criterio de Froude, ya que están presentes las fuerzas de inercia y gravedad. Siendo que la condición de similitud de Reynolds, Cauchy, Weber y Euler; son más preponderantes las fuerzas de inercia y de viscosidad, las de inercia y elasticidad, las de inercia y tensión superficial, las de inercia y presión, no se tomaron en cuenta para realizar la similitud hidráulica del modelo de presa.

Datos geométricos del modelo:

Diámetro de la obra de toma= 0.0254 m

Carga al NAMO= 0.2595 m

Altura de la corona= 0.63 m

Elevación de la obra de toma= 0.3105 m

Escala de longitudes:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Se consideró una escala de líneas de  $L_e = 70$ , basado en la tesis del ingeniero Marco Antonio Peña Ramírez, presentada en Ciudad Universitaria en 1997, llamada “Nuevas prácticas de obras hidráulicas en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería”.

Se obtiene la longitud del prototipo despejando de la Ec. 3.7:

$$L_p = L_m \times L_e$$

### 3.4.1 Condición de similitud de Froude

Para la condición de similitud de Froude de la longitud:

$$E_L = E_L \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Para la condición de similitud de Froude del área:

$$E_A = E_L \times E_L$$

$$E_A = E_L^2 \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

Para la condición de similitud de Froude del volumen:

$$E_V = E_L \times E_L \times E_L$$

$$E_V = E_L^3 \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

Para la condición de similitud de Froude del tiempo:

$$1 = Fr = \frac{E_v}{\sqrt{E_g \times E_L}}$$

$$1 = \frac{\frac{E_L}{E_t}}{\sqrt{E_g \times E_L}}$$

$$E_g \times E_L = \frac{E_L^2}{E_t^2}$$

$$E_t = \left(\frac{E_L}{E_g}\right)^{1/2} \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

Para la condición de similitud de Froude de la velocidad:

$$1 = Fr = \frac{E_v}{\sqrt{E_g \times E_L}}$$

$$E_v = \sqrt{E_g \times E_L}$$

$$E_v = (E_g \times E_L)^{1/2} \quad [\text{Ec. 3.12}]$$

Para la condición de similitud de Froude del gasto:

$$1 = Fr = \frac{E_v}{\sqrt{E_g \times E_L}}$$

$$1 = \frac{\frac{E_Q}{E_L^2}}{\sqrt{E_g \times E_L}}$$

$$E_g \times E_L = \frac{E_Q^2}{E_L^4}$$

$$E_Q^2 = E_g \times E_L^5$$

$$E_Q = (E_g \times E_L^5)^{1/2} \quad [\text{Ec. 3.13}]$$

Se considera el mismo campo gravitatorio tanto para el modelo como para el prototipo ( $g_m = g_p$ ), por lo tanto  $E_g = 1$ .

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos para cada condición de la similitud de Froude.

*Tabla 3.2 “Condición de similitud de Froude”*

<b>Características (Escala de)</b>	<b>Siglas</b>	<b>Condición de similitud de Froude</b>
Longitud	$E_L$	$E_L$
Área	$E_A$	$E_L^2$
Volumen	$E_V$	$E_L^3$
Tiempo	$E_t$	$(E_L / E_g)^{1/2}$
Velocidad	$E_v$	$(E_L \times E_g)^{1/2}$
Gasto	$E_Q$	$(E_L^5 \times E_g)^{1/2}$

# Capítulo III

## “Verificación de la propuesta de práctica”

En este capítulo, se realizó experimentación con la práctica propuesta, con el fin de verificar el desarrollo del manual, mediciones y resultados. Para realizar la verificación de la práctica se conformaron equipos piloto de 4 personas y los mejores resultados se exponen en los equipos; equipo piloto A, equipo piloto B y equipo piloto C. En el anexo del presente trabajo se encuentra el manual de la propuesta de práctica.

Como sucedería en una práctica normal, se dieron indicaciones a los miembros de los equipos, uno de ellos estuvo encargado del cronometro, la indicación para él fue que informaría a sus compañeros cada que pasaran 20 segundos.

Otro de los integrantes del equipo estuvo encargado de abrir y cerrar la válvula, cada que él compañero que tenía el cronómetro reportaría que habían pasado 20 segundos, se le indicó que tendría que seguir el patrón de la figura 4.1 que a continuación se muestra, este patrón fue obtenido de la investigación de las épocas de lluvia y estiaje en la ciudad de México.

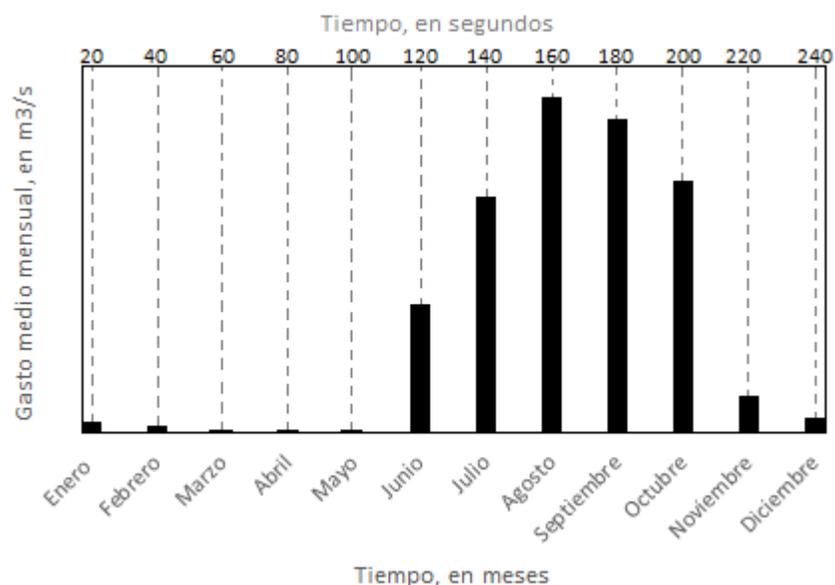


Figura 4.1. “Épocas de lluvia y estiaje, elaborada por el autor”

Un integrante más estuvo encargado de marcar en la hoja milimétrica, una línea y un número consecutivo para ubicar el mes al que está referida esa marca; así como el nivel que se presentara en el vertedor triangular, cada intervalo de 20 segundos.

Finalmente, el último integrante se encargó de abrir la válvula de la obra de toma en el instante en que comenzaron las mediciones; por lo tanto, la válvula de alimentación del vaso y la de la obra de toma se abrieron simultáneamente.

A continuación se muestran una serie de fotografías, donde se observan los equipos piloto A, B y C; durante las mediciones en el modelo de presa.



*Figura 4.2. “Equipo piloto A, tomada por el autor”*



*Figura 4.3. “Equipo piloto A, tomada por el autor”*



*Figura 4.4. “Equipo piloto B, tomada por el autor”*



*Figura 4.5. “Equipo piloto B, tomada por el autor”*



*Figura 4.5. “Equipo piloto C, tomada por el autor”*



*Figura 4.6. “Equipo piloto C, tomada por el autor”*

#### 4.1 Desarrollo de la práctica para los equipos piloto A, B y C

1. Revisar que las válvulas de alivio se encuentren cerradas y no se halle ningún objeto dentro del vaso de almacenamiento, ya que este se encuentra a la intemperie.
2. Establecer el nivel del NAMO dentro del vaso de almacenamiento, que corresponde a 0.57 m desde el nivel de piso.
3. Establecer el nivel de cresta en el vertedor triangular.
4. Establecer doce gastos, con la válvula de alimentación. Iniciar con válvula cerrada para  $t = 0$ . Cambiar el caudal cada 20 segundos hasta completar doce mediciones y registrarlas en la tabla 4.1. Ajustar la abertura de la válvula, tal que siga el patrón de la figura 4.1.
5. Colocar una hoja milimétrica a lado del piezómetro del tanque de alimentación y marcar como cero el nivel de cresta del vertedor triangular. De acuerdo a la figura 4.8.

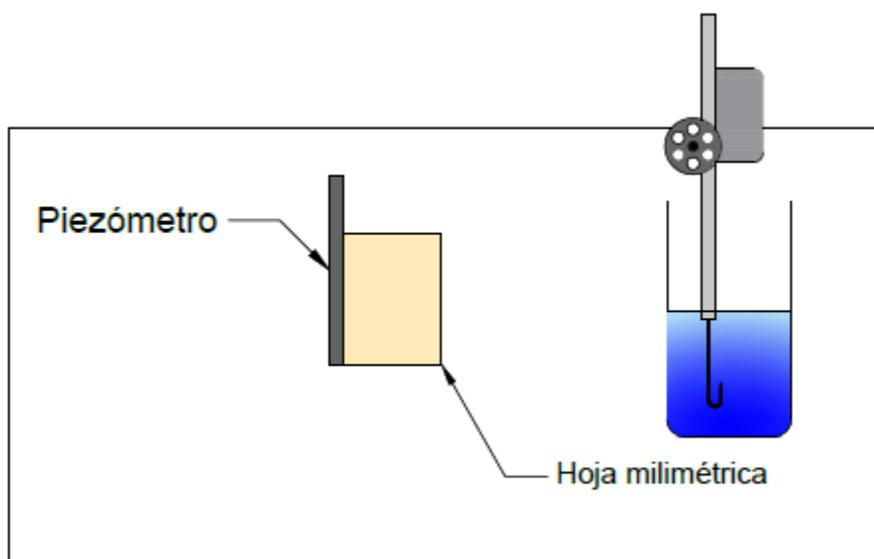


Figura 4.8. “Ubicación de hoja milimétrica, cerca al piezómetro, elaborada por el autor”

6. En el instante  $t = 0$ , comenzar abrir lentamente la válvula de la obra de toma.

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

7. Con el nivel de cresta, en el vertedor triangular para  $t = 0$ , registrar los niveles  $N_v$  en el vertedor, registrar estos niveles en la hoja milimétrica.

8. Llenar la tabla 4.1 con los registros obtenidos.

Tabla 4.1. “Mediciones en el modelo de presa”

<b>t (seg)</b>	<b>Mes</b>	<b>N<sub>v</sub> (m)</b>
20		
40		
60		
80		
100		
120		
140		
160		
180		
200		
220		
240		

Resultados de los equipos pilotos:

Tabla 4.2. “Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto A”

<b>EQUIPO PILOTO A</b>		
<b>t (seg)</b>	<b>MES</b>	<b>h</b>
20	Enero	0.038
40	Febrero	0.068
60	Marzo	0.071
80	Abril	0.0735
100	Mayo	0.0735
120	Junio	0.172
140	Julio	0.198
160	Agosto	0.202
180	Septiembre	0.2005
200	Octubre	0.2
220	Noviembre	0.1895
240	Diciembre	0.179

Tabla 4.3. “Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto B”

<b>EQUIPO PILOTO B</b>		
<b>t (seg)</b>	<b>MES</b>	<b>h</b>
20	Enero	0.039
40	Febrero	0.045
60	Marzo	0.041
80	Abril	0.041
100	Mayo	0.041
120	Junio	0.083
140	Julio	0.161
160	Agosto	0.189
180	Septiembre	0.187
200	Octubre	0.176
220	Noviembre	0.119
240	Diciembre	0.079

Tabla 4.4. “Mediciones en el modelo de presa, equipo piloto C”

<b>EQUIPO PILOTO C</b>		
<b>t (seg)</b>	<b>MES</b>	<b>h</b>
20	Enero	0.039
40	Febrero	0.052
60	Marzo	0.047
80	Abril	0.0425
100	Mayo	0.04
120	Junio	0.109
140	Julio	0.1685
160	Agosto	0.191
180	Septiembre	0.1865
200	Octubre	0.167
220	Noviembre	0.1165
240	Diciembre	0.078

## 4.2 Análisis del funcionamiento hidráulico del modelo de presa para los equipos piloto A, B y C

1. Calcular con el vertedor triangular los gastos de entrada  $Q_{Ei}$  al modelo de presa, en  $m^3/s$ . Llenar la tabla 4.5 con los datos obtenidos.

$$Q_{Ei} = C h^{\frac{5}{2}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde

$h$  carga sobre el vertedor, en m,  $h = N_{Vi}$

$C$  coeficiente de descarga del vertedor, en  $m^{1/2}/s$ ;  $C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K$

$g$  aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\theta$  ángulo en el vértice del vertedor triangular,  $60^\circ$

$\mu$  coeficiente de gasto, que depende de  $h$  y  $\theta$ , según la figura 7.9, referencia 1

$K$  coeficiente que depende de  $B/h$  y  $\theta$ , según la figura 7.10, referencia 1

$B$  ancho del canal de llegada,  $1.16 \text{ m}$

Tabla 4.5. “Registro de gastos”

Mes	$Q_{Ei} (m^3/s)$
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

- Ejemplo para la obtención del gasto:

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K$$

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

De acuerdo a la referencia 1,  $\mu = 0.64$

Al ser  $\theta = 60^\circ$  el valor de  $K = 1$  según la referencia 1

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{60}{2}\right) \times 0.64 \times 1 = \mathbf{0.8729}$$

$$Q_{E1} = 0.8729 \times 0.038^{\frac{5}{2}} = \mathbf{0.0002457 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Resultados de los equipos pilotos:

*Tabla 4.6. “Registro de gastos, equipo piloto A”*

EQUIPO PILOTO A	
MES	$Q_{Ei}$ (m <sup>3</sup> /s)
Enero	0.00024571
Febrero	0.001019617
Marzo	0.001135823
Abril	0.001238464
Mayo	0.001238464
Junio	0.010039999
Julio	0.014274981
Agosto	0.0150069
Septiembre	0.014729856
Octubre	0.014638195
Noviembre	0.012791916
Diciembre	0.011092901

*Tabla 4.7. “Registro de gastos, equipo piloto B”*

EQUIPO PILOTO B	
MES	$Q_{ei}$
Enero	0.0002622
Febrero	0.00037497
Marzo	0.00029711
Abril	0.00029711
Mayo	0.00029711

EQUIPO PILOTO B	
MES	Q <sub>ei</sub>
Junio	0.00162408
Julio	0.00851093
Agosto	0.0127077
Septiembre	0.01237418
Octubre	0.01063394
Noviembre	0.00399742
Diciembre	0.00143542

Tabla 4.8. “Registro de gastos, equipo piloto C”

EQUIPO PILOTO C	
MES	Q <sub>Ei</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Enero	0.0002622
Febrero	0.00053824
Marzo	0.00041803
Abril	0.00032504
Mayo	0.00027933
Junio	0.00320981
Julio	0.00953701
Agosto	0.01304656
Septiembre	0.01229163
Octubre	0.00932618
Noviembre	0.00379077
Diciembre	0.00139043

2. Expresar los caudales del punto anterior en volumen, en m<sup>3</sup>. Llenar la tabla 4.9 con los datos obtenidos.

$$V_{Qi} = Q_{Ei} (\Delta t) \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde

$\Delta t = 20$  segundos

Tabla 4.9. “Registro de volúmenes”

Mes	V <sub>Qi</sub> (m <sup>3</sup> )
Enero	
Febrero	

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

Mes	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

- Ejemplo para la obtención del volumen de entrada:

$$V_{Q1} = 0.0002457 (20) = \mathbf{0.004914 m^3}$$

Resultados de los equipos piloto:

*Tabla 4.10. “Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto A”*

EQUIPO PILOTO A	
MES	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Enero	0.00491421
Febrero	0.02039235
Marzo	0.02271647
Abril	0.02476928
Mayo	0.02476928
Junio	0.20079998
Julio	0.28549961
Agosto	0.30013799
Septiembre	0.29459711
Octubre	0.29276391
Noviembre	0.25583831
Diciembre	0.22185802

*Tabla 4.11. “Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto B”*

EQUIPO PILOTO B	
MES	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Enero	0.00524392
Febrero	0.00749939
Marzo	0.00594229

EQUIPO PILOTO B	
MES	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Abril	0.00594229
Mayo	0.00594229
Junio	0.03248163
Julio	0.17021869
Agosto	0.25415406
Septiembre	0.24748368
Octubre	0.21267881
Noviembre	0.07994843
Diciembre	0.02870849

Tabla 4.12. “Registro de volúmenes de entrada, equipo piloto C”

EQUIPO PILOTO C	
MES	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Enero	0.00524392
Febrero	0.01076472
Marzo	0.00836063
Abril	0.0065008
Mayo	0.00558656
Junio	0.06419612
Julio	0.19074023
Agosto	0.26093117
Septiembre	0.24583269
Octubre	0.18652357
Noviembre	0.07581539
Diciembre	0.0278086

3. Calcular los volúmenes  $V_{NAMINO}$  y  $V_{NAMO}$ , en m<sup>3</sup>, con las curvas  $E_v - A - V$  (ecuaciones 3 y 4) y con las elevaciones  $E_{NAMO} = 0.57 m$ ,  $E_{NAMINO} = 0.39 m$ .

$$V = \left( \frac{E}{0.6471} \right)^{\frac{1}{0.1862}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$A = \left( \frac{E}{0.4212} \right)^{\frac{1}{0.2607}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Para los tres equipos piloto los resultados de los volúmenes son los mismos:

$$V_{NAMO} = \left( \frac{0.57}{0.6471} \right)^{\frac{1}{0.1862}} = 0.5059 \text{ m}^3$$

$$V_{NAMINO} = \left( \frac{0.39}{0.6471} \right)^{\frac{1}{0.1862}} = 0.0659 \text{ m}^3$$

**4. Calcular el volumen de demanda  $V_D$ , en  $\text{m}^3$ .**

$$Q_D = C_d A_{OT} \sqrt{2gH_{NAMO}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde

$H_{NAMO}$  es la carga sobre la obra de toma desde el nivel del NAMO

$$H_{NAMO} = E_{NAMO} - E_{OT} \quad [\text{Ec. 6}]$$

$g$  aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

$E_{OT}$  eje de la obra de toma desde el nivel de piso,  $E_{OT} = 0.31 \text{ m}$

$D_{OT}$  diámetro de la obra de toma,  $D_{OT} = 0.0254 \text{ m}$

$C_d$  coeficiente de descarga,  $C_d = 0.60$

$$V_D = Q_D(\Delta t) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Para los tres equipos piloto el resultado del volumen de demanda es el mismo:

$$A_{OT} = \frac{\pi \times 0.0254^2}{4} = 0.0005067 \text{ m}^2$$

$$H_{NAMO} = 0.57 - 0.31 = 0.26 \text{ m}$$

$$Q_D = 0.60 \times 0.0005067 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.26} = 0.0006866 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_D = 0.0006866 (20) = 0.01373 \text{ m}^3$$

**5. Realizar el funcionamiento de vaso de acuerdo con el siguiente procedimiento:**

- a) Para el instante  $i = 1$ ,  $E_{V1} = E_{NAMO}$
- b) Con apoyo de las curvas  $E_v - A - V$  y las ecuaciones 3 y 4, obtener el área y el volumen  $V_i$  dentro del vaso para el mes  $i$ .

- c) Calcular el volumen de salida  $V_{si}$ , según la siguiente expresión:

$$Si \quad V_{Qi} + V_i > V_{NAMINO} \quad ; \quad V_{si} = V_D \quad [Ec. 8]$$

$$Si \quad V_{Qi} + V_i < V_{NAMINO} \quad ; \quad V_{si} = 0 \quad [Ec. 9]$$

- d) Calcular el volumen del mes  $i + 1$  ( $V_{i+1}$ ) de acuerdo a la siguiente condición:

$$Si \quad V_{Qi} + V_i - V_{si} > V_{NAMO} \quad ; \quad V_{i+1} = V_{NAMO} \quad [Ec. 10]$$

$$Si \quad V_{Qi} + V_i - V_{si} < V_{NAMO} \quad ; \quad V_{i+1} = V_{Qi} + V_i - V_{si} \quad [Ec. 11]$$

- e) Calcular la elevación  $E_{i+1}$  con el volumen  $V_{i+1}$ , utilizando la ecuación 4.

- f) Obtener el gasto de la obra de toma, en  $m^3/s$

$$Q_{OTi} = \frac{V_{si}}{\Delta t} \quad [Ec. 12]$$

- g) Calcular la carga sobre la obra de toma, en m, como:

$$H_{OTi} = E_{Vi} - E_{OT} \quad [Ec. 13]$$

- h) Conocido  $E_{Vi+1}$ , pasar al siguiente instante de cálculo y repita este procedimiento desde el inciso b y hasta  $i = 12$

- Ejemplo para la realización del funcionamiento de vaso:

a) 
$$E_{V1} = 0.57 \text{ m}$$

b) 
$$V_1 = \left( \frac{0.57}{0.6471} \right)^{\frac{1}{0.1862}} = 0.5059 \text{ m}^3$$

$$A_1 = \left( \frac{0.57}{0.4212} \right)^{\frac{1}{0.2607}} = 3.1914 \text{ m}^2$$

c) 
$$0.004914 + 0.5059 > 0.0659$$

$$\therefore V_{s1} = 0.01373 \text{ m}^3$$

d) 
$$0.004914 + 0.5059 - 0.01373 < 0.5059$$

$$\therefore V_{i+1} = 0.4971 \text{ m}^3$$

- e) Al despejar la elevación de la ecuación 3, se obtiene:

$$E_{Vi+1} = 0.6471 x^{0.1862}$$

$$E_{Vi+1} = 0.5681 \text{ m}$$

f) 
$$Q_{OT1} = \frac{0.01373}{20} = 0.0006866 \text{ m}^3/\text{s}$$

g) 
$$H_{OT1} = 0.57 - 0.31 = 0.26 \text{ m}$$

- h) Por lo tanto para el instante  $i = 2$

$$E_{V2} = 0.5681$$

6. Presentar en una tabla los datos obtenidos anteriormente.

Resultados de los equipos pilotos:

Tabla 4.13. “Funcionamiento de vaso, equipo piloto A”

Mes	$i$	t, en el modelo (s)	Volumen de entrada, $V_{Qi} (m^3)$	Elevación, $E_{Vi} (m)$	Área ( $m^2$ )	Volumen, $V_i (m^3)$
Enero	1	20	0.004914	0.570000	3.191360	0.505941
Febrero	2	40	0.020392	0.568137	3.151529	0.497122
Marzo	3	60	0.022716	0.569546	3.181623	0.503781
Abril	4	80	0.024769	0.570000	3.191360	0.505941
Mayo	5	100	0.024769	0.570000	3.191360	0.505941
Junio	6	120	0.200800	0.570000	3.191360	0.505941
Julio	7	140	0.285500	0.570000	3.191360	0.505941
Agosto	8	160	0.300138	0.570000	3.191360	0.505941
Septiembre	9	180	0.294597	0.570000	3.191360	0.505941
Octubre	10	200	0.292764	0.570000	3.191360	0.505941
Noviembre	11	220	0.255838	0.570000	3.191360	0.505941
Diciembre	12	240	0.221858	0.570000	3.191360	0.505941

Mes	Volumen de salida, $V_{si} (m^3)$	$V_{i+1} (m^3)$	Elevación $E_{Vi+1} (m)$	Gasto de la obra de toma ( $m^3/s$ )	$H_{OTi} (m)$
Enero	0.013733	0.497122	0.5681	0.0007	0.2600
Febrero	0.013733	0.503781	0.5695	0.0007	0.2581
Marzo	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2595
Abril	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Mayo	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Junio	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Julio	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Agosto	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Septiembre	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Octubre	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Noviembre	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600
Diciembre	0.013733	0.505941	0.5700	0.0007	0.2600

Tabla 4.14. “Funcionamiento de vaso, equipo piloto B”

Mes	$i$	t, en el modelo (s)	Volumen de entrada, $V_{Qi} (m^3)$	Elevación, $E_{Vi} (m)$	Área ( $m^2$ )	Volumen, $V_i (m^3)$
Enero	1	20	0.005244	0.570000	3.191360	0.505941
Febrero	2	40	0.007499	0.568207	3.153021	0.497452
Marzo	3	60	0.005942	0.566874	3.124749	0.491218
Abril	4	80	0.005942	0.565189	3.089271	0.483427
Mayo	5	100	0.005942	0.563482	3.053629	0.475636
Junio	6	120	0.032482	0.561752	3.017820	0.467845
Julio	7	140	0.170219	0.565877	3.103709	0.486593
Agosto	8	160	0.254154	0.570000	3.191360	0.505941
Septiembre	9	180	0.247484	0.570000	3.191360	0.505941
Octubre	10	200	0.212679	0.570000	3.191360	0.505941
Noviembre	11	220	0.079948	0.570000	3.191360	0.505941
Diciembre	12	240	0.028708	0.570000	3.191360	0.505941

Mes	Volumen de salida, $V_{si} (m^3)$	$V_{i+1} (m^3)$	Elevación $E_{Vi+1} (m)$	Gasto de la obra de toma ( $m^3/s$ )	$H_{OTi} (m)$
Enero	0.013733	0.497452	0.568207	0.000687	0.2600
Febrero	0.013733	0.491218	0.566874	0.000687	0.2582
Marzo	0.013733	0.483427	0.565189	0.000687	0.2569
Abril	0.013733	0.475636	0.563482	0.000687	0.2552
Mayo	0.013733	0.467845	0.561752	0.000687	0.2535
Junio	0.013733	0.486593	0.565877	0.000687	0.2518
Julio	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2559
Agosto	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Septiembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Octubre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Noviembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Diciembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600

Tabla 4.15. “Funcionamiento de vaso, equipo piloto C”

Mes	$i$	$t$ , en el modelo (s)	Volumen de entrada, $V_{Qi} (m^3)$	Elevación, $E_{Vi} (m)$	Área ( $m^2$ )	Volumen, $V_i (m^3)$
Enero	1	20	0.005244	0.570000	3.191360	0.505941
Febrero	2	40	0.010765	0.568207	3.153021	0.497452
Marzo	3	60	0.008361	0.567574	3.139571	0.494483
Abril	4	80	0.006501	0.566421	3.115169	0.489111
Mayo	5	100	0.005587	0.564852	3.082199	0.481878
Junio	6	120	0.064196	0.563061	3.044891	0.473732
Julio	7	140	0.190740	0.570000	3.191360	0.505941
Agosto	8	160	0.260931	0.570000	3.191360	0.505941
Septiembre	9	180	0.245833	0.570000	3.191360	0.505941
Octubre	10	200	0.186524	0.570000	3.191360	0.505941
Noviembre	11	220	0.075815	0.570000	3.191360	0.505941
Diciembre	12	240	0.027809	0.570000	3.191360	0.505941

Mes	Volumen de salida, $V_{si} (m^3)$	$V_{i+1} (m^3)$	Elevación $E_{Vi+1} (m)$	Gasto de la obra de toma ( $m^3/s$ )	$H_{OTi} (m)$
Enero	0.013733	0.497452	0.568207	0.000687	0.2600
Febrero	0.013733	0.494483	0.567574	0.000687	0.2582
Marzo	0.013733	0.489111	0.566421	0.000687	0.2576
Abril	0.013733	0.481878	0.564852	0.000687	0.2564
Mayo	0.013733	0.473732	0.563061	0.000687	0.2549
Junio	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2531
Julio	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Agosto	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Septiembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Octubre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Noviembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600
Diciembre	0.013733	0.505941	0.570000	0.000687	0.2600

7. Utilizar la condición de similitud de Froude para calcular los  $H_{OTi}$  y  $Q_{OTi}$ , correspondientes a un prototipo con  $L_e = \text{_____}$ , donde  $L_e$  será propuesta por el profesor, considerando un intervalo entre (20 – 70).

$$L_p = L_e(L_m) \quad [\text{Ec. 14}]$$

donde

$L_m$  es la longitud del modelo  
 $L_p$  es la longitud del prototipo  
 $L_e$  escala de líneas

$$Q_p = Q_e(Q_m) \quad [\text{Ec. 15}]$$

donde

$Q_e$  es la escala de gastos,  $Q_e = L_e^{5/2}$   
 $Q_m$  gasto del modelo  
 $Q_p$  gasto del prototipo

- Ejemplo para la obtención del gasto a escala y la carga sobre la obra de toma escalada, tomando como  $L_e=70$  para los tres equipos piloto:

$$H_{OT1 \text{ escala}} = 70 \times 0.26 = \mathbf{18.20 \text{ m}}$$

$$Q_{OT1 \text{ escala}} = 70^{5/2} \times 0.000687 = \mathbf{28.1507 \text{ m}^3/\text{s}}$$

El gasto de la obra de toma será contante para todos los meses, tanto para el equipo piloto A como para el B y el C. Por lo que se omite en las tablas.

Resultados de los equipos pilotos para cada mes:

Tabla 4.16. “Similitud hidráulica, equipo piloto A”

Mes	$H_{OTi \text{ escala}}$ (m)
Enero	18.2000
Febrero	18.0696
Marzo	18.1682
Abril	18.2000

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

<b>Mes</b>	<b><math>H_{OTi\ escala}</math> (m)</b>
Mayo	18.2000
Junio	18.2000
Julio	18.2000
Agosto	18.2000
Septiembre	18.2000
Octubre	18.2000
Noviembre	18.2000
Diciembre	18.2000

Tabla 4.17. “Similitud hidráulica, equipo piloto B”

<b>Mes</b>	<b><math>H_{OTi\ escala}</math> (m)</b>
Enero	18.2000
Febrero	18.0745
Marzo	17.9812
Abril	17.8632
Mayo	17.7437
Junio	17.6226
Julio	17.9114
Agosto	18.2000
Septiembre	18.2000
Octubre	18.2000
Noviembre	18.2000
Diciembre	18.2000

Tabla 4.18. “Similitud hidráulica, equipo piloto C”

<b>Mes</b>	<b><math>H_{OTi\ escala}</math> (m)</b>
Enero	18.2000
Febrero	18.0745
Marzo	18.0302
Abril	17.9494

Mes	$H_{OTi\ escala}$ (m)
Mayo	17.8396
Junio	17.7143
Julio	18.2000
Agosto	18.2000
Septiembre	18.2000
Octubre	18.2000
Noviembre	18.2000

8. Calcular la potencia media, en KW, con las cargas  $H_{OTi}$  y los gastos  $Q_{OTi}$  del prototipo obtenidos en el punto anterior.

$$P_{media\ i} = \frac{\eta \times g \times Q_{OTi} \times H_{OTi} \times \rho}{1000} \quad [\text{Ec. 16}]$$

donde

$\rho$  densidad del agua,  $1000 \frac{kg}{m^3}$

$\eta$  eficiencia del equipo turbogenerador, 0.85

- Ejemplo para la obtención de la potencia media:

$$P_{media\ 1} = \frac{0.85 \times 9.81 \times 28.1507 \times 18.20 \times 1000}{1000} = 4272.17\ KW$$

Resultados de los equipos pilotos para cada mes:

Tabla 4.19. “Potencia media, equipo piloto A”

Mes	Potencia media (KW)
Enero	4272.1763
Febrero	4241.5597
Marzo	4264.7178

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

<b>Mes</b>	<b>Potencia media (KW)</b>
Abril	4272.1763
Mayo	4272.1763
Junio	4272.1763
Julio	4272.1763
Agosto	4272.1763
Septiembre	4272.1763
Octubre	4272.1763
Noviembre	4272.1763
Diciembre	4272.1763

*Tabla 4.20. “Potencia media, equipo piloto B”*

<b>Mes</b>	<b>Potencia media (KW)</b>
Enero	4272.1763
Febrero	4242.7123
Marzo	4220.8147
Abril	4193.1273
Mayo	4165.0744
Junio	4136.6450
Julio	4204.4232
Agosto	4272.1763
Septiembre	4272.1763
Octubre	4272.1763
Noviembre	4272.1763
Diciembre	4272.1763

*Tabla 4.21. “Potencia media, equipo piloto C”*

<b>Mes</b>	<b>Potencia media (KW)</b>
Enero	4272.1763
Febrero	4242.7123
Marzo	4232.3127

Mes	Potencia media (KW)
Abril	4213.3612
Mayo	4187.5799
Junio	4158.1598
Julio	4272.1763
Agosto	4272.1763
Septiembre	4272.1763
Octubre	4272.1763
Noviembre	4272.1763
Diciembre	4272.1763

9. Obtener la generación media de cada mes  $Gen_i$ , en GWh/mes, utilice el número de días de cada mes según la tabla 4.22. Obtenga los factores de conversión para cada mes.

$$Fac_i = \text{Días del mes} \times \left( \frac{24 \text{ hrs}}{1 \text{ dia}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ G}}{1000^2 \text{ KW}} \right) \quad [\text{Ec. 17}]$$

$$Gen_i(\text{GWh/mes}) = P_{OTi} \times Fac_i \quad [\text{Ec. 18}]$$

Tabla 4.22. “Generación media”

Mes	$i$	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i$ (GWh/mes)
Enero	1	31			
Febrero	2	28			
Marzo	3	31			
Abril	4	30			
Mayo	5	31			
Junio	6	30			
Julio	7	31			
Agosto	8	31			
Septiembre	9	30			
Octubre	10	31			
Noviembre	11	30			
Diciembre	12	31			

- Ejemplo para la obtención de la generación en GWh/mes:

$$Fac_1 = 31 \times \left( \frac{24 \text{ hrs}}{1 \text{ dia}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ G}}{1000^2 \text{ KW}} \right) = 0.000744$$

$$Gen_1(\text{GWh/mes}) = 4272.1763 \times 0.000744 = 3.18 \text{ GWh/mes}$$

Resultados de los equipos pilotos:

Tabla 4.23. “Generación media, equipo piloto A”

Mes	<i>i</i>	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i$ (GWh/mes)
Enero	1	31	4272.1763	0.000744	3.18
Febrero	2	28	4241.5597	0.000672	2.85
Marzo	3	31	4264.7178	0.000744	3.17
Abril	4	30	4272.1763	0.00072	3.08
Mayo	5	31	4272.1763	0.000744	3.18
Junio	6	30	4272.1763	0.00072	3.08
Julio	7	31	4272.1763	0.000744	3.18
Agosto	8	31	4272.1763	0.000744	3.18
Septiembre	9	30	4272.1763	0.00072	3.08
Octubre	10	31	4272.1763	0.000744	3.18
Noviembre	11	30	4272.1763	0.00072	3.08
Diciembre	12	31	4272.1763	0.000744	3.18

Tabla 4.24. “Generación media, equipo piloto B”

Mes	<i>i</i>	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i$ (GWh/mes)
Enero	1	31	4272.1763	0.000744	3.18
Febrero	2	28	4242.7123	0.000672	2.85
Marzo	3	31	4220.8147	0.000744	3.14
Abril	4	30	4193.1273	0.00072	3.02
Mayo	5	31	4165.0744	0.000744	3.10
Junio	6	30	4136.6450	0.00072	2.98
Julio	7	31	4204.4232	0.000744	3.13
Agosto	8	31	4272.1763	0.000744	3.18
Septiembre	9	30	4272.1763	0.00072	3.08

CAPÍTULO III “VERIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE PRÁCTICA”

Mes	$i$	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i$ (GWh/mes)
Octubre	10	31	4272.1763	0.000744	3.18
Noviembre	11	30	4272.1763	0.00072	3.08
Diciembre	12	31	4272.1763	0.000744	3.18

Tabla 4.25. “Generación media, equipo piloto C”

Mes	$i$	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i$ (GWh/mes)
Enero	1	31	4272.1763	0.000744	3.18
Febrero	2	28	4242.7123	0.000672	2.85
Marzo	3	31	4232.3127	0.000744	3.15
Abril	4	30	4213.3612	0.00072	3.03
Mayo	5	31	4187.5799	0.000744	3.12
Junio	6	30	4158.1598	0.00072	2.99
Julio	7	31	4272.1763	0.000744	3.18
Agosto	8	31	4272.1763	0.000744	3.18
Septiembre	9	30	4272.1763	0.00072	3.08
Octubre	10	31	4272.1763	0.000744	3.18
Noviembre	11	30	4272.1763	0.00072	3.08
Diciembre	12	31	4272.1763	0.000744	3.18

10. Transformar el gasto de demanda  $Q_D$ , al gasto de demanda del prototipo  $Q_{Dp}$ , utilizar la ecuación 15.

Para los tres equipos piloto el gasto de demanda del prototipo es el mismo:

$$Q_{Dp} = 70^{5/2} \times 0.0006866 = 28.1507 \text{ m}^3/\text{s}$$

11. Obtener el gasto por unidad, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , para equipar la central. Utilice el siguiente criterio:

$$Q_U = \frac{Q_{Dp}}{n} \quad [\text{Ec. 19}]$$

donde

$n$  es el número de unidades para generación, para esta práctica  $n = 2$

Para los tres equipos piloto el gasto por unidad generadora es el mismo:

$$Q_U = \frac{28.1507}{2} = 14.0753 \text{ m}^3/\text{s}$$

**12. Elegir el tipo de turbina para equipar la central según la figura 4.9, utilice  $Q_U$  y  $H_{NAMO}$ .**

Para seleccionar el tipo de turbinas se debe considerar el gasto por unidad generadora, así como la carga máxima (ya escalada del modelo de presa).

Se utilizará el diagrama de selección de turbinas, según el criterio del Manual de Pequeña Hidráulica, European Small Hydropower Association; en este diagrama se muestran varios tipos de turbinas, que están en función de los parámetros  $H$  y  $Q$ . En caso de caer en un punto donde pueda seleccionarse más de un tipo de turbina, se tendrán que considerar las ventajas y desventajas de cada una de las turbinas para el tipo de obra, operación y construcción.

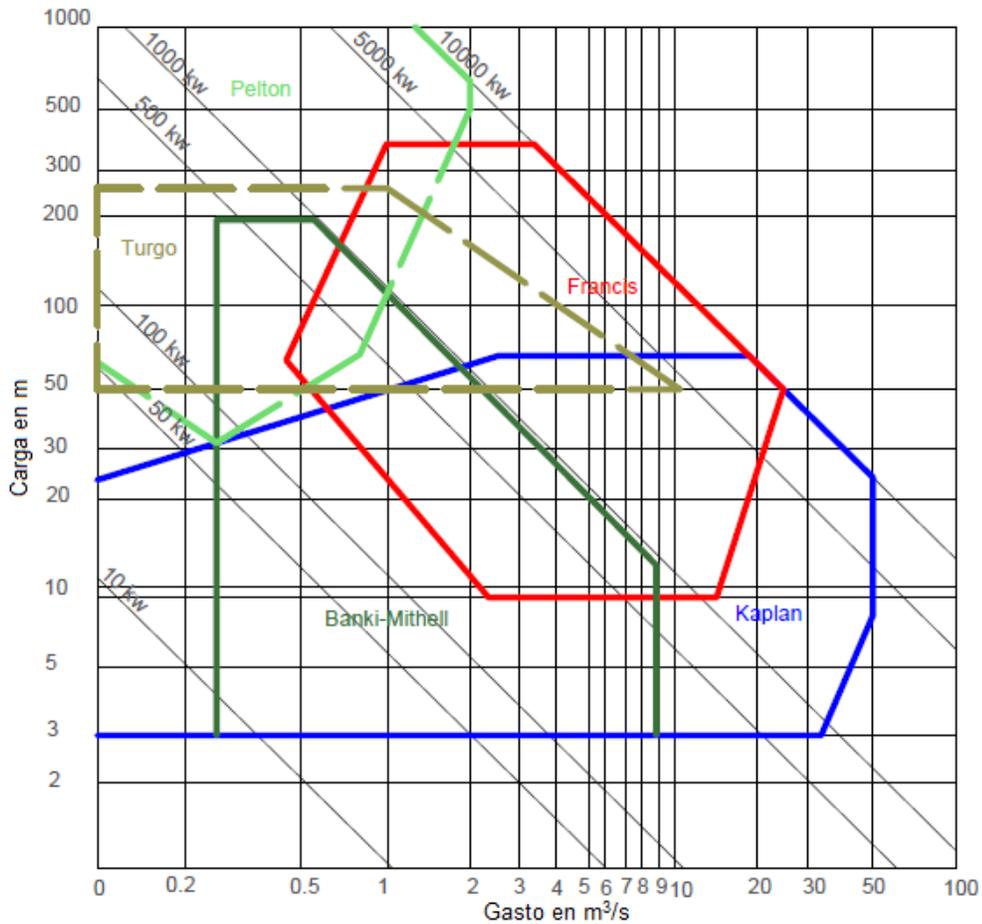


Figura 4.9. “Selección de turbinas, [8]”

Para los tres equipos piloto, los datos recopilados deberán resultar en la selección de la misma turbina:

Considerando que se tiene una carga de 18.20 m y un gasto por unidad generadora de 14.07 m<sup>3</sup>/s, se puede determinar de acuerdo con el diagrama de selección de turbinas la más adecuada para el prototipo de presa.

En la figura 4.10 se muestra la localización del tipo de turbinas de acuerdo a los parámetros ya establecidos. Donde el diagrama muestra que el tipo de turbinas a utilizar podría ser Francis o Kaplan, ya que la localización de los parámetros se encuentra entre estas dos. Se eligió el tipo de turbina Francis ya que por su diseño permite bajas pérdidas hidráulicas.

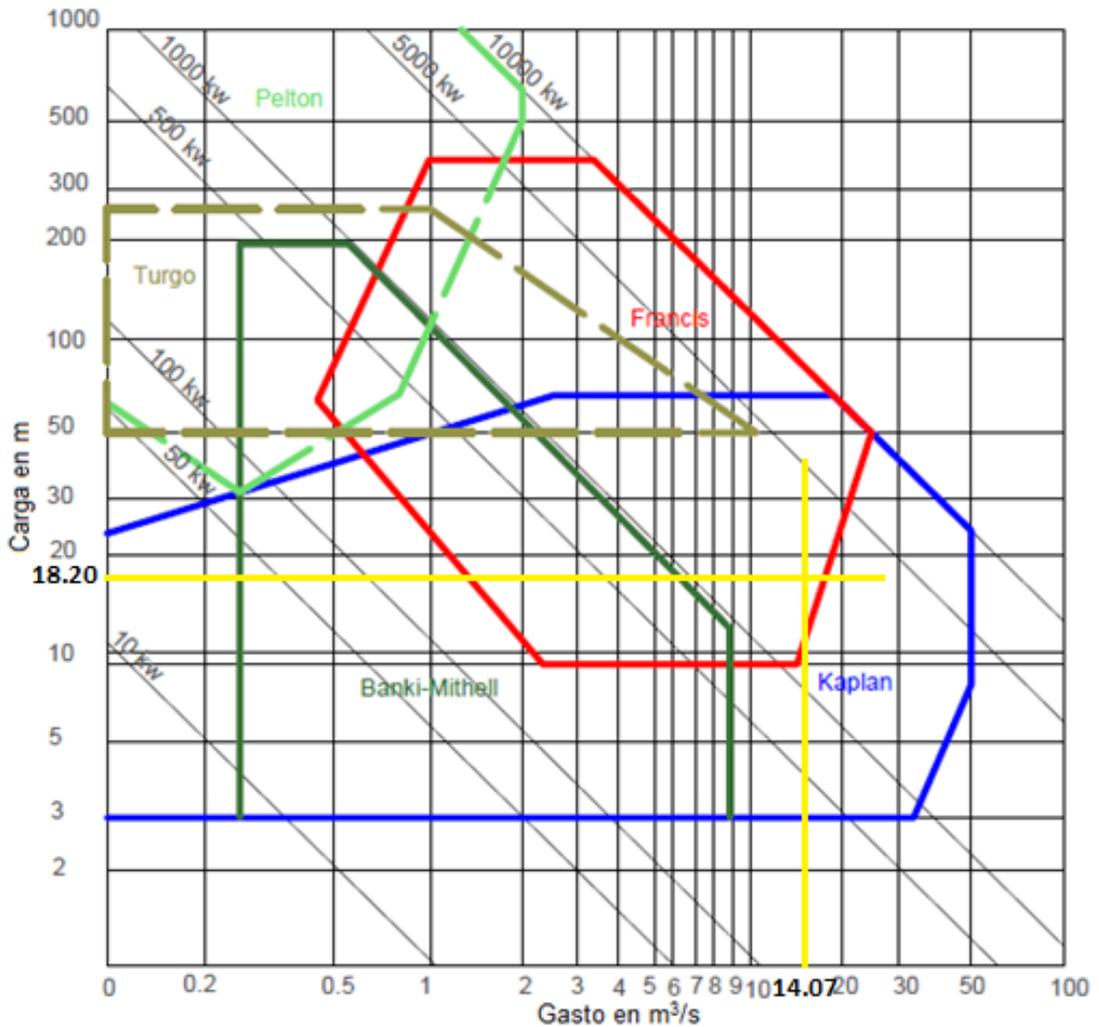


Figura 4.10. “Selección de turbinas, equipos piloto A, B y C”

13. Presente una gráfica ( $t - Gen_i$ ), como se muestra en la figura 4.5, donde el eje de la abscisas sea el tiempo y el de las ordenadas la generación. Concluya al respecto.

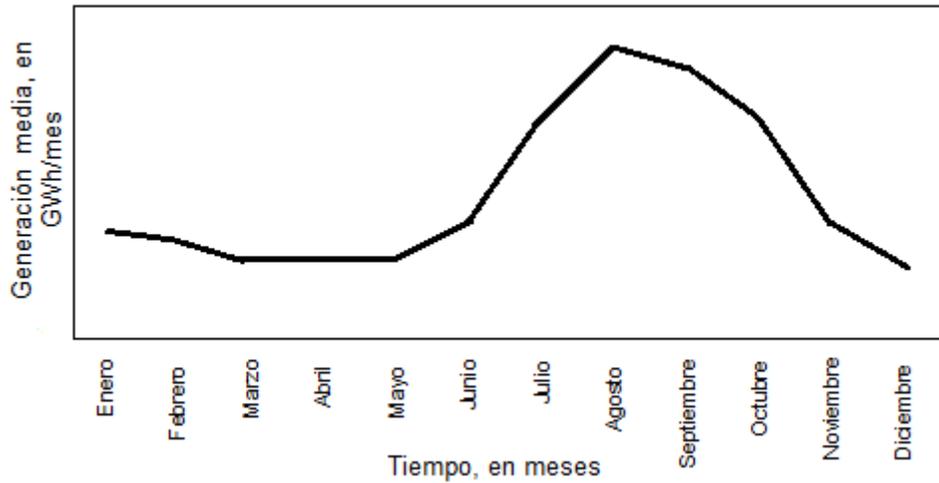


Figura 4.5. “Tiempo vs Generación media, elaborada por el autor”

Para el equipo piloto A, se obtiene la gráfica de tiempo vs generación media, a continuación se observa en la figura 4.6:

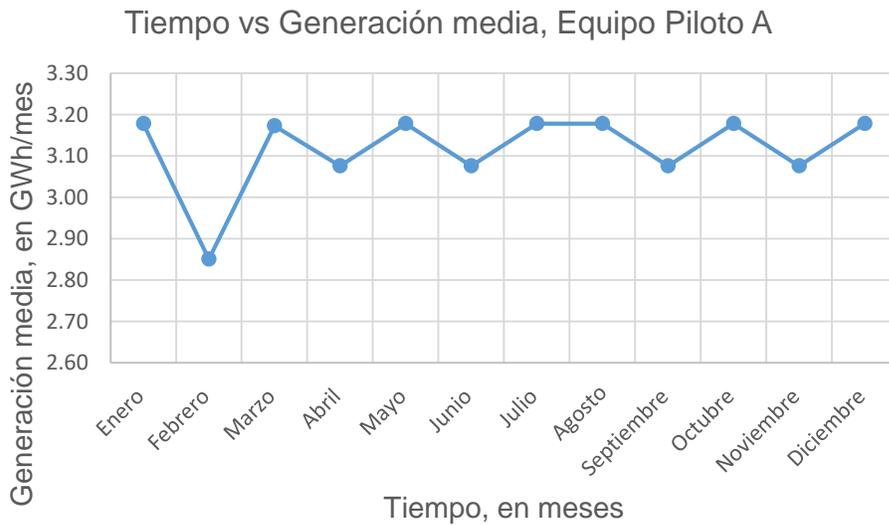


Figura 4.6 “Tiempo vs Generación media, equipo piloto A”

Para el equipo piloto B, se obtiene la gráfica de tiempo vs generación media, a continuación se observa en la figura 4.7:



Figura 4.7 “Tiempo vs Generación media, equipo piloto B”

Para el equipo piloto C, se obtiene la gráfica de tiempo vs generación media, a continuación se observa en la figura 4.8:

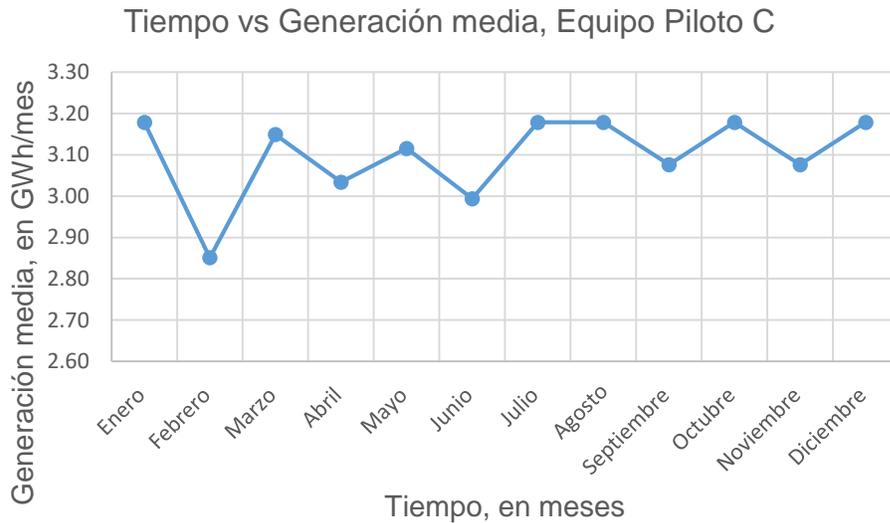


Figura 4.8 “Tiempo vs Generación media, equipo piloto C”

Al observar la gráfica tiempo vs generación media, se puede concluir que para los tres equipos piloto, el mes donde se presentó la menor generación fue en el mes de Febrero; siendo que para el equipo piloto A los meses de Enero, Mayo, Julio, Agosto, Octubre y Diciembre, se presentó la mayor generación con un valor de 3.18 GWh/mes. Para el equipo piloto B los meses de Enero, Agosto, Octubre y Diciembre; se presentó la mayor generación con la misma que el equipo piloto A. Por último el equipo piloto C presento la mayor generación para los meses de Enero, Julio, Agosto, Octubre y Diciembre.

**14. Obtenga una gráfica  $(t - V_{Qi})$ , como se muestra en la figura 4.9, donde el eje de la abscisas sea el tiempo y el de las ordenadas los volúmenes de entrada. Concluya al respecto.**

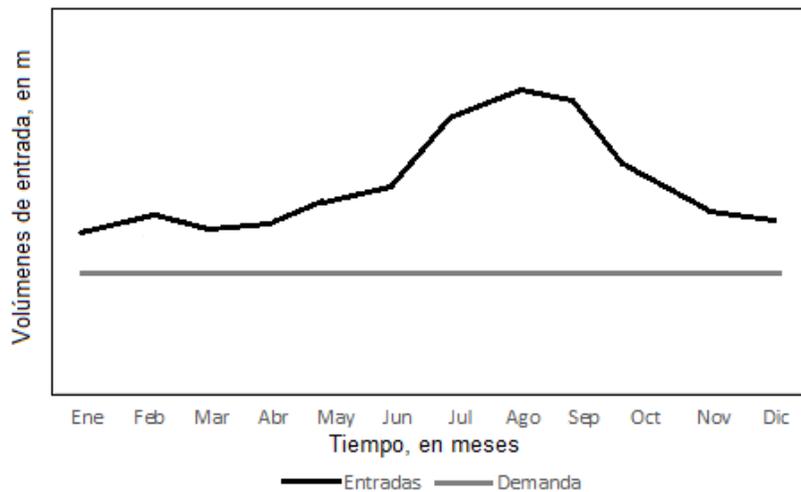


Figura 4.9. “Tiempo vs Volúmenes de entrada, elaborada por el autor”

Para el equipo piloto A, la gráfica tiempo vs volúmenes de entrada, se muestra a continuación en la figura 4.10:

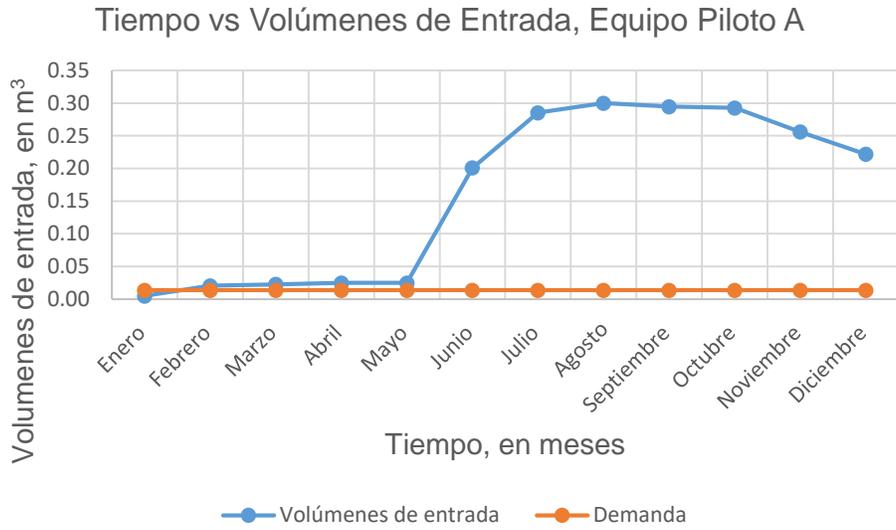


Figura 4.10 “Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto A”

En la figura 4.10 se observa que en el mes de Enero la demanda está por encima del volumen de entrada, consecuencia de abrir muy poco la válvula de alimentación del vaso, para así cumplir con el patrón de la figura 4.1. Si consultamos el funcionamiento de vaso en este mes, nos arroja que el nivel se encontró por debajo del NAMO, sin embargo este mismo nivel siempre se encontró por encima del NAMINO por lo que la demanda si se cumplió.

Para el equipo piloto B, la gráfica tiempo vs volúmenes de entrada, se muestra a continuación en la figura 4.11:

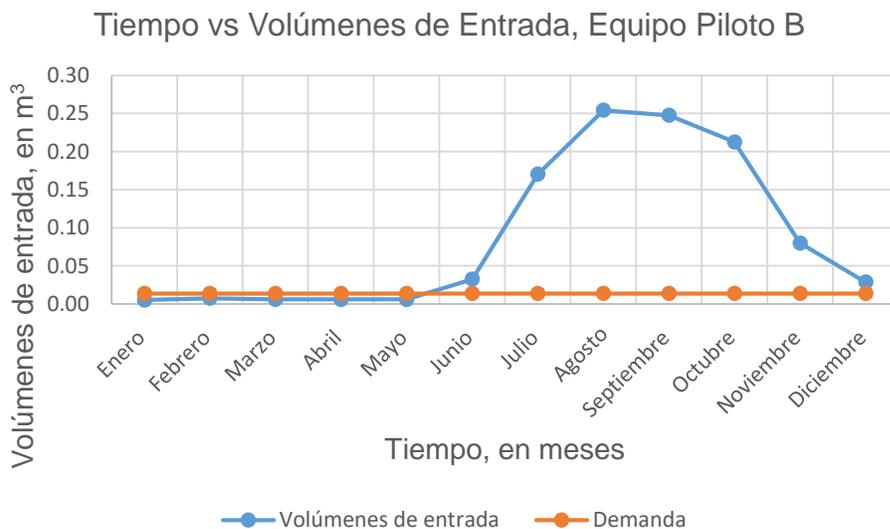


Figura 4.11 “Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto B”

En la figura 4.11 se observa que en los meses de Enero a Mayo la demanda está por encima del volumen de entrada, consecuencia de abrir muy poco la válvula de alimentación del vaso, para así cumplir con el patrón de la figura 4.1. Si consultamos el funcionamiento de vaso en estos meses, nos arroja que el nivel se encontró por debajo del NAMO, sin embargo este mismo nivel siempre se encontró por encima del NAMINO por lo que la demanda si se cumplió.

Para el equipo piloto C, la gráfica tiempo vs volúmenes de entrada, se muestra a continuación en la figura 4.12:

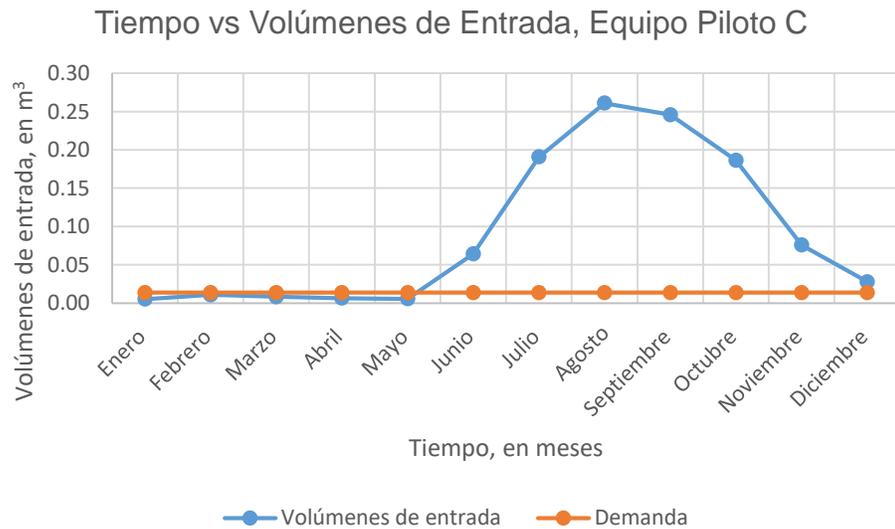


Figura 4.12 “Tiempo vs Volúmenes de entrada, equipo piloto C”

En la figura 4.12 se observa que en los meses de Enero a Mayo la demanda está por encima del volumen de entrada, consecuencia de abrir muy poco la válvula de alimentación del vaso, para así cumplir con el patrón de la figura 4.1. Si consultamos el funcionamiento de vaso en estos meses, nos arroja que el nivel se encontró por debajo del NAMO, sin embargo este mismo nivel siempre se encontró por encima del NAMINO por lo que la demanda si se cumplió.

Los resultados arrojados por los equipos piloto A, B y C fueron semejantes en cada punto de la práctica. Esto indica que la propuesta de práctica para la generación de energía eléctrica es repetible, tanto en el desarrollo de la misma como en su memoria de cálculo. Se verificaron las indicaciones hacia los alumnos, para saber si estas eran claras y evitar confusiones al momento de las mediciones en el modelo de presa.

# Capítulo IV

## “Conclusiones”

La propuesta de practica en el modelo de presa, busca extender el uso del modelo y al mismo tiempo que los alumnos desarrollen nuevos conocimientos y metodologías que puedan aprovechar en su vida laboral. En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 de los equipos piloto A, B y C respectivamente, se muestran una comparativa de la demanda y los volúmenes de entrada al vaso, en ellas se observa una diferencia significativa entre estas dos, al pensar en un proyecto real presentando las figuras ya mencionadas se entendería que el dimensionamiento de la obra de toma no es el correcto y se debería incrementar el diámetro de la obra de toma, para que de esta manera la generación fuera aun mayor y la carga bruta se aprovechara al máximo.

Al realizar un análisis que indique el diámetro de la obra de toma con el que se aprovecharía al máximo la generación del modelo, éste puede dar pie a otra propuesta de práctica que profundice más en este tema, utilizando el concepto de curva de permanencia y de frecuencia; necesarios para obtener el dimensionamiento del vaso.

Para realizar la verificación de la práctica se pensó en la forma más sencilla para medir los niveles dentro del vertedor triangular, esto evitaría confusiones entre los alumnos y entregando resultados confiables que permitirían el análisis de funcionamiento de vaso.

Al momento de verificar la práctica y dar todas las indicaciones necesarias a los alumnos, fue de gran importancia mantener su atención en las mediciones. Ya que algunas de ellas tuvieron que ser repetidas, esto nos indica la gran importancia que tienen los profesores y como manejan los grupos al impartir las practicas, dando información veraz y concisa al alumnado.

Los resultados obtenidos en la verificación de la práctica fueron muy similares entre los equipos piloto A, B y C, esto nos indica que la práctica es repetible y no depende de quien la imparta. El manual de práctica fue examinado por profesores del laboratorio tanto en redacción como en su memoria de cálculo, para que ésta fuera lo más clara posible y entendible; dejando así un manual confiable para el alumno y que pueda ser empleado para futuras generaciones. Aunque este no ha pasado por los controles de calidad que exige la norma ISO 9001 2015, siendo esta con la que el laboratorio de hidráulica está certificado, si fue revisado por algunos profesores del laboratorio, por lo que se podría validar por la norma e implementar en un futuro.

Por lo tanto la práctica que hoy se propone para el modelo de presa, fue pensada para la materia de Obra hidráulicas, siendo que en el temario de la asignatura se ven los propósitos de un vaso de almacenamiento, entre los cuales están irrigación, generación de energía eléctrica, control de avenidas, abastecimiento de agua potable, entre otras. Quedaría a consideración del profesor el ver análisis de generación en una central hidroeléctrica.

El contenido de la práctica corresponde a la asignatura de Obras hidráulicas, ya que los conocimientos que se deben tener para realizarla, se obtienen de las asignaturas del departamento de hidráulica. De la asignatura de Hidráulica Básica aparecen conceptos, como la ecuación de la energía, el concepto general de vertedores, la obtención del gasto de la obra de toma considerándolo como un orificio. En Hidráulica de Máquinas con los tipos de turbinas, potencia media, eficiencia del equipo turbogenerador, carga bruta. En Hidráulica de Canales con el concepto de funcionamiento de la estructura de excedencias que si bien no se considera en el análisis, si se puede observar al momento de las mediciones en él modelo. Por último en Hidrología, estamos partiendo de realizar un registro de gastos mensuales en un vaso de almacenamiento, el análisis de funcionamiento de vaso, los niveles en el mismo, la curva elevaciones – áreas – volúmenes, son algunos de los conceptos que se ven en él análisis.

Hoy en día las prácticas de laboratorio han perdido cierta importancia para los alumnos, en muchas ocasiones lo ven, más como un trámite para acreditar la materia y no comprenden la importancia de este. Si es cierto que las practicas nos ayudan aterrizar los conocimientos obtenidos en la teoría, se tendría que maximizar la importancia del laboratorio, ya que su función no es solo esa, también acercarnos a las metodologías que se utilizan en la vida profesional.

La Facultad de Ingeniería cuenta con un laboratorio con grandes capacidades que permiten ofrecer al alumnado la impartición de prácticas en diversos modelos, con la mejor calidad posible.

# Anexo

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	1/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

### Práctica

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	2/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad de la ejecución

	Peligro o Fuente de energía	Riesgo asociado
1	Rejillas en sala de modelos	Posible caída

## 2. Objetivos de aprendizaje

### I. Objetivo general

El alumno analizará el potencial eléctrico del modelo de presa y determinará el tipo de turbina que se necesite.

### II. Objetivos específicos

Medir y obtener un registro de gastos de 12 meses en el modelo de presa.

Realizar el funcionamiento de vaso y escalar los parámetros  $Q_{OT}$  y  $H_B$ .

Determinar el número de unidades generadoras y el tipo de turbinas para el prototipo de presa.

## 3. Introducción y antecedentes

- Concepto y componentes principales de un vaso de almacenamiento.
- Análisis preliminar de generación de energía eléctrica.
- Similitud hidráulica.
- Conceptos de potencia eléctrica, mecánica e hidráulica.
- Funcionamiento de vaso.
- Impacto de las obras hidráulicas.
- Tipos de turbinas.

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	3/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

#### 4. Material y equipo

- Modelo de presa.
- Piezómetro.
- Hoja milimétrica.
- Cronometro.

#### 5. Desarrollo

##### I. Actividad 1

1. Revisar que las válvulas de alivio se encuentren cerradas y no se halle ningún objeto dentro del vaso de almacenamiento, ya que este se encuentra a la intemperie.

2. Establecer el nivel del NAMO dentro del vaso de almacenamiento, este nivel corresponde a 0.57 m desde el nivel de piso.

3. Establecer el nivel de cresta en el vertedor triangular.

4. Establecer doce gastos, con la válvula de alimentación. Iniciar con válvula cerrada para  $t = 0$ . Cambiar el caudal cada 20 segundos hasta completar doce mediciones en la tabla 1. Abrir y cerrar la válvula, tal que siga el patrón de la figura 1.

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	4/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

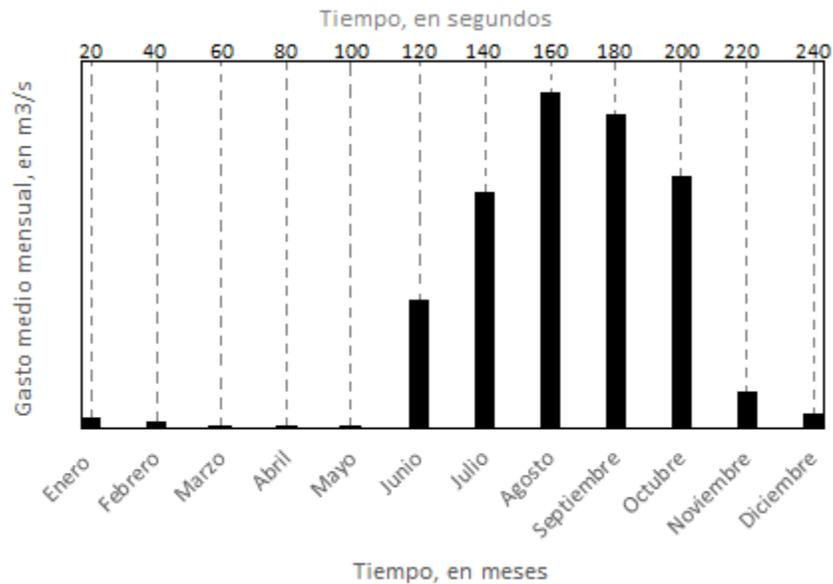


Figura 1. "Épocas de lluvia y estiaje"

- Colocar una hoja milimétrica a lado del piezómetro del tanque de alimentación y marcar como cero el nivel de cresta del vertedor triangular. De acuerdo a la figura 2.

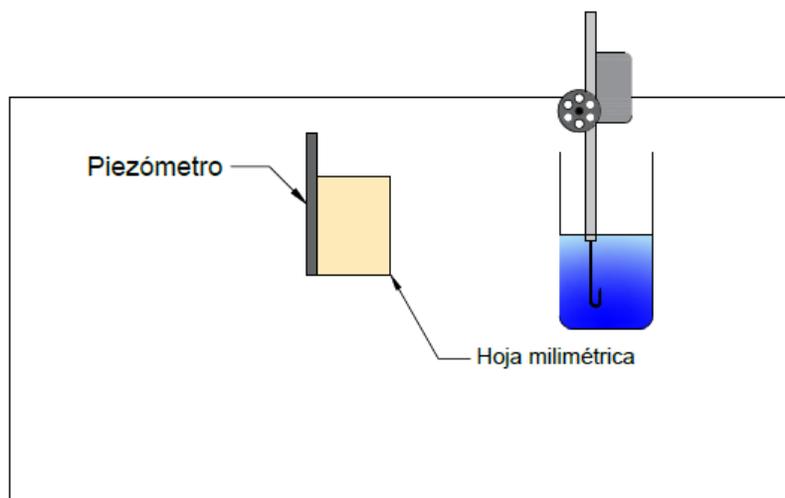


Figura 2. "Piezómetro"

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	5/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. En el instante  $t = 0$ , comenzar abrir lentamente la válvula de la obra de toma.
7. Con el nivel de cresta, en el vertedor triangular para  $t = 0$ , registrar los niveles  $N_v$  en el vertedor, registrar estos niveles en la hoja milimétrica.
8. Llenar la tabla 1 con los registros obtenidos.

Tabla 1. "Mediciones en el modelo de presa"

t (seg)	Mes	Nv (m)
20		
40		
60		
80		
100		
120		
140		
160		
180		
200		
220		
240		

## 6. Análisis del funcionamiento hidráulico del modelo de presa

15. Calcular los gastos de entrada  $Q_{Ei}$  al modelo con el vertedor triangular, en  $m^3/s$ . Llenar la tabla 2 con los datos obtenidos.

$$Q_{Ei} = Ch^{\frac{5}{2}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	6/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

donde

$h$  carga sobre el vertedor, en m,  $h = N_{Vi}$

$C$  coeficiente de descarga del vertedor, en  $m^{1/2}/s$ ;  $C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K$

$g$  aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\theta$  ángulo en el vértice del vertedor triangular,  $60^\circ$

$\mu$  coeficiente de gasto, que depende de  $h$  y  $\theta$ , según la figura 7.9, referencia 1

$K$  coeficiente que depende de  $B/h$  y  $\theta$ , según la figura 7.10, referencia 1

$B$  ancho del canal de llegada, 1.16 m

Tabla 2. "Registro de gastos"

Mes	$Q_{Ei} \text{ (m}^3/\text{s)}$
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

16. Expresar los caudales del punto anterior en volumen, en  $m^3$ . Llenar la tabla 3 con los datos obtenidos.

$$V_{Qi} = Q_{Ei} (\Delta t) \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde

$\Delta t = 20 \text{ segundos}$

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	7/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 3. “Registro de volúmenes”

Mes	$V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

17. Calcular los volúmenes  $V_{NAMINO}$  y  $V_{NAMO}$ , en m<sup>3</sup>, con las curvas  $E_V - A - V$  (ecuaciones 3 y 4) y con las elevaciones  $E_{NAMO} = 0.57$  m,  $E_{NAMINO} = 0.39$  m.

$$\psi = \left( \frac{E}{0.6471} \right)^{\frac{1}{0.1862}} \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$A = \left( \frac{E}{0.4212} \right)^{\frac{1}{0.2607}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

18. Calcular el volumen de demanda  $V_D$ , en m<sup>3</sup>.

$$Q_D = C_d A_{OT} \sqrt{2gH_{NAMO}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde

$H_{NAMO}$  es la carga sobre la obra de toma desde el nivel del NAMO

$$H_{NAMO} = E_{NAMO} - E_{OT} \quad [\text{Ec. 6}]$$

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	8/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- $g$       aceleración de la gravedad,  $9.81 \text{ m/s}^2$   
 $E_{OT}$     eje de la obra de toma desde el nivel de piso,  $E_{OT} = 0.31 \text{ m}$   
 $D_{OT}$     diámetro de la obra de toma,  $D_{OT} = 0.0254 \text{ m}$   
 $C_d$       coeficiente de descarga,  $C_d = 0.60$

$$V_D = Q_D(\Delta t) \quad [\text{Ec. 7}]$$

19. Realizar el funcionamiento de vaso de acuerdo al siguiente procedimiento:

- i) Para el instante  $i = 1$ ,  $E_{V1} = E_{NAMO}$
- j) Con ayuda de las curvas  $E_v - A - V$ , obtener el área y el volumen  $V_i$  dentro del vaso para el mes  $i$ , con las ecuaciones 3 y 4.
- k) Calcular el volumen de salida  $V_{si}$ , según la siguiente expresión:

$$\text{Si } V_{Qi} + V_i > V_{NAMINO} \quad ; \quad V_{si} = V_D \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$\text{Si } V_{Qi} + V_i < V_{NAMINO} \quad ; \quad V_{si} = 0 \quad [\text{Ec. 9}]$$

- l) Calcular el volumen del mes  $i + 1$  ( $V_{i+1}$ ) de acuerdo a la siguiente condición:

$$\text{Si } V_{Qi} + V_i - V_{si} > V_{NAMO} \quad ; \quad V_{i+1} = V_{NAMO} \quad [\text{Ec. 10}]$$

$$\text{Si } V_{Qi} + V_i - V_{si} < V_{NAMO} \quad ; \quad V_{i+1} = V_{Qi} + V_i - V_{si} \quad [\text{Ec. 11}]$$

- m) Calcular la elevación  $E_{i+1}$  con el volumen  $V_{i+1}$ , utilizando la ecuación 4.

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	9/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

n) Obtener el gasto de la obra de toma, en m<sup>3</sup>/s

$$Q_{OTi} = \frac{V_{si}}{\Delta t} \quad [\text{Ec. 12}]$$

o) Calcular la carga sobre la obra de toma, en m, como:

$$H_{OTi} = E_{Vi} - E_{OT} \quad [\text{Ec. 13}]$$

p) Conocido  $E_{Vi+1}$ , pasar al siguiente instante de cálculo y repita este procedimiento desde el inciso b y hasta  $i = 12$

20. Llenar la tabla 4 con los datos obtenidos en los puntos anteriores.

Tabla 4. "Funcionamiento de vaso"

Mes	$i$	t, en el modelo (s)	Volumen de entrada, $V_{Qi}$ (m <sup>3</sup> )	Elevación, $E_{Vi}$ (m)	Área (m <sup>2</sup> )
Enero	1	20			
⋮	⋮	⋮			
Diciembre	12	240			

Volumen, $V_i$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de salida, $V_{si}$ (m <sup>3</sup> )	$V_{i+1}$ , (m <sup>3</sup> )	Elevación $i+1$ (m)	Gasto de la obra de toma (m <sup>3</sup> /s)	$H_{OT}$ (m)

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	10/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

21. Utilizar la condición de similitud de Froude para calcular los  $H_{OTi}$  y  $Q_{OTi}$ , correspondientes a un prototipo con  $L_e = \text{_____}$ , donde  $L_e$  será propuesta por el profesor, considere un intervalo de escala de líneas entre (20 – 70).

$$L_p = L_e(L_m) \quad [\text{Ec. 14}]$$

donde

- $L_m$  es la longitud del modelo  
 $L_p$  es la longitud del prototipo  
 $L_e$  escala de líneas

$$Q_p = Q_e(Q_m) \quad [\text{Ec. 15}]$$

donde

- $Q_e$  es la escala de gastos,  $Q_e = L_e^{5/2}$   
 $Q_m$  gasto del modelo  
 $Q_p$  gasto del prototipo

22. Calcular la potencia media, en KW, con las cargas  $H_{OTi}$  y los gastos  $Q_{OTi}$  del prototipo obtenidos en el punto anterior.

$$P_{media\ i} = \frac{\eta \times g \times Q_{OTi} \times H_{OTi} \times \rho}{1000} \quad [\text{Ec. 16}]$$

donde

- $\rho$  densidad del agua,  $1000\text{ kg/m}^3$   
 $\eta$  eficiencia del equipo turbogenerador, 0.85

23. Obtener la generación media de cada mes  $Gen_i$ , en GWh, utilice el número de días de cada mes según la tabla 5. Obtenga los factores de conversión para cada mes.

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	11/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$Fac_i = \text{Días del mes} \times \left( \frac{24 \text{ hrs}}{1 \text{ día}} \right) \times \left( \frac{1 G}{1000^2 KW} \right) \quad [\text{Ec. 17}]$$

$$Gen_i(GWh) = P_{OTi} \times Fac_i \quad [\text{Ec. 18}]$$

Tabla 5. “Generación media”

Mes	<i>i</i>	Días del mes	$P_{OTi}$	$Fac_i$	$Gen_i(GWh)$
Enero	1	31			
Febrero	2	28			
Marzo	3	31			
Abril	4	30			
Mayo	5	31			
Junio	6	30			
Julio	7	31			
Agosto	8	31			
Septiembre	9	30			
Octubre	10	31			
Noviembre	11	30			
Diciembre	12	31			

24. Transformar el gasto de demanda  $Q_D$ , al gasto de demanda del prototipo  $Q_{Dp}$ , utilizar la ecuación 15.

25. Obtener el gasto por unidad, en  $m^3/s$ , para equipar la central. Utilice el siguiente criterio:

$$Q_U = \frac{Q_{Dp}}{n} \quad [\text{Ec. 19}]$$

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	12/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

donde

$n$  es el número de unidades para generación, para esta práctica  $n = 2$

26. Elegir el tipo de turbina para equipar la central según la figura 3, utilice  $Q_U$  y  $H_{NAMO}$ .

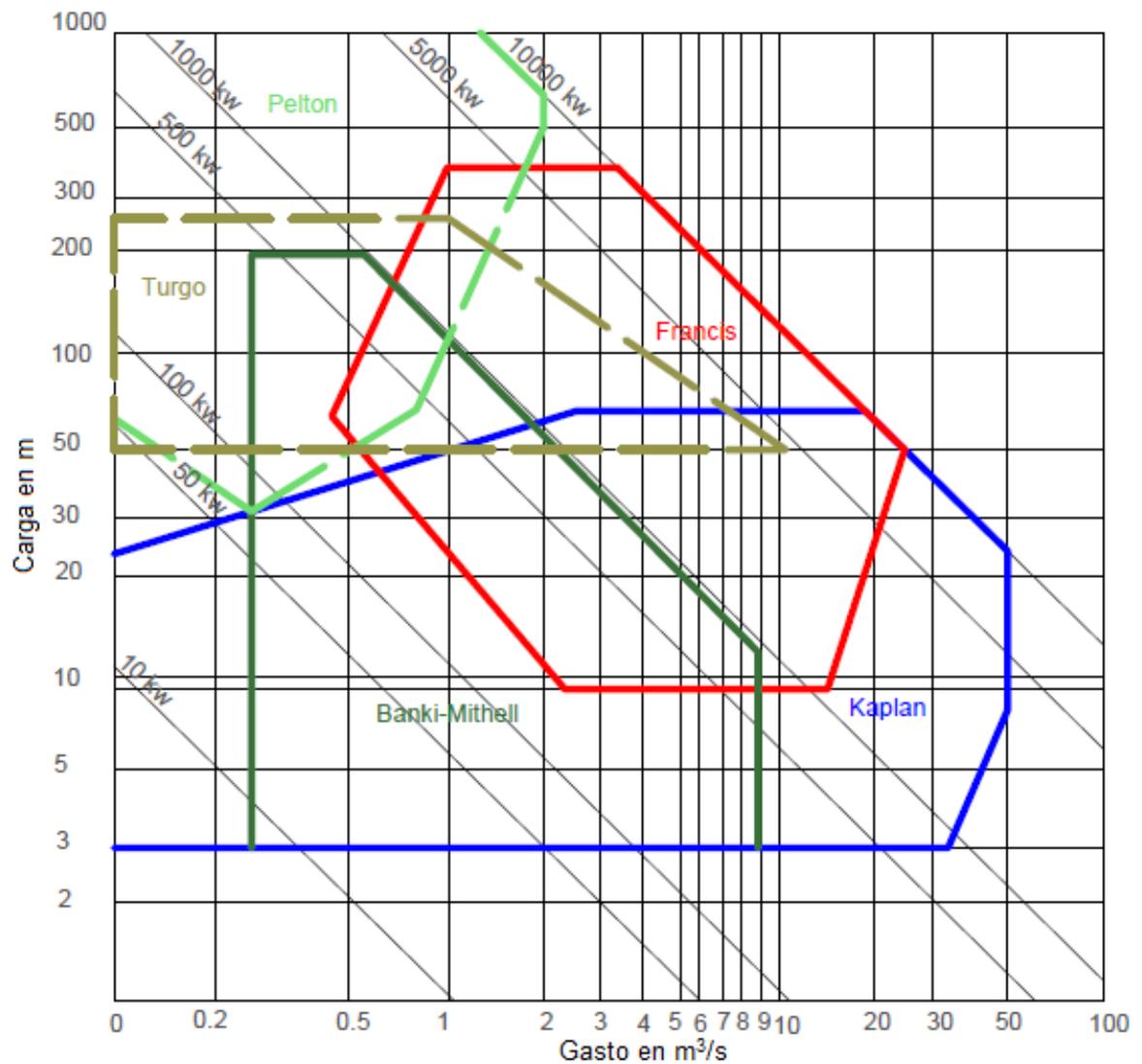


Figura 3. "Selección de turbinas"

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	13/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

27. Presente una gráfica ( $t - Gen_i$ ), como se muestra en la figura 4, donde el eje de la abscisas sea el tiempo y el de las ordenadas la generación. Concluya al respecto.

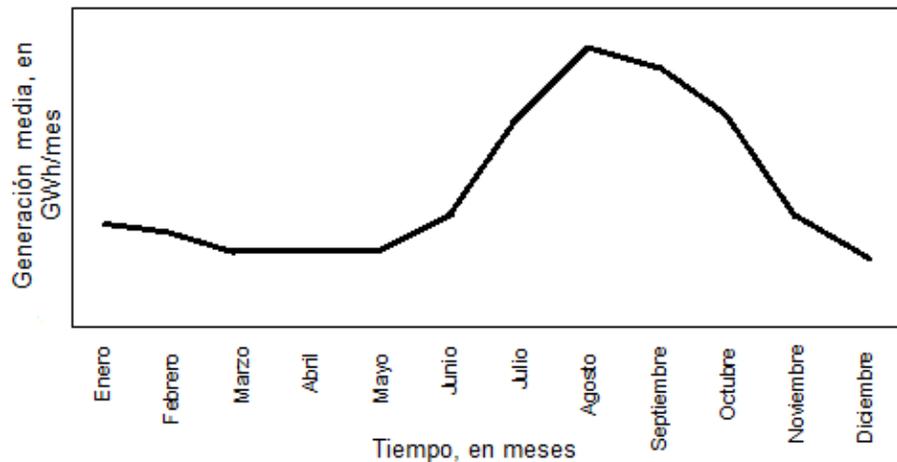


Figura 4. "Tiempo vs Generación media"

28. Obtenga una gráfica ( $t - V_{Qi}$ ), como se muestra en la figura 5, donde el eje de la abscisas sea el tiempo y el de las ordenadas los volúmenes de entrada. Concluya al respecto.

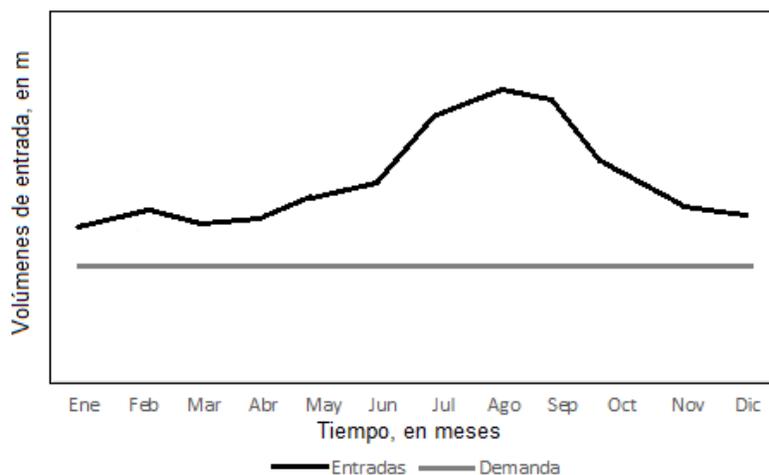


Figura 5. "Tiempo vs Volúmenes de entrada"

	<b>Manual de prácticas de obras hidráulicas</b>	Código	
		Versión	01
		Página	14/14
		Sección ISO	
		Fecha de emisión	
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de hidráulica	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 7. Conclusiones

## 8. Referencias Bibliográficas

1. Sotelo A., G. Hidráulica general, Vol. 1, México, Editorial Limusa, 2006.
2. European Small Hydropower Association. (1998). Manual de Pequeña Hidráulica: Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica. Bélgica: DG XVII comisión europea.
3. Miguel A. Vergara Sánchez. (1995). Técnicas de Modelación en Hidráulica. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
4. Francisco Javier Aparicio Mijares. (2006). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas 95, México, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.

## Referencias Bibliográficas

1. Francisco Javier Aparicio Mijares. (2006). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Balderas 95, México, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.
2. Universidad de Cádiz. (Enero 10, 2000). Centrales Hidroeléctricas. 2001, de Universidad de Cádiz Sitio web: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m200018/doc1.pdf>
3. José A. Roca. (Octubre 23, 2017). Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de bombeo del mundo. 2017, de El periódico de la energía.com Sitio web: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-bombeo-del-mundo/>
4. EPEC. (2015). La Tecnología Hidroeléctrica. 2015, de EPEC Sitio web: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf>
5. Gilberto Sotelo Avila. (1997). Hidráulica General Vol. 1. Balderas 95, México, D.F.: Limusa S.A. de C.V.
6. Miguel A. Vergara Sánchez. (1995). Técnicas de Modelación en Hidráulica. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
7. José de Jesús Rivas Carpio. (2014). Evaluación del Potencial Hidroeléctrico en la Cuenca del Río la Antigua, con Enfoque de Energía Renovable. México, D.F.: Pedro Ahumada.
8. European Small Hydropower Association. (1998). Manual de Pequeña Hidráulica: Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica. Bélgica: DG XVII comisión europea.
9. Claudio Mataix. (1982). Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México, D.F.: Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V.