



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**GUÍA DE DISEÑO DE OBRA CIVIL PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE UNA MICRO-HIDROELÉCTRICA Y EJEMPLO PRÁCTICO**

Elena Patricia Taracena Salán

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, marzo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA DE DISEÑO DE OBRA CIVIL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA
MICRO-HIDROELÉCTRICA Y EJEMPLO PRÁCTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELENA PATRICIA TARACENA SALÁN

ASESORADO POR EL INGENIERO MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I: Inga. Glenda Patricia García Soria
Vocal II: Inga. Alba Maritza Guerrero de López
Vocal III: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
Vocal IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Vocal V:
Secretaria: Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Examinador: Inga. Mónica Noemí Mazariegos Ramírez
Examinador: Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila
Examinador: Ing. Armando Fuentes Roca
Secretaria: Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**GUÍA DE DISEÑO DE OBRA CIVIL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA
MICRO-HIDROELÉCTRICA Y EJEMPLO PRÁCTICO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de abril de 2007.

Elena Patricia Taracena Salán

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS: Por culminar este trabajo de graduación, dándome la fuerza y el entendimiento necesario.

MI MAMÁ: Por apoyo, comprensión y amor incondicional.

MI HERMANO: José Carlos, por apoyarme en los momentos más difíciles.

MIS ABUELITOS: Zoila Estela y Ángel, por haberme amado tanto.

MI NOVIO: Francisco Carrillo, por su gran apoyo y amor.

MI TIOS: Por estar conmigo.

MI PRIMOS: Por estar conmigo.

MI ASESOR: Ing. Mario Corzo, por colaboración y excelente asesoría.

MIS AMIGOS: Por los momentos compartidos.

**FACULTAD DE INGENIERÍA,
DE LA UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA.**

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS:** Por haberme guiado en todo momento.
- MI MAMÁ:** Por ser la mejor madre y mi ejemplo a seguir.
- MIS ABUELITOS:** Zoila Estela y Ángel, por todo el amor que les tengo.
- MI HERMANO:** José Carlos, por ser el mejor hermano.
- MI NOVIO:** Francisco Carrillo, por su gran apoyo y amor.
- MI TÍO:** José Roberto, por ser como un padre para mí.
- MI ASESOR:** Ing. Mario Corzo, por haberme apoyado en la elaboración de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
RESUMEN.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MICRO-HIDROELÉCTRICAS	
1.1 Definición de pequeños aprovechamientos.....	5
1.2 Opciones técnicas.....	6
1.2.1 Aprovechamiento de agua fluyente.....	6
1.2.2 Micro-hidroeléctricas de pie de presa.....	9
1.2.3 Micro-hidroeléctricas integradas en un canal de riego.....	10
1.2.4 Micro-hidroeléctricas en sistemas de alimentación de agua potable.....	12
1.3 Planificación y evaluación de un aprovechamiento.....	13
2. COMPONENTES DE OBRA CIVIL: ESTRUCTURA HIDRÁULICA	
2.1 Estructuras de retención y derivación.....	15
2.1.1 Presa o azud.....	15
2.1.2 Vertederos.....	19
2.1.3 Desviación del río durante la construcción de la presa o el azud.....	21
2.1.4 Rejillas.....	22

2.2	Conducciones hidráulicas.....	23
2.2.1	Toma de agua o bocatoma.....	23
2.2.1.1	Tipos de tomas de agua.....	24
2.2.1.2	Ubicación de la toma de agua.....	27
2.2.2	Canal de derivación.....	28
2.2.3	Cámara de carga y el desarenador.....	29
2.2.4	Tubería forzada.....	31
2.2.5	La casa de máquinas y fundamentos de equipos.....	33
2.2.6	Canales de descarga.....	34

3. PLAN Y DETALLES DE LA CONSTRUCCIÓN

3.1	Presas o azudes.....	35
3.2	Vertederos.....	39
3.3	Cámara de compensación.....	45
3.4	Tubería forzada.....	46
3.4.1	Circulación del agua en conductos cerrados.....	47
3.4.2	Pérdida de carga por fricción.....	49
3.4.3	Pérdida de carga por turbulencia.....	52
3.4.3.1	Tipos de flujos.....	52
3.5	Canal abierto.....	53
3.5.1	Energía en canales abiertos.....	57
3.6	Desarenador.....	59
3.7	Drenaje.....	61
3.8	Sifones invertidos.....	62

4. OTROS COMPONENTES

4.1	Compuertas.....	65
4.1.1	Compuertas y ajustadores de nivel para el caudal de un río (Stoplogs).....	65

4.2	Válvulas.....	68
4.2.1	Válvulas de compuerta.....	69
4.2.2	Válvulas de mariposa.....	70
4.3	Controladores de flujo (Spillways).....	71
4.3.1	Controladores de flujo del desbordamiento.....	72
4.3.2	Controladores de flujo del sifón.....	73
4.4	Selección de turbinas.....	74
4.4.1	Turbina Francis.....	74
4.4.2	Turbina Pelton.....	75
4.4.3	Turbina Kaplan.....	77
4.4.4	Turbina Michell-Banki.....	78
4.4.5	Selección preliminar de turbina.....	80

5. COMPONENTES PRELIMINARES ANTES DEL DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS

5.1	Evaluación del terreno.....	85
5.1.1	Cartografía.....	85
5.1.2	Estudios geotécnicos.....	86
5.2	Recursos hídricos.....	87
5.2.1	Datos hidrológicos.....	87
5.2.2	Medidas directas del caudal.....	88
5.2.2.1	Método de llenado de un depósito para medir un caudal.....	88
5.2.2.2	Medida del caudal mediante un flotador.....	89
5.2.2.3	Medida del caudal mediante el uso de un vertedero.....	91
5.2.3	Medidas indirectas del caudal.....	93
5.2.3.1	Medida del caudal por la pendiente de la lámina de agua.....	93

5.3	Criterios de selección de turbinas o equipo electromecánico.....	94
5.3.1	Altura de salto.....	95
5.3.2	Caudal.....	96
5.3.3	Cavitación.....	98
5.4	Estimación de la demanda energética.....	101
5.4.1	Estimación de la demanda actual.....	101
5.4.2	Estimación de la demanda futura.....	102

6. EJEMPLO DE ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA ALDEA LOS LAURELES, MUNICIPIO DE SANTIAGO SACATEPÉQUEZ, DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ

6.1	Marco referencial.....	103
6.2	Estudio geológico.....	105
6.3	Descripción del proyecto.....	106
6.4	Datos obtenidos.....	110
6.5	Estimación del cauda aprovechable.....	117
6.6	Consumo de energía.....	119
6.7	Determinación de la altura de salto.....	120
6.8	Prediseño del canal abierto.....	121
6.8.1	Energía del canal abierto.....	123
6.9	Prediseño de la presa.....	123
6.10	Prediseño del desarenador.....	126
6.11	Potencia generada por la altura de salto.....	128
6.12	Selección preliminar de la turbina.....	129
6.13	Prediseño del diámetro de la tubería forzada.....	129
6.13.1	Pérdida por fricción.....	130
6.13.2	Pérdida por turbulencia.....	131
6.14	Cavitación.....	132

CONCLUSIONES	133
RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ejemplo de una micro-hidroeléctrica.....	4
2.	Aprovechamiento de montaña.....	5
3.	Representación de una toma.....	7
4.	Presa de compuerta y casa de máquinas integradas.....	8
5.	Micro-hidroeléctrica integrada en un canal de riego.....	10
6.	Micro-hidroeléctrica sumergidas en un canal.....	11
7.	Micro-hidroeléctrica en una red de agua potable.....	13
8.	Presas de concreto.....	16
9.	Detalle de presa o azud y reja.....	18
10.	Vertedero de pico de pato.....	19
11.	Vertedero en laberinto.....	20
12.	Vertedero en sifón.....	21
13.	Tipos de rejilla.....	22
14.	Toma en forma de torre.....	25
15.	Toma en sifón.....	26
16.	Tomas en montaña.....	27
17.	Tubería forzada.....	32
18.	Combinación de cargas para una presa.....	36
19.	Dimensiones de una presa por gravedad.....	37
20.	Dimensiones para una presa.....	38
21.	Vertedero.....	39
22.	Nivel energético.....	42
23.	Colchón mortiguador con contraumbral.....	43

24.	Diagrama para determinación de la longitud L_2 del resalto.....	44
25.	Valores de dimensionamiento al final del colchón amortiguador.....	45
26.	Propiedades geométricas de los canales.....	55
27.	Detalle de canal.....	56
28.	Dimensiones de un desarenador.....	60
29.	Relación entre grano y tiempo de sedimentación.....	61
30.	Dos ejemplos que ilustran como un sifón invertido se puede utilizar a lo largo de una alineación del canal.....	63
31.	Dimensiones típicas (m) del sifón invertido.....	64
32.	Compuerta.....	66
33.	Esquema de compuerta típica.....	67
34.	Válvulas de compuerta.....	69
35.	Válvulas de mariposa dirigidas por engranaje.....	70
36.	Coeficiente de la descarga para los controladores de flujo de diversos perfiles.....	72
37.	Controlador de flujo de sifón.....	73
38.	Esquema de una turbina Francis.....	75
39.	Esquema de una turbina Pelton.....	76
40.	Turbina Kaplan.....	78
41.	Turbina Michell-Banki.....	79
42.	Diagrama de salto neto versus caudal.....	84
43.	Hoja de recorrido de campo.....	87
44.	Método de llenado de un depósito para medir un canal.....	89
45.	Medida del caudal mediante un flotador.....	90
46.	Medida del caudal mediante el uso de un vertedero.....	91
47.	Detalles de ranuras para vertederos.....	92
48.	Altura de salto (H_b).....	96
49.	Curva de caudales clasificados.....	97
50.	Ubicación de Sacatepéquez.....	104

51. Mapa cartográfico del departamento de Sacatepéquez, parte 1.....	107
52. Cuenca.....	109
53. Niveles de estructuras.....	111
54. Planta de ubicación de estructuras.....	113
55. Perfil de estructuras.....	115

TABLAS

I. Materiales utilizados en tuberías forzadas.....	46
II. Valores típicos del coeficiente n de Manning.....	54
III. Velocidades máximas recomendadas en función de la característica del suelo.....	56
IV. Pendiente admisible en función del tipo de suelo.....	57
V. Taludes recomendables en función del material talud Z:1 (horizontal : vertical).....	57
VI. Coeficiente de fricción estática “ μ ” para las superficies secas liso-acabadas.....	68
VII. Según altura de salto.....	80
VIII. Según desniveles.....	80
IX. Tipo de configuración.....	81
X. Valores típicos del coeficiente n Manning en cursos naturales.....	94
XI. Demanda actual para distintas poblaciones.....	101

RESUMEN

Debido al crecimiento de la población guatemalteca, es necesario el aumento del suministro energético, por lo cual se considera ineludible la implementación de nuevas formas de generación; las cuales presenten una opción de mayor utilidad, para lo cual es considerado el uso de micro-hidroeléctricas por ser éstas económicas y accesibles.

El aprovechamiento del recurso hídrico, para la generación de energía en menor escala, a través de la conversión de energía mecánica a energía eléctrica, se conoce como micro-hidroeléctrica. Estas pueden ser: micro-hidroeléctricas de pies de presa, micro-hidroeléctricas integradas en un canal de riego y micro-hidroeléctricas en sistemas de alimentación de agua potable. Todas presentan las mismas ventajas económicas y de construcción.

La investigación y desarrollo de material didáctico con ejemplos de aplicación, para la construcción de obra civil de micro-hidroeléctricas, representa una importante herramienta para el profesional de ingeniería civil proporcionando procedimientos y criterios para su diseño y construcción.

Las micro-hidroeléctricas pueden contribuir en una buena parte al desarrollo de las poblaciones rurales, para que éstas gocen de un servicio energético, tanto corto, mediano como a largo plazo. Como una forma de provisión energía eléctrica a bajo costo

GLOSARIO

Abrasión: Es el desgaste causado a una roca por la acción mecánica del agua cargada por partículas procedente de la acumulación de fragmentos de rocas.

Aforo: Es la medida del caudal que pasa por una sección en un momento determinado.

Arroyo: Es una corriente natural de agua que normalmente fluye con continuidad, pero que, a diferencia de un río, tiene escaso caudal, que puede desaparecer durante el verano.

Cartografía: Es la ciencia que estudia la disciplina que integra ciencia, técnica y arte, que trata de la representación de la tierra sobre un mapa.

Caudal ecológico: Es el agua necesaria para preservar valores ecológicos como: flora, fauna, paisajes, etc.

Desfogue: Acción y efecto de dar a salida a la corriente de agua.

- Diques:** Es un terraplén natural o artificial, por lo general de tierra, paralelo al curso del río.
- Disipación:** Desvanecimiento de la energía cinética del agua.
- Efecto invernadero:** Fenómeno por el que determinados gases como el dióxido de carbono y el metano, que son componente de la atmósfera, retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar.
- Erosión:** Es el proceso de sustracción de roca al suelo intacto, generalmente por acción de corrientes superficiales de agua o viento, por cambios de temperatura o por gravedad.
- Estiaje:** Es el nivel del caudal mínimo que alcanza un río o laguna en algunas épocas del año, debido principalmente a la sequía.
- Estratigrafía:** Es la rama de la geología que trata del estudio e interpretación de las rocas sedimentarias estratificadas, y de la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal; cartografía y

correlación de las unidades estratificadas de rocas.

Factibilidad: Determina la disponibilidad de todos los recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto.

Fricción: Fuerza de rozamiento entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al móvil de una superficie sobre la otra o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento.

Geomorfología: Es la ciencia que tiene por objeto la descripción y la explicación del relieve terrestre, continental y submarino de la tierra.

Geotecnia: Ciencia que tiene por objeto permitir la viabilidad de todas las obras de ingeniería en que se presenta una interacción entre la obra misma y el suelo.

Junta de dilatación: Es un espacio que queda libre entre dos elementos de construcción permitiendo en ellos un movimiento relativo.

- Renovable:** Es la energía que se obtiene de fuentes naturales inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.
- Represamiento:** Es la retención de agua por medio de una presa.
- Revestimiento:** Elemento constructivo portante que recubre la estructura, sus funciones principales son las de aislamiento (térmico y acústico) y la ornamental.
- Rugosidad:** Es función del material con que están construidas las paredes de los canales y tuberías.
- Sifón:** Es un tubo en forma de "U" invertida, con uno de sus extremos sumergidos en un líquido, que asciende por el tubo a mayor altura que su superficie, desaguando por el otro extremo.
- Suspensión:** Es cuando existen partículas mayores que las de una mezcla homogénea, lo que permite observarlas a simple vista.

Terraplenes: Muro macizo de tierra con que se rellena un hueco, o que se levanta para hacer una defensa, permite salvar la zanja que separa la tierra del camino.

Viscosidad: Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Es la medida de la resistencia del fluido a derramarse o fluir por el interior de un conducto.

OBJETIVOS

General:

Proyectar e impulsar a las instituciones públicas, privadas, y personas particulares, al desarrollo de las micro-hidroeléctricas, para el progreso y mejora de la electrificación del país.

Específicos:

1. Orientar a los profesionales de ingeniería civil y personas que tengan conocimiento de obras civiles, en la construcción de una micro-hidroeléctrica.
2. Proporcionar procedimientos y criterios para el diseño de una micro-hidroeléctrica.
3. Describir las partes que componen una micro-hidroeléctrica, respecto de la obra civil.
4. Desarrollar un ejemplo de aplicación de la guía, para la aldea Los Laureles, municipio de Santiago Sacatepéquez, departamento de Sacatepéquez.

INTRODUCCIÓN

La función de una micro-hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua de un cauce y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica.

El desarrollo de las micro-hidroeléctricas juega un papel importante en el abaratamiento de los costos y accesibilidad a las fuentes de energía, así como en la sustitución de los combustibles fósiles debido a sus altos costos.

Aunque el desarrollo de una micro-hidroeléctrica requiere costos de inversión inicial relativamente elevados, comparadas con las plantas térmicas de igual capacidad, se ha demostrado que a largo plazo las micro plantas hidroeléctricas son económicas respecto al consumo, con una mayor vida útil, sin estar sujetas a los incrementos en los precios de combustibles y mantenimiento durante su operación.

En ocasiones, se hace necesario el empleo de la electricidad en zonas muy remotas, pero aledañas a ríos, las Micro-Hydropower o denominadas también micro-hidroeléctricas; tienen capacidad de generación que se encuentra entre el rango de los 15 kilowatt a los 100 kilowatt. Éstas requieren de muy poco o casi nulo represamiento de las aguas, además de turbinas de muy bajo tamaño y sobre todo, un costo despreciable de la línea de transmisión.

1. MICRO-HIDROELÉCTRICAS

La función principal de una micro-hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica.

Los beneficios medioambientales derivados de las instalaciones de una micro-hidroeléctrica son considerables: pueden proporcionar energía eléctrica a zonas que de otra manera estarían aisladas o alcanzables solo con obras de mayor impacto medioambiental; permiten realizar una política de distribución sobre el territorio de la producción de energía eléctrica; utilizan el recurso agua de manera equilibrada y controlada por las comunidades interesadas; ayudan a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y además no producen emisiones de gas con efecto invernadero, ni otras sustancias contaminantes.

Las instalaciones hidroeléctricas de pequeño tamaño representan una importante fuente energética renovable que pueden contribuir activamente al desarrollo sostenible del territorio en el que se construyen.

“Durante el proceso de análisis, predimensionamiento, cálculo, diseño y ejecución del proyecto para una micro-hidroeléctrica, el componente denominado Obra Civil, normalmente absorbe entre el 15 al 20 % de la inversión total necesaria. En algunos países las inversiones en una micro-hidroeléctrica normalmente fluctúan entre los 1600 a 2000 US\$ por [kW] instalado; por tanto, este componente para una micro-hidroeléctrica de 50 [kW] costaría entre los 12000 a 20000 US\$. Es posible igualmente, que este costo pueda ser significativamente reducido si el beneficiario, que en la mayoría de los casos es una comunidad campesina o población del medio rural, participa activamente en su ejecución mediante el aporte de su mano de obra y algunos materiales locales. En estas circunstancias los costos de la Obra Civil, para el mismo caso, estarían fluctuando entre los 10.000 a 15.000 US\$. “¹

Ventajas de las micro-hidroeléctricas:

- a. No requieren combustible, ya que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.
- b. Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
- c. A menudo puede combinarse con otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, y aún ornamentación del terreno y turismo.
- d. Los costos de mantenimiento y explotación comparativamente son bajos.
- e. Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable de 50 años y algunas

¹ Suárez, Carlos. PROMIHDEC. Perú. Cálculos y diseños hidráulicos-estructurales en micro centrales hidroeléctricas, www.Micro-Hidroeléctricas.com

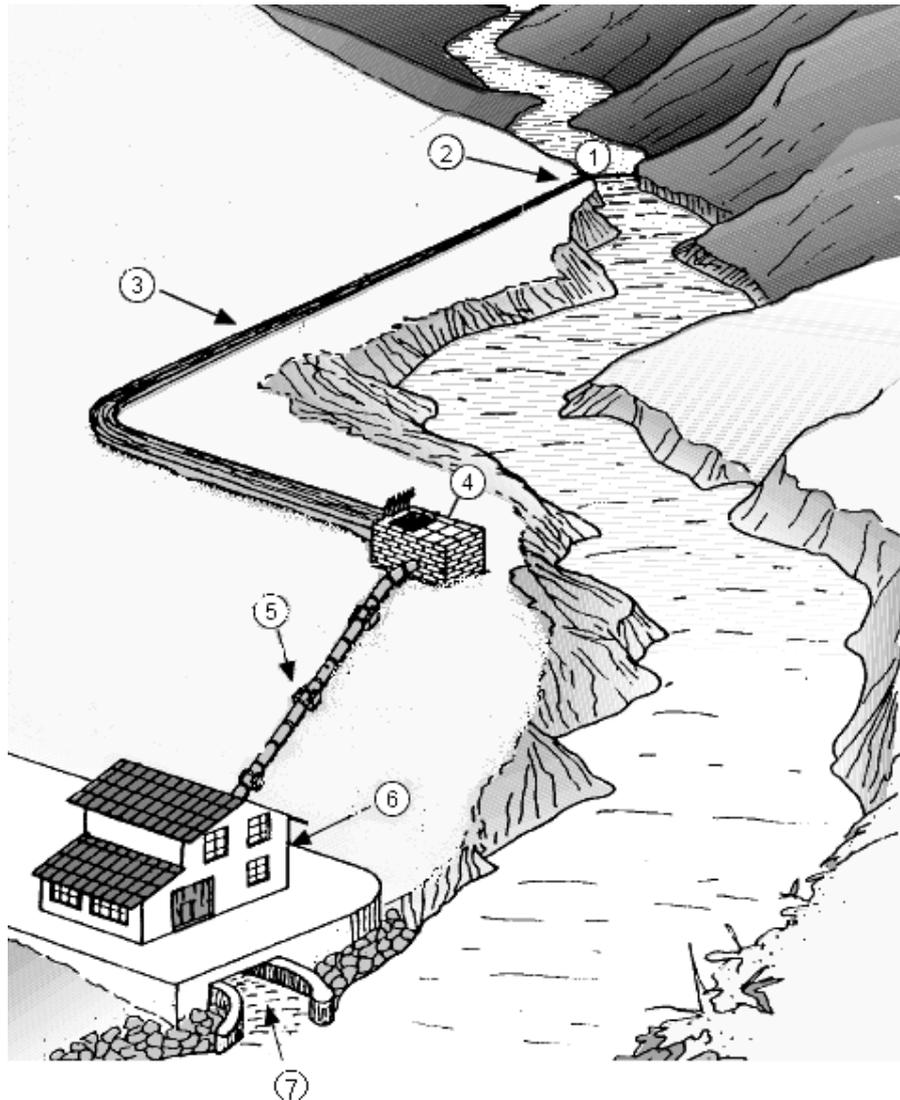
como la hidroeléctrica de Palín funciona alrededor de los 100 años.

- f. La turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia siendo sus costos de mantenimiento, por lo general, reducidos.

Desventajas de las micro-hidroeléctricas:

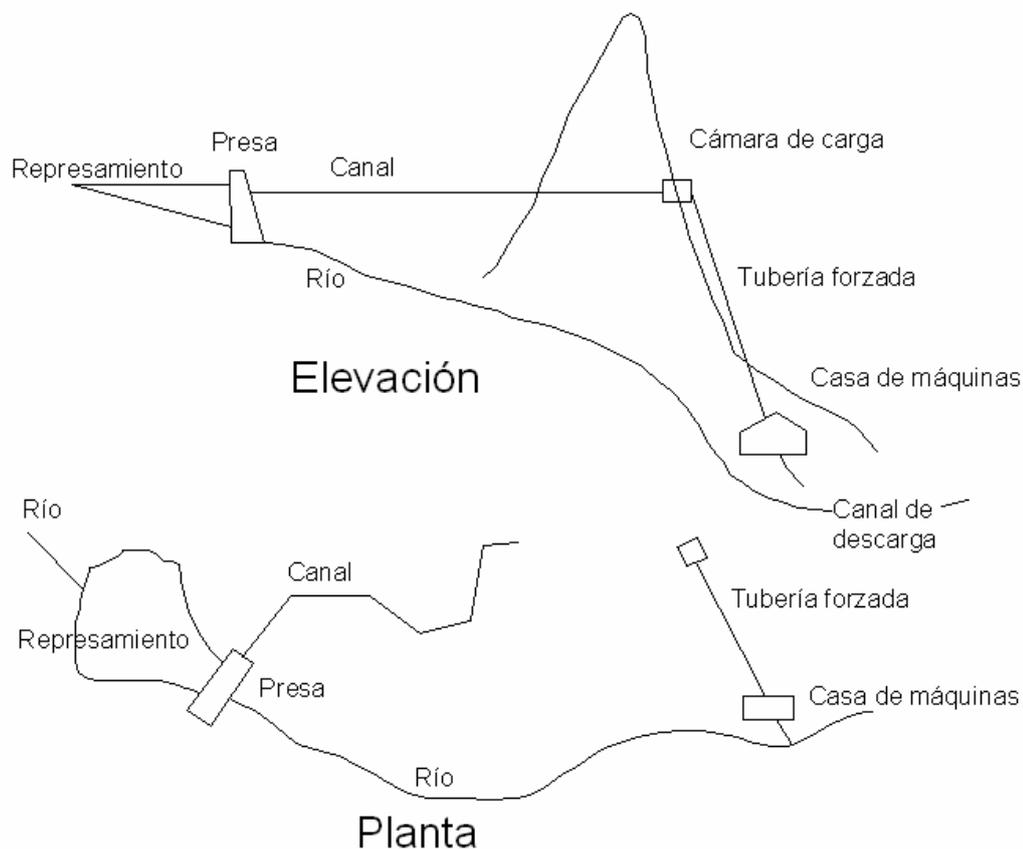
- g. Los costos de capital por kilowatt instalado son con frecuencia muy altos.
- h. El emplazamiento, determinado por características naturales, puede estar lejos del centro o centros de consumo y exigir la construcción de un sistema de transmisión de electricidad, lo que significa un aumento de la inversión y en los costos de mantenimiento y pérdida de energía.
- i. La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
- j. La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.

Figura 1. Ejemplo de una micro-hidroeléctrica.
1. Presa, 2. Toma de agua, 3. Canal de derivación, 4. Desarenador
5. Tubería forzada, 6. Casa de máquinas 7. Canal de descarga.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 63.

Figura 2. Aprovechamiento de montaña



**Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrais Hidroelétricas
Ministerio de minas y energía, página 16.**

1.1 Definición de pequeños aprovechamientos

El objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en un punto más alto a otro punto más bajo, donde se ubica la casa de máquinas. La potencia eléctrica que se obtiene en un aprovechamiento es proporcional al caudal utilizado y a la altura de salto.

De acuerdo con la altura de salto los aprovechamientos pueden clasificarse en:

- De alta caída: altura de salto de más de 150m.
- De media caída: altura de salto entre 50 y 150m.
- De baja caída: altura de salto entre 2 y 20m.

Otra clasificación en función del tipo de micro-hidroeléctrica sería de:

- Aprovechamiento de agua fluyente.
- Micro-hidroeléctricas a pie de presa con regulación propia.
- Micro-hidroeléctricas en canal de riego o tubería de abastecimiento de agua.

1.2 Opciones técnicas

1.2.1 Aprovechamientos de agua fluyente

Son aquellos aprovechamientos que no disponen de una presa reguladora importante, de modo que la micro-hidroeléctrica trabaja mientras el caudal que circula por el cauce del río es superior al mínimo técnico de las turbinas instaladas, y deja de funcionar cuando desciende por debajo de ese valor.

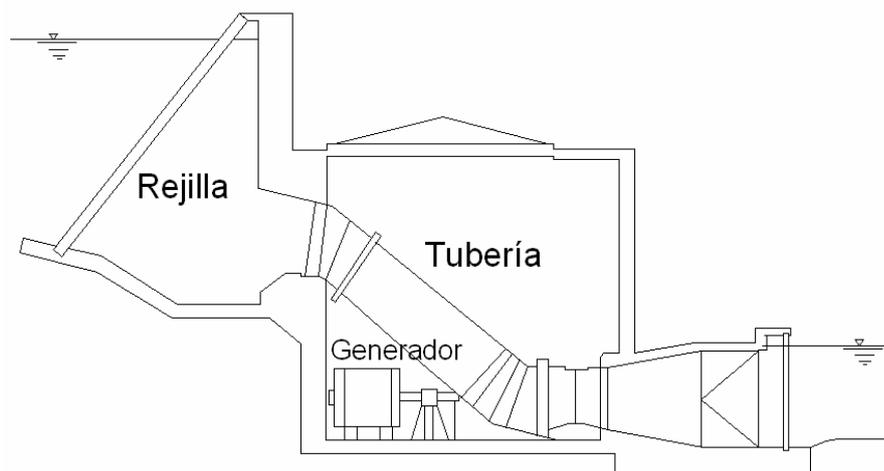
En algunos casos, se maneja un volumen de agua horaria para tener una operación confiable.

Los aprovechamientos de baja altura son esquemas típicos de valle, que admiten dos soluciones:

1. Una obra de toma que funcione también como cámara de compensación adicionada a una tubería de presión de longitud muy corta para ubicar las turbinas y generadores (Fig. 3).
2. Si la topografía permite la construcción de una presa que promueva la altura de salto sin o con compuerta ésta presa contará con vertederos.

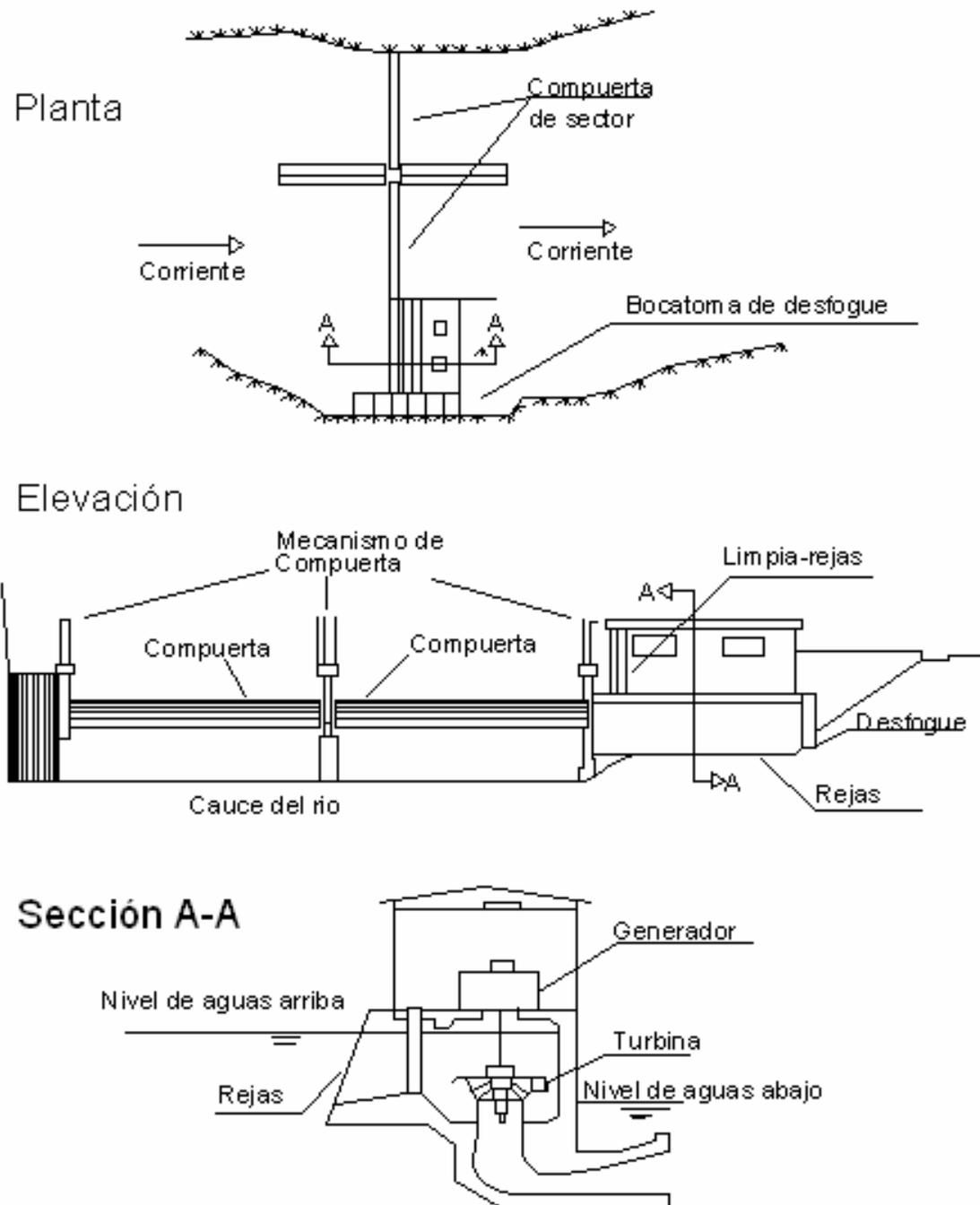
En este tipo de micro-hidroeléctrica, la presa, la toma de agua y la casa de máquinas, con sus obras de desfogue (generalmente un canal) forman una estructura única (Fig. 4).

Figura 3. Representación de una toma



**Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrais Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 17.**

Figura 4. Presa de compuertas y casa de máquinas integradas



Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrais Hidroelétricas
Ministerio de minas y energía, página 18.

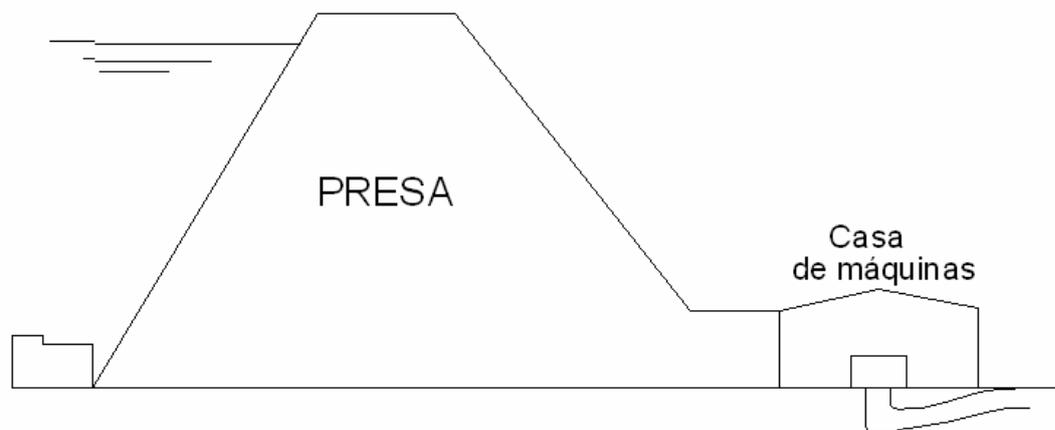
1.2.2 Micro-hidroeléctricas de pie de presa

La existencia de una presa permite independizar, dentro de ciertos límites, la producción de electricidad del caudal natural del río que lo alimenta. Un pequeño aprovechamiento hidroeléctrico es raramente compatible con una gran presa, dado el elevado costo de la presa y sus instalaciones anexas. No obstante, si existen presas construidas para otros usos como la regulación de caudal, protección contra corriente, se puede generar electricidad con los caudales excedentes.

La micro-hidroeléctrica suele situarse a pie de presa cuando es alimentada por un conducto existente en el fondo (véase figura 5), o por un sifón en caso de que no existiese ninguna toma de agua.

En último caso, la tubería forzada pasa sobre el borde superior de la presa sin afectar a su estructura. La altura de salto será equivalente en cualquier caso a la altura de la presa. El caudal circulante puede oscilar entre menos de $1\text{m}^3/\text{s}$ y $5\text{m}^3/\text{s}$.

Figura 5. Micro-hidroeléctrica de pie de presa con conducto existe



**Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 19.**

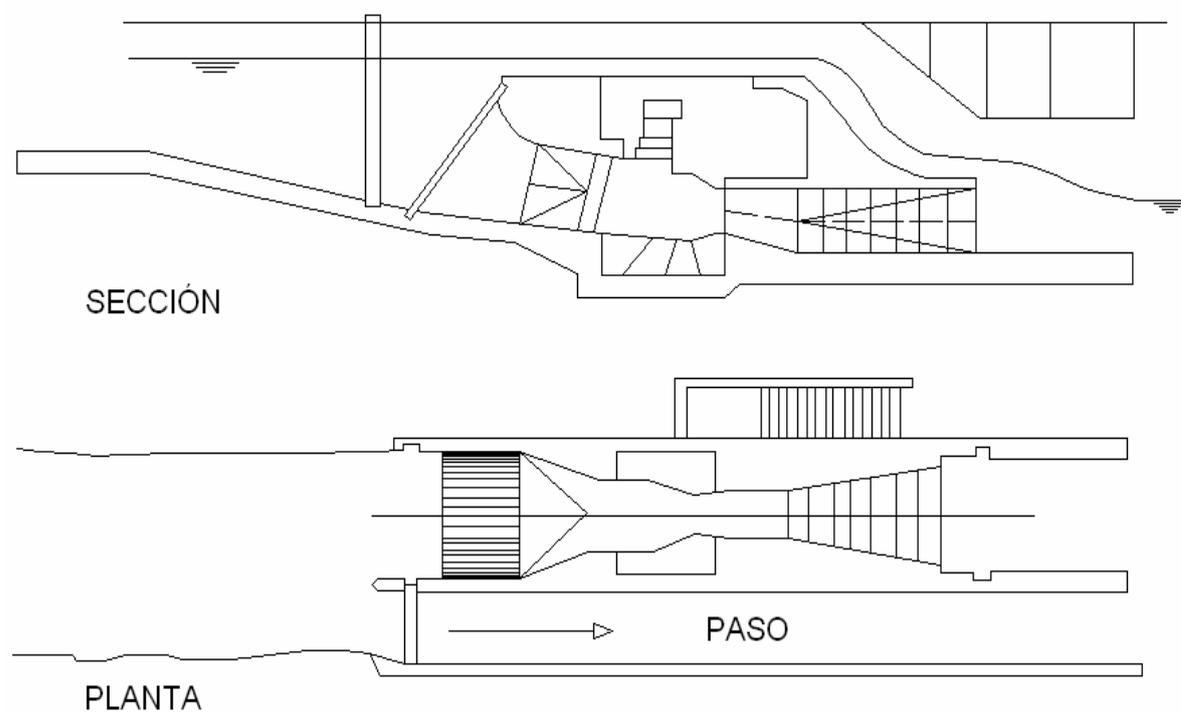
1.2.3 Micro-hidroeléctricas integradas en un canal de riego

Es factible instalar una micro-hidroeléctrica aprovechando un canal de introducción, ya sea agrandado el canal, para poder instalar en él la toma de agua, la micro-hidroeléctrica y el canal de descarga, o construir una toma lateral, que alimente una tubería forzada.

Si la altura de salto es aproximadamente de 6m, puede construirse en el cauce del canal una estructura como lo indica la figura 3, o una micro-hidroeléctrica sumergida, como la que se muestra en la figura 6.

Es necesario prever una válvula de paso en caso de cierre brusco de la turbina (véase la figura 6).

Figura 6. Micro-hidroeléctrica sumergida en un canal



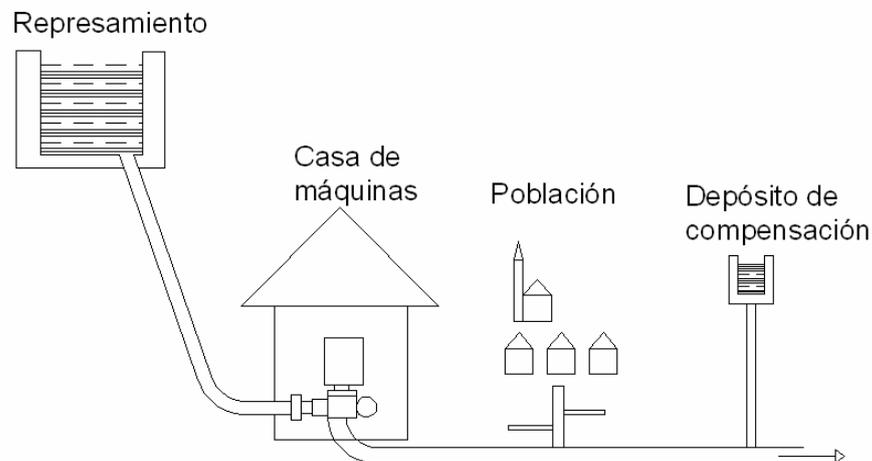
**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 20.**

1.2.4 Micro-hidroeléctricas en sistemas de alimentación de agua potable

La conducción de agua potable a una ciudad se suele plantear como una tubería a presión que conduce el agua desde una presa a la planta de tratamiento, en cuya entrada, un sistema de válvulas especialmente creadas, se encargan de disipar la energía hidrostática. Existe la posibilidad de sustituir estas válvulas de disipación por una turbina que convierta esa energía disipada, en energía eléctrica utilizable. Esta solución lleva a la utilización de una o varias válvulas de paso, para garantizar la continuidad de abastecimiento de agua en caso de parada de la turbina.

En ocasiones estos aprovechamientos trabajan en contrapresión. Así como en un aprovechamiento convencional, el agua cuando sale de la turbina está a la presión atmosférica, en este momento está sujeta a la contrapresión de la red o de la planta de tratamiento. La figura 7 muestra esquemáticamente la configuración de una micro-hidroeléctrica de este tipo que exige un sistema de regulación.

Figura 7. Micro-hidroeléctrica en una red de agua potable



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 23.**

1.3 Planificación y evaluación de un aprovechamiento

El estudio de un aprovechamiento constituye un proceso complejo e iterativo, durante el cual, se comparan desde una óptica económica, pero sin perder de vista su impacto ambiental, los diferentes esquemas tecnológicos posibles, para terminar escogiendo el que más ventajas ofrece.

Las posibles soluciones tecnológicas vienen condicionadas por la topografía del terreno y por la sensibilidad ambiental de la zona. Así pues, aunque es difícil elaborar una guía metodológica para la evaluación de un aprovechamiento, sí se pueden indicar los pasos fundamentales que hay que seguir, antes de proceder o no a un estudio de factibilidad.

Pasos fundamentales a seguir son:

- Identificación topográfica del lugar y sus características geológicas.
- Evaluación de los recursos hidráulicos, para calcular la producción de energía.
- Definición del aprovechamiento y evaluación preliminar de su costo.
- Evaluación del impacto ambiental y estudio de las medidas supervisoras.
- Posibilidades de financiación y estudio económico del aprovechamiento.
- Conocimiento de los requisitos institucionales y de los procedimientos administrativos para su autorización.

Para estudiar la viabilidad de un aprovechamiento es necesario comenzar por evaluar su potencial energético, que es una función del caudal que pasa por la turbina y de la altura de salto disponible.

2. COMPONENTES DE OBRA CIVIL: ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

2.1 Estructuras de retención y derivación

2.1.1 Presa

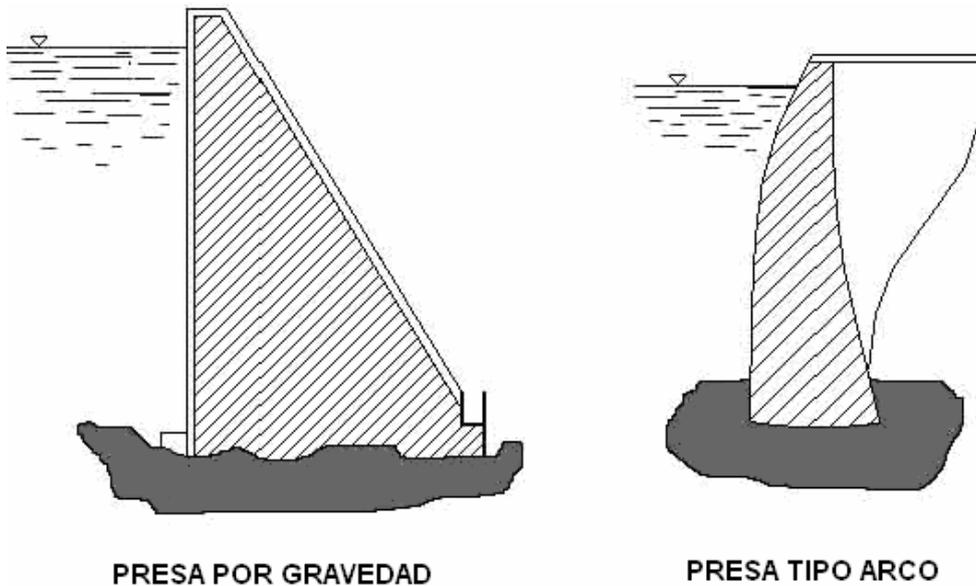
Es el primer elemento que se encontrará en un aprovechamiento hidroeléctrico, la cual se encarga de contener el río, incrementar la altura de salto, retener sedimentos que traen el flujo o el río y almacenamiento de agua para lograr la regulación o para poder generar en épocas de bajo caudal.

Con esta construcción se logra un determinado nivel del agua antes de la contención, y otro nivel diferente después de la misma. Ese desnivel se aprovecha para producir energía.

Las presas pueden clasificarse por el material empleado en su construcción en:

1. Presa de tierra
2. Presa de concreto: son las más utilizadas y se pueden a su vez clasificar en:
 - Gravedad: tiene un peso adecuado para contrarrestar el momento de volteo que produce el agua.
 - Arco: necesita menos materiales que las de gravedad. En éstas la presión provocada por el agua se transmite completamente a las bajadas por el efecto de arco. Ver Fig. 8.

Figura 8. Presas de concreto



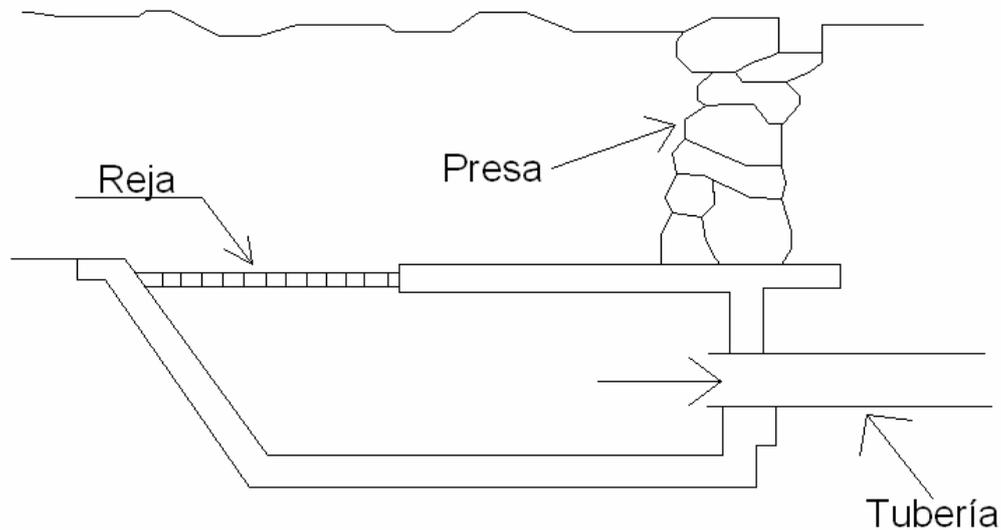
La presa es un componente fundamental de los aprovechamientos hidráulicos convencionales, en los que se utiliza para elevar el nivel de la lámina de agua y/o para crear una retención donde almacenarla.

La gran mayoría de los pequeños aprovechamientos son llamados aguas afluentes, en los que la electricidad se genera mientras fluye el agua por el cauce, y dejan de hacerlo cuando el caudal es inferior al mínimo técnico de las turbinas que lo equipan. En estos aprovechamientos, se levanta en el cauce una estructura que permita desviar un cierto caudal para conducirlo a la casa de máquinas.

En su versión más elemental esta estructura es un simple obstáculo, capaz de retener el agua, para derivar el caudal deseado y sobre el que continúa pasando agua.

Las presas deben construirse preferentemente sobre suelo rocoso; en su versión más simple consisten en un muro que tenga más de un metro de altura, construido con rocas sueltas (Fig. 9).

Figura 9. Detalle de presa y reja.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 89.

Las presas que sean más anchas se deben construir con materiales como: arcillas finas hasta rocas alteradas fácilmente compactables, etc., con un sistema de drenaje aguas abajo, y una protección mecánica aguas arriba. Cuando los materiales que se disponen no garantizan la impermeabilidad, habrá que construir un núcleo central de impermeabilización.

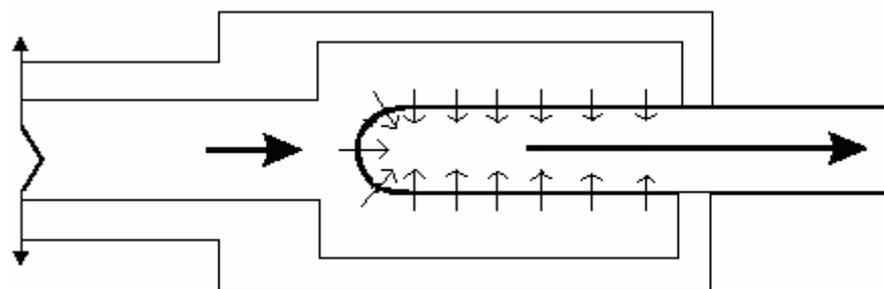
2.1.2 Vertederos

Los vertederos son elementos vitales de la presa que tienen como misión liberar parte del agua retenida sin que ésta pase por la casa de máquinas. Se encuentran en la pared principal de la presa y pueden ser de fondo o de superficie.

En todos los vertederos, donde los períodos de estiaje son súbitamente seguidos por fuertes corrientes, es necesario incorporar a la presa un vertedero para que el exceso de agua pueda pasar sin producir daños sobre la parte superior de la presa, ya que suelen disponer en su base de algún medio para disipar la energía de la corriente.

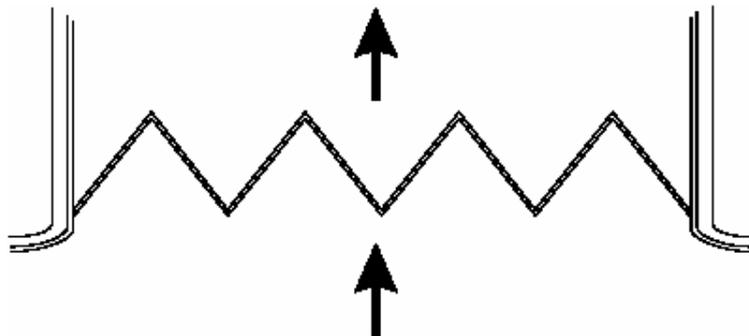
En ocasiones, el espacio disponible para ubicar el vertedero viene limitado por consideraciones topográficas. En esos casos suele recurrirse a los vertederos en pico de pato (Fig. 10) o de laberinto (Fig. 11).

Figura 10. Vertedero de pico de pato



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 114.**

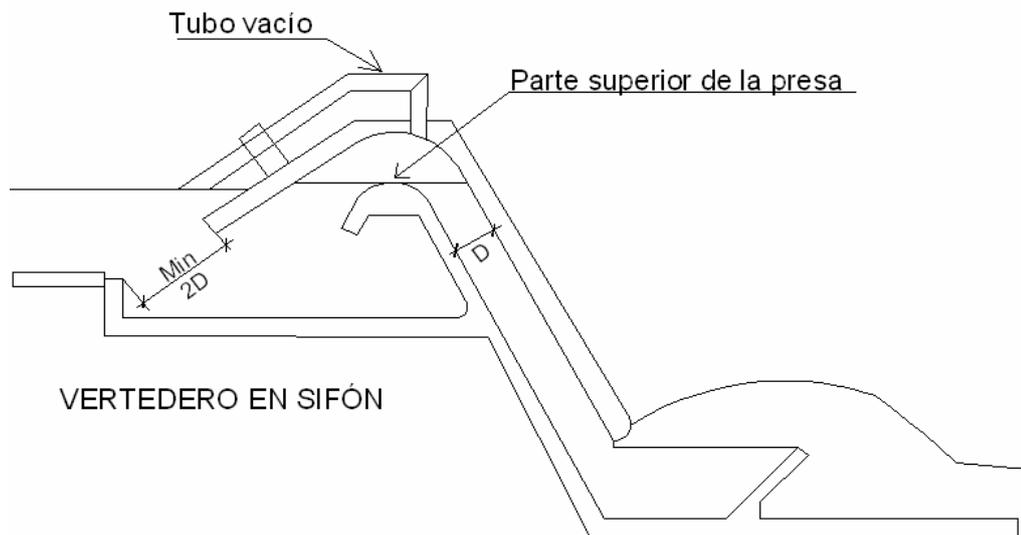
Figura 11. Vertedero en Laberinto



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 114.**

Cuando no se dispone de espacio para construir un vertedero convencional se puede acudir a un vertedero en sifón o a un vertedero en pozo, ambas soluciones son muy eficaces para mantener, entre límites muy estrechos, el nivel del agua arriba de la presa. Un vertedero en sifón es básicamente un conducto cerrado, de perfil curvo, como lo muestra la figura 12.

Figura 12. Vertedero en sifón.



**Fuente: Centras Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 115.**

2.1.3 Desviación del río durante la construcción de la presa o el azud

A veces, sobre todo en micro-hidroeléctricas, las obras de derivación pueden realizarse durante la época de estiaje, pero si no es así habra que construir los terraplenes necesarios para desviar temporalmente el cauce del río. Estos terraplenes pueden construirse con la ayuda de:

- Gaviones con protección de geotextil en las paredes aguas arriba.
- Diques de tierra con protección.
- Azudes hinchables.
- Tablestacas de acero.

2.1.4 Rejillas

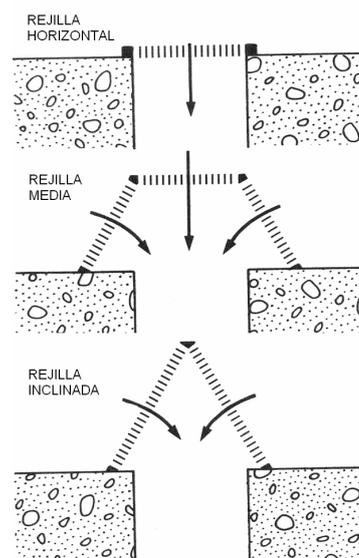
Son las que previenen generalmente el paso de los restos flotantes para que no puedan producir desperfectos en las conducciones hidráulicas.

Las rejillas son muy útiles, porque retienen los restos flotantes sin obstruir el flujo por debajo de la superficie del agua, reducen el ondaje, que producen los sólidos en el momento de caer al agua.

Las rejillas se deben colocar:

- En los bocatomas
- Antes de la cámara de compensación
- Antes del canal de derivación

Figura 13. Tipos de rejillas.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 163.

2.2 Conducciones hidráulicas

2.2.1 Bocatoma o toma de agua

Son construcciones adecuadas que permiten recoger el líquido para llevarlo hasta el desarenador por medio de canales o tuberías y luego hacia la casa de máquinas. Estas obras son muy variadas, según los requerimientos y tipos de presas.

Por medio de la bocatoma se capta el agua necesaria para el funcionamiento de los equipos transformadores de la energía hidráulica. Ésta se diseñará para las condiciones de máxima corriente probable del recurso hídrico y su proceso constructivo deberá desarrollarse de preferencia en períodos de estiaje o ausencia de lluvias. Ubicarlas preferentemente en zonas estables del cauce del río, que disminuya la posibilidad de arenas o sedimentos a la entrada de la rejilla. Es conveniente que en las zonas de instalación, la pendiente promedio del río sea entre 3 a 10 %, de modo que esas posibilidades se vean minimizadas.

2.2.1.1 Tipos de tomas de agua

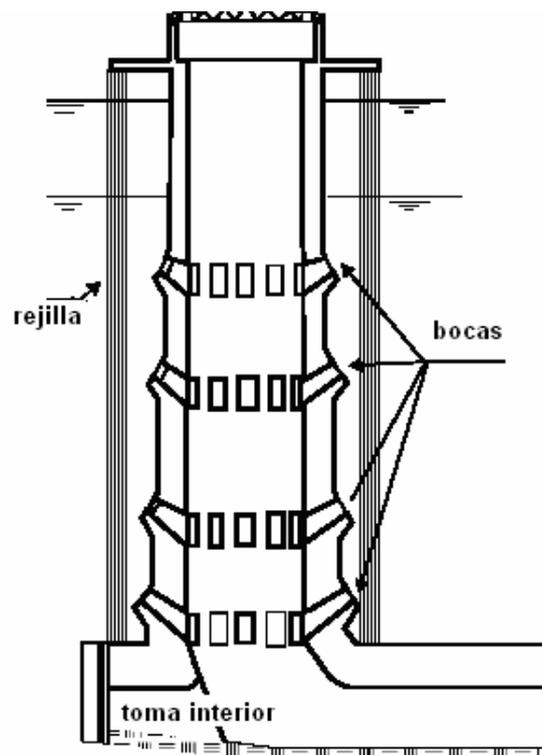
Lo primero que hay que hacer es identificar el tipo de toma de agua que necesita el aprovechamiento.

Existen una gran variedad de tomas, éstas pueden clasificarse con los siguientes criterios:

- La toma de agua alimenta directamente a la tubería forzada. Se conoce como cámara de carga, aunque este término suele reservarse para cuando está situada al final del canal de derivación.
- La toma de agua alimenta una conducción de agua a presión atmosférica: canal, túnel, canaletas, etc., que termina en una cámara de carga.
- No utiliza el aprovechamiento para desviar el agua con una estructura de derivación tipo azud, sino que emplea otro tipo de estructuras como las tomas de sifón o las de montaña.
- En las presas multiuso construidas para cultivos, suministro de agua potable, regulación de crecidas, etc., la toma de agua puede construirse en forma de torre, con tomas a distinto nivel (Fig.

14) para poder extraer el agua a distintas alturas e igualmente a distintas temperaturas, o utilizando un desagüe de fondo.

Figura 14. Toma en forma de torre.

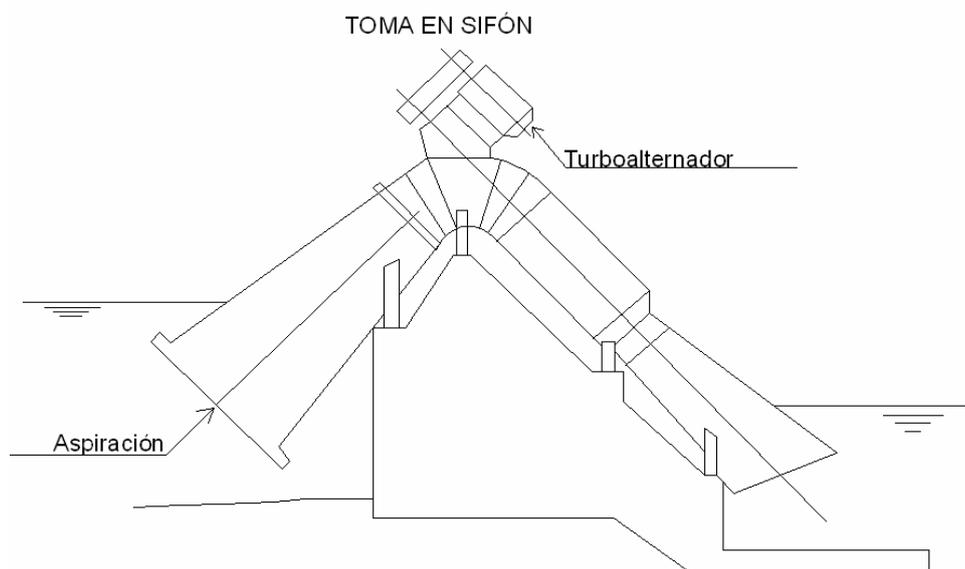


Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 116.

a) **La toma en sifón:** en el supuesto de que exista una toma por turbina (Fig. 15). No requiere de una compuerta, ni una entrada de toma en la turbina, lo que reduce el costo global en un 25% a 40%. Por su disposición resulta también menos propensa a dejar entrar

sedimentos. El sifón suele ser de acero, pero si es difícil adquirir este material, se puede construir en concreto, revistiendo de acero solamente la zona de la parte superior de la presa.

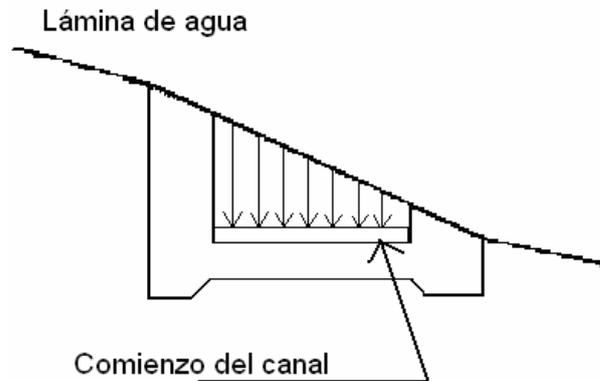
Figura 15. Toma en sifón.



**Fuente: Centráis Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 118.**

b) Las tomas de montaña: (Fig. 16) constan de un canal, excavado transversalmente en el fondo del cauce y cubierto por una rejilla inclinada, con una pendiente muy pronunciada. Las barras de la rejilla se orientan paralelamente a la corriente.

Figura 16. Tomas en montañas.



**Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 119.**

2.2.1.2 Ubicación de la toma de agua

Una vez decidido el tipo de toma de agua a utilizar hay que ubicarla correctamente en el curso de agua, para lo que habrá que tener en cuenta factores geológicos, tipo de residuos que arrastra el río, etc.

La orientación de la entrada con respecto a la dirección de la corriente es crítica. De como esté la orientación dependerá como se acumulen los elementos dañinos tales como vegetales o minerales delante de la rejilla, lo que puede originar muchas obstrucciones y elevados costos de mantenimiento. La toma de agua no debe ubicarse en una zona muerta, alejada del vertedero.

En la toma de agua se debe incorporar una rejilla para impedir la entrada de elementos nocivos, una compuerta para poder aislar las estructuras situadas aguas abajo, una plataforma de limpieza para eliminar los sedimentos y un vertedero para verter el exceso de agua si lo hubiera.

2.2.2 Canal de derivación

El canal de derivación se utiliza para conducir agua desde la presa hasta las turbinas de la casa de máquinas. Generalmente es necesario hacer la entrada a las turbinas con tubería forzada siendo por ello preciso que exista una cámara de presión donde termina el canal y comienza la turbina. Es bastante normal evitar el canal y aplicar directamente las tuberías forzadas a las tomas de agua de las presas.

El canal de derivación permite conducir de manera segura y permanente el caudal requerido por las turbinas alojadas en la casa de máquinas y deberá ser diseñado para las condiciones de máxima potencia probable de tales equipos. En microhidroeléctricas de 50 a 100 kilowatt, es suficiente considerar canales en tierra, dependiendo de la pendiente y posibilidades geológicas y topográficas de los terrenos que éste deba atravesar.

2.2.3 Cámara de carga y desarenador

El desarenador y la cámara de carga (o tanque de presión) son dos estructuras que normalmente se construyen adyacentes a través de las cuales se pueden eliminar por precipitación la mayor proporción de material fino y en suspensión que contiene el recurso hídrico, y al mismo tiempo lograr que la tubería forzada trabaje a sección llena, evitando acciones de sobre presión o cavitación. Normalmente se construyen de concreto armado y semienterrado y sus características geométricas están influenciadas por el caudal de diseño de la micro-hidroeléctrica y por la velocidad de sedimentación de las partículas en arrastre, principalmente.

Deberá considerarse la velocidad de ingreso y recorrido del agua, como máximo hasta 0.25m/s. El diámetro del grano límite será asumido como 0.2mm y hasta un máximo de 0.05mm. El espesor de muros deberá ser como máximo de 0.20m.

La cámara de carga se ubica al final del canal hidráulico, aunque en algunos casos puede coincidir con la toma de agua en la cuesta del río. Su diseño, al tener que alimentar directamente la tubería forzada, es más crítico que el de las tomas de aguas convencionales.

En los pequeños aprovechamientos, aun en aquellos con gran altura de salto, la tubería forzada suele salir de la cámara de carga horizontalmente, mediante un codo de transición para seguir luego la pendiente. Solo en las tomas de agua de las centrales de bombeo, o en las pocas ocasiones en las que el agua se toma de un lago natural, la tubería se instala en forma vertical. El diseño de la toma varía según se trate de aprovechamientos de bajo o de alto salto.

En una cámara de carga hay que diferenciar los siguientes componentes:

- El perfil aguas arriba de la compuerta, tanto en lo que se refiere a las paredes laterales, como a la solera y al techo.
- La transición de una sección rectangular, en la rejilla, a otra circular en la tubería forzada.
- Los equipos mecánicos: rejillas y compuertas.
- El conducto de ventilación.

El perfil de transición influencia decisivamente en la eficacia de la cámara. La velocidad de corriente varía entre los 0.8 - 1.0 m/seg en la entrada de la rejilla, hasta los 3 - 5 m/seg en la tubería forzada. Un buen perfil es el que acelera uniformemente la corriente. Una aceleración o deceleración brusca da lugar a pérdidas de carga adicionales.

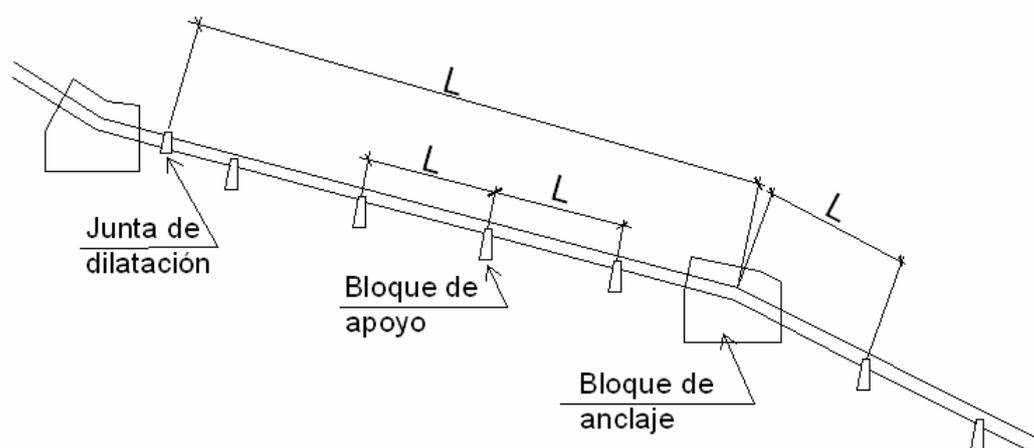
2.2.4 Tubería forzada

Es la encargada de transportar un cierto caudal de agua desde la cámara de carga hasta la casa de máquinas. Las tuberías forzadas pueden instalarse sobre o bajo el terreno, según sea la naturaleza de éste, el material utilizado para la tubería, la temperatura ambiente y las exigencias medioambientales del entorno.

Para enterrar una tubería forzada de acero, previamente hay que pintarla y protegerla exteriormente, mediante una cinta enrollada que garantice su resistencia a la corrosión. Si se hace así y la cinta no sufre daños durante el montaje, la tubería no necesitará ningún mantenimiento posterior. En general las tuberías forzadas en acero, se piensan como una serie de tramos rectos, simplemente apoyados en unos pilares, y anclados sólidamente en cada cambio de dirección así también en sus extremidades, que en general coinciden con cambios de dirección. Entre cada dos anclajes consecutivos se intercala una junta de dilatación. Los anillos de soporte se diseñan basándose en el comportamiento elástico de los cilindros de débil espesor. La pared del tubo debe resistir las tensiones combinadas, correspondientes a su trabajo como viga y como recipiente cilíndrico sometido a presión interna. Las reacciones sobre los apoyos, propias de una viga continua, se transmiten, por esfuerzo cortante, entre placa y anillo. Para ello los anillos se sueldan a la placa con soldaduras continuas en rincón, y se rigidizan mediante diafragmas.

El acero, a medida que disminuye la altura de salto, va resultando menos competitivo, porque el espesor requerido para compensar la corrosión, interna y externa, no disminuye con el espesor de pared, y porque se necesita un espesor mínimo para poder manipular los tubos en obra sin que se deformen. Para diámetros más pequeños existen varias opciones: tubo de acero estirado, con empalmes y cordón y anillos de cierre, o con bridas (elementos de fijación de tuberías) soldadas; tuberías de hormigón, centrifugadas o pretensadas y tuberías de cemento. Los tubos con juntas y cordón, construidos en acero, fundición dúctil, con empaquetaduras flexibles no necesitan juntas de dilatación, ya que éstas absorben los pequeños movimientos longitudinales.

Figura 17. Tubería forzada.



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 143.**

2.2.5 La casa de máquinas y fundamentos de equipos

La casa de máquinas (o casa de fuerza) se puede considerar como el corazón de la micro-hidroeléctrica. En ella se alojará prácticamente todo el equipamiento electromecánico que conforma el proyecto y dependiendo de las características y dimensiones de los mismos se tendrán establecidas la estructuración y arquitectura de aquella.

Complementos fundamentales de la casa de máquinas son la ubicación y concepción de los fundamentos o apoyos del equipamiento (turbina, generador, regulador, etc.) para los cuales el dimensionamiento debe ser el más exacto posible que facilite el proceso de montaje de aquellos.

Es práctica frecuente y recomendable que la ubicación y la colocación para la casa de máquinas, se determine muy cercana al lugar de descarga de las aguas turbinadas, por tanto, es importante saber la capacidad soporte del suelo y de la cimentación en zonas muy cercanas a quebradas o cauces de ríos.

2.2.6 Canal de descarga

El canal de descarga es el último componente de la obra civil, y cuya característica más importante es la de servir de desfogue o conducción de las aguas que pasan por las turbinas hacia el punto de descarga, que por lo general es el mismo cauce del recurso utilizado como fuente energética para la micro-hidroeléctrica.

Después de pasar por la turbina, el agua tiene que ser devuelta al río a través de un canal, generalmente corto, conocido como canal de descarga. Las turbinas de acción pueden llegar a tener velocidades de salida muy elevadas, por lo que habrá que proteger el canal para que la erosión no ponga en peligro la casa de maquinas. Normalmente se colocan, entre la turbina y el canal, unos escudos de hormigón o una protección de tierra paralelo, al curso del río. Hay que prever también que, incluso en los períodos de grandes crecidas, el nivel del agua en el canal nunca llegue al rodete de la turbina.

Se puede establecer una estandarización de dimensiones de largo de acuerdo a rangos de potencias. Por ejemplo:

POTENCIA

de 5 a 30 kW:	3.00m a 4.50m
de 30 a 60 kW:	4.00m a 6.00m
de 60 a 100 kW:	4.50 m a 7.50m

3. PLAN Y DETALLE DE LA CONSTRUCCIÓN

3.1 Presas

Las presas son más que los vertederos grandes. Aunque las presas y los vertederos pueden tener las mismas características como la protección de la erosión, la protección contra los cantos rodados, etc. Hay diferencias significativas:

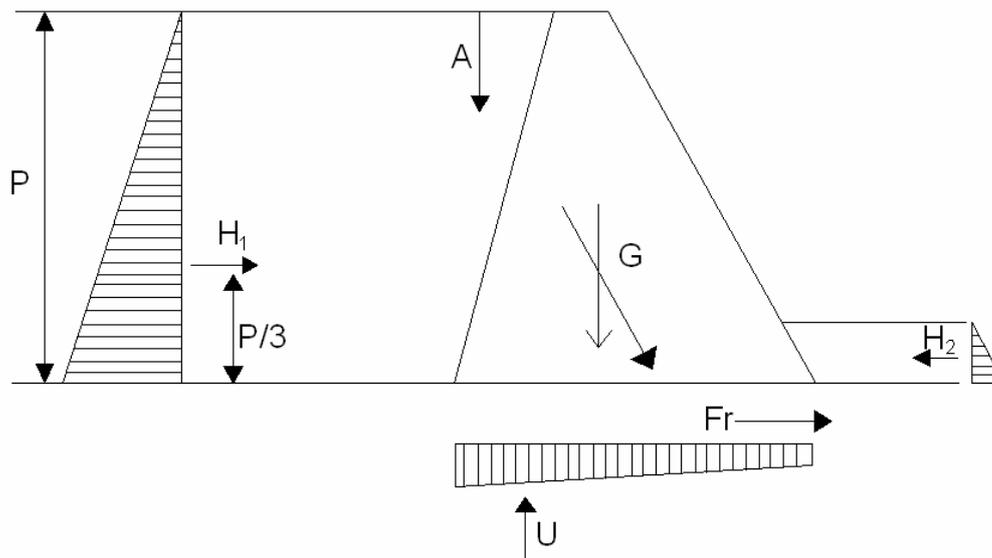
- Las presas deben soportar la presión significativa del agua, las cuales tienden a empujar hacia río abajo. El diseño debe garantizar que la presa sea segura contra volteo a lo largo de su borde en sentido descendiente, de que es seguro de resbalar, y que no hay parte de ella bajo tensión.
- Se instalan tubos que lleven un material más fino cuando el agua filtra debajo de la presa bajo suficiente presión y la velocidad, puede ser un problema significativo, a menos que la presa se construya de roca en el fondo.
- La mayor parte de estos factores, no son críticos en el diseño de vertederos, porque su tamaño es pequeño y se encuentran las presiones mínimas del agua.

Cuando una presa se coloca en la corriente es para proporcionar almacenaje del agua, no se requiere ninguna limpieza de sedimentos o basuras porque el depósito por sí mismo efectúa esta función.

Para guardar la filtración a un mínimo, una presa de tierra consiste en una base impermeable que se extiende bien en la base impermeable y esté situada aguas arriba de la presa. Generalmente, esta base se construye de material arcilloso de alta densidad. La pendiente de los taludes comúnmente son de 1:2 a 1:3.

La presa debe garantizar su estabilidad ante cualquier combinación de cargas posibles (Figura 18): cargas hidrostáticas sobre aguas arriba y aguas abajo; sub-presión hidrostática bajo la base de la presa; empuje de los sedimentos en contacto con la presa; fuerzas sísmicas (si está ubicada en un territorio sísmicamente activo) se presume que actúan en sentido horizontal y vertical sobre el centro de gravedad de la presa; esfuerzos dinámicos inducidos por el movimiento relativo de la presa durante un terremoto.

Figura 18. Combinación de cargas para una presa.



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 109.**

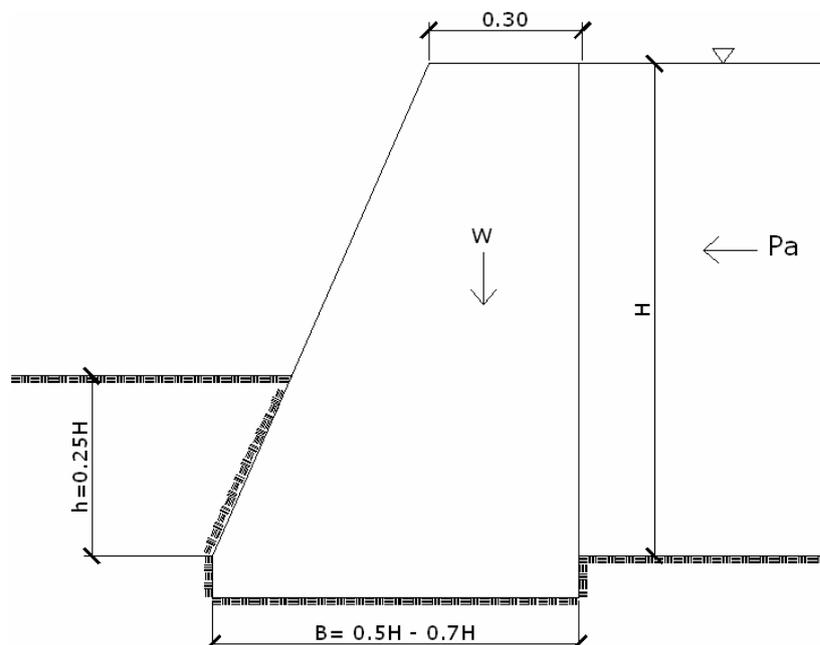
Todas las fuerzas mostradas en la fig. 19 también son sometidas para cualquier tipo de presa ya sea de tierra o de concreto armado.

Dimensionamiento de una presa por gravedad

Una vez establecido un apropiado tirante “Y” de agua en el canal de conducción, la altura de la presa por gravedad será sobre el fondo del río, igual a:

- $H = 3$ y, cuando el caudal sea menor $1\text{m}^3/\text{s}$.
- $H = 2.5$ y, cuando el caudal sea igual o mayor a $1\text{m}^3/\text{s}$.
- $H = 2$ y, cuando el caudal es mayor que $10\text{m}^3/\text{s}$

Figura 19. Dimensiones de una presa por gravedad.

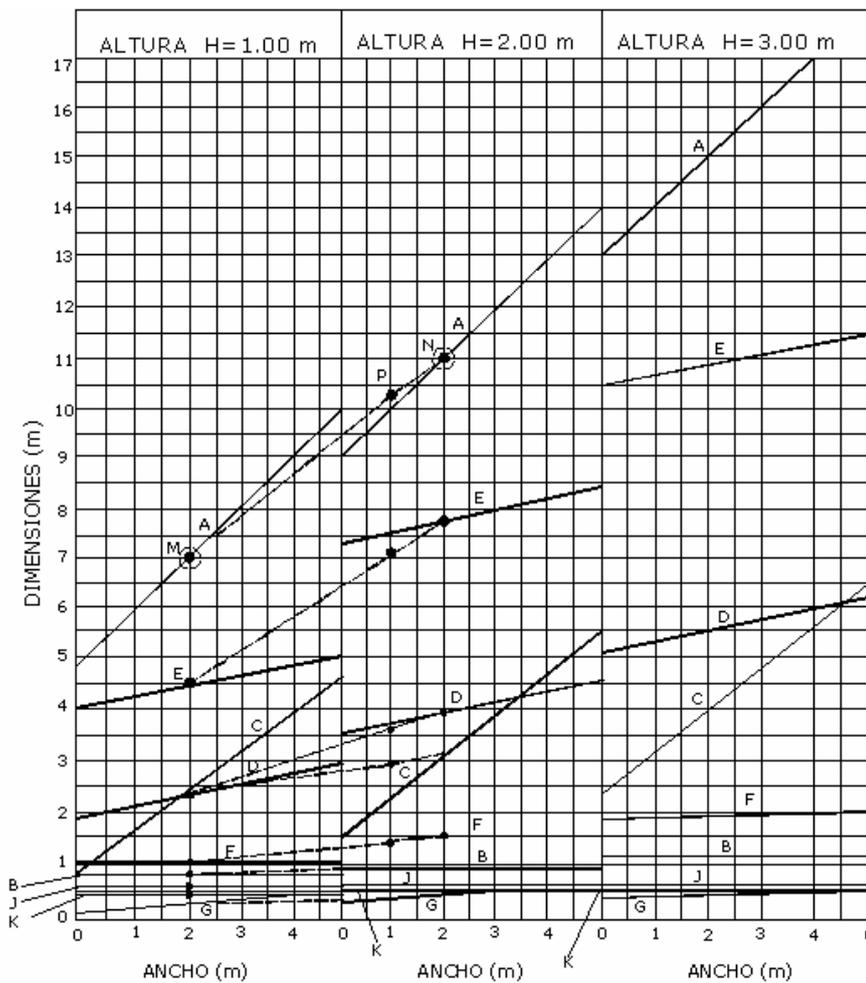
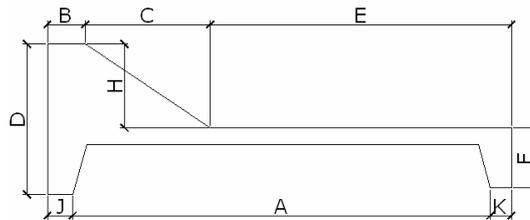


Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.
Guatemala: USAC, página 40.

Dimensionamiento de una presa dependiendo al lugar de captación

- Para encontrar las dimensiones de la presa se utilizará el siguiente esquema 20:

Figura 20. Dimensiones para una presa



Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Guatemala: USAC, página 30.

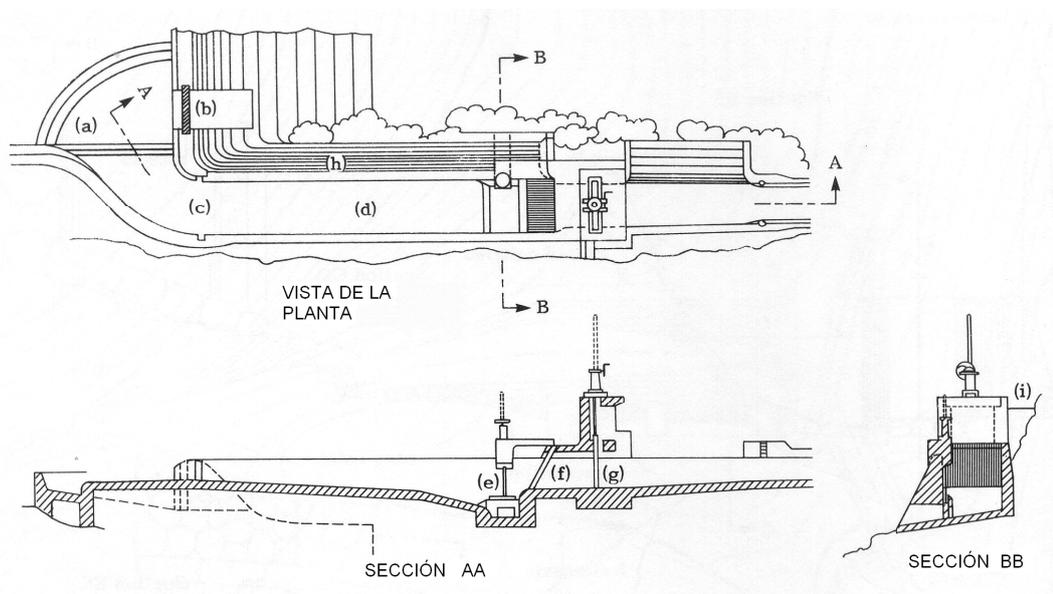
- Utilizando el esquema mostrado en la figura 20 se obtienen las dimensiones directamente para los valores de H de 1m, 2m y 3m.
- Cuando se requiere obtener las dimensiones para valores de H intermedios, se debe interpolar, midiendo la distancia y multiplicando por 0.8.

3.2 Vertederos

Las micro-hidroeléctricas a menudo incluyen un vertedero “permanente” a través de una corriente.

Las compuertas se deben incorporar para eliminar el sedimento, que se acumula generalmente antes de la bocatoma (véase las Fig. 21).

Figura 21. Vertedero.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 92.

Los vertederos eliminan diferentes sedimentos en suspensión que puedan pasar a través de la bocatoma o la obra de entrada entre la presa o el canal, para vertirlos con un vertedero de pared delgada.

Los vertederos permanentes se construyen generalmente a través del ancho entero de la corriente. Si un diseño restringe parcialmente el ancho de la corriente, el agua que desborda la cresta será más profunda durante períodos de inundación. Este factor se debe considerar en el diseño, para asegurarse de que no tiene ningún impacto opuesto en la estructura del transporte del agua, la erosión en el borde en sentido descendiente del vertedero, etc.

La cantidad de agua a descargarse por encima de un vertedero depende de la forma de la cresta, de la altura del vertedero “h” y de la altura de salto.

Detrás del vertedero debe ser construida una solera amortiguadora o con un colchón amortiguador para la amortiguación de la energía, forzando el resalto hidráulico en un tramo distinto detrás del vertedero y fijando localmente la transición del estado de flujo supercrítico al estado de flujo subcrítico.

En un vertedero el caudal de vertido se calcula mediante la fórmula:

$$Q = CLH^{3/2}$$

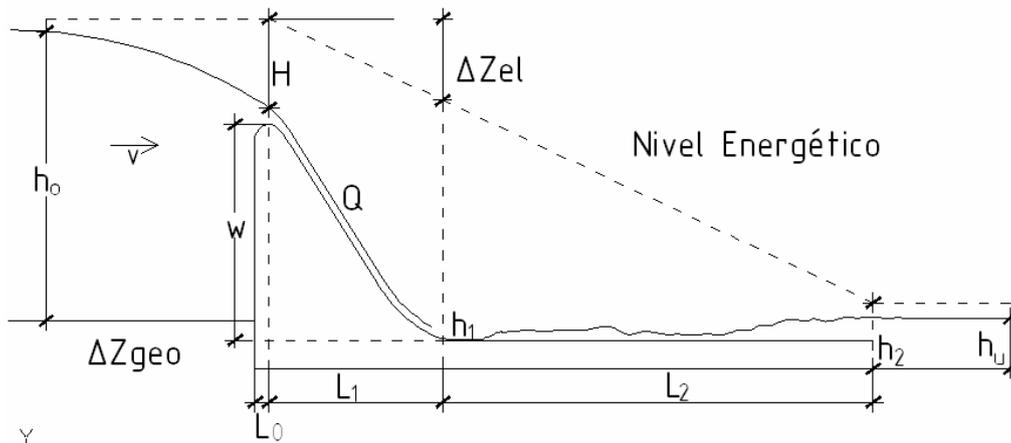
En donde la **C** es el coeficiente de vertido, **L** la anchura del vertedero en la coronación y **H** la altura estática desde el vertedero a la superficie de la lámina. El coeficiente **C**, obtenido mediante ensayos sobre modelos reducidos, puede variar entre 1.56 en vertederos muy anchos y 2.2 cuando el perfil del aliviadero es el óptimo.

El dimensionamiento de un vertedero con solera amortiguadora adyacente se procede según los siguientes pasos:

1. Los niveles (tirantes) de agua arriba h_0 y aguas abajo h_u tienen valores conocidos. El nivel de aguas arriba concuerda con el tirante del río y el nivel aguas abajo es en función de las condiciones hidráulicas, es decir, en dependencia de la descarga vertiendo por encima de una presa en el cauce o del caudal pasando encima de un vertedero y entrando en el canal alimentador de agua motriz, siempre considerando los tirantes abajo en el río y/o en el canal.
2. De la fórmula del vertedero se obtiene el valor de h y éste determina la altura de coronación (cresta) del vertedero.
3. Se escogen las dimensiones y la forma hidráulica favorable del vertedero.

4. Se supone que la solera (plataforma) amortiguadora coincide con el nivel del lecho del río. Así se puede determinar el tirante (nivel) del agua h_1 en el inicio de la plataforma amortiguada:

Figura 22. Nivel energético.



Fuente: GTZ. Taller de Microcentrales Hidroeléctricas, página 109.

$$h_1 = h + w + \frac{Q^2}{h_1^2 * B^2 * 2g} - 1.1$$

Donde:

Q = Caudal del vertedero m^3/s

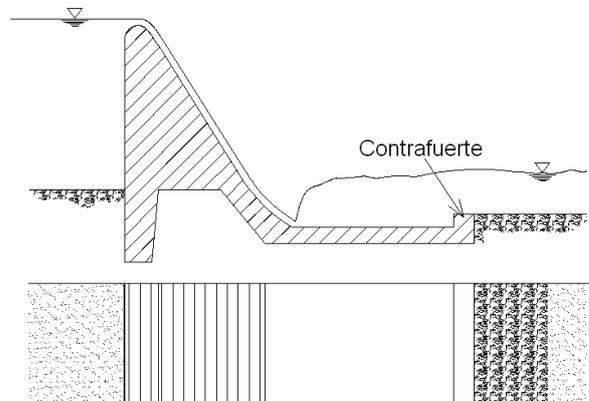
B = Ancho del vertedero m

5. El nivel de agua h_2 (m) corresponde al tirante h_1 (m), se calcula según:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + \frac{2 * Q^2}{g * B^2 * h_1}}$$

En caso que h_2 coincida con el nivel de aguas abajo h_u , se confirma el nivel del fondo del colchón (plataforma) amortiguador supuesto. (El nivel de aguas abajo h_u resulta de las condiciones hidráulicas de los ríos o del canal y puede ser calculado en forma aproximada por las fórmulas anteriores, a no ser que los niveles de agua para ciertas descargas ya sean previamente conocidos).

Figura 23. Colchón amortiguador con contraumbral.



Fuente: GTZ. Taller de Microcentrales Hidroeléctricas, página 109.

6. Determinación de la longitud del colchón amortiguador. La longitud del colchón amortiguador resulta del diagrama mostrado en la Fig. 24. Es igual a la longitud del resalto hidráulico, a no ser que sea recortada por un umbral, tal como está descrito en el numeral 7.

Para la determinación del colchón amortiguador hay que determinar el número de Fraude:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \quad \text{con} \quad V_1 = \frac{Q}{B \cdot h_1}$$

Donde:

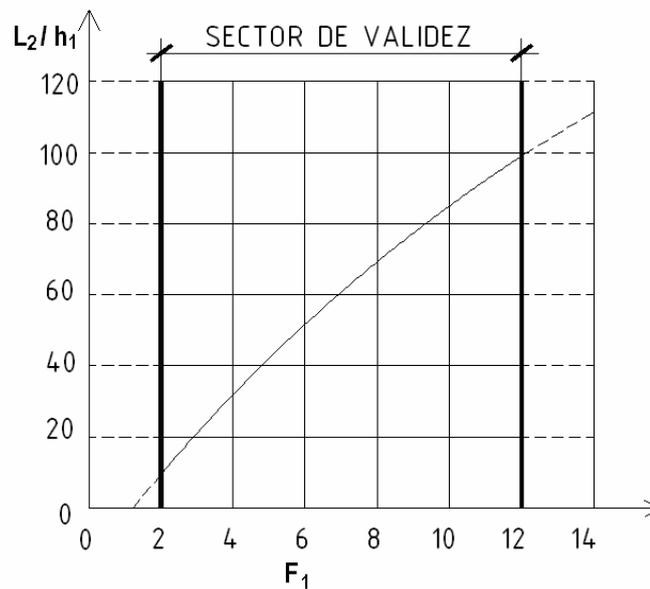
Q = Descarga por encima del vertedero (m³/s)

B = Ancho del vertedero o ancho del colchón amortiguador (m)

h₁ = Nivel del agua en la cabecera del colchón amortiguador (m)

Del diagrama resulta entonces la longitud del colchón amortiguador en dependencia de h₁.

Figura 24. Diagrama para determinación de la longitud L₂ del resalto

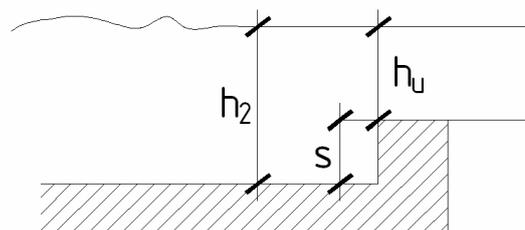


Fuente: GTZ. Taller de Microcentrales Hidroeléctricas, página 110.

7. Para profundizar la solera del colchón amortiguador se estima el valor S (ver Fig. 25):

$$S > h_2 - h_u$$

Figura 25. Valores de dimensionamiento al final del colchón amortiguador.



Fuente: GTZ. Taller de Microcentrales Hidroeléctricas, página 110.

Para la determinación del nuevo valor h_1 anterior S y h_2 se hace según pasos 4 y 5.

La determinación de la longitud de la plataforma de amortiguación se hace con:

$$L = 5 * h_u + S \text{ (m)}$$

3.3 Cámara de compensación

Es detener el volumen de agua disponible para las condiciones de pare y arranque de la turbina y con ello evitar que se produzca ingreso de burbujas de aire a la tubería reforzada para evitar cavitación.

3.4 Tubería forzada

En la siguiente tabla se detallan algunas de las propiedades mecánicas de los materiales que se utilizan en la tubería forzada.

Tabla I. Materiales utilizados en tuberías forzadas

Material	Módulo de Young (N/m ²)	Coef. Térmica (mm/°C)	Carga de tracción (N/m ²)	n
Acero soldado	206	12	400	0.012
Polietileno PE	0.55	140	5	0.009
PVC	2.75	54	13	0.009
Uralita	n.a	8.1	n.a	0.011
Madera	n.a	n.a	n.a	0.012
Fundición	78.5	10	140	0.014
Hierro dúctil	16.7	11	340	0.015
Metal corrugado	206	n.a	400	0.024

Fuente: Centráis Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas Ministerio de minas y energía, página 147.

Para el diseño de la tubería forzada se necesita encontrar su diámetro, para eso se debe tener los siguientes datos:

- Altura de salto, que es la diferencia de cota que hay entre la cámara de carga y la casa de máquinas.
- El caudal a conducir en la tubería, que es el necesario para generar la potencia establecida.
- Tipo de material de la tubería.
- Longitud de la línea de conducción.

Para un diseño preliminar se puede calcular el diámetro de la tubería mediante las siguientes fórmulas:

Para caídas localizadas de $H < 100$

$$D = (0.0052 Q^3)^{1/7} * 1000$$

Para caídas localizadas de $H > 100$

$$D = (5.2 Q^3 / H)^{1/7} * 1000$$

Donde:

D = Diámetro en milímetros

Q = Caudal en m^3/s

H = Caída en metros

3.4.1 Circulación del agua en conductos cerrados

La energía contenida en un fluido incompresible que circula por el interior de un tubo, viene dada por la ecuación de Bernoulli:

$$H_1 = h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

Donde:

H_1 = Energía total

h_1 = Elevación de la línea de corriente sobre un plano de referencia

P_1 = Presión

γ = Peso específico del fluido

V_1 = Velocidad de la línea de corriente

g = Aceleración de la gravedad

Las partículas cercanas a la pared, frenan a las que circulan a mayor velocidad por el interior. En ese momento el flujo pasa a ser turbulento, y la distribución de velocidad es más plana. Reynolds encontró que el punto de transición de flujo laminar a flujo turbulento venía determinado por un número adimensional N_R (número de Reynolds) que, en el caso de un tubo de sección circular, viene dado por el producto de la densidad del fluido (ρ), el diámetro del tubo D (m), y la velocidad media V (m/seg), dividido por el coeficiente de viscosidad del líquido (μ). En la fórmula N_R , es la viscosidad cinemática del fluido es (ν m²/seg).

$$N_R = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{DV}{\nu}$$

Un fluido que circula por un tubo de sección circular y paredes lisas, la transición de flujo laminar a flujo turbulento ocurre aproximadamente cuando N_R alcanza el valor 2000.

La viscosidad hace que el agua, por el interior de un tubo, experimente una pérdida de energía h_f que es debida a:

1. La fricción contra las paredes del tubo.
2. La disipación viscosa como consecuencia de la fricción interna del flujo.

Aplicando la ecuación de Bernouilli a un fluido real en dos posiciones de su recorrido se constata que:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + h_f$$

En la que aparece en el segundo término de la igualdad, una cantidad h_f que representa la energía perdida entre un tramo 1 y 2, fundamentalmente como consecuencia de la fricción del fluido contra las paredes del tubo y en menor medida por la fricción interna debida a la turbulencia.

3.4.2 Pérdida de carga por fricción

Utilizando la metodología de los volúmenes de control con un cierto volumen en el interior del tubo, ubicado entre dos secciones perpendiculares a su eje, al que se aplica el principio de conservación de masa de Darcy y Weisbach, los cuales derivaron la siguiente ecuación, válida tanto para flujos laminares como turbulentos, circulando en conductos de sección transversal arbitraria:

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

Donde

f = Factor de fricción, es un número adimensional

L = Longitud del tubo en m

D = Diámetro del tubo en m

V = Velocidad media en m/seg

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

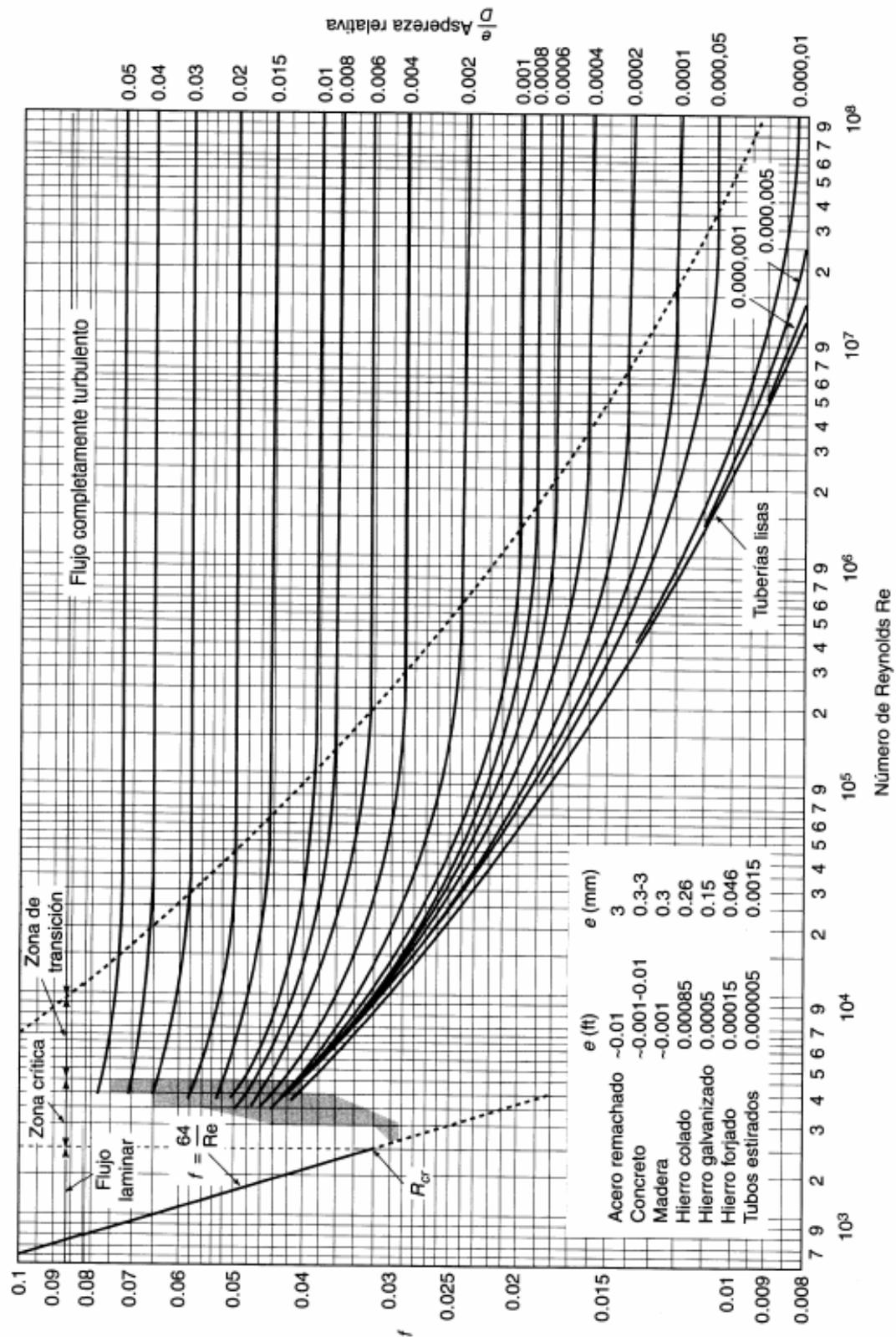
Si el flujo es laminar, el factor de fricción f puede calcularse matemáticamente mediante la ecuación:

$$f = \frac{64\mu}{\rho V D} = \frac{64}{N_R}$$

El hecho que f disminuya al aumentar N_R , no quiere decir que la fricción disminuye con la velocidad.

$$h = \frac{64\mu}{\rho V D} * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = \frac{32\mu L V}{\rho g D^2}$$

Se observa que incluso para valores de $N_R \gg 2000$, correspondiente a un régimen turbulento, en las afueras de la pared del tubo existe una capa de fluido muy delgada, conocida como subcapa laminar, cuyo espesor disminuye al aumentar N_R .



3.4.3 Pérdida de carga por turbulencia

Un flujo, circulando en régimen turbulento por un sistema de tuberías, con sus entradas, codos, válvulas y demás accesorios, experimenta, además de las pérdidas por fricción, unas pérdidas por disipación de la viscosidad que es necesario analizar. Debido a la complejidad de la configuración del flujo, hay muy poca teoría disponible, por lo que, en general, las pérdidas se calculan a partir de un coeficiente K adimensional, obtenido experimentalmente como cociente de la pérdida de carga h_f y la altura cinética $V^2/2g$.

3.4.3.1 Tipos de flujos

Si se toma el tiempo como criterio de clasificación de regímenes, un flujo se clasificará como permanente, cuando en una sección dada el tirante no varía con el tiempo, o como variable cuando varía porque cambia la pendiente o la sección o porque existe un obstáculo en el canal. El movimiento será gradualmente variable si es válido el enfoque unidimensional y rápidamente variable si no lo es.

Flujo uniforme: para que en un canal abierto el flujo sea uniforme tiene que satisfacer los siguientes requisitos:

1. Tanto el tirante de agua como el caudal y la distribución de velocidad en todas las secciones del canal, deben permanecer constantes.
2. La línea de nivel energético, la superficie del agua y el fondo del canal deben de ser paralelos.

Basándose en estos conceptos Chezy encontró que:

$$V = C\sqrt{R_h S_e}$$

Donde:

C = Factor de resistencia de Chezy

R_h = Radio hidráulico, resultado de dividir el área A de la sección perpendicular a la corriente por su perímetro mojado P

S_e = Pendiente del fondo del canal (se considera igual que a la de la lámina de agua)

3.5 Canales abiertos

Canales de derivación y de descarga deben ser dimensionados de acuerdo al caudal de diseño, es decir, los canales deben ser dimensionados de tal manera que, con la inclinación dada el caudal requerido puede ser descargado en la sección del canal.

El régimen de corriente en un canal diseñado con fines hidroeléctricos, es siempre turbulento, por lo que puede aplicarse, sin dificultad, la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} * R_H^{2/3} * S^{1/2} * A$$

Donde:

A = Área del canal.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

S= Gradiente hidráulico, que suele reemplazarse por la pendiente del fondo del canal.

R_H= Radio hidráulico (Área/Perímetro Mojado).

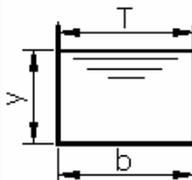
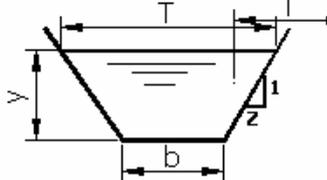
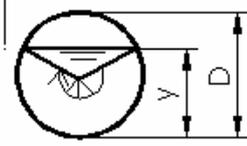
Tabla II. Valores típicos del coeficiente n de Manning

Valores Típicos del coeficiente n de Manning	
Revestimiento del canal	Valor de n
Madera limpia	0.011-0.012
Madera con algas y musgo	0.015-0.017
De concreto bien terminado	0.012-0.015
De tierra recto y limpio	0.022
De tierra recto con hierbas	0.025-0.030
Con mampostería suelta	0.020-0.025
Revestido con asfalto	0.014-0.016

**Fuente: Centráis Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 136.**

En el siguiente esquema se especifica las propiedades geométricas, para canales de sección transversal.

Figura 26. Propiedades geométricas de los canales

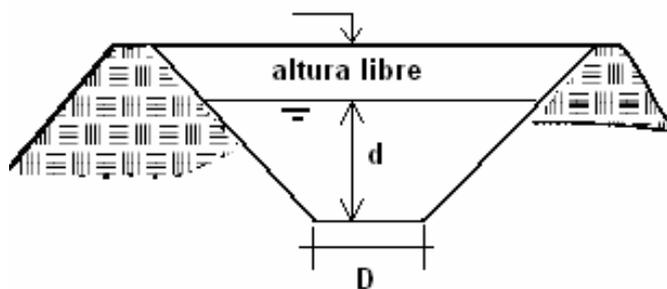
			
Área A	by	$(b+zy)y$	$\frac{1}{8}(\phi - \text{sen } \phi)D^2$
Perímetro mojado P	$b+2y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$1/2\phi D$
Ancho superficial T	b	$b+2zy$	$2\sqrt{y(D-y)}$
Radio hidráulico R	$\frac{by}{b+2y}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen } \phi}{\phi}\right)D$
Tirante hidráulico D	y	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\phi - \text{sen } \phi}{\text{sen } \frac{\phi}{2}}\right)D$
Factor de sección	$by^{1.5}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2zy}}$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen } \theta)^{1.5}}{32\sqrt{\text{sen } \frac{1}{2}\theta}} D^{2.5}$

Fuente: **Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas**
Ministerio de minas y energía, página 51.

Es preciso señalar que la sección más eficiente desde el punto de vista hidráulico, no tiene que ser necesariamente la más económica. La sección hidráulica óptima minimiza el área requerida para transportar un caudal dado, pero a veces, el área de excavación necesaria para conseguir esa sección es considerablemente mayor.

En los grandes aprovechamientos y en algunos de los pequeños, sobre todo los situados en valles, en los que los canales deben transportar un gran volumen de agua, éstos se construyen siguiendo el perfil de la figura 27.

Figura 27. Detalle de canal.



**Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 52.**

Tabla III. Velocidades máximas recomendadas en función de la característica de los suelo

Características de los suelos	Velocidades máximas m/s
Canales en tierra franca	0.6
Canales en tierra arcillosa	0.9
Canales revestidos con piedra y mezcla simple	1.0
Canales con mampostería de piedra y concreto	2.0
Canales revestidos con concreto	3.0
Canales en roca:	
- pizarra	1.25
- areniscas consolidadas	1.5
- rocas duras, granito, etc.	3 a 5

Nota: Resulta práctico durante los cálculos, no dar valores de velocidad, sino verificarlos, ya sea aplicando la fórmula de Manning o la ecuación de continuidad, de tal manera que los resultados obtenidos estén dentro del rango recomendado.

Tabla IV. Pendiente admisible en función del tipo de suelos

Tipo de suelo	Pendiente (S) %
Suelos sueltos (gravas)	0.5 - 1.0
Suelos francos (limos)	1.5 - 2.5
Suelos arcillos	3.0 - 4.5

Notas:

1. Durante el diseño no necesariamente se deben tomar estos valores máximos.
2. Cuando la velocidad resulta erosiva, reducir la pendiente produce una sensible disminución de la velocidad.

**Tabla V. Taludes recomendables en función del material talud Z:1
(horizontal: vertical)**

Características de los suelos	Canales pocos profundos	Canales profundos
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25 : 1
Arcillas compactas o conglomerados	0.5 : 1	1 : 1
Limos arcillosos	1 : 1	1.5 : 1
Limos arenosos	1.5 : 1	2 : 1
Arenas sueltas	2 : 1	3 : 1

3.5.1 La energía en canales abiertos

Si el flujo es paralelo a las líneas de corriente no tienen curvatura substancial ni divergencia a la suma $h+P/g$ es constante e igual al tirante.

La energía específica del flujo relativo en el fondo del canal será:

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

α = Es un factor para corregir la no uniformidad del perfil de velocidad

V = Velocidad promedio del flujo.

El valor de α varía con la distribución de la velocidad de la corriente en el canal. Su valor puede variar entre 1.05 para una distribución uniforme y 1.20 para una distribución poco uniforme.

Sin embargo, para un primer análisis se trabaja con un valor de $\alpha = 1$, lo que es admisible cuando la pendiente es pequeña. Entonces:

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

Definiendo el caudal por unidad de ancho q como:

$$q = \frac{Q}{b}$$

La velocidad promedio será:

$$\bar{v} = \frac{q}{y}$$

Y para un canal rectangular $y = Y$, la ecuación puede reescribirse:

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{2/3}$$

Sustituyendo valores en la definición de energía específica se llega a la ecuación:

$$y_c = \frac{2}{3} E_c$$

3.6 Desarenador

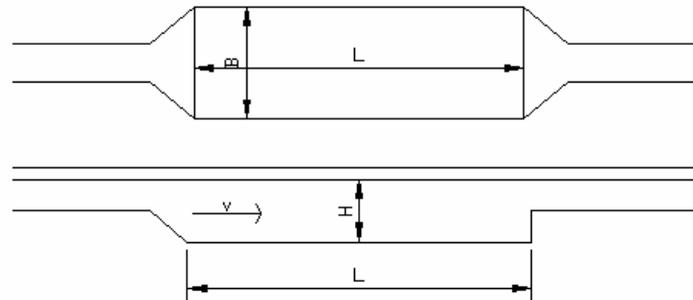
Los desarenadores siempre son necesarios por dos razones:

1. Por la abundante cantidad de sedimentos.
2. El contenido de sedimentos que tenga un alto porcentaje de material fino que pasa por el tamiz # 200.

Deben ser protegidas contra la abrasión por materias duras en suspensión.

- El desarenador se ubicará antes que la presa de captación.
- Dimensiones del desarenador

Figura 28. Dimensiones de un desarenador



Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Guatemala: USAC, página 43.

- Para dimensionar el desarenador quedará a criterio del diseñador ubicarlo con el terreno disponible, usando la siguiente fórmula:

$$L = V * H * T * C$$

Donde:

V = Velocidad del agua

H = Profundidad del desarenador

T = Tiempo de sedimentación

C = Coeficiente de seguridad (1.5 – 2.0)

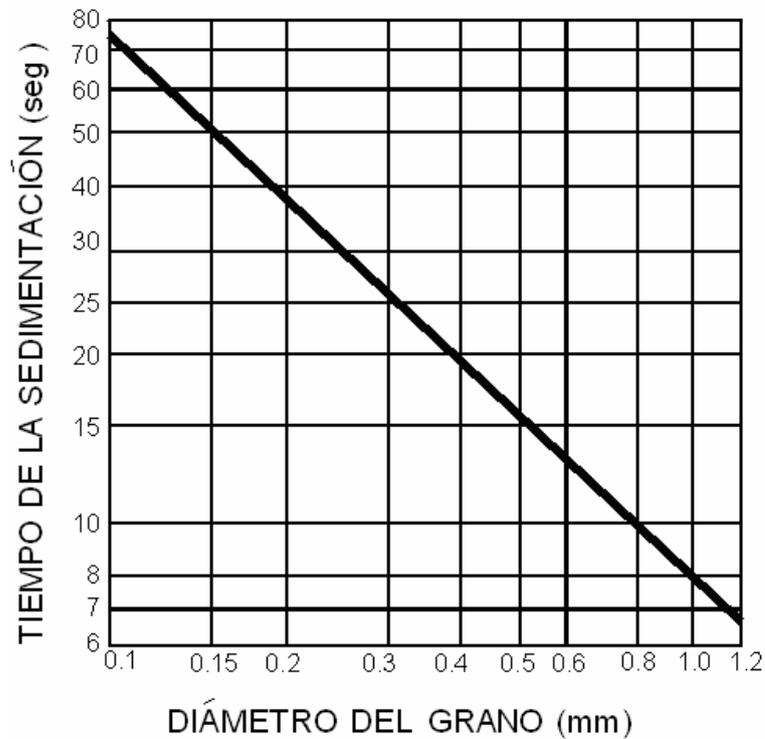
L = Longitud del desarenador

- Se dará un ancho B y una profundidad H y la velocidad será:

$$V = \frac{Q}{B * H}$$

- El tiempo de sedimentación (s) se encontrará por medio de la figura 29 y así se encontrará la longitud del desarenador.

Figura 29. Relación entre grano y tiempo de sedimentación



Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Guatemala: USAC, página 44.

3.7 Drenaje

La función principal de un drenaje es la de permitir la retirada de las aguas que se acumulan en hundimientos topográficos del terreno, causando inconvenientes en las micro-hidroeléctricas. Otra función sumamente importante del sistema de drenaje es la de controlar, en los perímetros de inundación, la acumulación de sales en el suelo, lo que puede disminuir drásticamente la productividad.

El drenaje funciona debido a la fuerza de la gravedad. Las tuberías se conectan en ángulo descendente, desde el interior del canal hacia el exterior del mismo.

3.8 Sifones invertidos

Se conoce como sifón invertido a un tubo con forma de U invertida en el que fluye un líquido subiendo en su primera mitad, impulsado por una fuerza exterior, y bajando en la otra. Pues bien, en un sifón invertido fluye un líquido, y funciona siempre que el punto de entrada esté por encima del de salida: es decir, tiene que haber un cierto desnivel entre los puntos inicial y final que permita compensar el rozamiento.

El canal puede tener que atravesar una depresión larga y profunda, puede ser demasiado costoso o desagradable por una cierta u otra razón. En estos casos, la descarga del canal se podría llevar adentro de un sifón invertido (Fig. 30b) para poder drenar el sifón.

$$h_f = \frac{120}{D^{3/4}} * L * \frac{v^2}{2g} + (K_e + K_b) * \frac{v^2}{2g} + 19.1719 \cdot \frac{v^2}{2g} + 0.7333 \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_f = sifón invertido canal principal de la pérdida (m)

n = coeficiente de la rugosidad

D = diámetro del sifón (m)

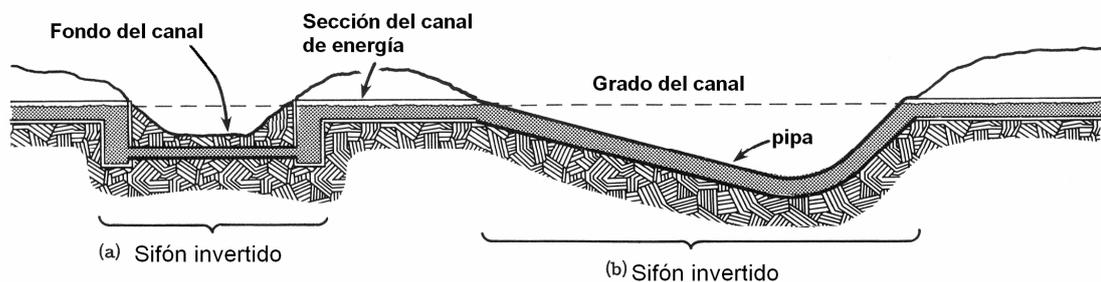
v = velocidad en el sifón (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

K_e = coeficiente de pérdidas en la entrada

K_b = coeficiente de pérdidas en las curvas

Figura 30. Dos ejemplos que ilustran como un sifón invertido se puede utilizar a lo largo de una alineación del canal.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 116.

El coeficiente de pérdidas de la fricción se define como:

$$k_p = \frac{120n^2}{D^{4/3}}$$

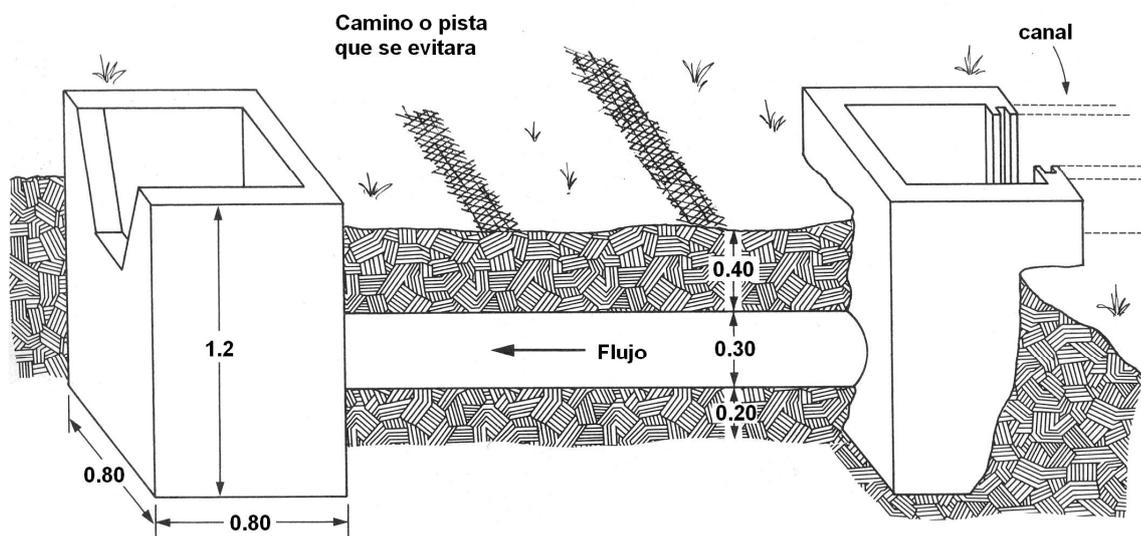
Donde:

K_p = Coeficiente de pérdida

D = Diámetro de la tubería

Fig. 31 demuestra el diseño y las dimensiones típicas de un sifón invertido usado a lo largo de obras a ambientes naturales. Los tanques de la entrada actúan como tanques de lavado, cuando aumenta el caudal. Cualquier tipo de suelo que lleve el agua es depositado en estos tanques; sus dimensiones interiores, comúnmente, son de 0.60m de ancho para limpiar el sedimento acumulado que proviene de afuera.

Figura 31. Dimensiones típicas (m) del sifón invertido.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 117.

El diseño hidráulico de un sifón tiene como base el cálculo de las pérdidas de carga, locales y por fricción en el conducto. Entre las pérdidas locales se considerarán principalmente pérdidas en la estructura de entrada, en los cambios de dirección o codos y en la estructura de salida. El cálculo se realizará para cada sección de conducto considerado, hasta obtener niveles de pérdidas que permitan, por un lado, el funcionamiento hidráulicamente eficiente del sifón y represente el menor costo posible.

4. OTROS COMPONENTES

4.1 Compuertas

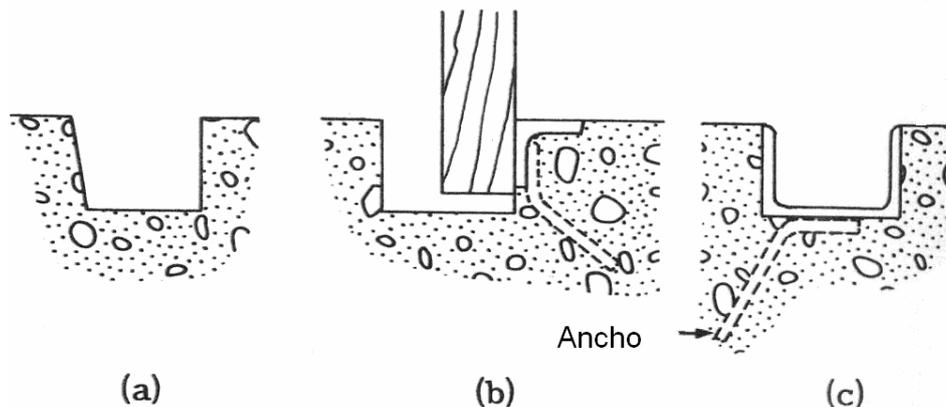
Se utilizan para el control del paso de agua en los canales abiertos o para otros usos de baja presión. Las compuertas se utilizan con bastante frecuencia para ajustar el flujo del nivel del caudal.

4.1.1 Compuertas y ajustadores de nivel para el caudal de un río (Stoplogs)

Los stoplogs es el tipo más simple de compuerta, es una pared vertical, horizontalmente colocada, que atraviesa una abertura y apoyada en cada extremo en las zanjas, fijadas generalmente con concreto o una estructura de piedra. Estas compuertas se manipulan manualmente. Para facilitar el instalar y el quitar las compuertas, una plataforma estrecha que atraviesa la abertura se incluye generalmente apenas río abajo de las zanjas.

En su forma más simple, las zanjas de las compuertas son cortes rectangulares verticales, formadas en el concreto (Fig. 32). Para reforzar su borde, pueden ser alineados con el hierro o el canal de acero.

Figura 32. Compuerta



Fuente: Allen R. Inversin. *Micro-Hydropower Sourcebook*, página 154.

Para diseñar un mecanismo de compuerta de subida, la fuerza para funcionar la compuerta debe primero ser determinada. Además del peso de la compuerta, la fuerza de la fricción entre la compuerta y el canal en los cuales se monta debe ser superada. Esto puede ser una fuerza significativa. Su magnitud, que depende de los materiales en contacto y la condición de sus superficies, se puede aproximar por la ecuación siguiente:

$$F = 1000 * \mu * A * H$$

Donde:

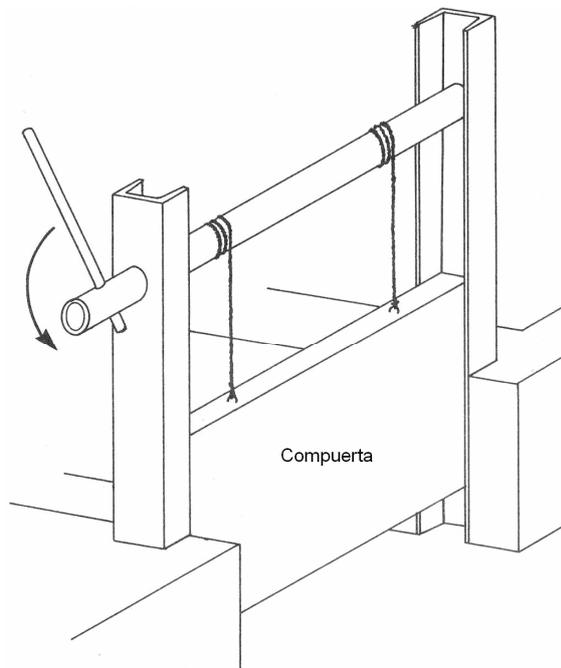
F = Fuerza requerida para superar la fricción (kg)

μ = Coeficiente de fricción estática (véase la tabla VI)

A = Área sumergida de la puerta (m²)

H = Distancia desde la superficie del agua al centro de A (m)

Figura 33. Esquema de una compuerta típica



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 157.

El coeficiente de fricción estática de las válvulas “ μ ” está en la tabla VI, estos valores son para las superficies lisas. Los materiales ferrosos como el hierro puede desarrollar una fricción excesiva, la cual provoca picaduras y acumulación de moho cuando se exponen a la adherencia de soldadura sucesiva y a la sequedad. Si una compuerta es cerrada por períodos de tiempo largos, el coeficiente de fricción estática de las válvulas “ μ ” para el metal se debe aumentar en 50%.

Tabla VI. Coeficiente de fricción estática “ μ ” para las superficies secas liso-acabadas.

SUPERFICIE	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
Acero en superficie congelada	0.45
Acero en acero	0.60
Madera en metal	1.00
Madera en madera	1.10
Caucho en madera	1.10

Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 158.

La fuerza real encontrada para levantar una compuerta es la suma de la fuerza de la fricción descrita arriba y del peso de la compuerta sumergida. Si se utiliza una compuerta de madera y está sumergida, se compensará el peso de la compuerta en un cierto grado.

4.2 Válvulas

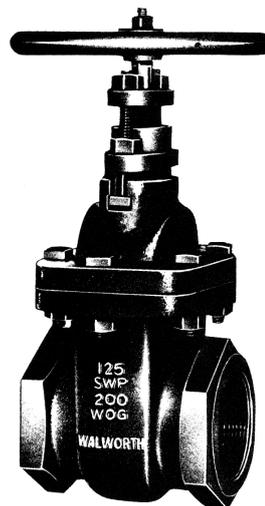
Se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye, en forma parcial, uno o más orificios o conductos. Para los usos de una micro-hidroeléctrica, controlan todo lo que atraviesa en la tubería forzada.

4.2.1 Válvulas de compuerta

La válvula de compuerta es de vueltas múltiples, en la cual se cierra el orificio con un disco vertical, de cara plana, que se desliza en ángulos rectos sobre el asiento.

La válvula de compuerta es básicamente una puerta que resbala y deja circular el agua a través de una tubería. Cuando la válvula es cerrada, la fuerza de presión del agua pega contra el asiento de la compuerta. Por esta razón, cuando una válvula de compuerta es grande se coloca en el extremo de alta presión de la tubería forzada, una válvula de compuerta pequeña se coloca paralelamente a la corriente del agua.

Figura 34. Válvula de compuerta.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 159.

4.2.2 Válvulas de mariposa

La válvula de mariposa es de $\frac{1}{4}$ de vuelta y controla la circulación por medio de un disco circular, con el eje de su orificio en ángulos rectos con el sentido de la circulación.

La válvula de mariposa se coloca para apertura total o cierre total, estrangulación, para baja caída de presión y corte positivo para líquidos o gases.

La válvula de mariposa está esencialmente colocada dentro de un disco, montado en un eje (Fig. 35). Este tipo de válvula puede funcionar con poca delantera, porque la presión de aguas arriba está esencialmente balanceada en cada mitad del disco. Debido a su diseño, una válvula de mariposa se puede cerrar rápidamente.

Figura 35. Válvulas de mariposa dirigidas por engranaje.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 159.

4.3 Controladores de flujo (Spillways)

Los controladores de flujo pueden ser colocados en una presa, en las obras de toma, sedimentador, o a lo largo de un canal de derivación

Si se colocan los controladores de flujo a lo largo de la parte superior de la presa se deben diseñar para permitir que el flujo máximo de la crecida corra con seguridad.

Un controlador de flujo se debe también incorporar en el diseño del sedimentador para prevenir desbordes inesperados. Esto sucederá cuando el agua entra rápidamente al sedimentador que es tomada por la tubería forzada, porque el canal está transportando exceso de flujo o porque el flujo en la tubería forzada se ha reducido o se ha parado.

La longitud del controlador de flujo y la elevación de la parte superior de la presa se deben seleccionar para permitir que todo el exceso de agua desborde a través de ella antes de que ocurra en otra parte. Y dondequiera que se utilice un controlador de flujo, el agua que desborda se debe conducir lejos para evitar la erosión.

4.3.1 Controlador de flujo del desbordamiento

De los varios tipos de diseños de controladores de flujo básicos, el más común es el de desbordamiento donde rebalsa el agua en la parte superior de la estructura de una presa, en la pared de las obras de toma, en el sedimentador, o en el lado de un canal. Los controladores de flujo no se sumergen, es decir, si el nivel del agua en sentido descendiente está debajo de la parte superior de la presa, el excedente de la descarga de caudal se puede determinar por la ecuación siguiente:

$$Q = C * L * H^{3/2}$$

Donde:

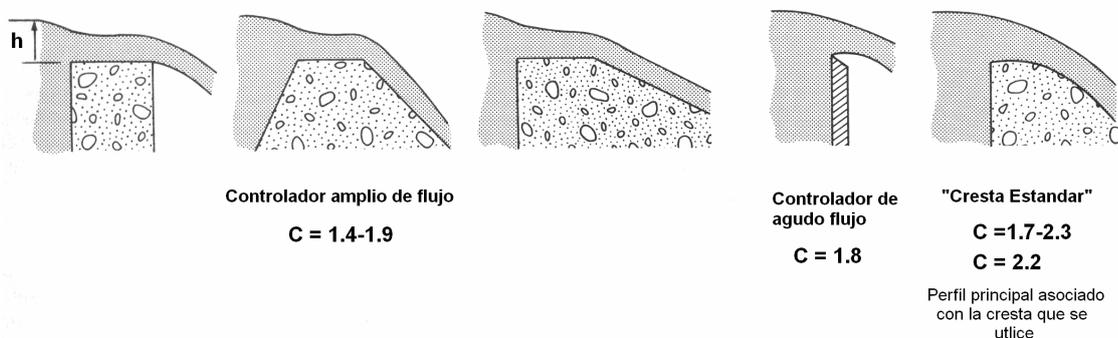
Q = Caudal de descarga (m³/s)

L = Longitud del controlador de flujo (m)

h = Cabeza sobre la cresta (m)

C = Coeficiente de descarga, que es 1.4 - 2.3

Figura 36. Coeficientes de la descarga para los controladores de flujo de diversos perfiles.



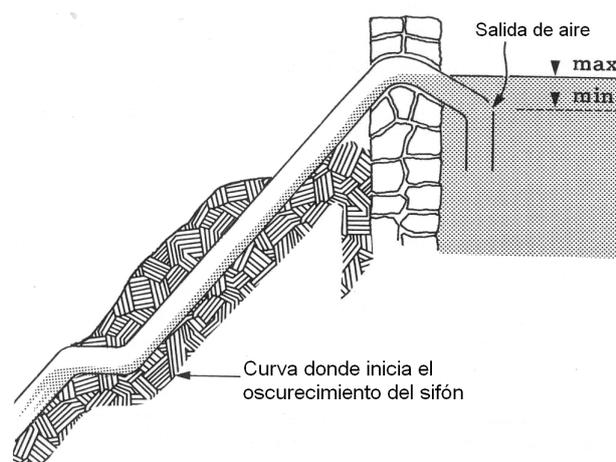
Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 161.

4.3.2 Controlador de flujo del sifón

En las centrales hidroeléctricas grandes, este controlador se incorpora a menudo en la presa. Aunque se ha utilizado raramente en las micro-hidroeléctricas, su teoría de operación se describe aquí porque puede ser que encuentre un cierto uso, debido a que utiliza la cabeza grande a través de un sifón, produce una velocidad perceptiblemente más grande del flujo que sea logrado con un vertedero.

La operación básica de un controlador de flujo de sifón se ilustra en Fig. 37. Cuando el nivel del agua se levanta sobre el codo del sifón, el agua comienza a fluir abajo de la tubería. El sifón funcionará correctamente cuando se ha quitado todo el aire dentro, pero esto no puede suceder hasta que el nivel del agua esté considerablemente sobre el nivel máximo.

Figura 37. Controlador de flujo de sifón.



Fuente: Allen R. Inversin. Micro-Hydropower Sourcebook, página 162.

4.4 Selección de turbinas

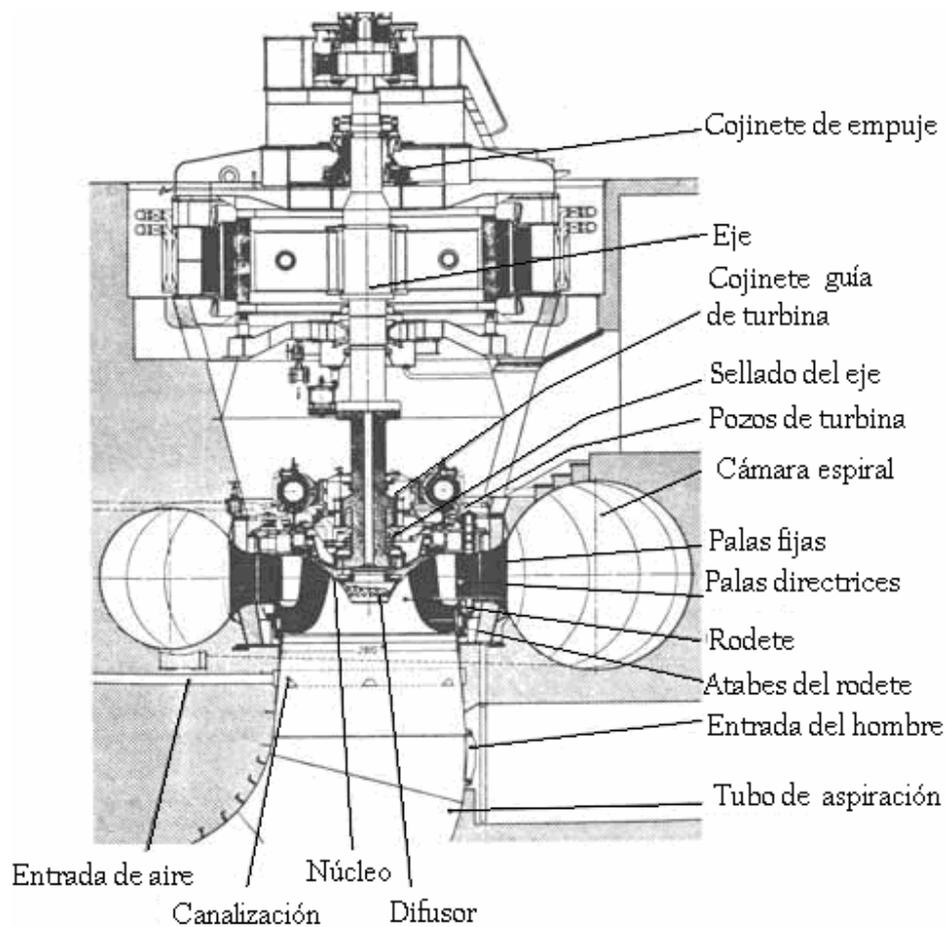
Para las micro-hidroeléctricas de media y alta presión es recomendable la aplicación de los siguientes tipos de turbinas: turbinas Pelton, Francis, Kaplan y Michell-Banki.

La selección del tipo de turbina depende del campo de aplicación, es decir, principalmente de la altura de salto y caudal del agua y de otros criterios tales como la sensibilidad a materias en suspensión del agua, la posibilidad y magnitud del mantenimiento así como del costo del equipo.

4.4.1 Turbinas Francis

La llamada turbina de reacción o turbina Francis se convirtió en la turbina hidráulica más utilizada con presiones de agua, o alturas de salto, equivalentes a una columna de agua de 10 a 100 m. Este tipo de turbina funciona debido a la expansión del agua mientras fluye a través de los espacios entre los vertedores, lo que produce una fuerza neta, o reacción, con una componente tangencial que pone la rueda en movimiento. Pueden ser de eje vertical u horizontal.

Figura 38. Esquema de una turbina Francis



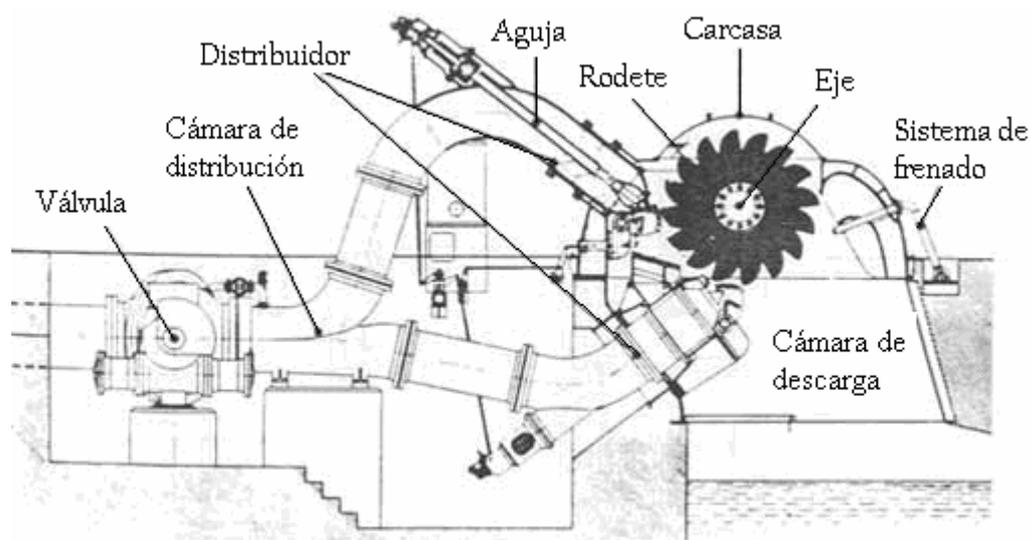
4.4.2 Turbina Pelton

Se utiliza en instalaciones donde la presión del agua es equivalente a una columna de agua de entre 90 y 900 m. En este tipo de turbinas el agua se conduce desde un depósito a gran altura a través de un canal o una tubería forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión. Dado que la acción de la turbina Pelton depende

del impulso del chorro sobre ella, en lugar de la reacción del agua en expansión, este tipo de turbina se denomina también turbina de acción. Su mantenimiento es más fácil y económico que la Francis.

En las instalaciones de turbinas Pelton, el flujo del agua se controla abriendo y cerrando las boquillas eyectoras.

Figura 39. Esquema de una turbina Pelton



4.4.3 Turbina Kaplan

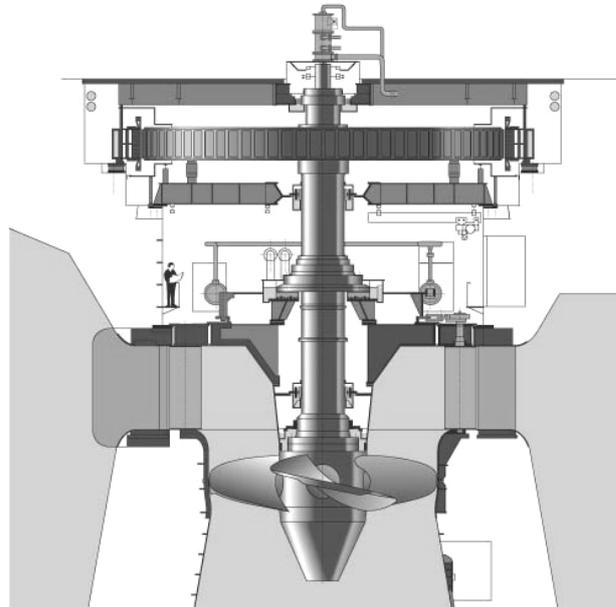
Kaplan mejoró la turbina haciendo que las palas pudieran pivotar sobre su eje. Los distintos ángulos de las palas aumentaban el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua.

Para mantener una salida fija del generador en una instalación hidroeléctrica la velocidad de la turbina debe mantenerse constante, independientemente de las variaciones de la presión del agua que las mueve. Esto requiere gran número de controles que, tanto en la turbina de Francis como en la de Kaplan, varían el ángulo de las palas.

La tendencia en las turbinas hidráulicas modernas es utilizar altura de salto mayores y máquinas más grandes. Según el tamaño de la unidad, las turbinas Kaplan se utilizan en alturas de salto de unos 60 m, y en el caso de las turbinas Francis de hasta 610 m.

Las turbinas Kaplan se simplifican a veces y se abarata su construcción omitiendo el distribuidor constituyendo una SemiKaplan.

Figura 40. Turbina Kaplan



4.4.4 Turbina Michell-Banki

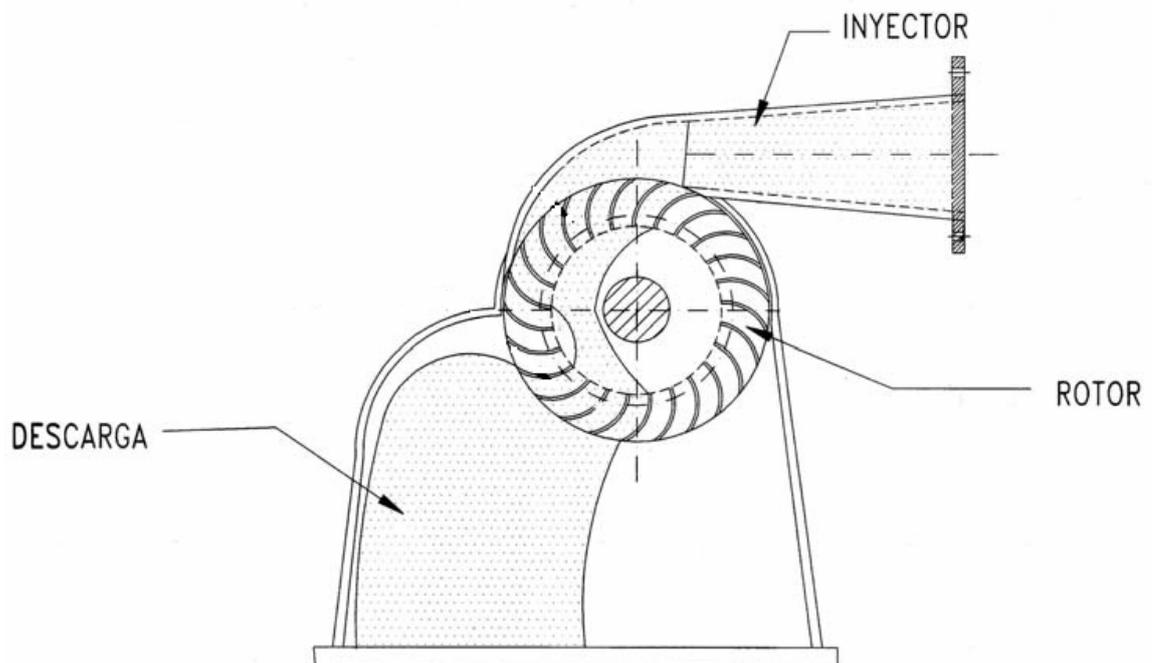
La turbina de flujo transversal o Michell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Sus ventajas principales son su sencillo diseño y su fácil construcción, lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones.

Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 MW.

Las principales características de esta turbina son las siguientes:

- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango.
- El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal.
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas.
- Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un alabé ajustable.

Figura 41. Turbina Michell-Banki



4.4.5 Selección preliminar de turbina

Tabla VII. Según la altura de salto

Tipo de turbina	salto en metros
Kaplan y hélice	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Michell-Banki	$3 < H < 200$

Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 179.

Tabla VIII. Según desniveles

TURBINAS	PELTON	MICHELL-BANKI	FRANCIS	KAPLAN
Para caudales	Pequeñas a Grandes	Pequeños a medianos	Grandes	Grandes
Para desniveles	Medianas a Grandes	Pequeños a medianos	Medianos y Grandes	Medianos y Grandes
Costo comparativo de instalacion	Menor	Menor	Mayor	Mayor

Para reducir el costo global (obra civil + equipos), y en particular reducir el volumen de obra civil, se han concebido un cierto número de configuraciones que han llegado a ser consideradas como clásicas. Todas ellas hacen uso de uno de los dos tipos de turbinas aplicables a estas alturas de salto: la kaplan y la semi-kaplan.

Tabla IX. Tipos de configuración.

Tipo de Configuración	Flujo	Sistema de Cierre	Tipo de Multiplicador
Kaplan o semi-Kaplan vertical	Radial	Compuerta	Paralelo
Semi-Kaplan vertical en sifón	Radial	Sifón	Paralelo
Semi-Kaplan inversa en sifón	Radial	Sifón	Paralelo
Semi-Kaplan inclinada en sifón	Axial	Sifón	Epicycloidal
Kaplan en S delante	Axial	Distribuidor	Paralelo
Kaplan en S invertida	Axial	Distribuidor	Paralelo
Kaplan con reenvío a 90°	Axial	Compuerta	Cónico
Semi-Kaplan con reenvío a 90°	Axial	Compuerta	Cónico
Semi-Kaplan en pozo	Axial	Compuerta	Epicycloidal

Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas Ministerio de minas y energía, página 181.

La potencia de una turbina hidráulica generada por la altura de salto es igual a:

$$P = \frac{r * Q * H}{102} * \frac{n}{100}$$

Donde:

P = Potencia en Kw

n = Eficiencia de la turbina en %

r = Peso específico del agua Kg/m³

Q = Caudal de la turbina en m³/s

H = Altura del salto en m.

También se puede calcular la potencia de cada una de las turbinas seleccionadas, para determinar la energía que generan anualmente (en año medio) hay que seguir los siguientes pasos:

1. Delimitar la gama de caudales entre el caudal medio (Qmedio), considerado como el caudal nominal provisional, y el caudal

ecológico ($Q_{\text{ecológico}}$) exigido para mantener unas condiciones ambientales aceptables en el tramo de río.

$Q_{\text{ecológico}} = 10\%$ caudal medio anual

$Q_{\text{ecológico}} = 50\%$ caudal mínimo del estiaje del año

$Q_{\text{ecológico}} =$ caudal que es excedente de menos de 330 por año

$Q_{\text{ecológico}} =$ caudal que es excedente de menos de 347 por año

2. Calcular el caudal de equipamiento, o caudal de diseño ($Q_{\text{diseño}}$) que vendrá dado por la ecuación:

$$Q_{\text{diseño}} = (Q_{\text{medio}}) - (Q_{\text{ecológico}})$$

3. Medir la altura de salto bruto (H) y calcular la altura de salto neto.
4. Utilizando la figura 42, identificar los tipos de turbina adecuados a la altura de salto (H) y al caudal de diseño previamente estimado, y determinar sus rendimientos a partir de las curvas caudal-rendimiento para cada uno de los tipos de turbina seleccionada, así como sus caudales mínimos técnicos.
5. Calcular la parte útil de la curva de caudales clasificados, utilizando Q_{medio} , $Q_{\text{ecológico}}$ y Q_{min} .
6. Calcular la producción anual de energía y la potencia de la central, a partir del área de la curva de caudales clasificados y teniendo en cuenta la curva caudal-rendimiento, la altura de

salto neto y la constante de gravedad. La energía bruta media (E en kWh) viene dada por la ecuación:

$$E = fn(Q_{\text{diseño}}, H, h, \eta_{\text{turbina}}, \eta_{\text{multiplicador}}, \eta_{\text{generador}}, \eta_{\text{transformador}})$$

Donde:

$Q_{\text{diseño}}$ = caudal (en m^3/s)

H = salto neto (en m)

η_{turbina} = rendimiento de la turbina, función de Q_{medio}

$\eta_{\text{multip.}}$ = rendimiento del multiplicador, constante para un tipo de turbina

$\eta_{\text{gener.}}$ = rendimiento del generador, constante para un tipo de turbina

$\eta_{\text{transf.}}$ = rendimiento del transformador, constante para un tipo de turbina

n = número de horas en un año

Para calcular la energía generada por cada turbina, se comienza por eliminar la banda correspondiente al caudal ecológico (que no pasa por las turbinas) y se divide el área utilizable de la curva de caudales clasificados (CCC), a partir del origen (tiempo = 0), en bandas verticales de una anchura igual al 5%. La última banda intersectará la CCC en $Q_{\text{mínimo}}$. Se calcula el caudal medio de cada banda, y con ese valor se identifica, en la curva rendimiento-caudal de la turbina escogida, el correspondiente η_{turbina} . La contribución energética (E) de cada banda se calcula por la fórmula:

$$E = w(Q_{medio} * H * h * \eta_{turbina} * \eta_{multiplicador} * \eta_{generador} * \eta_{transformador} * g)$$

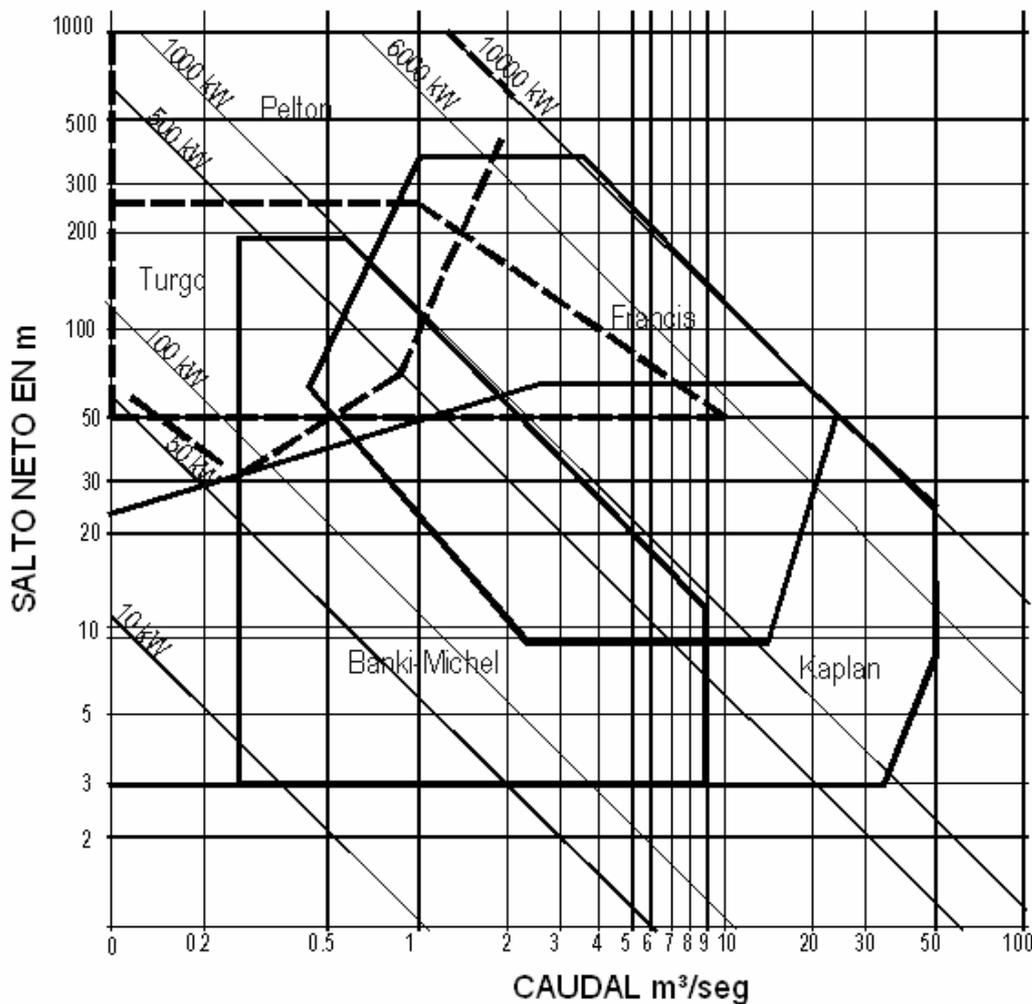
Donde:

W = anchura de la banda (= 0.05 para todas las bandas menos la última que estará entre 0.05 y 0.005)

h = número de horas en un año

g = peso específico del agua (9.81 kNm⁻³)

Figura 42. Diagrama de salto neto vrs. Caudal.



Fuente: Centrais Elétricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrais Hidroelétricas
Ministerio de minas y energía, página 77.

5. COMPONENTES PRELIMINARES ANTES DEL DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS

5.1 Evaluación del terreno

5.1.1 Cartografía

Para este trabajo se utilizan mapas a escala 1:50,000, la cual es la escala conveniente. En proyectos que afectan a superficies por encima de los 100 km², se recurre a la fotografía digital a partir de foto-diapositiva aérea o de imágenes procedentes de satélites. Cuando se necesita una mayor precisión las fotos digitalizadas se geocorrigien (utilizando puntos de control en el terreno) y se ortorectifican. Existen multitud de programas informáticos, y compañías especializadas, que realizan rutinariamente este trabajo. Aunque sea preferible realizar expresamente el trabajo de fotogrametría aérea, siempre será posible encontrar en las agencias gubernamentales encargadas de la ordenación del territorio, fotografías aéreas, a una escala entre 1:5,000 y 1:50,000.

5.1.2 Estudios geotécnicos

En el pasado se ha subestimado la necesidad de proceder a un estudio geotécnico detallado del terreno. En muchos países se puede disponer de mapas geológicos con cortes del terreno, que sirven para evaluar, en una primera aproximación, la seguridad de las cimentaciones, la estabilidad de las laderas y la permeabilidad del terreno.

Así, la toma de agua y el represamiento correspondiente, se verán afectados por las inestabilidades naturales de las formaciones superficiales que puedan existir en su zona de influencia y, que a su vez, afectarán a la natural estabilidad de estas formaciones.

En visita de campo se llenará la hoja de “recorrido de campo” (esquema 5.1), en la que se hará un croquis del aprovechamiento, se anotarán ciertos datos topográficos, hidrológicos y demás condiciones características del sitio. Se aprovechará la visita para tratar de reunir información sobre la distribución de la población, la ocupación de los habitantes y sus necesidades, en especial de los requerimientos que puedan tener de energía eléctrica. Una anotación importante que debe hacerse es la existencia, longitud y calidad de los caminos de acceso.

Figura 43. Hoja de recorrido de campo.

RIO: _____ RECORRIDO DE CAMPO

FECHA: _____

POBLACION A SERVIRSE: _____

	COTA DE CAPTACION (ALTIMETRO): _____ m.g.r.m
	ANCHO DEL CAUCE: _____ m.
	ALTURA NORMAL DEL AGUA: _____ m.
	ALTURA DE CRECIENTES: _____ m.
	GRADIENTE DEL RIO: _____ %
	VELOCIDAD PROMEDIO: _____ m/s
	AFORO REALIZADO. Q = _____ m ³ /s
	CARACTERISTICAS PARTICULARES DEL SITIO DE TOMA: _____

	LONGITUD APROXIMADA DE CONDUCCION: CANAL _____ km. TUNEL _____
	PENDIENTES TRANSVERSALES DEL TERRENO: _____
	CARACTERISTICAS PARTICULARES DE LA CONDUCCION: _____

	COTA DE RESTITUCION (ALTIMETRO): _____ m.g.n.m.
	ACCESOS: _____
OBSERVACIONES GENERALES: _____	

Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Guatemala: USAC, página 52.

5.2 Recursos hídricos

5.2.1 Datos hidrológicos

En la mayoría de países existen organismos especialmente dedicados a gestionar los datos hidrológicos y los datos climáticos recogidos, respectivamente, en las estaciones de aforo y de meteorología.

Guatemala cuenta con el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), que dispone de un servicio de información hidrológica, dedicado a medir información sobre:

- Ríos de Guatemala
- Lagos de Guatemala
- Mareas oceánicas
- Hidroquímica
- Meteorología
- Medidas de caudal : directas e indirectas

5.2.2 Medidas directas del caudal

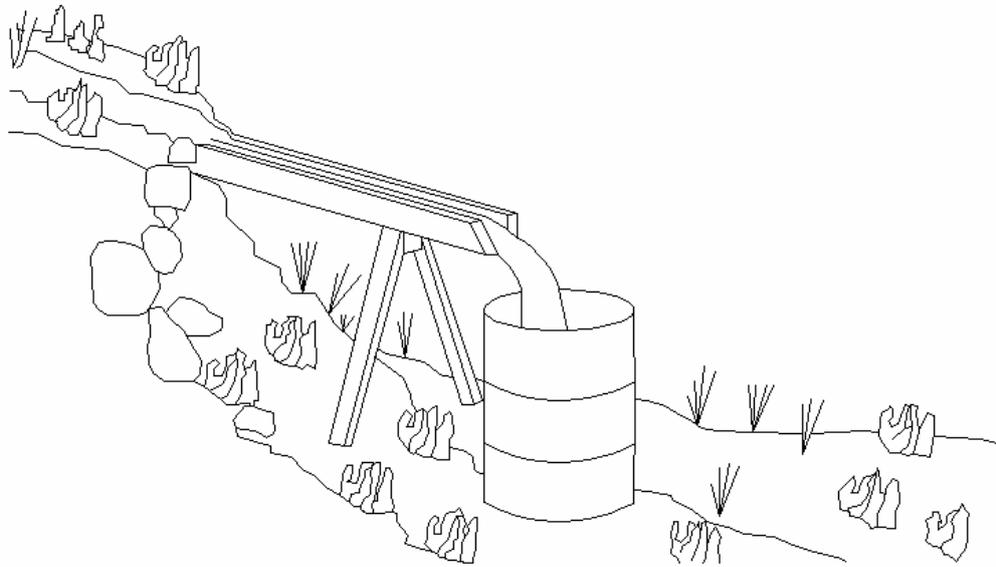
Si no existen series temporales para el tramo de río en estudio, y se dispone de tiempo para ello, se pueden medir los caudales a lo largo de un año como mínimo, ya que una serie de medidas instantáneas no tienen ningún valor. Para ello puede hacerse uso de diversas opciones.

5.2.2.1 Método volumétrico (llenado de un depósito para medir un caudal)

En arroyos pequeños con menos de 20 litros/segundo, se desvía el agua mediante una canaleta hacia un depósito de capacidad conocida y se cronometra el tiempo que tarda en llenarse. El caudal se obtiene de la operación:

$$Q(m^3 / s) = \frac{\text{Volumen del deposito (litros)}}{\text{Tiempo de llenado (segundos)} * 1000}$$

Figura 44. Método del llenado de un depósito para medir un caudal



5.2.2.2 Medida del caudal mediante un flotador

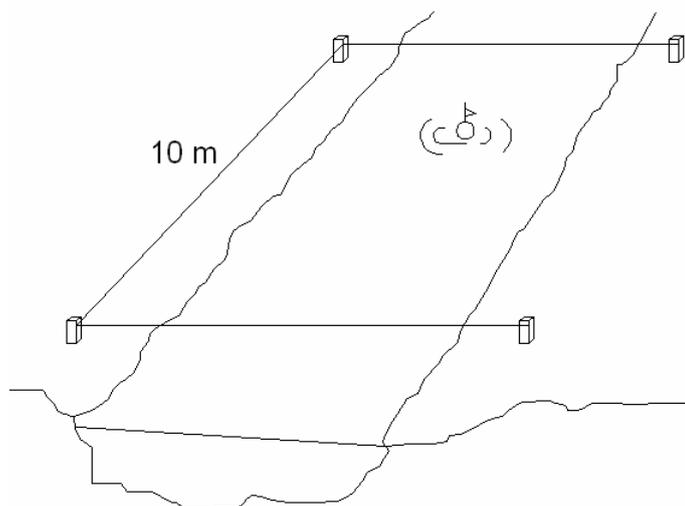
En los casos en que el nivel del agua tenga la profundidad suficiente y la velocidad del agua no sea excesiva, este método permite unos resultados bastantes aproximados.

En primer lugar, debe buscarse un tramo de unos 10m de longitud en que la sección sea lo más constante posible y medirla. A continuación se coloca un flotador en el centro de la corriente y se mide el tiempo en que el flotador recorre los 10 metros. El caudal se obtiene de:

$$\text{Velocidad del flotador} = \frac{\text{Longitud del tramo (metros)}}{\text{Tiempo que tarda en recorrerlo (segundos)}}$$

$$Q(m^3/s) = \text{Área de la sección (m}^2\text{)} * \text{Velocidad del flotador (m/s)} * 0.75$$

Figura 45. Medida del caudal mediante un flotador

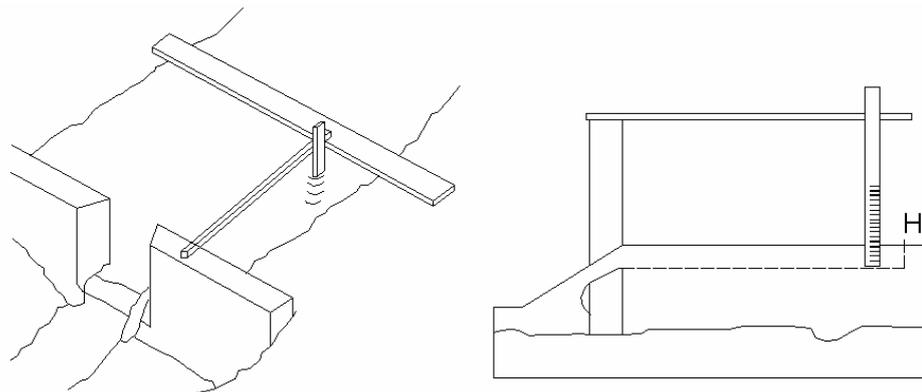


Nota: 0.75 es un factor de reducción de caudal, que se utiliza por seguridad.

5.2.2.3 Medida del caudal mediante el uso de un vertedero

En arroyos con caudales superiores a 25 litros por segundo, se puede utilizar un vertedero para determinar el caudal. Este método consiste en colocar una tabla de madera situada perpendicularmente al cauce, con una ranura de forma que todo el caudal pase por dicha ranura. Existen diferentes tipos de vertederos con distintos métodos para la medida de caudales.

Figura 46. Medida del caudal mediante el uso de un vertedero.



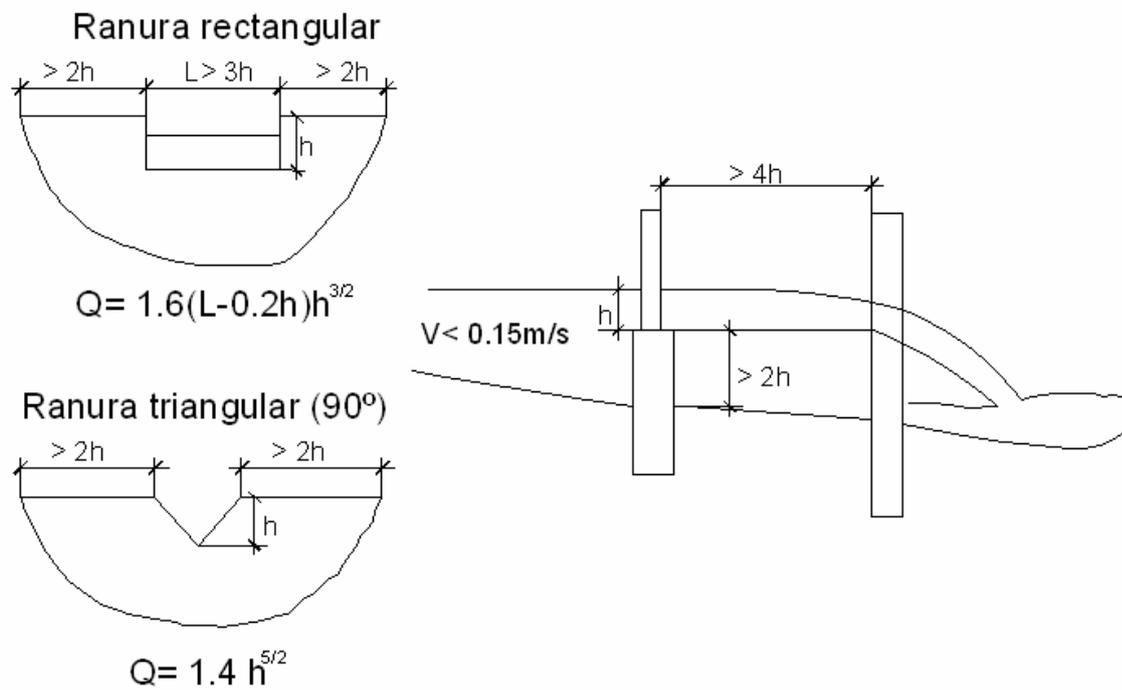
Fuente: Centráis Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 57.

Se puede usar este método siempre que el caudal no sobrepase los $4\text{m}^3/\text{s}$, haciéndolo pasar por un vertedero de sección conocida dispuesto perpendicularmente a la corriente. Los vertederos se clasifican, según la forma del corte: triangular, rectangular y trapezoidal.

Las experiencias llevadas a cabo en laboratorio permiten conocer los coeficientes de caudal correspondientes a los distintos tipos de vertedero.

Basta pues medir aguas arriba del mismo (como mínimo a una longitud igual a 4 veces la altura a medir) el nivel h , sobre el vertedero (figura 47).

Figura 47. Detalle de ranuras para vertederos.



Fuente: Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas
Ministerio de minas y energía, página 64.

5.2.3 Medidas indirectas del caudal

5.2.3.1 Medida del caudal por la pendiente de la lámina de agua

Este método, basado en la ecuación de Manning, se emplea para medir grandes caudales, con los que ninguno de los métodos anteriores da buenos resultados.

Para ello, se escoge un tramo del río de 50 a 300 metros de longitud, recto, de pendiente y sección uniformes. La pendiente de la lámina de agua se mide fijando en el cauce una serie de estacas; y la sección transversal, levantando un plano en varias secciones del cauce y calculando la media de sus áreas (A) y de sus radios hidráulicos (R_H). Con los que se calcula Q utilizando la fórmula de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} * R_H^{2/3} * S^{1/2} * A$$

El punto débil del método reside en la estimación del valor de n (tabla 5.1). En cauces naturales n es del orden de 0.035, por lo que un error de apreciación de 0.001 dará lugar a un error del orden del 3% en el valor del caudal.

Tabla X. Valores típicos del coeficiente n de Manning en cursos naturales

Cursos de agua	n
Arroyos limpios en los que el agua fluye suavemente	0.030
Arroyos o ríos normales en condiciones estables	0.035
Ríos poco profundos con meandros y abundante vegetación	0.045
Ríos o arroyos pocos profundos con ramas y piedras	0.060

5.3 Criterios de selección de turbinas o equipo electromecánico

El tipo, geometría y dimensiones de la turbina están condicionados, fundamentalmente, por los siguientes criterios:

- Altura de salto
- Caudal
- Problemas de cavitación
- Costo

5.3.1 Altura del salto

La altura de salto es la distancia vertical, medida entre los niveles de la lámina de agua en la toma y en el canal de descarga, en las turbinas de reacción, o el eje de tubos en las de turbinas de acción. Conocida la altura de salto bruto, para calcular el neto, basta deducir las pérdidas de carga, a lo largo de su recorrido.

También se puede estimar la altura de salto neto, para obtener la capacidad instalada señalada en el estudio de la demanda con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{P}{7.5 * Q}$$

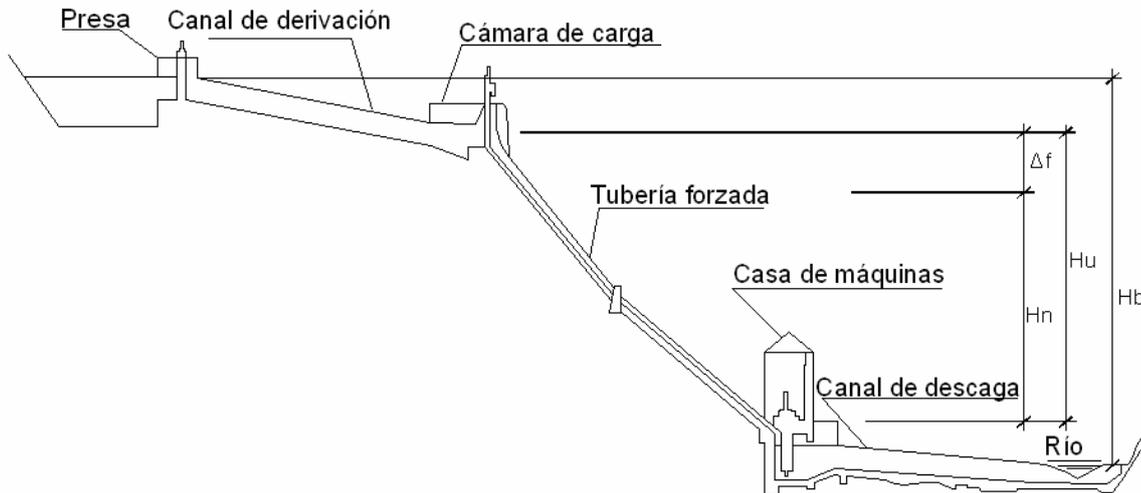
Donde:

H = Altura de salto neto, en metros

P = Potencia necesaria para satisfacer la demanda, en Kw

Q = caudal a conducir, en m³/s

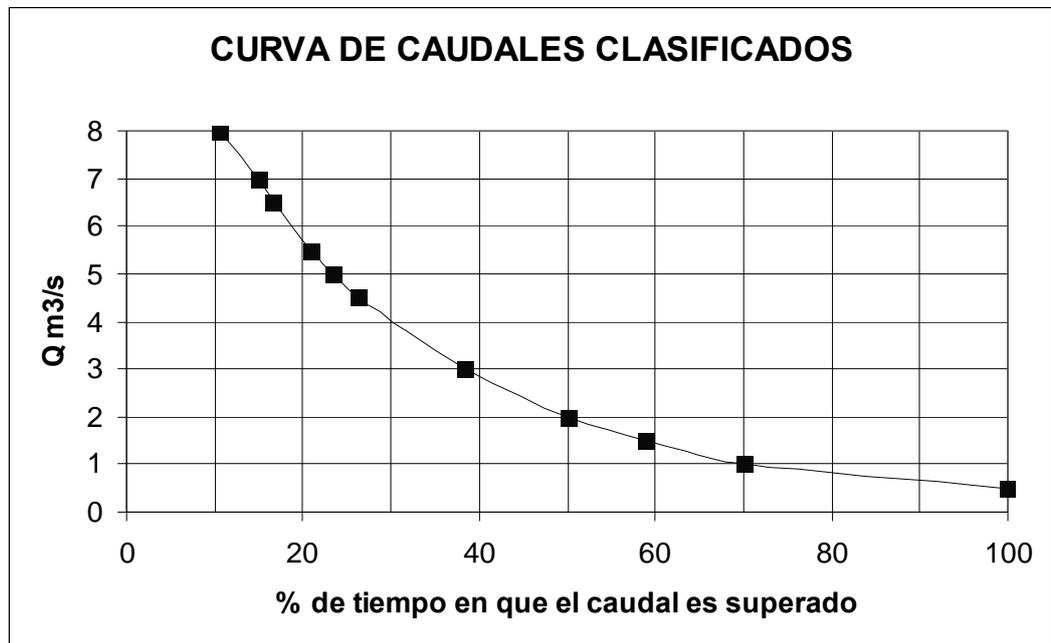
Figura 48. Altura de salto (H_b)



5.3.2 Caudal

Un valor aislado del caudal no tiene ninguna significación. Lo que interesa es el régimen de caudales, preferiblemente representado por la curva de duración de caudales clasificados (CCC) o curva de duración de caudales (CDC) obtenida de los datos procedentes de la estación de aforos o de los estudios hidrológicos, previos a la elección de la turbina. No todo el caudal representado en una CCC puede utilizarse para producir energía eléctrica. En primer lugar hay que descartar el caudal ecológico que tiene que transitar todo el año por el cauce. En segundo lugar, cada tipo de turbina solo puede trabajar con caudales comprendidos entre el nominal (para el que el rendimiento es máximo) y el mínimo técnico por debajo del cual no es estable.

Figura 49. Curva de caudales clasificados.



Fuente: **Centrais Eléctricas Brasileiras SA. Manual de Microcentrales Hidroeléctricas**
Ministerio de minas y energía, página 67.

Un caudal y una altura de salto definen un punto en el plano que reúne la envolvente operacional de cada tipo de turbina. Cualquier turbina dentro de cuya envolvente caiga dicho punto, podrá ser utilizada en el aprovechamiento en cuestión. La elección final será el resultado de un proceso iterativo, que balancee la producción anual de energía, el costo de adquisición y mantenimiento, y su fiabilidad.

5.3.3 Cavitación

Cuando la presión ejercida sobre un líquido en movimiento, desciende por debajo de su presión de vaporización, éste se evapora formando gran número de pequeñas burbujas, que al ser arrastradas a zonas de mayor presión, terminan por estallar. La formación de estas burbujas y su subsiguiente estallido, es lo que constituye la cavitación. La experiencia demuestra que el estallido de esas burbujas genera impulsos de presión muy elevados, que van acompañados de fuertes ruidos (una turbina en cavitación suena como si a través de ella pasasen un montón de grava), y que la acción repetitiva de esos impulsos produce una especie de corrosión difusa, formando picaduras en el metal. Con el tiempo esas picaduras, degeneran en verdaderas grietas con arrancamiento de metal. Las elevadas temperaturas generadas por esos impulsos y la presencia frecuente de gases ricos en oxígeno, agravan la corrosión. Un alabe sometido a cavitación aparece al cabo de cierto tiempo lleno de cavidades, lo que obliga a sustituirlo o, si aún se está a tiempo, a repararlo recargándolo por soldadura.

La experiencia demuestra que existe un coeficiente, llamado de toma, que define con bastante precisión, bajo que parámetros tiene lugar la cavitación.

Este coeficiente se define por la ecuación

$$\sigma_T = H_{suc} / H$$

Donde:

H_{suc} = altura de succión neta positiva

H = altura de salto

$$H_{suc} = H_{atm\ lugar} - z - H_{vap} + \frac{V_d^2}{2d} + H_1$$

Donde:

$H_{atm\ lugar}$ = presión atmosférica a una altitud de Z .

H_{vap} = presión del vapor de agua, a su paso por la turbina.

Z = altura de aspiración, o distancia entre el eje del rodete en turbinas de eje horizontal, o de su plano de referencia en turbinas de eje vertical, y la lamina de agua en el canal de descarga.

V_d = velocidad media del agua al salir al canal de descarga.

H_1 = pérdida de carga en el difusor.

Si se desprecian las pérdidas de carga en el difusor y la altura correspondiente a la velocidad de salida V_d , el valor sigma critico del aprovechamiento vendrá definido por la ecuación:

$$\sigma_T = (H_{atm\ lugar} - H_{vap} - Z) / H$$

Para que no haya cavitación, la turbina deberá instalarse, como mínimo, a una altura de nivel Z_p sobre la lámina de agua en el canal de descarga dada por la ecuación:

$$Z_p = H_{atm} - H_{vap} - \sigma_T H$$

Donde:

$$H_{atm\ lugar} = H_{atm} * e^{-\left(\frac{z * g}{T * T_m}\right)}$$

Donde:

$H_{atm\ lugar}$ = presión atmosférica a una altitud de Z .

H_{atm} = presión atmosférica estándar 1,013.3 Hpa.

Z_p = altitud del nivel en metros sobre el nivel del mar.

g = aceleración de la gravedad 9.8m/s^2 .

T_m = temperatura media entre los niveles de $H_{atm\ lugar}$ y H_{atm} en kelvin 293 K.

R = constante de los gases $287.04\text{ m}^2/\text{seg}^2\text{ K}$

Para cada lugar se debe calcular la presión atmosférica, ya que es diferente. Por ejemplo, el departamento de Santiago Sacatepéquez tiene 1,530 metros sobre el nivel del mar, entonces la presión atmosférica del lugar es de:

$$H_{atm\ Santiago} = 1,013.3 * e^{\left(\frac{1,530 * 9.81}{287.04 * 293}\right)}$$

$$\underline{H_{atm\ Santiago} = 847.68\text{ HPa} = 84,768\text{ Pa}}$$

La presión de vapor a una temperatura normal de 25°C es de 23.76mmHg que es equivalente a $0.32\text{mH}_2\text{O}$ y a 3,169.60 Pa.

5.4 Estimación de la demanda energética

Para la determinación de la demanda es necesario establecer ciertos índices y metas en el año, para el cual se diseñan las micro-hidroeléctricas y que están basados en la observación del comportamiento del sector rural, con cierto grado de electrificación.

Al mismo tiempo, se debe aclarar que los parámetros que se obtienen, no serán exactos y estarán influidos por los errores que una estimación a largo plazo produce.

Para el caso de electrificación rural, al igual que a nivel de país, se adoptan los siguientes tipos de consumidores: residencial, agroindustrial, alumbrado público y otros.

5.4.1 Estimación de la demanda actual

Se considera la demanda actual en función del número de habitantes.

Tabla XI. Demanda actual para distintas poblaciones.

POBLACIÓN (habitantes)	DEMANDA DE POTENCIA
100 – 500	15 kw - 35 kw
500 – 1,000	35 kw - 100 kw

Se ha supuesto que la potencia instalada per cápita W/hab. sea de 30W – 60W por habitante. **Fuente: Jorge Heriberto Estrada Vásquez. Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Guatemala: USAC, página 59.**

5.4.2 Estimación de la demanda futura

Se calcula la demanda futura para un periodo de 15 años. La tasa de incremento de la demanda de energía se puede estimar en un 4 a 10% anual, según características del crecimiento anual de población, el nivel de vida social y los proyectos de desarrollo de la zona en estudio. La tasa que se elige es a criterio del diseñador, basado en el estudio de desarrollo de la comunidad.

La fórmula para dicha estimación es:

$$F = A * \left(1 + \frac{P}{100} \right)^n$$

Donde:

F = Demanda futura en Kw

A = Demanda actual en Kw

P = Crecimiento anual de la demanda de energía en %

N = Número de años para los que se hace la estimación.

Se asume, además, que a 15 años plazo, el consumo comercial será de 20% del consumo residencial, el consumo agroindustrial será el 30% del residencial y el alumbrado público y otros es el 10% del consumo residencial. Estos porcentajes han sido determinados en base a la experiencia que se ha tenido en proyectos similares, en los cuales se observa que en la comunidad en estudio se obtienen datos irreales de consumidores, siempre hay periferias y aldeas que se incorporan inicialmente, surgen comercios y agroindustria a corto y mediano plazo.

6 EJEMPLO DE ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA ALDEA LOS LAURELES, MUNICIPIO DE SANTIAGO SACATEPÉQUEZ, DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ

6.1 Marco referencial

SACATEPEQUEZ: el departamento de Sacatepéquez está situado en la región V o Central de la República, a 1,530 metros sobre el nivel del mar y pertenece al "Complejo Montañoso del Altiplano Central". Su cabecera departamental es Antigua Guatemala y se encuentra a 54 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala. Cuenta con una extensión territorial de cuatrocientos sesenta y cinco (465) kilómetros cuadrados, con los siguientes límites: Al Norte, con el departamento de Chimaltenango; al Sur, con el departamento de Escuintla; al Este, con el departamento de Guatemala; y al Oeste, con el departamento de Chimaltenango. Se ubica en la latitud 14° 33' 24" y en la longitud 90° 44' 02". Su precipitación pluvial anual acumulada es de 952.50 mm., con un clima templado y semifrío.

Su jurisdicción departamental comprende 16 municipios que son:

1. Antigua Guatemala
2. Jocotenango
3. Pastores
4. Santa Domingo Xenacoj
5. Sumpango
6. Santiago Sacatepéquez
7. San Bartolomé Milpas Altas

8. San Lucas Sacatepéquez
9. Santa Lucía Milpas Altas
10. Magdalena Milpas Altas
11. Santa María de Jesús
12. Ciudad Vieja
13. San Miguel Dueñas
14. Alotenango
15. San Antonio Aguas Calientes
16. Santa Catarina Barahona

Figura 50. Ubicación de Sacatapéquez.



6.2 Estudio geológico

a) Ubicación y accesibilidad: el área escogida para la construcción de la micro-hidroeléctrica tiene como nombre aldea Los Laureles, que pertenece al municipio de Santiago Sacatepéquez del departamento de Sacatepéquez.

A la aldea Los Laureles se accede por vía terrestre, la carretera es de tercercería.

b) Clima: el clima de la zona es templado y semifrío, con grandes precipitaciones pluviales en épocas de invierno (mayo – octubre).

c) Estratigrafía²

- Depósitos aluviales: geomorfológicamente son depósitos de flujos de barro provocados por deslizamiento.
- Estratos tobaceros, incluyendo tobos subacuático, sillar, ignimbrita soldada, toba subárea y flujos delgados de andesita y basalto.
- Tierra de granito, monzonita de cuarzo, granodiorita y cuarzo diorita.

² Instituto Geográfico Nacional (IGN), mapa geológico de San Juan Sacatepéquez a escala 1:50,000, hoja 2060 IIG

6.3 Descripción del proyecto

La población a beneficiar es la aldea Los Laureles del municipio de Santiago Sacatepéquez del departamento de Sacatepéquez, cuya población es de 210 habitantes.

Ríos, riachuelos y quebradas que componen la cuenca del río Chiplátanos son (ver figuras 51 y 52, páginas 107-109)³:

Ríos:

- Río Xaltayá
- Río Chinimayá

Riachuelos:

- Riachuelo Chitzirin
- Riachuelo Chaquijchoy

Quebradas:

- Quebrada Cruz de Piedra
- Quebrada Chipanquín
- Quebrada Canacán

El río seleccionado para la generación de energía es el Chiplátanos.

³ Instituto Geográfico Nacional (IGN), mapa cartográfico de la Ciudad de Guatemala a escala 1:50,000, hoja 2059 I

Figura 51. Mapa cartográfico del departamento de Sacatepéquez

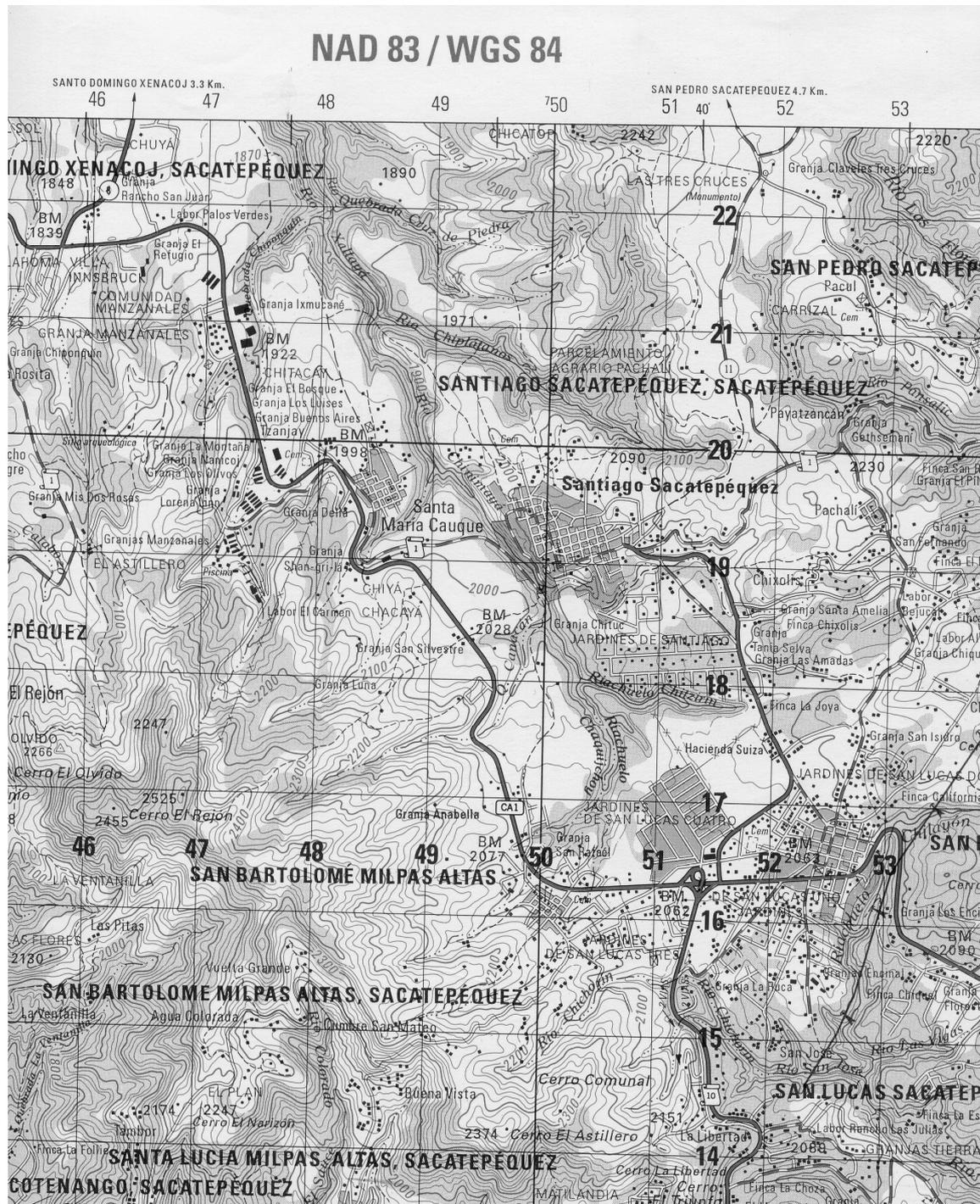
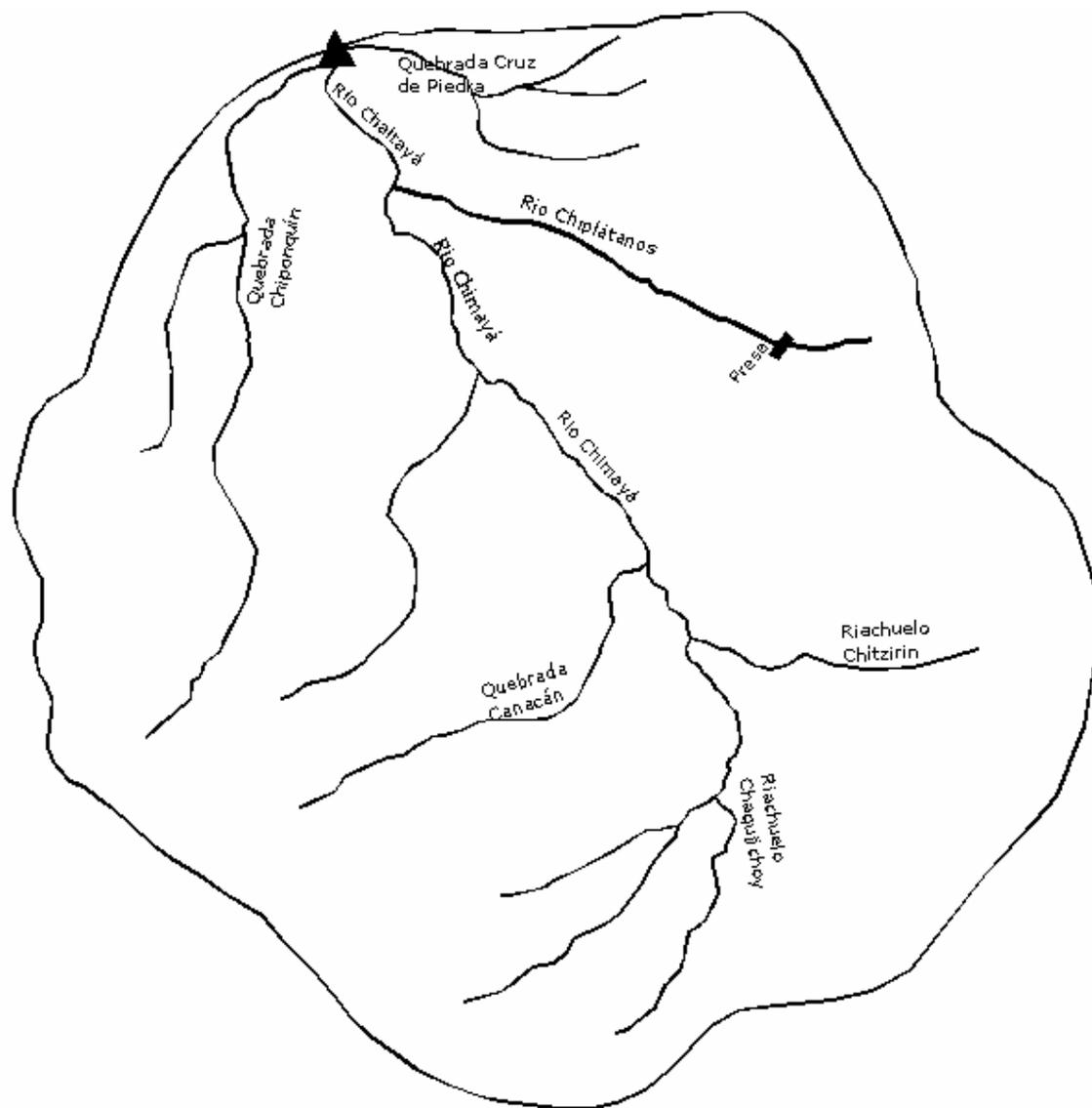


Figura 52. Cuenca



Área de la Cuenca = $1.2858 \text{ km}^2 = 1,285,800.00 \text{ m}^2$

Longitud del Río Chiplatanos = $4 \text{ km} = 4,000 \text{ m}$

6.4 Datos obtenidos

Los siguientes datos fueron obtenidos de las figuras 53, 54 y 55.

- a) Densidad del agua = $1,000 \text{ Kg/m}^3$.
- b) En el lugar de captación se construirá una presa de 2m de ancho, esto depende del ancho del río.
- c) La conducción se hará por medio de un canal abierto que tendrá una longitud de 250m (distancia de la presa hacia la cámara de compensación), el cual se revestirá de concreto con una pendiente longitudinal de 0.05%.
- d) La tubería reforzada tendrá una longitud de 203m (distancia de la cámara de compensación hacia la casa de máquinas).
- e) La caída localizada es de aproximadamente de 42m (diferencia de nivel entre la presa y la casa de máquinas).
 $H = 2020\text{m} - 1978\text{m} = 42\text{m}$
- f) Las partículas arrastradas por el río tienen un diámetro máximo de 0.3mm.

A continuación se presentan un perfil del anteproyecto, el cual se elaboró a partir del mapa con curvas de nivel (figura. 54).

Figura 53. Niveles de estructuras.

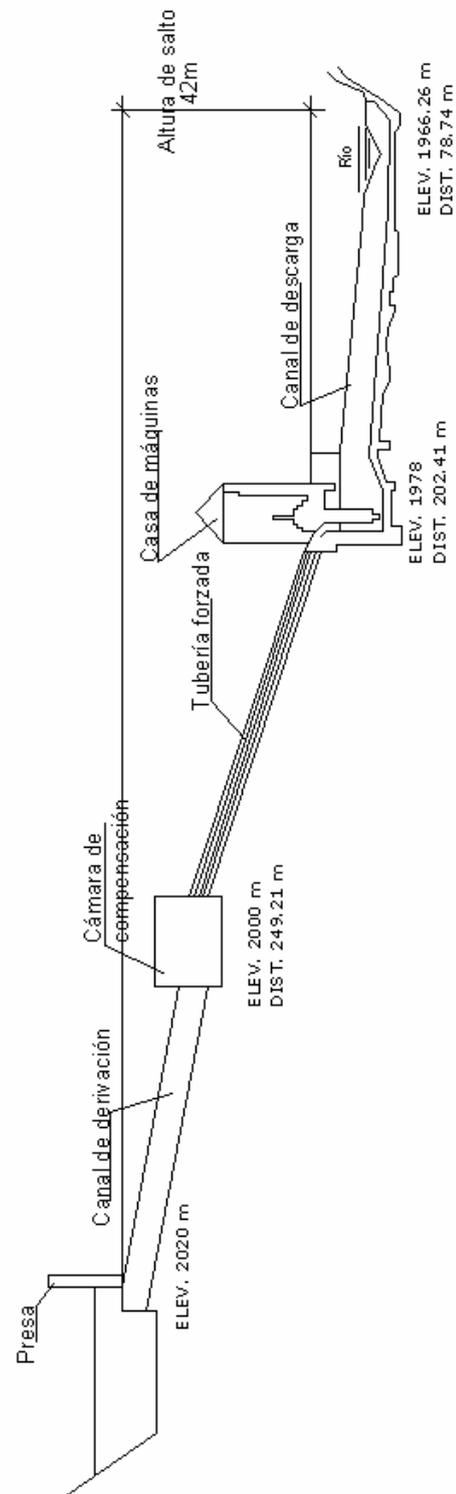


Fig. 54 Planta de ubicación de estructuras

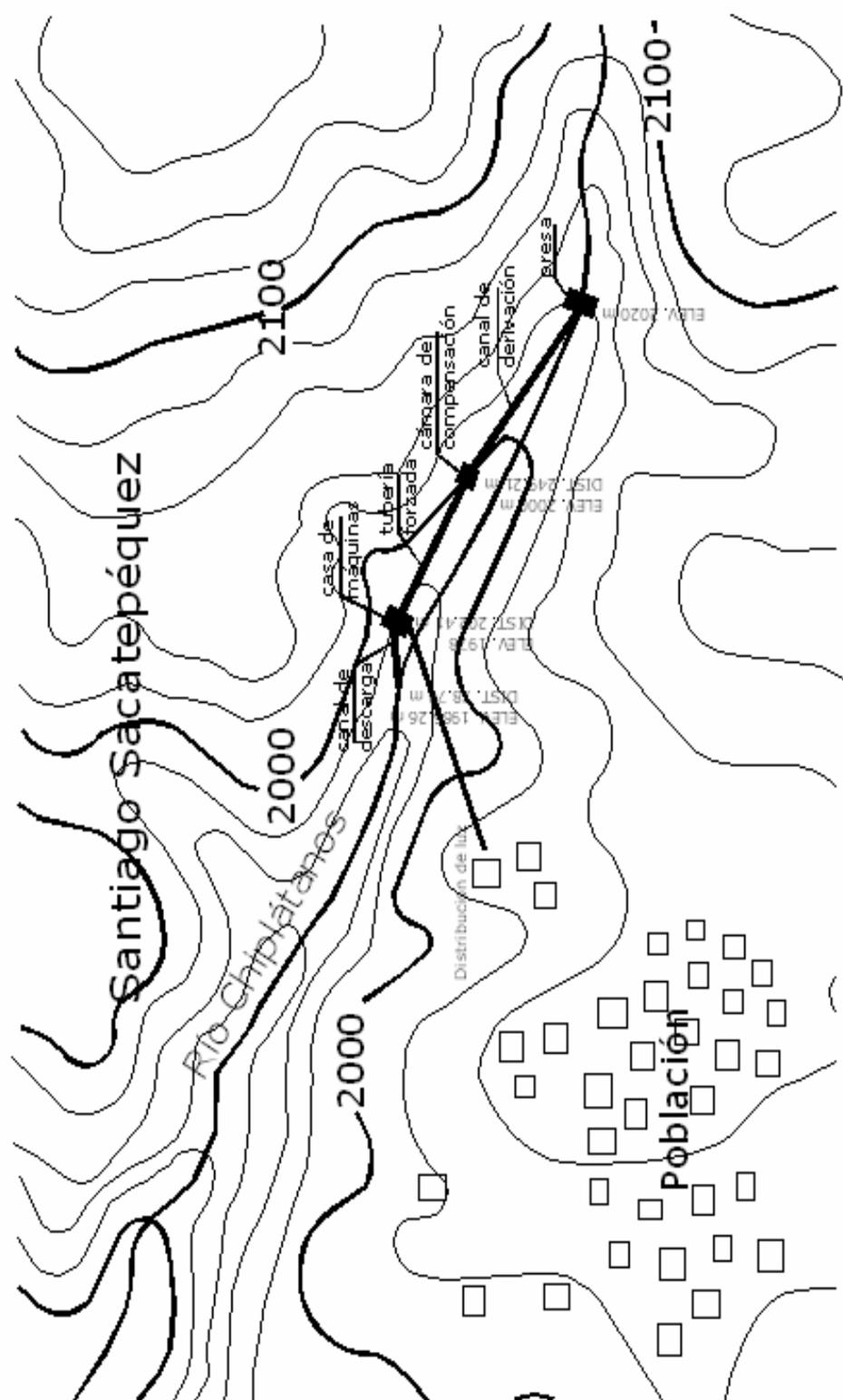
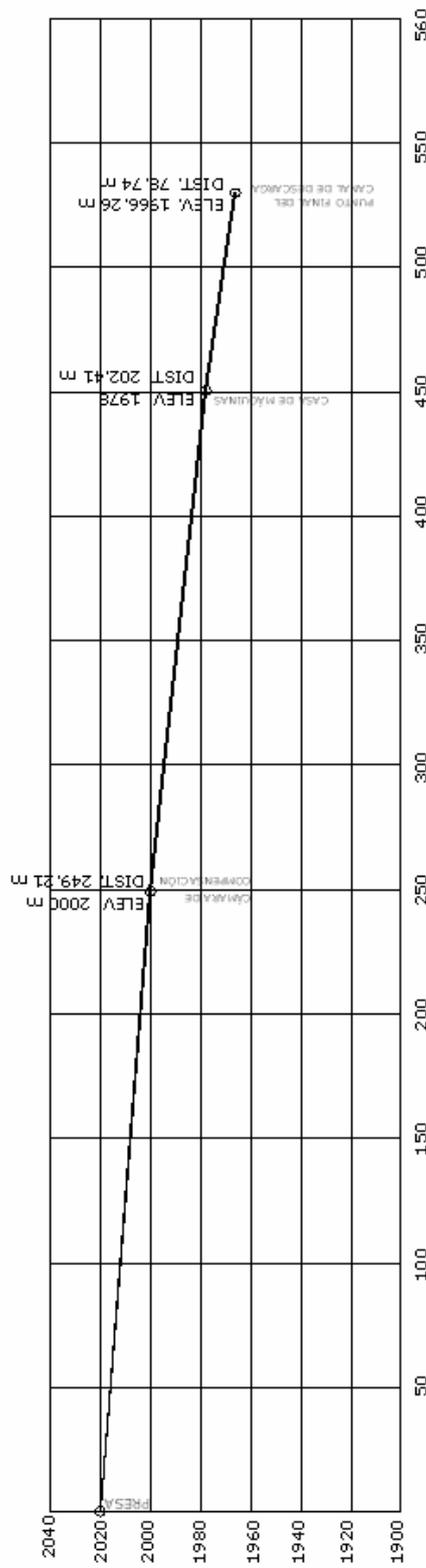


Fig. 55 Perfil de estructuras



6.5 Estimación del caudal aprovechable

Los cálculos del caudal fueron proporcionados por la empresa IERSA (Ingeniería de Energía Renovable, S.A.).

Dicha empresa utilizó dos métodos para calcular el caudal del río Chiplátanos, los cuales se describen continuación:

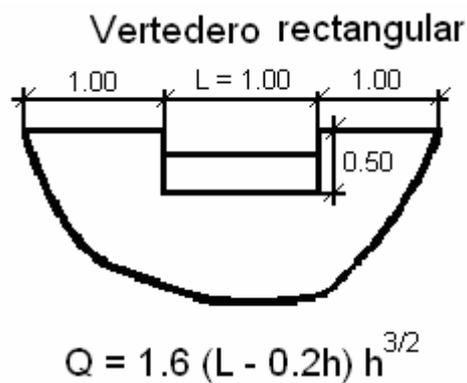
- **Según método volumétrico de llenado de un depósito para medir caudal** (sección 5.2.2.1, pág. 88)

Con base a este método se obtuvieron diferentes caudales utilizando un depósito de volumen de 50 galones que es equivalente a 0.1893 m^3 .

AÑO	MES	DÍA	HORA	TIEMPO DE LLENADO (segundos)	VOLUMEN (m ³)	CUADAL (m ³ /s)
2006	Septiembre	15	9:30 AM	0.35	0.1893	0.541
		16	11:00 AM	0.45	0.1893	0.421
2006	Octubre	20	10:00 AM	0.64	0.1893	0.296
2007	Enero	20	10:30 AM	0.83	0.1893	0.228
PROMEDIO =						0.371

- **Medida de caudal mediante el uso de un vertedero** (sección 5.2.2.3, pág. 91)

La empresa IERSA construyó un vertedero con las siguientes medidas:



Con base a este vertedero se obtuvieron los siguientes caudales:

AÑO	MES	DÍA	HORA	ANCHO DEL VERTEDERO (m)	ALTURA DEL AGUA (m)	CUADAL (m ³ /s)
2007	Mayo	19	9:30 AM	1.00	0.41	0.386
			10:30 AM	1.00	0.38	0.346
			11:30 AM	1.00	0.3	0.247
PROMEDIO						
=						0.326

El caudal se obtendrá de los promedios de los métodos el cual será de:

$$\text{Caudal} = \left(\frac{0.371 + 0.326}{2} \right) = 0.3485 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\underline{\underline{\text{Caudal} = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

6.6 Estimación del consumo de energía

- Demanda actual
 - Hab. = 210
 - De la sección 5.4.1, pág. 101, tabla 5.2 en el rango que se encuentra es de 15 - 35 Kw

$$\underline{\underline{\text{Promedio} = (15 + 35)/2 = 25\text{Kw}}}$$

- Demanda futura
 - Se calcula para un periodo de 15 años
 - Se estimará un crecimiento de 5% anual
 - Sección 5.4.2, pág. 102

$$F = A * (1 + P/100)^n$$

$$F = 25 * (1 + 5/100)^{15}$$

$$\underline{\underline{F = 51.97 = 52 \text{ Kw}}}$$

- Al consumo residencial, se incorporará: consumo comercial, consumo agroindustrial y consumo de alumbrado público.

Consumo residencial	=	52Kw
Consumo comercial 20%	=	52(0.20) = 10.4Kw
Consumo agroindustrial 30%	=	52(0.30) = 15.6Kw
Consumo alumbrado público 10%	=	52(0.10) = 5.2 Kw

Consumo total = 83kw

6.7 Determinación de la altura de salto

- La caída localizada

$H_{\text{localizada}} = \text{elevación presa} - \text{elevación casa máquinas}$

$H_{\text{localizada}} = 2020\text{m} - 1978\text{m} = \mathbf{42\text{m}}$

- La altura de salto recomendable o salto neto (sección 5.3.1, pág. 95)

$$H = \frac{P}{7.5 * Q} = \frac{83}{7.5 * 0.35}$$

H = 31.62 m

Caída localizada > altura de salto recomendable

42 > 31.62 si cumple

6.8 Predimensionamiento del canal abierto

- Pendiente $S = 0.05\%$
- Talud recomendado por el tipo de suelo es de 2:1 (según tabla V, pág. 57)
- Coeficiente de rugosidad para concreto = 0.015
- Dimensiones del canal: será de sección trapezoidal, el cual deberá tener un radio hidráulico óptimo de $R = y/2$, para conducir un caudal de $0.33\text{m}^3/\text{s}$, se revestirá de concreto $n = 0.015$ (tabla II, pág.54).

$$\text{Área: } A = (b+zy)y = by + 2y^2 \quad (\text{sección 3.5, pág.55})$$

$$\text{Perímetro mojado: } P = b + 2y\sqrt{1+z^2} = b + 2y\sqrt{1+2^2} = b + 4.47y$$

$$\text{Radio hidráulico: } \text{Área/perímetro mojado}$$

$$R_h = \frac{by + 2y^2}{b + 4.47y} \quad R_h = y/2 \text{ (Radio hidráulico óptimo)}$$

$$\frac{by + 2y^2}{b + 4.47y} = \frac{y}{2} \quad \text{dejar } b \text{ en función de } y$$

$$b = 0.47 y$$

Sustituyendo $b = 0.47y$ en área y perímetro mojado

$$A = 0.47y^2 + 2y^2 = 2.47 y^2$$

$$P = 0.47y + 4.47y = 4.84 y$$

$$R_h = y/2$$

Sustituir en la ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2} * A$$

$$0.35 = \frac{1}{0.015} * \left(\frac{y}{2}\right)^{2/3} * (0.005)^{1/2} * 1.478242 * (0.7468 * 0.01 * 241.92 * 647.0098 * y)$$

$$\mathbf{y = 0.4920m = 0.50m}$$

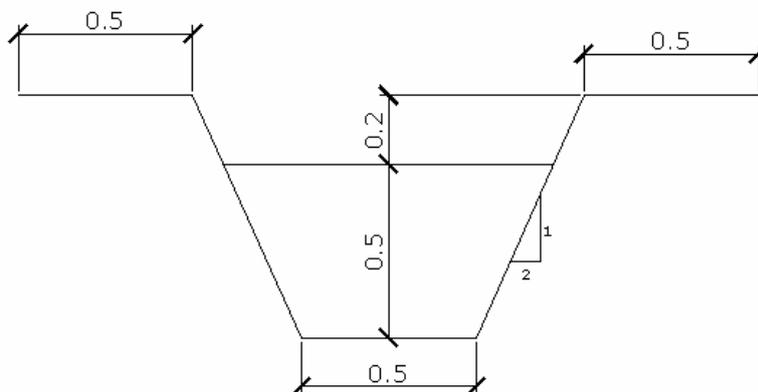
$$\mathbf{b = 0.47 y = 0.47(0.50) = 0.2350m = 0.25m}$$

$$\mathbf{V = Q/A = 0.35 / ((0.25 * 0.50) + (2 * 0.50^2)) = 0.56m/s}$$

- Borde libre B.L.

$$B.L. = \frac{Y}{3} = \frac{0.50}{3} = 0.2m$$

- Ancho de la corona: a criterio del diseñador tendrá 0.50m



Detalle del canal

6.8.1 Energía del canal abierto

$$E = Y + \frac{\alpha * V^2}{2g} \quad \text{donde } \alpha = 1 \quad (\text{sección 3.5.1, pág. 58})$$

$$E = 0.5 + \frac{1 * 0.53^2}{2 * 9.81} = 0.51m$$

Caudal unitario:

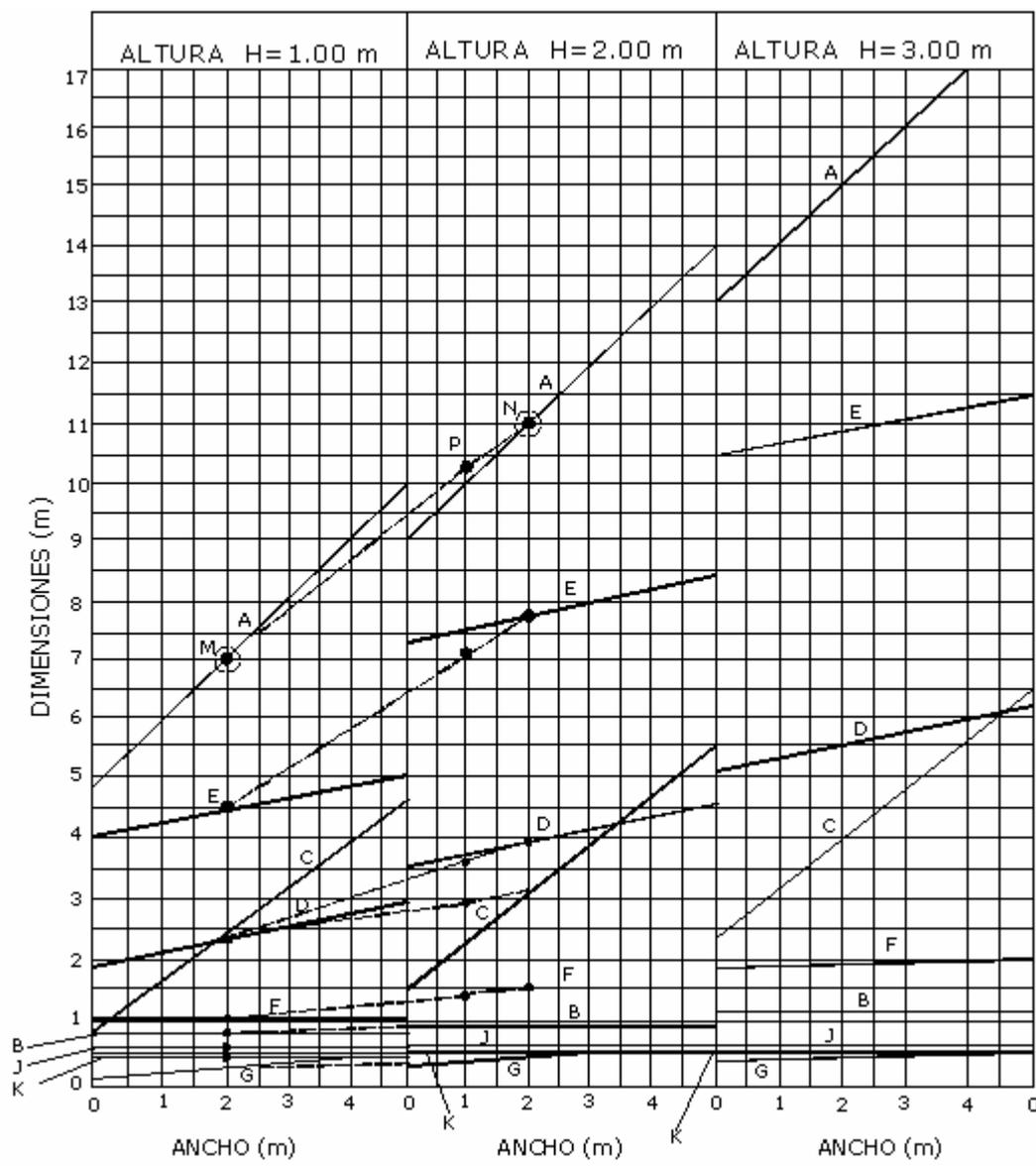
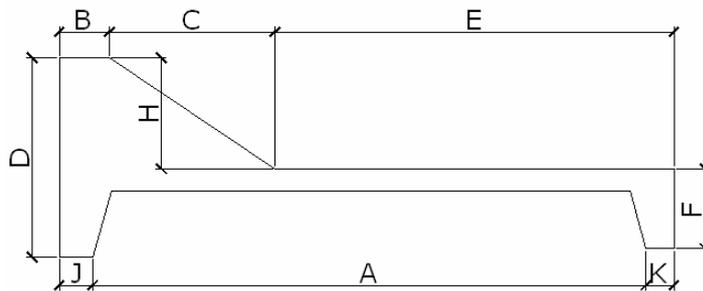
$$q = \frac{Q}{b} = \frac{0.35}{0.25} = 1.40m^2 / s$$

Tirante crítico:

$$Y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{2/3} = \left(\frac{1.40^2}{9.81} \right)^{2/3} = 0.34m$$

6.9 Predimensionamiento de la presa

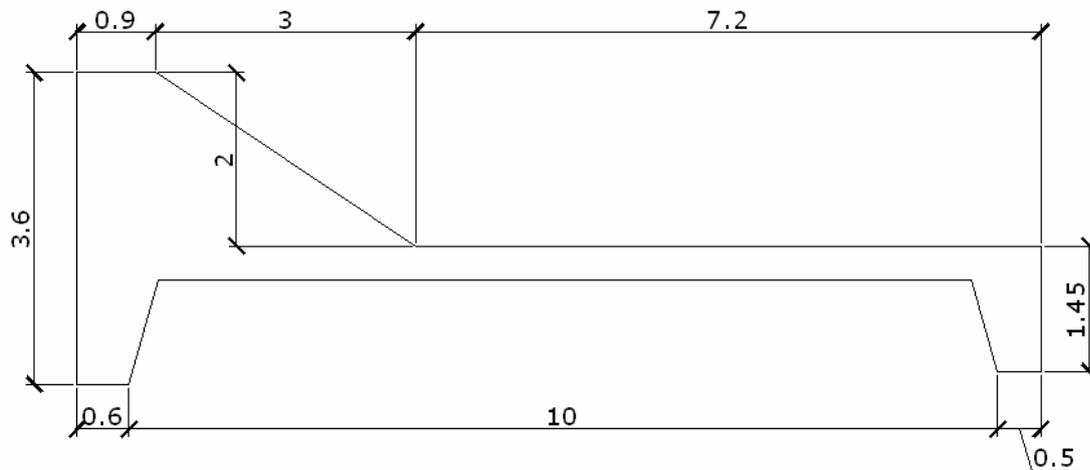
- La presa tendrá un ancho de 2m para derivar un caudal de $0.35m^3/s$ al canal abierto que tiene un tirante $y = 0.50m$
- Para encontrar las dimensiones de la presa se utilizará el figura 20, pág. 38, sección 3.1



- Utilizando la figura 20 se obtienen las dimensiones directamente para los valores de H de 1m, 2m y 3m.
- Cuando se requiere obtener las dimensiones para valores de H intermedios, se debe interpolar, midiendo la distancia y multiplicando por 0.8.
- H = 1.50m y ancho de 2.00
 1. En el esquema 3.3 para H=1.00 con un ancho = 2.00m, en las abscisas, se obtiene el punto M en la curva A.
 2. En el esquema 3.3 para H=2.00 con un ancho = 2.00m, en las abscisas, se obtiene el punto N en la curva A.
 3. Se une con una recta los puntos M y N, se multiplica la distancia por 0.8 y se obtiene el punto P.
 4. Proyectando este punto sobre las ordenadas del esquema en la escala correspondiente a "dimensiones", se lee el valor de A = 10.00, que es el correspondiente a una presa de ancho de 2.00m y con una altura de 1.50m.
 5. Igual procedimiento se sigue para cada una de las otras dimensiones en su curva correspondiente.

Dimensiones de la presa:

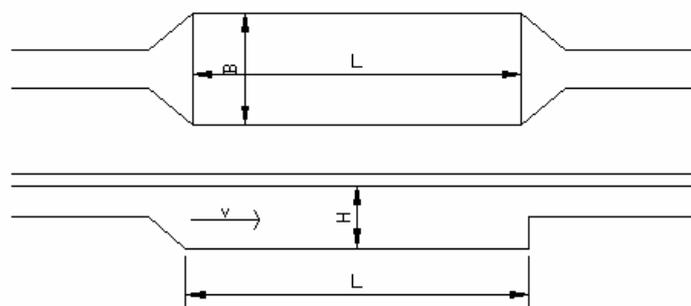
A = 10.0m	E = 7.20m	G = 0.40m
C = 3.0m	D = 3.60m	F = 1.45m
B = 0.90m	J = 0.60m	K = 0.50m

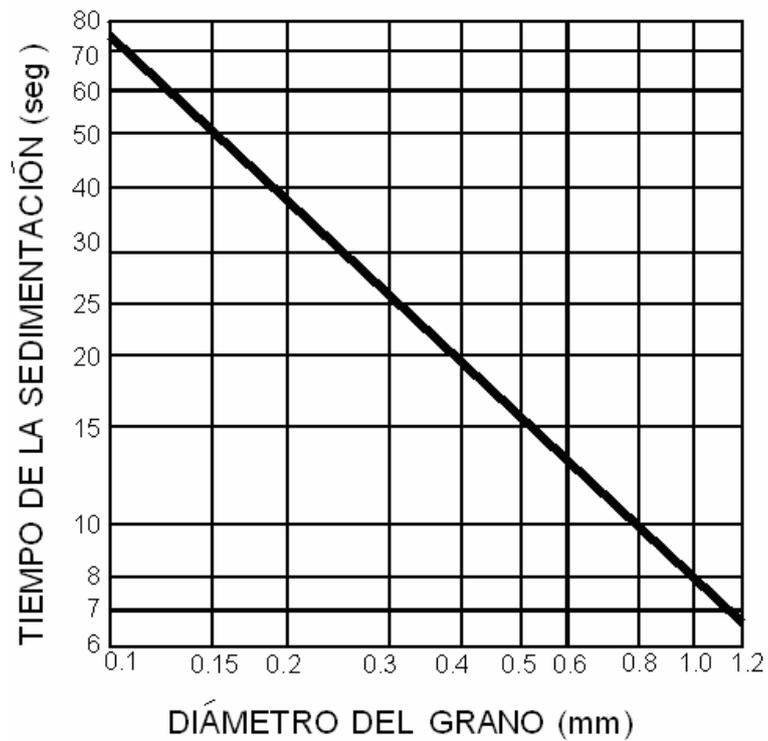


Detalle de la presa

6.10 Predimensionamiento del desarenador

- El desarenador se ubicará antes de la presa, si el canal tiene una longitud de 250m.
- Dimensiones del desarenador
- Sección 3.6, pág. 60 y 61





- Para predimensionar el desarenador quedará a criterio del diseñador ubicarlo con el terreno disponible, usando la siguiente fórmula:

-

$$L = V * H * T * C$$

Donde:

V = Velocidad del agua

H = Profundidad del desarenador

T = Tiempo de sedimentación

C = Coeficiente de seguridad (1.5 – 2.0)

L = Longitud del desarenador

- Se dará un ancho de $B = 3.0\text{m}$ y una profundidad de $H = 1.0\text{m}$. El diámetro máximo del grano es de 0.3mm y el caudal es $0.35\text{m}^3/\text{s}$

$$V = \frac{Q}{B * H} = \frac{0.35}{3 * 1} = 0.12\text{m} / \text{s}$$

- Para el tiempo de sedimentación se interpola en la gráfica 5.1 la curva con el diámetro de 0.3mm y da un equivalente de $T = 25\text{s}$.

o

- Se usará un coeficiente de seguridad de $C = 2$

$$L = 0.12 * 1 * 25 * 2$$

$$\underline{\underline{L = 6.00\text{m}}}$$

6.11 Potencia generada por la altura de salto

Para calcular la potencia a generar se usará la fórmula dada en la sección 4.4.5, pág. 81.

$$r = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad H = 42\text{m} \quad Q = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

$n = 75\%$ (esta la asume el diseñador)

$$P = \frac{(r * Q * H)}{102} * \frac{n}{100} = \frac{(1000 * 0.35 * 42)}{102} * \frac{75}{100}$$

$$\underline{\underline{P = 108 \text{ kw}}}$$

6.12 Selección preliminar de la turbina

- Se usa la tabla VII, sección 4.4.5, pág. 80
- Como el salto es de 42m resulta que es apta para las turbinas Francis y Michell-Banki.
- Se recomienda utilizar una turbina Francis.
- Por lo que se tendrá que comprar una turbina de 100kw, ya que la demanda es de 83kw.

6.13 Predimensionamiento del diámetro de la tubería forzada

- La tubería tendrá una longitud de 203m.
- Como la altura del salto es 42m.
- $H < 100$ se utilizará la fórmula de la sección 3.4, pág. 47
$$D = (0.0052 * Q^3)^{1/7} * 1000$$
$$D = (0.0052 * 0.35^3)^{1/7} * 1000$$

D = 300mm que equivale a 12pulgadas

El material será decidido por el diseñador y dependerá de las condiciones del terreno.

6.13.1 Pérdida por fricción

- La longitud de la tubería forzada es de 203m, un caudal de $0.35\text{m}^3/\text{s}$, diámetro de la tubería PVC es de 12".
- Velocidad de la tubería:

$$Q = V \cdot A \quad V = \frac{Q}{A} = \frac{0.35}{\pi (0.30/2)^2} = 4.95\text{m/s}$$

- Número de Reynolds (sección 3.4.1, pág. 48)

$$N_R = \frac{DV}{\nu} = \frac{0.30(4.95)}{1.519 \times 10^{-3}} = 978$$

Como el número de Reynolds es menor de 2000 entonces el flujo es laminar, para sacar el coeficiente de fricción (f) se utiliza la gráfica dada en la página 51.

- La gráfica determina que el coeficiente de fricción es igual (sección 3.4.2, pág. 50):

$$f = \frac{64}{N_R} = \frac{64}{922} = 0.069$$

- Pérdida de carga por fricción de la tubería forzada es (sección 3.4.2, pág. 50):

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2g} \quad \text{pág.50}$$

$$h_f = 0.069 \left(\frac{203}{0.30} \right) \frac{4.95^2}{2(9.81)}$$

$$\mathbf{h_f = 58.31m}$$

6.13.2 Pérdida de carga por turbulencia

Sección 3.4.3, pág. 52:

$$h_f = \frac{V^2}{2g} = \frac{4.95^2}{2(9.81)} =$$

$$\mathbf{h_f = 1.25m}$$

6.14 Cavitación

El diseño que se trabajó no provocará cavitación, porque el nivel de agua de salida es superior al nivel de entrada de la turbina, por lo tanto no habrá cálculo de altura de succión positiva (H_{suc}), ya que no se trata de una succión.

Si un diseño de micro-hidroeléctrica no cuenta con una presa y la turbina se encuentra al mismo nivel o superior al nivel de agua, entonces allí existirá una succión; por lo se tendrá que calcular la cavitación.

CONCLUSIONES

1. Las micro-hidroeléctricas pueden contribuir en una buena parte al desarrollo de las poblaciones rurales, para que éstas gocen de un servicio energético, tanto a corto, mediano como a largo plazo.
2. Una de las formas de proveer energía eléctrica a bajo costo a comunidades pequeñas y lejanas, es por medio del aprovechamiento hidráulico, a través del desarrollo de micro-hidroeléctricas.
3. Las obras de captación, conducción y generación de energía, son parte constitutivas del esquema de aprovechamiento hidroeléctrico, por lo que necesitan ser diseñadas y construidas, de manera tal que cumplan con condiciones eficientes de funcionamiento.
4. Donde los períodos de estiaje son súbitamente seguidos por fuertes avenidas, es necesario incorporar a la presa un vertedero para que el exceso de agua pueda pasar sin producir daños sobre la parte superior de la presa.
5. Las fórmulas, tablas, esquemas y figuras presentadas en este trabajo son aplicables a problemas de cálculo y diseño de la obra civil para una micro-hidroeléctrica.

RECOMENDACIONES

1. Para obtener la medida de un caudal más exacto deberán realizarse aforos periódicamente durante un año antes de empezar a diseñar la micro-hidroeléctrica, para diseñar en base a un caudal representativo, y deberá tomarse por lo menos tres veces en cada época del año.
2. En el presente trabajo de graduación se indican los criterios que sirven como guía de diseño y construcción, pero cada proyecto difiere uno del otro, las obras varían en dimensiones y aspectos estructurales, pero tienen siempre las mismas funciones. Por lo tanto, se recomienda que con base a los recursos naturales de cada población se diseñen las obras de la micro-hidroeléctrica.
3. Es importante que el estado cree un programa de construcción de micro-hidroeléctricas para el proceso y mejora de electrificación del país.
4. Buscar en el mercado mundial existente, los equipos electromecánicos que tengan en disponibilidad, fabricados en serie, es decir, no por pedido específico; esto con la finalidad de bajar costo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AZEVEDO, J.M. **Manual de Hidráulica**. Sexta edición. México: Editorial Harla, 1975.
2. BALZER, W. **Cómo hacer teorías**. Madrid: Alianza Editorial, 1997.
3. Centráis Eléctricas Brasileiras SA. DNAE. **Manual de Microcentrales Hidroeléctricas Ministerio de minas y energía**. Electrobas. Brazil, Junio 1985.
4. EPDCI, Proyecto: **Rehabilitación de las Centrales Hidroeléctricas para el desarrollo de las áreas provinciales y rurales**. Japón: S.P.I, 1992.
5. ESTRADA Vásquez, Jorge Heriberto. **Tesis Pequeñas Centrales Hidroeléctricas**. Guatemala: USAC, Octubre 1993.
6. GTZ. **Taller de Microcentrales Hidroeléctricas**. Montevideo, Uruguay, Noviembre 1990.
7. INVERSIN, Allen R. **Micro-Hydropower Sourcebook**. Washington, DC, USA: NRECA, June 1990.
8. ORDOÑEZ Sáenz, Sandra esperanza. **Tesis Metodología de Estudio para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas a nivel de Prefactibilidad**. Guatemala: USAC, Octubre 1990.

9. KHENNAS, Smail y Andrew Barnett. **Best Practices for Sustainable Development of Micro-Hydropower in Developing Countries.** Cambridge Massachusetts, USA: UK, March 2000.

10. VIEJO ZUBICARAY, Manuel y Pedro Alonso Palacios. **Energía Hidroeléctrica Turbinas y Plantas Generadoras.** México: Editorial Limusa, 1977.