

---

# *Manual para ayudar la comprensión del diseño de microcentrales hidroeléctricas aisladas*

---

## **Agradecimientos**

---

En el marco de la redacción de este manual, se agradece especialmente a la ONG Soluciones Prácticas, y en particular a Robert Cotrina, Gilberto Villanueva, Fernando Acosta y Miguel por las informaciones que brindaron y la interesante visita del proyecto de microcentral hidroeléctrica en Yanacancha Baja, Cajamarca. Muchas gracias también al operador de la microcentral de Yanacancha Baja, Gilberto Molocho, por las informaciones interesantes que proporciono durante la visita de la central.

Por fin se lo agradece mucho a mis colegas de Microsol, por haber creado un ambiente de trabajo muy simpático.

Astrid Forget

16 de junio 2011, Lima

## Contenido

---

Agradecimientos .....	1
Contenido.....	2
Lista de ilustraciones.....	5
Lista de tablas .....	6
Introducción.....	7
1. Principios básicos de la tecnología .....	8
2. Microcentral hidroeléctrica (MCH) .....	9
2.1. Definición.....	9
2.2. Componentes .....	11
2.2.1. Central de agua fluyente .....	11
2.2.2. Central de pie de presa ya existente .....	13
2.2.3. Central en canal de riego.....	13
2.3. Definición de características.....	13
2.3.1. Medidas físicas .....	14
2.3.1.1. Medida de la caída.....	14
2.3.1.1.1. Evaluación del desnivel (caída bruta) .....	14
2.3.1.1.2. Evaluación de la caída neta.....	17
2.3.1.2. Medida del caudal.....	18
2.3.1.2.1. Evaluación de la distribución de velocidades .....	18
2.3.1.2.2. Método del balde.....	21
2.3.1.2.3. Método del vertedero de pared delgada .....	22
2.3.1.2.4. Método de la pendiente de la línea de agua .....	22
2.3.2. Potencia y energía producidas .....	25
2.3.2.1. Potencia teórica .....	25
2.3.2.2. Potencia hidráulica a disposición de la turbina .....	26
2.3.2.3. Potencia mecánica proporcionada por la turbina .....	26
2.3.2.4. Energía eléctrica generada .....	26
2.3.2.4.1. Estimación.....	26
2.3.2.4.2. Cálculo más preciso .....	26
2.3.3. Obras civiles.....	27
2.3.3.1. Bocatoma (9).....	27
2.3.3.2. Canal de conducción .....	29
Material de construcción .....	30
Sección transversal del canal .....	30
2.3.3.3. Desarenador (8) .....	33

2.3.3.4.	Cámara de carga .....	35
2.3.3.5.	Tubería de presión .....	37
2.3.3.6.	Casa de fuerza (o de máquinas).....	40
2.3.4.	Equipo electromecánico .....	40
2.3.4.1.	Turbina .....	40
2.3.4.1.1.	Turbinas a acción .....	41
2.3.4.1.2.	Turbinas a reacción .....	43
2.3.4.1.3.	Eficiencia de las turbinas.....	44
2.3.4.1.4.	Resumen .....	44
2.3.4.2.	Multiplicador de velocidad .....	45
2.3.4.3.	Generador eléctrico .....	46
2.3.4.4.	Control y protección de la generación.....	46
2.3.4.4.1.	Tablero eléctrico .....	47
2.3.4.4.2.	Control de velocidad de la turbina .....	48
2.3.4.4.3.	Regulador de tensión .....	48
2.3.5.	Distribución de electricidad.....	48
2.3.6.	Resumen .....	50
2.3.7.	Normas .....	51
3.	Construcción, operación y mantenimiento.....	52
3.1.	Construcción.....	52
3.1.1.	Obras civiles.....	52
3.1.2.	Pruebas del equipo electromecánico .....	52
3.1.3.	Instalación de generadores eléctricos.....	52
3.2.	Operación y mantenimiento .....	53
3.2.1.	Operación .....	53
3.2.2.	Mantenimiento.....	54
3.2.2.1.	Mantenimiento de las obras civiles .....	55
3.2.2.1.1.	Bocatoma .....	55
3.2.2.1.2.	Canal .....	55
3.2.2.1.3.	Desarenadores .....	55
3.2.2.1.4.	Cámara de carga .....	55
3.2.2.1.5.	Tubería de fuerza .....	55
3.2.2.1.6.	Válvulas .....	56
3.2.2.2.	Mantenimiento del equipo electromecánico .....	56
3.2.2.2.1.	Mantenimiento de las turbinas hidráulicas .....	56
3.2.2.2.2.	Acoplamientos, rodamientos y fajas .....	56

3.2.2.2.3. Mantenimiento de los generadores .....	56
3.2.2.3. Diagnóstico de fallas .....	57
3.2.3. Reemplazo .....	57
4. Turbinas de río y ruedas hidráulicas.....	58
4.1. Turbinas de río.....	58
4.2. Ruedas hidráulicas.....	59
Conclusión.....	61
Bibliografía .....	62
A. Principios básicos de electricidad.....	63
A.1. Cargas eléctricas.....	63
A.2. Corriente eléctrica.....	63
A.2.1. Definiciones .....	63
A.2.2. Analogía hidráulica .....	65
A.3. Circuitos eléctricos .....	65
A.3.1. Circuito en serie.....	65
A.3.2. Circuito en paralelo .....	66
A.3.3. Ley de Ohm.....	66
A.4. Potencia y energía eléctricas.....	67

## Lista de ilustraciones

---

Ilustración 1.a: Ciclo Hidrológico (1) .....	8
Ilustración 2.a: Central hidroeléctrica de pie de presa (1).....	10
Ilustración 2.b: Componentes de una microcentral de agua fluyente .....	12
Ilustración 2.c: Desnivel o caída bruta (6).....	14
Ilustración 2.d: Medida del desnivel con un clinómetro (nivel de Abney) .....	14
Ilustración 2.e: Medición con nivel de carpintero .....	15
Ilustración 2.f: Medición de altura de caída usando manguera y manómetro (8).....	16
Ilustración 2.g: Principio de Bernoulli.....	17
Ilustración 2.h: Medida de la sección transversal (5) .....	18
Ilustración 2.i: Método del corcho o flotante (10).....	19
Ilustración 2.j: Medidor de caudal electromagnético.....	20
Ilustración 2.k: Evolución de la conductividad en función del tiempo (5).....	21
Ilustración 2.l: Método del balde (6) .....	21
Ilustración 2.m: Método del vertedero .....	22
Ilustración 2.n: Curva de caudales clasificados (5) .....	23
Ilustración 2.o: Curva de caudales clasificados con escala logarítmica (5).....	23
Ilustración 2.p: Curva de caudales clasificados y características notables.....	25
Ilustración 2.q: Bocatoma de la MCH de Yanacancha Baja (11) .....	29
Ilustración 2.r: Comienzo del canal (11) .....	29
Ilustración 2.s: Pequeño rebalse antes de la bocatoma, bocatoma, caudal restante en el río (11) .....	29
Ilustración 2.t: Dimensiones de un canal en función del caudal. De izquierda a derecha: conducción circular en lamina libre, canal rectangular, canal trapezoidal. (1).....	32
Ilustración 2.u: Canal de concreto y primer desarenador (11).....	32
Ilustración 2.v: Canal de concreto pasando debajo de otro río (11) .....	32
Ilustración 2.w: Parte del canal hecho de tubería de plástico porque se había malogrado (11) ...	33
Ilustración 2.x: La tubería echa el agua a otra parte del canal de concreto en buen estado (11) .	33
Ilustración 2.y: Segundo desarenador, aprovechando una curva del río que reduce la velocidad del agua (11).....	35
Ilustración 2.z: Compuerta del desarenador, para sacar los sedimentos (11) .....	35
Ilustración 2.aa: Tercero y último desarenador, antes de la cámara de carga (11) .....	35
Ilustración 2.bb: Cámara de carga con reja en la entrada y sección amovible del tubo de desagüe de limpieza (11) (8).....	35
Ilustración 2.cc: Componentes básicos de una cámara de carga (8).....	36
Ilustración 2.dd: Componentes de una tubería de presión (8).....	37
Ilustración 2.ee: Espesor de la tubería en función y del diámetro; diámetro de ella en función del caudal. (1).....	39
Ilustración 2.ff: Casa de máquinas (derecha), casa del operador (izquierda) y transformador en el primer plano (11).....	40
Ilustración 2.gg: El agua turbinada retorna al río (11).....	40
Ilustración 2.hh: Turbina Pelton in situ.....	42
Ilustración 2.ii: Dibujo de una turbina Pelton .....	42
Ilustración 2.jj: Turbina Turgo y generador .....	42
Ilustración 2.kk: Principio de una turbina Michell-Banki (5).....	43
Ilustración 2.ll: Turbina Francis.....	43
Ilustración 2.mm: Turbina Kaplan.....	44
Ilustración 2.nn: Eficiencia de varios tipos de turbinas .....	44
Ilustración 2.oo: Selección de turbinas hidráulicas (GRUPO-PUCP) (12).....	45
Ilustración 2.pp: Sistema de transmisión en una etapa, mediante fajas y poleas (9) .....	46

Ilustración 2.qq: Tablero de control con mediciones de intensidades (corriente trifásica) y tensión (11) .....	47
Ilustración 2.rr: Interior del tablero de control (11) .....	47
Ilustración 2.ss: Medidor de frecuencia (11) .....	47
Ilustración 2.tt: Mecanismo de evacuación del excedente de electricidad en forma de calor en una resistencia sumergida (11) .....	47
Ilustración 2.uu: Transformador y principio de las líneas de transmisión, al nivel de la MCH (11) .....	49
Ilustración 2.vv: Transformador al nivel de la escuela de Yanacancha Baja (11) .....	49
Ilustración 2.ww: Equipo electromecánico de la MCH de Yanacancha Baja: turbina en el primer plano, fajas y poleas, generador atrás, equipo de control en la pared izquierda (11).....	50
Ilustración 2.xx: Esquema global de la instalación (10) .....	51
Ilustración 2.yy: Reparto porcentual de costos en una minicentral hidráulica (10).....	51
Ilustración 3.a: Esquema de la turbina Pelton (11).....	54
Ilustración 3.b: Montaje de la turbina y del generador (11) .....	54
Ilustración 3.c: Lista de las operaciones de encendido y de apagado (11).....	54
Ilustración A.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones .....	63
Ilustración A.b: Tensión de corriente continua.....	64
Ilustración A.c: Tensión de corriente alterna.....	64
Ilustración A.d: Circuito en serie.....	66
Ilustración A.e: Circuito en paralelo.....	66

## Lista de tablas

---

Tabla 2.a: Tipología de pequeñas centrales hidroeléctricas según Soluciones Prácticas (2) .....	9
Tabla 2.b: Comparación de métodos de medición de la caída (9).....	17
Tabla 2.c: Coeficiente de corrección para el cálculo del caudal (7).....	20
Tabla 2.d: Valores del coeficiente de Manning para diferentes tipos de canales (5).....	23
Tabla 2.e: Definición del caudal mínimo técnico según el tipo de turbina.....	24
Tabla 2.f: Diferentes materiales para la tubería de presión .....	38
Tabla 2.g: Resumen de características de turbinas .....	45
Tabla 2.h: Tipos de generadores (13) .....	46
Tabla 3.a: Momentos favorables a la parada de la MCH en caso que sea necesario para mantenerla (9).....	55
Tabla 4.a: Componentes de la turbina de río de Soluciones Prácticas (16).....	59

## Introducción

---

Con una tasa de electrificación de 78% al nivel nacional, en el Perú quedan 6 millones de personas sin acceso a esta energía, mayormente en zonas rurales de baja densidad de población y de acceso difícil que hace poco rentable la prolongación de la red interconectada nacional hacia ellas. Por tanto la electrificación rural mediante pequeños sistemas autónomos utilizando recursos renovables, como la energía hidráulica (en centrales de potencia inferior a 20 MW, que es la definición dada por el gobierno), se ve como un medio de proporcionar a estas personas electricidad, que además de ser limpia por ser producida a partir de fuentes renovables, les permitirá mejorar su nivel de vida con el acceso a una iluminación de calidad, la posibilidad de utilizar otros aparatos eléctricos y la oportunidad de tener más ingresos al utilizar la electricidad a fines productivos.

El presente documento aspira a aclarar conceptos sobre el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, que son instalaciones autónomas generando electricidad a partir de la energía potencial y cinética del agua. Se destina a personas que quieren difundir esta tecnología vía la implementación de proyectos de pequeños sistemas de hidroelectricidad en el país o vía el desarrollo de canales de distribución de estos productos. Se proporcionaran herramientas de diseño y de instalación de microcentrales hidroeléctricas y se mencionaran las tareas a realizar para el buen manejo y el mantenimiento de dichos sistemas.

# 1. Principios básicos de la tecnología

Producir electricidad a partir un flujo de agua consiste en transformar la energía cinética y/o potencial del agua circulando en un río para generar energía mecánica, que será luego convertida en energía eléctrica.

La energía hidroeléctrica proviene indirectamente de la energía del sol, que es responsable por el ciclo hidrológico (1).

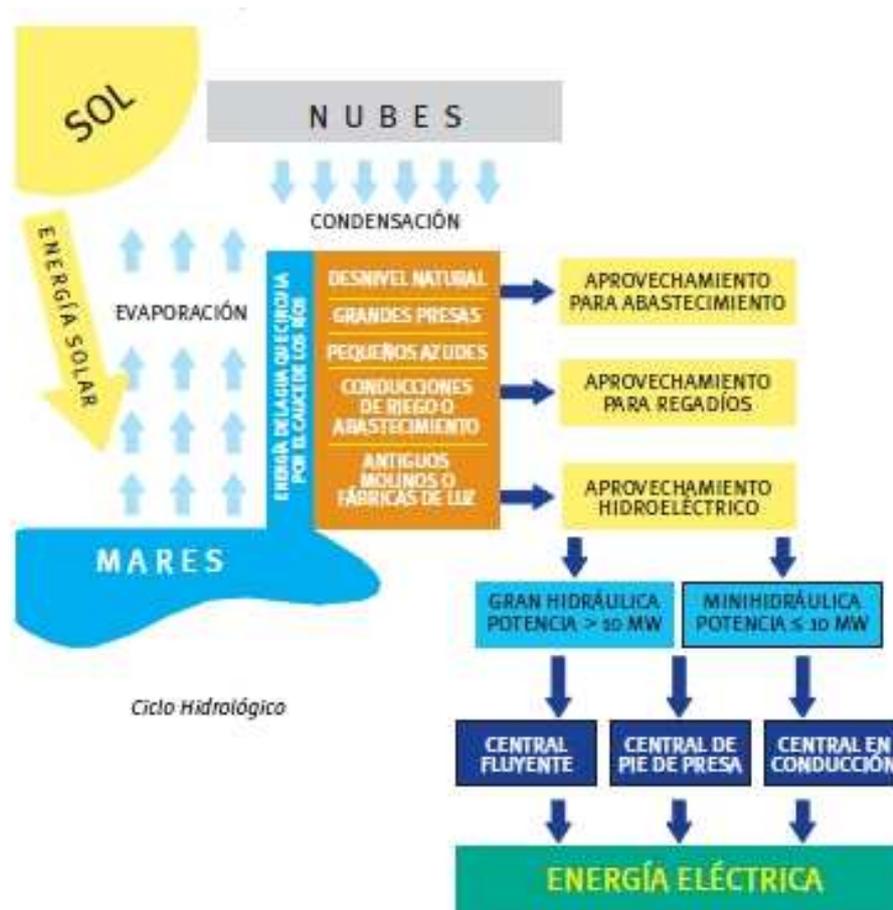


Ilustración 1.a: Ciclo Hidrológico (1)

Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía cinética del agua para producir al final energía eléctrica. Esta energía cinética que se manifiesta en el movimiento del agua durante su caída proviene de la conversión de la energía potencial gravitatoria que poseía el agua que estaba en un nivel superior (arriba de la caída).

La energía cinética es la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento; depende de la masa y de la velocidad de dicho cuerpo. La energía potencial es asociada al trabajo realizado por una fuerza dicha conservativa<sup>1</sup> para trasladar un sistema de una posición a otra posición; se puede ver como la energía “almacenada” en el sistema resultando del trabajo necesario para poner el sistema en una posición relativa a un punto de referencia, y que tiene el *potencial* de convertirse en energía

<sup>1</sup> Una fuerza es conservativa si el trabajo producido por ésta para desplazar una particular no depende de la trayectoria seguida.

cinética. En el caso que nos ocupa aquí, se trata de la energía potencial gravitatoria, asociada con la fuerza gravitatoria, conservativa. Depende de la masa del sistema, de su posición relativa y de la intensidad de la fuerza (aquí la gravedad  $g$ ). Por ejemplo, un objeto tenido en una cierta altura relativamente al suelo tiene una energía potencial debida a esta altura, que se convertirá en energía cinética cuando se suelte el objeto.

Entonces aquí la energía potencial gravitatoria está creada por la diferencia de altura entre dos puntos por los cuales se escurre el agua; cuando el fluido se pone en movimiento entre esos dos puntos, la energía potencial disponible se convierte en energía cinética. La caída del agua es por lo tanto un parámetro importante a evaluar; otro parámetro imprescindible de estimar es el caudal del río, porque con éste se puede determinar la masa de agua disponible, que da informaciones sobre la energía potencial o cinética aprovechable. Dependiendo de las características hidráulicas del lugar se escogerá la turbina a instalar; hay turbinas más adecuadas para grandes caudales y otras para grandes caídas. Eso será más detallado en los próximos rubros.

El principio de generación de energía mecánica es simple: como en las antiguas ruedas hidráulicas, la presión del agua gira una turbina mediante álabes, los cuales tienen un diseño diferente según el modelo de turbina. El par así generado está transmitido mediante el eje de la turbina.

Para generar electricidad a partir de esta energía mecánica de rotación, es necesario acoplar la turbina con un generador eléctrico.

Centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial de una caída de agua (natural o artificial), energía creada por el desnivel entre los puntos extremos de la caída. La energía potencial se transforma en energía cinética que las centrales convierten en energía mecánica mediante una turbina y luego en energía eléctrica mediante un generador.

## 2. Microcentral hidroeléctrica (MCH)

---

### 2.1. Definición

---

La potencia de una central hidroeléctrica es proporcional a la caída y al caudal y permite determinar el tamaño de una central. Pero no existe un consenso para definir las potencias a las cuales se considera que una central hidroeléctrica es una microcentral. En la literatura disponible destacan en general límites desde 5 kW como potencia mínima hasta centenas de kilovatios como máximo, por ejemplo 100, 300 o 500 kW.

La clasificación adoptada por la ONG Soluciones Prácticas es la siguiente:

	Pico central	Micro central	Mini central
Potencia	100 W – 10 kW	10 kW – 100 kW	100 kW – 1 MW

Tabla 2.a: Tipología de pequeñas centrales hidroeléctricas según Soluciones Prácticas (2)

Las MCH pueden ser clasificadas en diferentes categorías, tampoco rígidas:

- centrales de **alta caída**: > 100 m
- centrales de **media caída**: 30-100 m
- centrales de **baja caída**: 2-30 m

Esta clasificación por altura de caída es importante porque ya conlleva una información sobre la máquina que deberá ser utilizada.

Otra clasificación existe, por el tipo de régimen de flujo, que está condicionado por las características tipográficas de la ubicación:

- **centrales de agua fluyente o de filo de agua o de pasada**: utilizan una parte del flujo de un río, desviada hasta la central para generar electricidad. Luego está echada de nuevo al cauce del río. Operan de forma continua, con una constante de vaciado inferior a 2 horas; este funcionamiento continuo puede limitar la potencia instalada, ya que se puede utilizar sólo el agua disponible en el momento considerado.

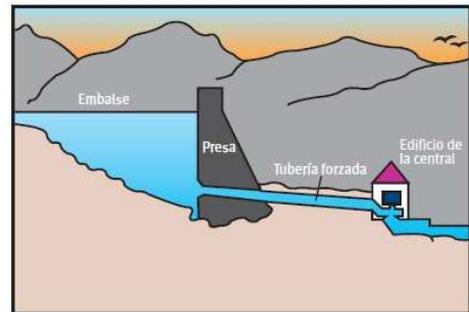


Ilustración 2.a: Central hidroeléctrica de pie de presa (1)

- **centrales de embalse o de pie de presa**: se utiliza un embalse para reservar el agua; se aprovecha el desnivel creado por la propia presa (1). Es el tipo más frecuente entre las grandes centrales. Sin embargo, es posible considerar la implementación de una MCH sobre un embalse que ya fue construido por otros fines, sean riesgos o abastecimiento de agua en poblaciones. En el caso contrario, la inversión necesitada sería demasiado alta para una central de pequeño tamaño. En las minicentrales hidroeléctricas el volumen de almacenado suele ser pequeño, permitiendo por ejemplo producir energía eléctrica un número de horas durante el día, y llenándose el embalse durante la noche. Si la regulación es semanal, se garantiza la producción de electricidad durante el fin de semana, llenándose de nuevo el embalse durante el resto de la semana. (1)
- **centrales integradas a un canal de riego o de abastecimiento de agua**: se distinguen dos tipos de centrales dentro de este grupo:
  - aquellas que utilizan el desnivel existente en el propio canal. Mediante la instalación de una tubería forzada, paralela a la vía rápida del canal de riego, se conduce el agua hacia la central, devolviéndola posteriormente a su curso normal en canal.
  - aquellas que aprovechan el desnivel existente entre el canal y el curso de un río cercano. La central en este caso se instala cercana al río y se turbinan las aguas excedentes en el canal. (1)

Para lograr las exigencias de sencillez, fiabilidad, alto rendimiento y fácil mantenimiento, se deben desarrollar equipos específicos a las MCH. La obra civil difiere mucho también. Entonces, una MCH no puede ser considerada como la sencilla reducción a pequeña escala de una gran central hidroeléctrica, por razones técnicas y económicas (3).

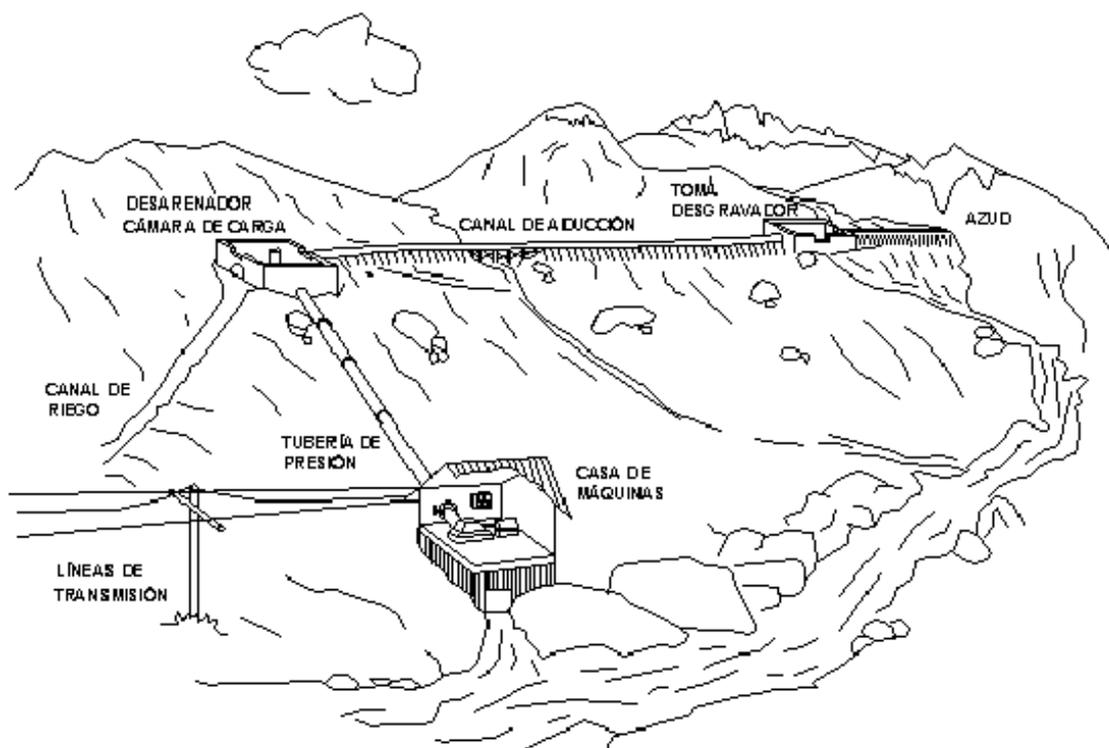
Existen diferentes tipos de diseños de centrales hidroeléctricas:

- de agua fluyente: desvían parte del flujo de un río ofreciendo una caída. Luego echan de nuevo el agua al río.
- de pie de presa: aprovechan el desnivel creado por un embalse en lo cual está almacenada el agua. En el caso de MCH, sólo se puede considerar si el embalse ya existe por otras razones, si no el costo sería demasiado elevado.
- en canal de riego: aprovechan la existencia de un canal artificial de riego, ofreciendo un desnivel en sí mismo o un desnivel entre sí mismo y un río cercano.

A partir del párrafo 2.3 de este documento se detallará solamente las características del diseño y construcción de una MCH de agua fluyente, ya que fue el único tipo que se visitó en el Perú, eso debido a lo que es el más común en este país, entre las centrales hidroeléctricas de pequeño tamaño.

## 2.2. Componentes

### 2.2.1. Central de agua fluyente



### Ilustración 2.b: Componentes de una microcentral de agua fluyente<sup>2</sup>

La característica común a todas las centrales de agua fluyente es que están condicionadas por la hidrología, ya que no tienen capacidad de regulación del caudal turbinado. Estas centrales cuenta con una caída útil prácticamente constante y su potencia depende directamente del caudal que pasa por el río. (1)

Una microcentral hidroeléctrica instalada al filo de agua conlleva en general los siguientes componentes – “en general” porque según la configuración del lugar de implementación, algunos de ellos pueden revelarse no necesarios: (4)

- Azud o embalse: en el contexto de MCH, obra civil que permite crear un umbral para garantizar el abastecimiento de la bocatoma en agua
- Bocatoma o captación de agua: capta una parte de la corriente. Puede ser un simple canal equipado con una reja filtrante. A veces se construye una pequeña presa en la bocatoma para elevar el plano de ésta y facilitar su entrada al canal de derivación.
- Escalera de peces: dispositivo que permite a los peces migratorios de subir o bajar un río
- Canal de derivación: lleva el agua hasta una zona con un pendiente favorable a la instalación de una tubería de presión. Puede ser al aire libre, enterrado o ser directamente una tubería. Se debe escoger el tipo con cuidado porque el canal genera a menudo dificultades, como fugas, hundimientos, enarenamiento. Una tubería necesita una inversión inicial más alta, pero permite evitar estos problemas.
- Desarenador: es un estanque más ancho que el canal, lo que aminora el flujo de agua y por tanto permite separar las partículas más gruesas, que se almacenan en el fondo del desarenador. En su salida está una fina reja para detener las demás partículas. Este componente debe ser limpiado con regularidad y a tal efecto equipado con una válvula.
- Cámara de carga: estanque que juega el rollo de amortiguador entre la bocatoma y la tubería de presión, garantizando que ésta esté siempre alimentada en agua.
- Tubería de presión (o tubería forzada): lleva el agua en flujo forzado desde la cámara de carga hasta la central. El material escogido depende del tipo de caída: material sintético (PVC o PEHD) para las bajas caídas y metal para las altas caídas. Su dimensionamiento debe ser minucioso para evitar caídas de presión (pérdidas de energía por fricción en la tubería).
- Casa de fuerza (o casa de máquinas): edificio que alberga todo el equipo electromecánico
  - Válvula de guarda: regula el flujo en la turbina
  - Turbina: es un motor rotativo girado por la presión del agua. Transforma la mayor parte (dependiendo de su rendimiento) de la energía hidráulica en energía mecánica.
  - Multiplicador de velocidad: puede ser necesario si la velocidad de la turbina es muy baja para alcanzar las velocidades necesarias para la producción de electricidad. Por ejemplo puede ser un conjunto faja-poleas.

<sup>2</sup> [http://prodener.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=44&Itemid=2](http://prodener.org/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=2)

- Generador: convierte la energía mecánica en energía eléctrica.
  - Componentes de control y de mando: principalmente interruptores, medidores, sistema de regulación
  - Condensadores: en caso de utilización de un generador asíncrono, dan el arranque necesario al encendido del generador.
  - Transformador (opcional): eleva la tensión de salida del generador para transportar la corriente, si es necesario
  - Abastecimiento de urgencia en corriente continua (opcional)
  - Conexión a la red de transporte o de distribución
- Canal de restitución (o de descarga): echa el agua turbinada al río
  - Subestación (opcional) y líneas de transmisión

### 2.2.2. Central de pie de presa ya existente

---

Las obras e instalaciones necesarias para construir una micro- o minicentral al pie de una presa que ya existe son: (1)

- adaptación o construcción de las conducciones de la presa a la central,
- toma de agua con compuerta y reja,
- tubería de presión hacia la central,
- edificio con equipamiento electromecánico,
- subestación y línea eléctrica.

### 2.2.3. Central en canal de riego

---

Las obras e instalaciones necesarias para construir una micro- o minicentral en un canal de riego son: (1)

- toma en el canal, con un aliviadero que habitualmente es en forma de pico de pato para aumentar así la longitud del aliviadero,
- tubería forzada,
- edificio con equipamiento electromecánico,
- obra de incorporación al canal o al río, dependiendo del tipo de aprovechamiento (véase 2.1),
- subestación y línea eléctrica.

## 2.3. Definición de características

---

Antes de decidir de implementar un proyecto, se deben seguir etapas que permitirán evaluar la

oportunidad de esta implementación: (5)

- Topografía y geomorfología del emplazamiento
- Evaluación del recurso hidráulico y de su potencial de generación
- Elección del emplazamiento, trazado elemental
- Turbinas hidráulicas, generadores, sistema de control y mando
- Evaluación del impacto ambiental y medidas de atenuación
- Evaluación económica del proyecto, necesidades y potencial de financiamiento
- Marco institucional, trámites administrativas para obtener las autorizaciones

Para cada etapa se decidirá si se debe hacer un estudio profundado para su realización.

### 2.3.1. Medidas físicas

La segunda etapa del proceso de evaluación consiste en la evaluación del recurso hidráulico y de su potencial. Como ya se mencionó en el párrafo 2.1, la potencia de la MCH es proporcional a la caída y al caudal del agua.

#### 2.3.1.1. Medida de la caída

##### 2.3.1.1.1. Evaluación del desnivel (caída bruta)

La caída bruta es la diferencia de altura entre los planes de agua de arriba y abajo de la futura instalación. La medida se realiza con técnicas de topografía, por ejemplo utilizando un nivel de géometa, un tacómetro o un clinómetro. En general, se necesitan al menos dos personas para hacer las medidas y es mejor hacerlas dos o tres veces para garantizar la coherencia.

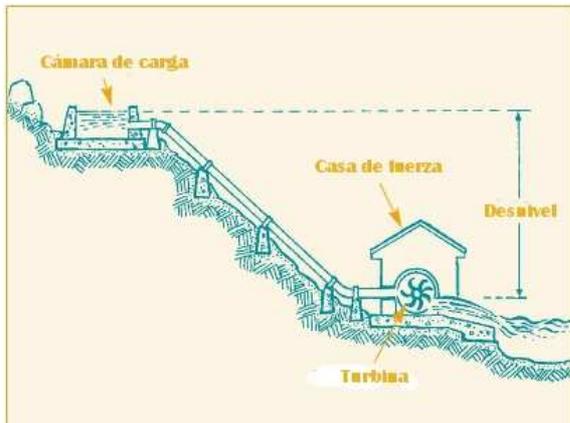


Ilustración 2.c: Desnivel o caída bruta (6)

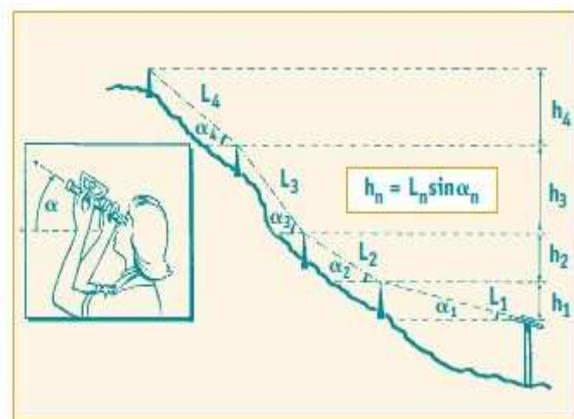


Ilustración 2.d: Medida del desnivel con un clinómetro (nivel de Abney)

##### 2.3.1.1.1.1. Con un clinómetro (Ilustración 2.d)

Si es realizada por alguien acostumbrado a la utilización del clinómetro, la medida puede resultar muy precisa. Además del clinómetro, que mide los ángulos, se necesita un metro lineal para medir las distancias  $L_n$  (véase Ilustración 2.d). Se plantan palos verticalmente al largo de la pendiente y, desde abajo, se mide con el clinómetro el ángulo entre la línea horizontal y el segmento uniendo la

punta de cada palo a la punta del siguiente, así como la longitud de este segmento, con el metro lineal. Además se necesita una calculadora para calcular el seno del ángulo y así conocer la altura (véase fórmula en la Ilustración 2.d).

#### 2.3.1.1.1.2. Con un nivel de carpintero

También si se realiza con cuidado, este método puede dar muy buenos resultados. Como material se necesita un nivel de carpintero y dos tablas o reglas de madera de aproximadamente 2 m de longitud, una de las dos graduada en centímetros (7). Después, manteniendo la tabla graduada bien vertical, se puede medir el desnivel por tramos.

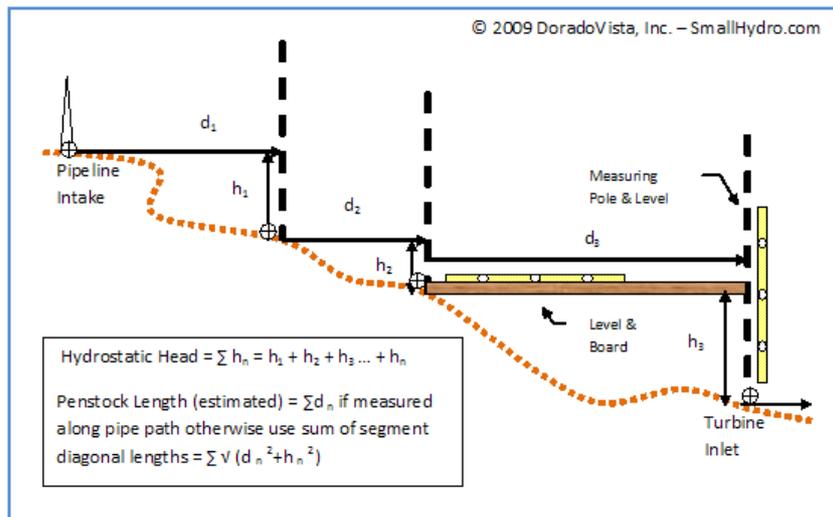


Ilustración 2.e: Medición con nivel de carpintero<sup>3</sup>

#### 2.3.1.1.1.3. Con una manguera de nivelación

Este tipo de medición, basado en el principio de los vasos comunicantes, se puede realizar para pequeñas caídas; en el caso de caídas más grandes, se preferirá utilizar el método del nivel de carpintero. Sólo se necesita una manguera transparente llena de agua (se recomienda eliminar las burbujas de aire de ella). Dos personas deben hacer la medida, porque hay que mantener la manguera en forma de “U”, para que el principio de los vasos comunicantes se pueda aplicar.

Se toma la medida de la persona que será la referencia hasta la altura de sus ojos. Empezando de abajo de la pendiente, esta persona pone el nivel del agua en una de las dos extremidades de la manguera en la altura de sus ojos, mientras que la segunda persona, marca la altura del nivel de agua sobre la pendiente. Siguiendo, la primera persona pone sus pies al nivel de la marca hecha por la segunda persona, y se mide así la altura por tramos. En lugar de utilizar como referencia la altura de una persona, se obtiene el mismo resultado utilizando uno o dos palos de altura conocida o reglas graduadas.

#### 2.3.1.1.1.4. Con una manguera y un manómetro

<sup>3</sup> <http://smallhydro.com/>

Se usa una manguera de plástico transparente, para evitar las burbujas, de menos de 20 m de longitud y de 6 a 8 mm de diámetro, un manómetro de presión y la curva de calibración del manómetro.

Para establecer la curva de calibración se miden las presiones mostradas por el manómetro para varias alturas escalonadas de la manguera plástica llena de agua (al menos 5 lecturas). Se obtiene una curva de calibración que debe ser una línea recta.

Luego para tomar las mediciones en el terreno, se miden varias veces la presión ocasionada por la manguera llenada de agua; la suma de las presiones permite determinar el salto total.

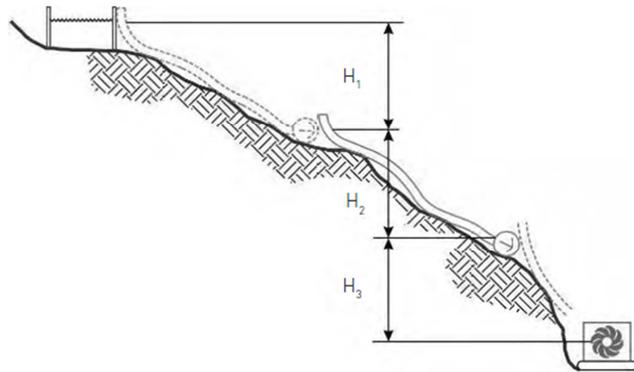


Ilustración 2.f: Medición de altura de caída usando manguera y manómetro (8)

#### 2.3.1.1.1.5. Con un altímetro

El altímetro mide la presión atmosférica, la cual está directamente relacionada con la altura sobre el nivel del mar. Sin embargo, otros factores influyen la medición de la misma, como la humedad o la temperatura. Por tanto es necesario tomar varias lecturas durante el día para estimar el valor del salto.

Es un instrumento fácil de usar pero relativamente costoso. Además, la precisión de los resultados depende principalmente de la destreza y experiencia de quien lo emplee. (9)

#### 2.3.1.1.1.6. Con un nivel de ingeniero

Es un método muy preciso, pero costoso y que requiere destreza de los operadores. Los equipos que se emplean se pueden también alquilar. No es apropiado para lugares escarpados o con mucha vegetación. Se necesitan dos personas para hacer las medidas, un operador de nivel y un portamira, que trabajarán por tramos. (8)

#### 2.3.1.1.1.7. Con un mapa

Si se dispone de un mapa preciso del lugar con las curvas de nivel, se puede para grandes caídas evaluar directamente la altura usando estas curvas de nivel. Pero no tiene mucha precisión.

Método	Ventajas y limitaciones	Precisión	Observación
<b>Clinómetro</b>	Rápido. Peso liviano y costo moderado.	≈ 5%	Recomendable en terrenos despejados y en lugares donde los otros métodos son muy lentos.
<b>Nivel de carpintero</b>	Inapropiado para pendientes suaves y largas. Lento.	≈ 5% en pendientes pronunciadas. Poco preciso en pendientes suaves.	Usar sólo para caídas cortas cuando no se dispone de otro método.
<b>Manguera de nivelación</b>	Trabajoso para caídas ltas. Rápido para pequeñas caídas.	≈ 5%	Recomendable hacerlo entre 2 personas.
<b>Manguera y manómetro</b>	Rápido, seguro. Posibilidad de medir la longitud de la tubería	< 5%	Calibrar instrumentos.

	de presión a la vez. Ligero peso, bajo costo.		
<b>Altímetro</b>	Usado en caídas altas y medianas (> 40 m). Rápido. Relativamente costoso.	Probabilidad de grandes errores (30%)	Necesita calibración de instrumentos y destreza. Tomar 3 medidas o más.
<b>Nivel de ingeniero</b>	Rápido. Alto costo.	Muy buena	No usar en lugares con demasiados arboles.
<b>Mapa</b>	Sólo para caídas altas. No se necesita viajar al lugar. Bajo costo.	Aceptable para estudio de perfiles y prefactibilidad.	Se necesita destreza para leer planos.

Tabla 2.b: Comparación de métodos de medición de la caída (9)

### 2.3.1.1.2. Evaluación de la caída neta

La caída neta no corresponde a la realidad física sobre el terreno: es definida como la energía hidráulica de la masa dividida por la gravedad. La energía hidráulica de masa se expresa de la siguiente manera (véase ecuación de Bernoulli): (5)

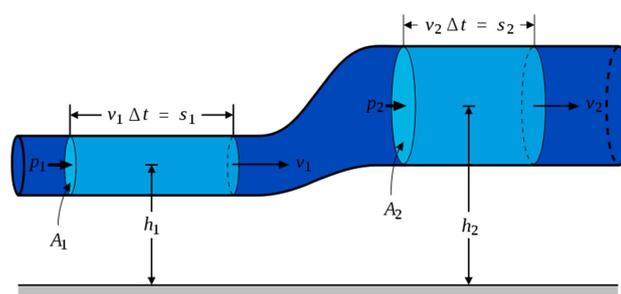


Ilustración 2.g: Principio de Bernoulli<sup>4</sup>

(2.1)

Donde:	energía hidráulica de masa	[J/kg] (o [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ])
	densidad absoluta del agua	[kg/m <sup>3</sup> ]
	gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
	presión en la sección	[Pa] (o [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> ])
	velocidad del agua en la sección	[m/s]
	altura de la sección	[m]

La caída neta es — , expresada en metros. Es útil para determinar la potencia hidráulica a disposición de la turbina. Por eso se necesita primero calcular la energía hidráulica de masa a disposición de la turbina mediante esta fórmula, tomando entonces la sección 1 más arriba de la turbina y la sección 2 más abajo de ella.

La caída neta es siempre menor que la caída bruta, porque toma en cuenta las pérdidas de presión en las rejillas, válvulas, por fricción en la tubería de presión, etc. (5) (3) Se puede suponer que las pérdidas de cargas son del orden del 5% al 10% de la caída bruta. (1)

(2.2)

<sup>4</sup> <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:BernoullisLawDerivationDiagram.png>

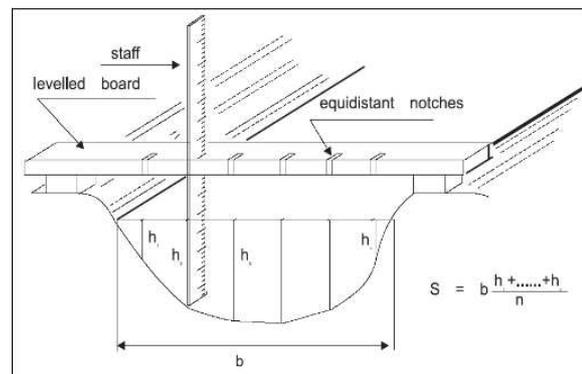
### **Medida de la caída: resumen**

Para la medida de la caída, diferentes métodos existen:

- Evaluación de la caída bruta (desnivel) mediante:
  - Clinómetro,
  - Nivel de carpintero,
  - Manguera de nivelación,
  - Manguera y manómetro,
  - Altimetro,
  - Nivel de ingeniero,
  - Mapa,
  - ...
- Evaluación de la caída neta mediante principios de mecánica de los fluidos: la caída neta corresponde a las pérdidas de carga (pérdidas de energía) substraídas de la caída bruta.

### **2.3.1.2. Medida del caudal**

Es necesario disponer de un caudal suficiente y regular; entonces se debe elegir un caudal de diseño adecuado para definir el equipamiento a instalar, de forma que la energía producida sea la máxima posible en función de la hidrología. Por lo tanto, se debería conocer la variación durante el año. A veces los datos de caudal pueden ser obtenidos antes los laboratorios o servicios meteorológicos regionales o nacionales (SENAMHI), en los lugares donde tienen instaladas estaciones de aforo; en el caso que no haya medidas disponibles, es recomendable hacer una campaña de mediciones durante al menos un año; es mejor tener los datos de varios años porque así se puede escoger un año medio representativo para determinar el caudal de equipamiento.



**Ilustración 2.h: Medida de la sección transversal (5)**

Diferentes metodologías de medición del caudal existen, descritas a continuación:

#### **2.3.1.2.1. Evaluación de la distribución de velocidades**

Se basa en la sección transversal del río (medio a grande) y la velocidad media a través de ella.

##### **2.3.1.2.1.1. Medida de la sección transversal**

Para medir la sección transversal de un río natural, se debe dividir esta sección en varios trapecios (por los menos tres) y medir, mediante una regla o plancha graduada, los lados  $h_i$  (Ilustración 2.h) de los trapecios. Eso permite calcular la profundidad media del río.

Luego el área de la sección del río  $A$  se calcula de la siguiente manera:

Donde:	área de la sección del río	[m <sup>2</sup> ]
	ancho del río	[m]
	profundidad	[m]
	número de medidas	[-]

Se divide por            porque, para calcular el promedio, hay que tomar en cuenta las medidas implícitas de la profundidad en cada orilla del río, que es de 0 m.

#### 2.3.1.2.1.2. Medida de la velocidad

Se considera una sección del río. Como la velocidad no está constante en todos los puntos del río, es necesario medirla en varios puntos para calcular la velocidad media.

- **Con una estación de aforo**

Es un método convencional para ríos medianos o grandes; para pequeños proyectos, en general no es posible utilizar este método porque necesitaría una gran inversión para construir la estación de aforo, a menos que ya este construida, lo que es poco probable. Se afuera una sección del río.

- **Método del corcho**

Se utiliza un objeto flotante, como una botella llena a medias o un corcho. Este objeto está puesto en el centro del flujo y se mide con un cronómetro el tiempo  $t$  (s) necesario para recorrer una longitud  $L$  (m); esta longitud puede ser de 10 a 20 metros. Se recomienda hacer tres mediciones, para obtener una velocidad media. (7)

El caudal en promedio puede ser calculado aplicando un coeficiente de corrección dependiendo de la profundidad del río y de la rugosidad del fondo (Tabla 2.c); permite tomar en cuenta las variaciones de velocidad en el tramo de medición, ocasionadas por las turbulencias en el río. Este coeficiente varía entre 0.60 y 0.85, 0.75 siendo en general el valor utilizado. La precisión de este método corresponde a la gama de variación del coeficiente, entonces no es muy preciso, si no fácil a realizar y no costoso.

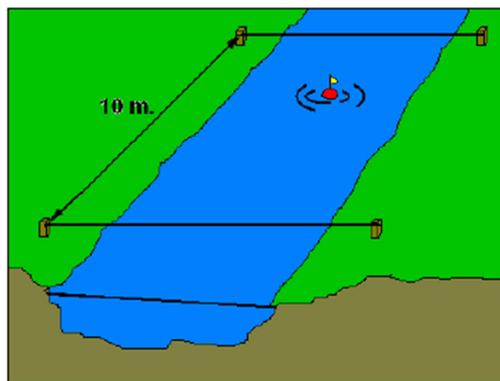


Ilustración 2.i: Método del corcho o flotante (10)

Donde:	caudal	[m <sup>3</sup> /s]
	coeficiente de corrección	[-]
	velocidad del agua	[m/s]
	área de la sección del río	[m <sup>2</sup> ]

Tipo de canal o río	Factor <i>K</i>
Canal revestido en concreto, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.8
Canal de tierra, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.7
Río o riachuelo, profundidad del agua mayor a 15 cm	0.5
Ríos o canales de tierra, profundidades menores a 15 cm	0.5 a 0.15

Tabla 2.c: Coeficiente de corrección para el cálculo del caudal (7)

- **Método del molinillo hidrométrico mecánico con elemento rotativo**

Es un instrumento de medida de la velocidad de un fluido. Existen dos tipos:

- Rotor de eje vertical a álabes: principalmente para las bajas velocidades, adecuados para aguas arenosas
- Rotor de eje horizontal a hélice: cada rotación de la hélice está contado durante cortos tiempos (1 a 2 minutos), lo que permite luego calcular la velocidad del agua mediante la curva de calibrado del aparato. Ofrece una buena precisión de medida.

- **Método del medidor de caudal electromagnético**

Este instrumento de medida de a inducción eléctrica no tiene partes móviles. Está adecuado para velocidades muy bajas, cuando la fiabilidad de los molinillos disminuye. Además está apropiado para medir caudales de ríos conllevando muchos materiales en suspensión.

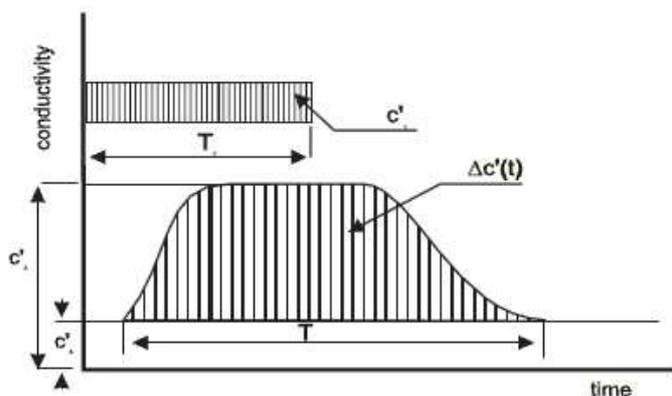


Ilustración 2.j: Medidor de caudal electromagnético<sup>5</sup>

- **Métodos de dilución y de trazadores**

El aforo por dilución es muy adecuado para pequeñas corrientes turbulentas. Consiste en derramar una solución química en el río y a extraer muestras abajo, después de la completa dilución de la solución en el agua. (5) Como material se necesita un conductímetro.

<sup>5</sup> <http://www.usinenouvelle.com/expo/img/debitmetre-electromagn-000145901-4.jpg>



**Ilustración 2.k: Evolución de la conductividad en función del tiempo (5)**

función del tiempo (Ilustración 2.k). El promedio de los ordenados de esta curva representa el promedio de la diferencia de conductividad entre las soluciones de sal y el agua más arriba del punto de inyección.

Se extrae un gran volumen  $V^*$  del río y se inyecta un pequeño volumen  $v$  de la solución salada conocida. Luego se miden las diferencias de conductividad. El caudal  $Q$  del río es dado por:

$$Q = \frac{V}{T} \cdot \frac{V^*}{v} \cdot \frac{\Delta c^*}{\overline{\Delta c'}} \quad (2.5)$$

Donde:	$V =$	volumen de la solución derramada	$[m^3]$
	$T =$	duración de la inyección de la solución	$[s]$
	$v =$	pequeño volumen de la solución añadido a uno más grande	$[m^3]$
	$V^* =$	volumen del agua extraída del río	$[m^3]$
	$\Delta c^* =$	cambio de conductividad tras la dilución de $v$ en $V^*$	$[ohm^{-1}]$
	$\overline{\Delta c'} =$	promedio de las conductividades en la curva	$[ohm^{-1}]$

### 2.3.1.2.2. Método del balde

Si el caudal del río es muy pequeño, inferior a unos 200 L/s, se puede desviar todo el cauce del riachuelo hacia un balde. Se necesitan un balde de capacidad conocida, mantas o calaminas de plástico y un cronómetro. Después de haber determinado el tramo donde se realizará la medición, se debe encausar el río formando una catarata, de tal manera a desviarlo todo hacia el balde. Con el cronómetro se mide la duración de llenado del balde. Hacer por lo menos tres pruebas para que el resultado sea coherente (7). El caudal  $Q$  se calcula así:

$$Q = \frac{V}{\overline{T}} \quad (2.6)$$

Donde:	$V =$	volumen del balde	$[L] \text{ o } [m^3]$
--------	-------	-------------------	------------------------



**Ilustración 2.l: Método del balde (6)**

$\bar{T}$  = duración de llenado en promedio [s]

Por ejemplo, si se realizan tres mediciones, con duraciones de llenado respectivas  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , el promedio  $\bar{T}$  es  $\frac{t_1+t_2+t_3}{3}$ .

Si el balde es un cilindro, su volumen es  $V = \pi r^2 h$ , con  $r$  el radio de su base y  $h$  su altura. Si es un tronco de cono, la fórmula es  $V = \frac{\pi h}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)$ , donde  $h$  es también la altura, y  $r_1$  y  $r_2$  los radios de las dos bases.

### 2.3.1.2.3. Método del vertedero de pared delgada

Si el caudal del río es bastante débil ( $< 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ), es posible instalar una presa temporal en el ancho del río, presentando un corte rectangular, trapezoidal o triangular (el último más adecuado para bajos caudales). Véase las fórmulas para calcular el caudal en la Ilustración 2.m.

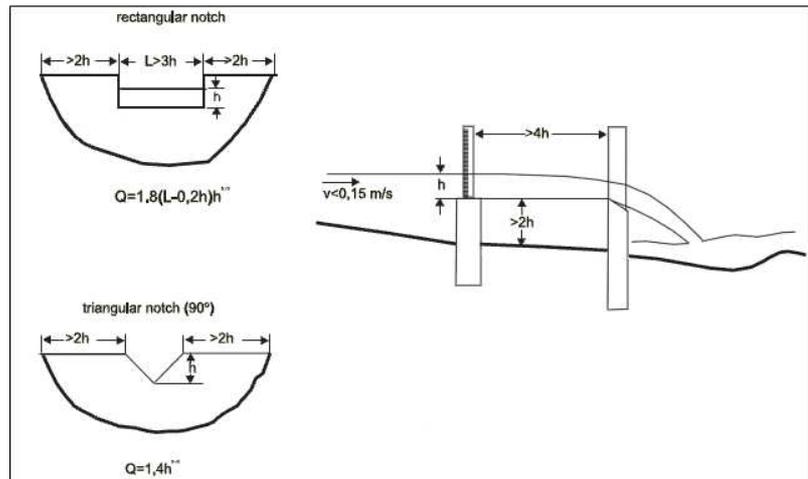


Ilustración 2.m: Método del vertedero

### 2.3.1.2.4. Método de la pendiente de la línea de agua

Es utilizado para flujos importantes, cuando los otros métodos no pueden ser aplicados. Debe ser posible hundir estacas en el río, arriba y abajo, para medir cotas. Estas costas sirven luego para calcular la pendiente de la línea de agua  $S$ . Medidas de la sección transversal permiten evaluar la superficie  $A$  y el radio hidráulico  $R$ . (5)

El caudal  $Q$  se calcula mediante la fórmula de Manning:

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (2.7)$$

Donde  $v$  es la velocidad del agua.

$$Q = v \cdot A = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (2.8)$$

El radio hidráulico se define como el ratio del área "mojada" (sección derecha del agua) con el perímetro "mojado" (perímetro del canal o del río en contacto con el agua).

Valores típicos del coeficiente de Manning  $n$  (también llamado coeficiente de rugosidad):

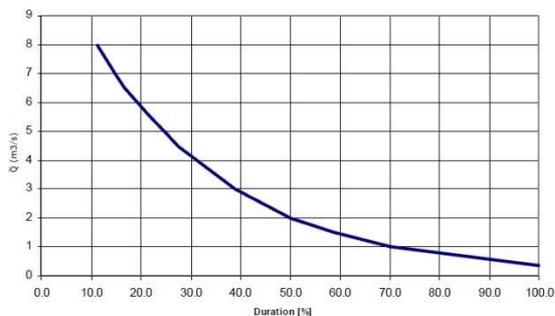
Tipo de canal		$n$
Canales de tierra	Limpio	0.022
	Pedregoso	0.025

<b>Canales con revestimiento artificial</b>	Herboso	0.030
	Con piedras más grandes o corrientes naturales	0.035
	Bronce	0.011
	Acero liso	0.012
	Acero pintado	0.014
	Acero remachado	0.015
	Fundición	0.013
	Hormigón bien terminado	0.012
	Hormigón en bruto	0.014
	Madera cepillada	0.012
	Ladrilla	0.014
	Mampostería	0.015
	Asfalto	0.016
	Metal oxidado	0.022
	Mampostería de mampuestos en bruto	0.025

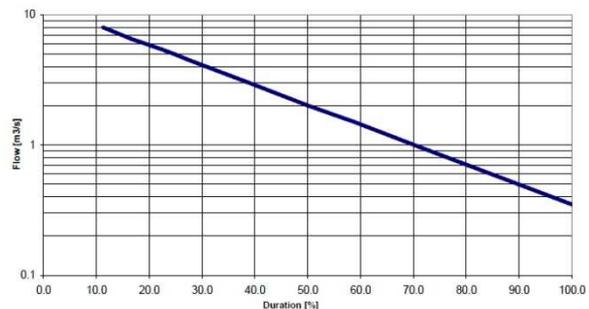
**Tabla 2.d: Valores del coeficiente de Manning para diferentes tipos de canales (5)**

Debe ser escogido con cuidado, dado que una variación de  $n$  de 0.001 resulta en una variación de 3% del valor del caudal. (5)

Cuando se tiene la relación cronológica de las medidas del caudal durante un año, se puede realizar la curva de caudales clasificados (véase Ilustración 2.n, Ilustración 2.o y Ilustración 2.p); esta curva muestra la duración durante la cual un cierto valor de caudal estuvo sobrepasado (para el punto del río donde fueron realizadas las medidas).



**Ilustración 2.n: Curva de caudales clasificados (5)**



**Ilustración 2.o: Curva de caudales clasificados con escala logarítmica (5)**

Si la relación entre los caudales máximos y mínimos es superior a 2, la lectura es más fácil con una escala logarítmica. La Ilustración 2.o representa los mismos datos que la Ilustración 2.n, pero en escala logarítmica. (5)

La curva de caudales clasificados califica el régimen hidrológico de un cauce, proporcionando valiosas informaciones sobre el volumen de agua existente, el volumen turbinado y volumen vertido por servidumbre, mínimo técnico o caudal ecológico. (1)

Para elaborar esta curva (Ilustración 2.p), hay que calcular los siguientes parámetros:

$Q_M$ : caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida

$Q_m$ : caudal mínimo del año o estiaje

$Q_{sr}$ : caudal de servidumbre que es necesario dejar en el río por su cauce normal. Incluye el caudal ecológico y el necesario para otros usos. Para conocer el caudal ecológico (también llamado caudal residual) se debe referir a la legislación de cada país; si no está definido, se puede considerar igual al 10% del caudal medio interanual (si se tienen datos de varios años). Para que no se desagüe la sección del río donde se encuentra la instalación hidroeléctrica, se define un caudal mínimo de reserva. Así se limiten los impactos negativos sobre la flora y la fauna acuáticas. Debe ser evaluado rigurosamente porque un caudal residual demasiado alto disminuye la potencia disponible y uno demasiado bajo afecta el medio ambiente.

$Q_{mt}$ : caudal mínimo técnico. Es proporcional al caudal de equipamiento  $Q_e$  con un factor  $k$  que depende del tipo de turbina.

$$Q_{mt} = kQ_e \quad (2.9)$$

Para una primera aproximación, se tomarán los siguientes valores de  $k$ : (5)

Tipo de turbina (cf. §0)	Valor de $k$
<b>Pelton</b>	0.10
<b>Kaplan a simple reglaje</b>	0.25
<b>Kaplan a doble reglaje</b>	0.15
<b>Francis</b>	0.50
<b>Trg</b>	00
<b>Hélices</b>	0.75

Tabla 2.e: Definición del caudal mínimo técnico según el tipo de turbina

El caudal de equipamiento (caudal de diseño)  $Q_e$  se elige de forma que el volumen turbinado sea máximo (área naranja de la Ilustración 2.p máxima). Se nota que a veces, no se puede escoger el caudal que permite la mayor producción de electricidad, por razones económicas o por limitaciones debidas a instalaciones ya existentes.

Otra forma de determinarlo es, una vez descontado el caudal de servidumbre a la curva de caudales clasificados, se elige el caudal de equipamiento en el intervalo de la curva comprendido entre el  $Q_{80}$  y el  $Q_{100}$ , siendo  $Q_j$  el caudal que circula por el río durante  $j$  días al año.

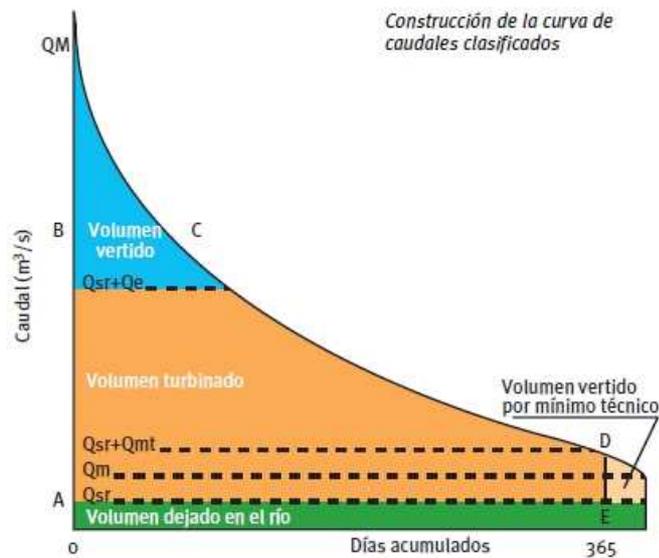


Ilustración 2.p: Curva de caudales clasificados y características notables

### Medida del caudal: resumen

Para la medida del caudal, diferentes métodos existen:

- Evaluación de la distribución de velocidades:
  - Primero se debe medir la sección transversal del río, midiendo las profundidades en varios lugares del río,
  - Segundo la velocidad del agua en el río:
    - estación de aforo,
    - corcho,
    - molinillo hidrométrico mecánico,
    - medidor de caudal electromagnético,
    - métodos de dilución,
    - ...
- Método del balde,
- Método del vertedero de pared delgada
- Método de la pendiente de línea de agua
- ...

## 2.3.2. Potencia y energía producidas

### 2.3.2.1. Potencia teórica

$$P_{teo} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta Z \quad (2.10)$$

Donde:  $P_{teo}$  = potencia teórica [J/kg]  
 $\rho$  = densidad absoluta del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$Q =$	caudal	[m/s]
$g =$	gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
$\Delta Z =$	caída bruta	[m]

Esta potencia es solo teórica, ya que como se calcula con la caída bruta, no toma en cuenta las pérdidas de presión que ocurren en el sistema.

### 2.3.2.2. Potencia hidráulica a disposición de la turbina

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot gH \quad (2.11)$$

Donde  $gH$  es la energía hidráulica de masa, en J/kg.

### 2.3.2.3. Potencia mecánica proporcionada por la turbina

$$P_{mec} = \eta_{tur} \cdot P_h = \eta_{tur} \cdot \rho \cdot Q \cdot gH \quad (2.12)$$

Donde  $\eta_{tur}$  es el rendimiento de la turbina.  $P_{mec}$  es la potencia al eje de la turbina.

### 2.3.2.4. Energía eléctrica generada

#### 2.3.2.4.1. Estimación

La energía eléctrica generada anualmente puede ser **estimada** por la siguiente fórmula: (3)

$$E = \eta \cdot \rho \cdot V \cdot g \cdot \Delta Z \quad (2.13)$$

Donde:  $E =$  energía eléctrica generada anualmente por la instalación [J/año]  
 $V =$  volumen anual medio turbinado (según la curva de caudales clasificados) [m<sup>3</sup>]  
 $\eta =$  rendimiento global, producto de los rendimientos medios de la tubería de presión  $\eta_{tub}$ , de la turbina  $\eta_{tur}$ , del eventual multiplicador de velocidad  $\eta_{mul}$ , del generador  $\eta_{gen}$  y del eventual transformador  $\eta_{tr}$ .

$$\eta = \eta_{tub} \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_{mul} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \quad (2.14)$$

Generalmente  $\eta$  alcanza alrededor de 50%.

#### 2.3.2.4.2. Cálculo más preciso

Un cálculo más preciso de la energía eléctrica generada se hace por integración de la curva de los caudales clasificados (véase Ilustración 2.n). Se puede hacer dividiendo la zona de caudales utilizables en fajas contando por ejemplo por 5% del tiempo. La última faja corta la curva de caudales clasificados en el caudal mínimo técnicamente turbinable  $Q_{mt}$  (véase Ilustración 2.p). Para cada faja  $i$ , se calcula el caudal medio  $Q_{medio}^i$  y se lee el valor del rendimiento de la turbina  $\eta_{tur}^i$  correspondiente en una curva estándar o en la curva garantizada si la turbina ya está conocida. (5)

La producción de energía de la faja  $i$  considera se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta E_i = \rho \cdot Q_{medio}^i \cdot g \cdot H_n^i \cdot \eta_{tur}^i \cdot \eta_{mul} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot h_i \quad (2.15)$$

Donde:	$\rho =$	densidad del agua (1000 kg/m <sup>3</sup> )	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$Q_{medio}^i =$	caudal medio cruzando la turbina para la faja $i$	[m <sup>3</sup> /s]
	$g =$	gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
	$H_n^i =$	caída neta al caudal medio de la faja $i$	[m]
	$\eta_{tur}^i =$	rendimiento de la turbina a $Q_{medio}^i =$	[-]
	$h_i =$	número de horas equivalentes de funcionamiento a $Q_{medio}^i =$	[-]

La producción de energía anual es la suma de la producción de cada faja:

$$E = \sum_{i=1}^p \Delta E_i \quad (2.16)$$

$p$  es el número de fajas (si cada faja representa 5% del tiempo,  $p = 20$ ).

La potencia eléctrica generada por la MCH depende de:

- el caudal del agua circulando en la turbina,
- la caída neta,
- los rendimientos (eficiencias) de cada componente de la central: rendimiento de la turbina, de la multiplicadora, del generador, del eventual transformador. Además, si no se dispone de la caída neta, se utiliza el rendimiento de la tubería y otros como los de las rejillas, para corregir la caída bruta.
- y otros parámetros independientes de la instalación como la densidad absoluta del agua y la gravedad.

La potencia entrando a la turbina nunca puede ser aprovechada en su totalidad: a cada cambio de la naturaleza de la energía (cinética → mecánica, mecánica → eléctrica...) se pierde un poco de energía.

### 2.3.3. Obras civiles

#### 2.3.3.1. Bocatoma (9)

El papel principal de la bocatoma es de regular y captar un caudal de agua determinado para la producción de energía hidráulica.

Debe cumplir las siguientes funciones:

- Garantizar la captación de una cantidad constante de agua, especialmente en periodos de estiaje.
- Impedir el ingreso de materiales sólidos y flotantes, haciéndolos seguir el flujo del río o facilitando la limpieza.
- Proteger el resto del sistema del ingreso de avenidas o embalses que pudieran producirse en las épocas de lluvias.

Es más apropiado ubicar la bocatoma en los tramos rectos y estables del río, o si no fuera posible, en la parte convexa de los primeros tramos de una curva.

La bocatoma conlleva varias partes:

- **Barraje:** esta estructura de derivación sirve para aumentar el nivel del río con fines de captación, cuando sea necesario. Un tipo de barraje que se usa en el caso de pequeños caudales de río, cuando el caudal de derivación supera el 30% del caudal total, es el azud o presa derivadora; debe tener la menor altura posible para no afectar el régimen natural del río.
- **Descarga de fondo:** se trata aquí de la compuerta metálica que elimina los aluviones que se acumulan delante del barraje.
- **Solera de captación:** esta losa a desnivel respecto de la antecámara o piso de la bocatoma crea un pozo de sedimentación para que se depositen los materiales en suspensión.
- **Antecámara o zona de decantación:** área donde se acumularán los materiales de acarreo del río. Su cota debe ser la misma que la del río y aprox. 30 cm menor que la solera de captación.
- **Reja de admisión:** es conveniente colocar antes de la compuerta de admisión del agua una reja con máx. 5 cm de apertura, para impedir el ingreso de materiales que podrían dañar el canal o afectar su funcionamiento por su tamaño.
- **Compuerta de control de admisión:** de madera o de metal, este dispositivo controla, regula o impide el acceso de agua del río al canal de conducción.

El diseño de una bocatoma se hace tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- curso del río (curvo o recto),
- configuración del terreno (pendiente del cauce, ancho del valle),
- caudal del río, caudal a derivarse, ángulo de desvió,
- régimen del río, nivel de aguas mínimas y máximas ordinarias, nivel de aguas máximas extraordinarias,
- acarreo de materiales (frecuencia, tamaño de los materiales, materiales de suspensión o de fondo),
- geología del lugar (presencia de fallas, arcillas o calizas en las zonas de fundación de la bocatoma),
- geotecnia del lugar, capacidad portante de los suelos,
- importancia de la obra, disponibilidad presupuestal.

#### ***Bocatoma: resumen***

La bocatoma regula y capta un caudal de agua determinado y aprovechable para la producción de energía hidráulica; deja en el río un caudal también diseñado como suficiente para no afectar la fauna y la flora.

Para su diseño se deben tomar en cuenta parámetros tales como el curso y caudal del río, su régimen, la configuración, geología y geotecnia del terreno y el presupuesto disponible.



Ilustración 2.q: Bocatoma de la MCH de Yanacancha Baja (11)



Ilustración 2.r: Comienzo del canal (11)



Ilustración 2.s: Pequeño rebalse antes de la bocatoma, bocatoma, caudal restante en el río (11)

### 2.3.3.2. Canal de conducción

La principal función del canal de conducción es de conducir el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga, pasando por desarenadores y otros mecanismos que se pueden construir en el trecho. (8)

El diseño de un canal de conducción se caracteriza por su sección transversal y su material de construcción. Cada parte del canal puede tener sus especificaciones geológicas y por tanto se pueden combinar varios tipos de canales. Una vez elegido el tipo de canal, de material y de revestimiento se calcularán las dimensiones adecuadas y el desnivel correcto entre la entrada y la salida del canal. Parámetros a manejar con cuidado son la pendiente, la sección y la rugosidad, de tal manera que se pueda conducir el caudal de diseño de la instalación.

Se pueden aprovechar obras existentes, si existen, como canales de riego.

### **Material de construcción**

Entre los materiales de construcción más usados existen:

- tierra,
- concreto,
- mampostería de piedra,
- madera,
- tubería de PVC. Pero el uso de una tubería resulta considerablemente más caro que un canal abierto. También se puede enterrar.

Se podrá revestir un canal de tierra en caso sea necesario, por ejemplo en terrenos arenosos, gredosos, etc. La finalidad de los revestimientos es evitar pérdidas de agua por filtración y proteger la solera y los taludes del canal contra erosiones. (8)

La realización de un canal sin revestimiento resulta mucho más barata, ya que no necesita transporte de materiales ni mucha mano de obra, pero sólo tras una evaluación de la ruta se podrá determinar si se requiere o no un canal revestido. Se deberá hacer una evaluación en el caso que:

- el terreno sea excesivamente poroso,
- el terreno rocoso impida excavar,
- el terreno sea escarpado y el suelo inestable.

Resulta muy útil observar los canales de riego u otros en la región y consultar a agricultores de la zona.

Además los canales no revestidos conllevan las siguientes desventajas al conducir agua a poca velocidad:

- riesgo de crecimiento de plantas,
- riesgo de acumulación de sedimentos,
- mientras más grande sea el canal, más espacio habrá que usar (los canales revestidos pueden ser más compactos).

### **Sección transversal del canal**

Entre las secciones más comunes tenemos:

- rectangular,
- trapezoidal,
- circular,
- semicircular.

La geometría preferida es la trapezoidal, porque es muy eficaz hidráulicamente y no difícil de construir; de hecho es la mejor aproximación de un perfil semicircular, que es el más eficiente pero que conlleva dificultades de construcción. Pero a veces los perfiles rectangulares resultan más fáciles de construir. En caso de un perfil trapezoidal, se recomiendan para cada material un ángulo de talud específico. También para optimizar el compromiso entre erosión de las paredes del canal y deposición de sedimentos, a cada tipo de material de construcción le conviene una velocidad máxima del flujo de agua; la velocidad depende de la pendiente. (8)

El diseño ideal de un canal responde a los siguientes principios:

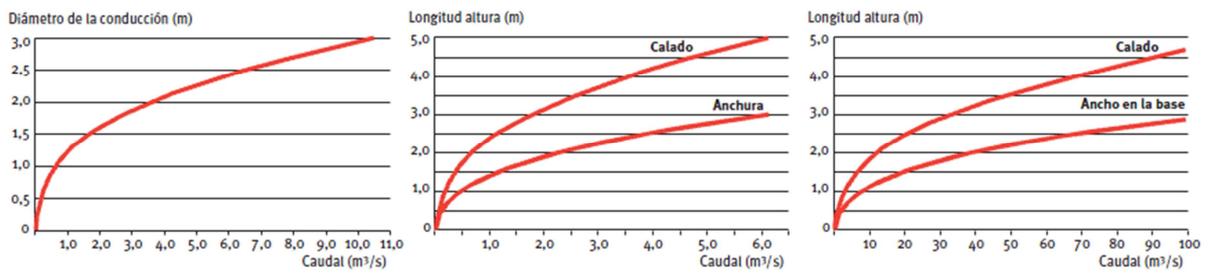
- Evitar que los sólidos en suspensión en el agua se asienten en el fondo del canal o ingresen a la tubería de presión: por tanto la velocidad debe ser suficientemente alta.
- Evitar la erosión de las paredes laterales del canal: para ello la velocidad debe ser bastante baja. Si no es posible, se deberá considerar el uso de un revestimiento más resistente.
- Reducir la pendiente en todo el canal. La rugosidad del material (o del revestimiento, llegado el caso) del canal induce pérdidas de energía por fricción (pérdidas de carga): mayor la rugosidad, mayores las pérdidas y mayor debe ser el desnivel.
- Realizar una construcción durable y confiable. Por tanto, no sólo se debe buscar evitar la sedimentación, pero también proteger el canal de los efectos de escurrimientos o derrumbes. También se debe protegerlo contra caudales demasiado altos, en caso la bocatoma no lo haga efectivamente; eso se puede hacer mediante aliviaderos que transportaran el caudal excedente hacia quebradas.
- Minimizar los costos de construcción y de mantenimiento. Por tanto se deben evaluar la disponibilidad de materiales, mano de obra calificada y no calificada y otros costos.

Conociendo el caudal de diseño, calculado para estimar la generación de energía, los pasos a seguir para el diseño de una sección del canal trapezoidal o rectangular son los siguientes:

- Definir la pendiente  $S$  del canal. Para MCH se recomiendan pendientes no mayores a 2 o 3%. Si inicialmente no se puede estimar la pendiente por algunas razones topográficas, se calculará dividiendo la diferencia de altura entre la bocatoma y el último desarenador (donde terminará el canal antes de la cámara de carga) por la longitud del canal.
- Definir el material de construcción del canal y deducir de esto el coeficiente de rugosidad (cf. 2.3.1.2.4).
- Deducir del material el ángulo de talud del canal ( $90^\circ$  si se trata de una sección rectangular).
- Dar unos primeros valor al ancho de fondo del canal (base) y al tirante de agua (o sea, a la profundidad del canal, también llamada calado). Como primeros valores se recomienda escoger un valor de la base del doble del tirante.
- Con estos calcular la sección  $A$ , el perímetro mojado  $P$  y el radio hidráulico  $R = \frac{A}{P}$  (cf. §2.3.1.2.4).
- Calcular la velocidad del agua  $v$  con la fórmula de Manning (cf. §2.3.1.2.4).

- Calcular el caudal . Este valor debe ser comparado con el de diseño. Si es menor, hay que aumentar las dimensiones del canal y viceversa; la pendiente y la rugosidad se mantienen, sólo cambian el radio hidráulico y la sección del canal.
- Se vuelven a hacer los cálculos precedentes, hasta que el caudal calculado sea igual o ligeramente mayor al de diseño.

Los costos de construcción de un canal de conducción son muy variables. Por ejemplo los costos de construcción de canales de sección trapezoidal, revestidos por el método de cerchas con concreto, instalados por Soluciones Prácticas en diversos lugares peruanos costaron entre US\$ 6 y US\$ 23 por metro lineal. (12)



**Ilustración 2.t: Dimensiones de un canal en función del caudal. De izquierda a derecha: conducción circular en lamina libre, canal rectangular, canal trapezoidal. (1)**



**Ilustración 2.u: Canal de concreto y primer desarenador (11)**



**Ilustración 2.v: Canal de concreto pasando debajo de otro río (11)**



**Ilustración 2.w: Parte del canal hecho de tubería de plástico porque se había malogrado (11)**



**Ilustración 2.x: La tubería echa el agua a otra parte del canal de concreto en buen estado (11)**

El canal de conducción conduce el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga, pasando por desarenadores y otros mecanismos que limpian el agua de materiales en suspensión. Tiene una variedad de diseños, con diferentes tipos de materiales a utilizar y diferentes formas de sección transversal, la más utilizada siendo la trapezoidal.

### *2.3.3.3. Desarenador (8)*

Para que no lleguen a la tubería de presión y a los alabes de la turbina pequeñas partículas abrasivas de materia en suspensión en el agua (como arena), que los desgastarán, se utilizan obras denominadas desarenadores, construidas a lo largo del canal, con una última antes de la cámara de carga. Gracias al diseño de los desarenadores, la velocidad del agua en ellos disminuye, dejando así las partículas asentarse en el fondo, de donde se podrán limpiar fácilmente.

Los desarenadores deben cumplir los siguientes principios:

- tener una longitud y un ancho adecuados al depósito de los sedimentos, sin ser demasiado voluminosos o caros,
- permitir una eliminación sencilla de los depósitos,
- proporcionar una evacuación de sedimentos por la compuerta que evite la erosión del suelo que soporta la base de la tubería y del depósito. Para ello se recomienda construir una superficie revestida.
- impedir la turbulencia del agua o recodos que harían pasar los sedimentos hacia la tubería de presión,
- tener la capacidad suficiente para la acumulación de sedimentos.

Un desarenador tiene tres partes: entrada, área de decantación y salida. Las dimensiones del área de decantación dependen del caudal del agua en el desarenador (o sea de la velocidad horizontal del agua y de la sección transversal del desarenador), de la velocidad vertical del agua

(velocidad de decantación de las partículas de materia) y de la profundidad de decantación (no mayor a 1 m). La velocidad horizontal del agua debe pertenecer al intervalo 0.2-0.4 m/s.

La longitud de entrada y salida debe alcanzar 1.5 veces el ancho del área de decantación para evitar la turbulencia en el agua.

$$W = \frac{Q}{V_h \cdot d_d} \quad (2.17)$$

Donde	$W$	es el ancho del área de decantación	[m]
	$Q$	es el caudal del agua	[m <sup>3</sup> /s]
	$V_h$	es la velocidad horizontal del agua	[m/s]
	$d_d$	es la profundidad de decantación	[m]

$$L_d = \frac{V_h}{V_d} \cdot d_d \cdot f \quad (2.18)$$

Donde	$L_d$	es la longitud del área de decantación	[m]
	$V_d$	es la velocidad de decantación	[m/s]
	$f$	es un factor de seguridad, valiendo 2 o 3	[-]

Los desarenadores disminuyen la velocidad del agua para sedimentar las partículas abrasivas de material en suspensión (típicamente arena). Para lograr ello se debe diseñar con cuidado, dado que se pueden aprovechar características de la ubicación, como curvas. Se construyen varios desarenadores a lo largo del canal.



**Ilustración 2.y: Segundo desarenador, aprovechando una curva del río que reduce la velocidad del agua (11)**



**Ilustración 2.z: Compuerta del desarenador, para sacar los sedimentos (11)**



**Ilustración 2.aa: Tercero y último desarenador, antes de la cámara de carga (11)**



**Ilustración 2.bb: Cámara de carga con reja en la entrada y sección amovible del tubo de desagüe de limpieza (11) (8)**

#### **2.3.3.4. Cámara de carga**

La cámara de carga es un depósito localizado al final del canal y del cual arranca la tubería de fuerza. (1)

Cumple funciones de amortiguación para evitar sobrepresiones en la tubería de presión. La obra debe contar con un aliviadero o vertedero, puesto que en caso de parada de la central, el agua no turbinada se debe desaguar hacia el río más próximo. Además, la cámara de carga sirve para aquietar el agua; en este sentido podrá tener elementos que permitan la decantación de arenas y partículas sólidas. (8)

Una cámara de carga tiene cuatro vías de movimiento de agua:

- la acometida por donde ingresa el canal de conducción,
- el vertedero para eliminar excedentes de caudal,
- el descargador de fondo que permitirá el vaciado de sedimentos,
- la alimentación a la tubería de presión mediante rejillas o malla de filtrado. Como es necesaria la limpieza frecuente de la reja, se podrá insertar justo antes de ella una compuerta de madera para impedir el ingreso de agua a la tubería de presión cuando sea necesario.

Existen trabajos de investigación sobre la formación de vórtices en la cámara de carga, pero sobre todo para instalaciones grandes. Si se forman en la entrada de la tubería de presión, esos pueden inducir pérdidas de rendimiento de la turbina, entrada de materiales sólidos a la tubería forzada y otros problemas. Se deben tomar medidas de prevención en la formación de vórtices, pero se dispone de poca información sobre ello. Un remedio muy simple y barato es incorporar un elemento flotante, como una rejilla de madera, que logrará romper la tensión superficial del fluido. (8)

La altura mínima entre el eje de ingreso a la tubería y el nivel de agua en la cámara de carga depende de la velocidad media del agua en la tubería de presión y del diámetro interno de la tubería. (8)

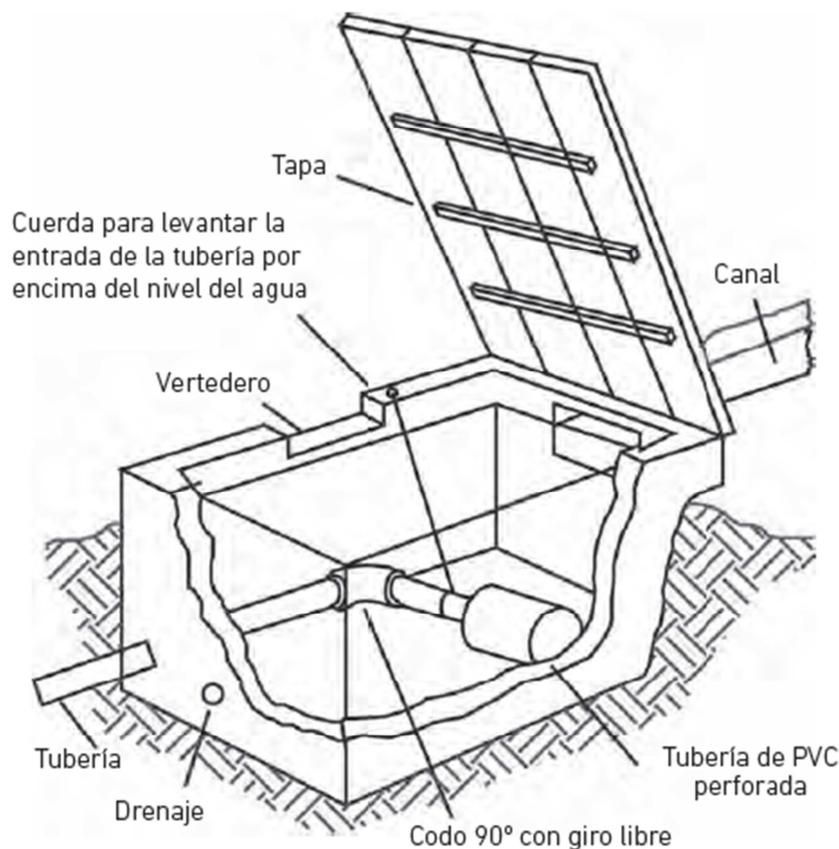


Ilustración 2.cc: Componentes básicos de una cámara de carga (8)

En la cámara de carga, existen pérdidas de carga al nivel de:

- entrada a la tubería de presión,

- rejas (pérdida causada por el enrejado – cf. la ecuación de Wahl y la ecuación dando las pérdidas a través de rejas inclinadas).

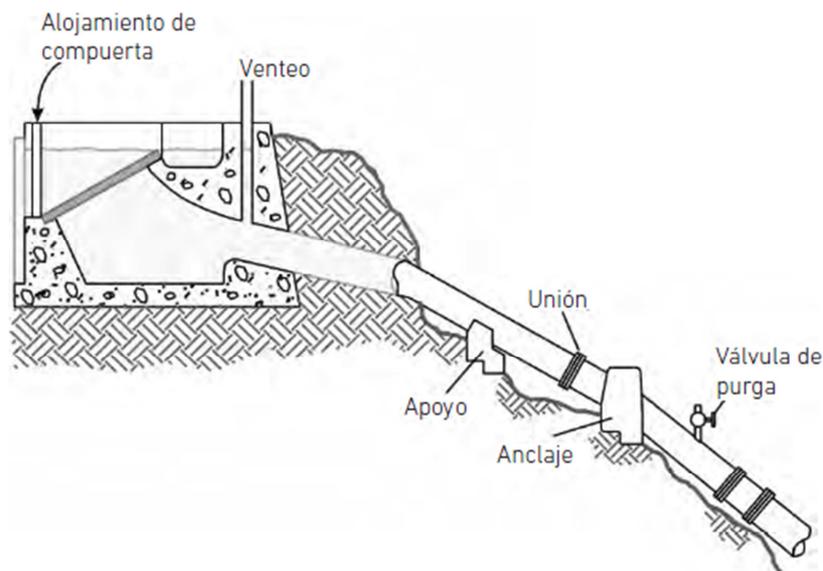
En las instalaciones de pequeña altura, se deben optimizar. Para minimizar las pérdidas al nivel de la entrada, la velocidad de entrada debe estar entre 0.05 y 0.10 m/s. Cálculos muestran que una reja inclinada de 30° con respecto a la línea horizontal también minimiza las pérdidas de carga. (8)

La cámara de carga cumple funciones de amortiguación para evitar sobrepresiones en la tubería de presión y de alivio del agua.

### 2.3.3.5. Tubería de presión

La tubería de presión, de fuerza o forzada es la que se encarga de llevar el agua a presión de la cámara de carga hasta la turbina. Debe poder soportar la presión que produce la columna de agua y también la sobrepresión que provoca el golpe de ariete en caso de parada repentina de la MCH.

En la Ilustración 2.dd se muestran los componentes principales de una tubería forzada:



**Ilustración 2.dd: Componentes de una tubería de presión (8)**

La tubería de fuerza puede estar enterrada o al aire libre, dependiendo de la orografía y de factores medioambientales.

- En caso esté aérea, será necesario sujetar la tubería mediante apoyos, además de los anclajes indispensables en cada cambio de dirección de dicha tubería. Habrá también que instalar juntas de dilatación que compensen los esfuerzos generados por los cambios de temperatura. (1)
- Si está enterrada, hay que excavar una zanja, cuyo fondo se suele cubrir de arena. Se instalan anclajes de hormigón en cada cambio de dirección, pero como estando debajo del suelo, la tubería está menos sometida a variaciones de temperatura, no son necesarias juntas de dilatación.

Material de la tubería	Propiedades	Adecuado para:
Acero soldado	Relativamente barato. Se pueden	Grandes saltos y grandes

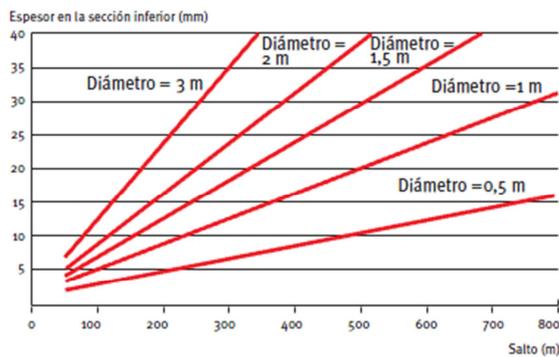
	conseguir el diámetro y espesor requeridos. Requiere protección contra la corrosión.	diámetros
<b>Polietileno de baja o media densidad (HDP, MDPE)</b>	Tuberías un poco pesadas pero muy robustas.	Baja altura de salto
<b>PVC</b>	Sensible a la radiación UV, por tanto se suele enterrar.	Muy competitivo en alturas medias. No adecuado en terrenos rocosos (fragilidad).
<b>Aleación de plástico</b>	Hep0: mezcla de PVC y derivados acrílicos. Menos espeso y menos frágil que las tuberías de PVC.	Salto hasta 160 m.
<b>Refuerzo de fibra de vidrio</b>	Costo competitivo, peso inferior a los tubos de acero. Elevada resistencia.	
<b>Polietileno de alta densidad (PEAD)</b>	Instalación al aire libre posible. Se pueden curvar fácilmente. Soportan temperaturas bajo 0°C.	Diámetros hasta 30 cm.
<b>Otros</b>	Tuberías de hormigón con revestimiento interior de acero: difíciles de transportar, no protección contra la corrosión. De madera con flejes de acero: flexibilidad de colocación, no anclajes, no juntas de dilatación, resistencia a corrosión, pero posibilidad de fugas, necesidad de tener el tubo siempre lleno de agua y necesidad de mantenimiento.	Tubería de madera: salto hasta 50 m con diámetro hasta 5.5 m y salto hasta 120 m con diámetro hasta 1.5 m.

**Tabla 2.f: Diferentes materiales para la tubería de presión**

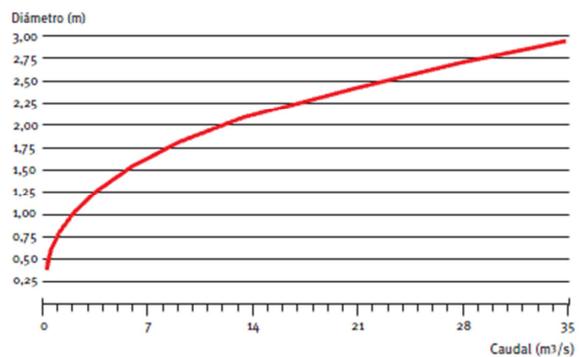
El espesor de la tubería de presión suele ser al menos 6 mm; se calcula en función del tipo de salto y del diámetro.

El diámetro suele ir con el caudal (véase la Ilustración 2.ee).

*Espesor de la tubería forzada en la sección inferior en función del salto y el diámetro*



*Diámetro de la tubería en función del caudal*



**Ilustración 2.ee: Espesor de la tubería en función y del diámetro; diámetro de ella en función del caudal. (1)**

El cálculo preciso de los parámetros de diseño de la tubería de presión se refiere a conceptos de mecánica de fluidos:

- Ecuación de Bernoulli que determina la energía contenida en un fluido incompresible circulando por el interior de un tubo (cf. §2.3.1.1.2)
- El régimen de flujo, laminar o turbulento, caracterizado por el número de Reynolds

$$(2.19)$$

Donde	es el número de Reynolds	[-]
	es la velocidad media	[m.s <sup>-1</sup> ]
	es el diámetro de tubo	[m]
	es la viscosidad dinámica del fluido	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
	es la densidad de masa	[kg.m <sup>-3</sup> ]
	es la viscosidad cinemática del fluido	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

Si  $Re < 2300$ , el flujo es laminar y si  $Re > 2300$ , es turbulento. Entre estos dos valores, se habla de flujos de transición.

Por la viscosidad, existen pérdidas de carga debidas a la fricción contra las paredes del tubo y a la disipación viscosa como consecuencia de la fricción interna del flujo. La pérdida de carga es siempre más elevada en régimen turbulento que en régimen laminar.

El diámetro de la tubería se escoge haciendo un compromiso entre el costo y las pérdidas de carga. De hecho, una tubería de pequeño diámetro resulta más barata que una tubería de gran diámetro pero necesita una mayor velocidad del agua para transportar el mismo caudal y por tanto genera más pérdidas de carga por fricción, y viceversa.

**Resumen de la metodología de selección de la tubería de presión (8):**

- Considerar las diferentes clases de material para uniones
- Comparar costos de mantenimiento
- Tomar diámetros de tubería y espesores de pared disponibles
- Calcular la pérdida de carga por fricción de 4 a 10% para determinados materiales y diámetros. Tabular los resultados

- Calcular la posible sobrepresión ocasionada por el golpe de ariete en caso de brusco cierre de la entrada de agua y sumarla con la presión estática
- Calcular espesores de pared adecuados para determinados tamaños de tubería. Tabular los resultados
- Diseñar soportes, anclajes y uniones
- Preparar tabla de opciones, calculando el costo de cada una y tomando en cuenta la disponibilidad en el mercado
- Seleccionar el diámetro en función del menor costo y menores pérdidas de energía.

Para más precisiones sobre el diseño de la tubería de presión se recomienda referirse al manual de la ONG Soluciones Prácticas, nº (8) de la bibliografía.

El costo de la tubería de presión es muy variable, según el diámetro, la clase (resistencia a la presión), el material, el tipo de unión, etc., de ella. Se trata de decenas de US\$ por metro lineal de tubería. (12)

### *2.3.3.6. Casa de fuerza (o de máquinas)*

La casa de maquinas abriga todo el equipo electromecánico de la instalación. Se construye entonces al nivel determinado para la ubicación de la turbina. Debe contar con un canal de restitución o descarga, que se inicia debajo de la turbina, para echar la totalidad del agua turbinada al río.

El costo por metro cuadrado de construcción varía entre US\$ 120 y US\$ 140. (12)



**Ilustración 2.ff: Casa de máquinas (derecha), casa del operador (izquierda) y transformador en el primer plano (11)**



**Ilustración 2.gg: El agua turbinada retorna al río (11)**

## **2.3.4. Equipo electromecánico**

### *2.3.4.1. Turbina*

Existen diferentes tipos de pequeñas turbinas adecuadas para las MCH. Su desarrollo debe ser basado en pruebas de laboratorios para asegurar los valores de rendimiento.

La energía potencial del agua puede ser transformada en energía mecánica por la turbina según dos mecanismos:

- La presión del agua es totalmente convertida en energía cinética antes de llegar a la parte móvil de la turbina (la rueda), mediante un dispositivo estático (por ejemplo un inyector). Este tipo de turbinas es llamado **turbinas a acción**.
- El agua bajo presión crea una fuerza sobre las caras de los álabes de la turbina. Mientras que el agua atraviesa la turbina, la presión se reduce, ya que está siendo transformada en energía mecánica de rotación y transmitida al generador mediante el palier de transmisión. La rueda de la turbina, llamada **a reacción**, está totalmente sumergida y el armazón de la turbina debe ser diseñado para sostener la presión de servicio.

Varios parámetros entran en cuenta al escoger un modelo de turbina; los más importantes son la altura de caída y el caudal con aquellos la turbina tendrá que trabajar. Se debe recordar que la altura de la caída no variará pero que el caudal puede variar según la estación del año u otros parámetros. Un parámetro llamado velocidad específica de la turbina, notada  $n_s$ , permite evaluar para qué tipos de altura y de caudal la turbina es adecuada. Es el número de revoluciones que haría una turbina de misma geometría ( semejanza) trabajando con una caída de 1 m para proporcionar una potencia de 1 kW con el rendimiento máximo. Además esta ley de semejanza permite hacer ensayos en laboratorio con turbinas de tamaño reducido.

Inicialmente expresa en las unidades del sistema imperial, la velocidad específica se expresa de la manera siguiente en el sistema métrico, en rpm<sup>6</sup>:

$$n_s = 0.2626n \cdot \frac{P^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{5}{4}}} \quad (2.20)$$

Donde:  $n$  es la velocidad de rotación de la turbina [rpm]  
 $P$  es la potencia de la turbina [kW]  
 $h$  es la altura de caída [m]

También intervienen en la decisión el rendimiento mecánico de la turbina y su costo.

Existen dos grandes familias de turbinas: las turbinas a acción, que utilizan sólo la energía cinética del agua (toda la presión siendo transformada en energía cinética antes) y turbinas a reacción que utilizan la energía potencial de presión del agua.

### 2.3.4.1.1. Turbinas a acción

#### 2.3.4.1.1.1. Turbina Pelton

- Rendimiento mecánico: hasta 91%
- Medianas a altas caídas: por encima de 30 m, hasta 1800 m
- Pequeños caudales, de 0.1 a 50 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 1 kW – 300 MW

<sup>6</sup> revoluciones por minuto

- Velocidad específica: 4-26 rpm

El agua pasa por uno o varios inyector(es) que le da(n) presión; el o los chorro(s) producido(s) impacta(n) los álabes de la turbina, que tienen forma de cucharas (cf. Ilustración 2.ih e Ilustración 2.ii). La energía potencial del agua, al salir por los chorros, se convierte casi sin pérdidas en energía cinética, que es aprovechada por los álabes; se dispone de la energía cinética máxima cuando el agua incide tangencialmente sobre el rodete. El diseño de los álabes debe ser pensado para maximizar la transformación de la energía cinética en energía mecánica (toda la energía cinética que sale de los álabes estará perdida). La turbina puede ser de eje vertical u horizontal, éste siendo lo más común en el caso de la pequeña hidroelectricidad.

Siempre debe estar colocada arriba del nivel del nivel de agua más abajo, en una cota indicada por el fabricante.

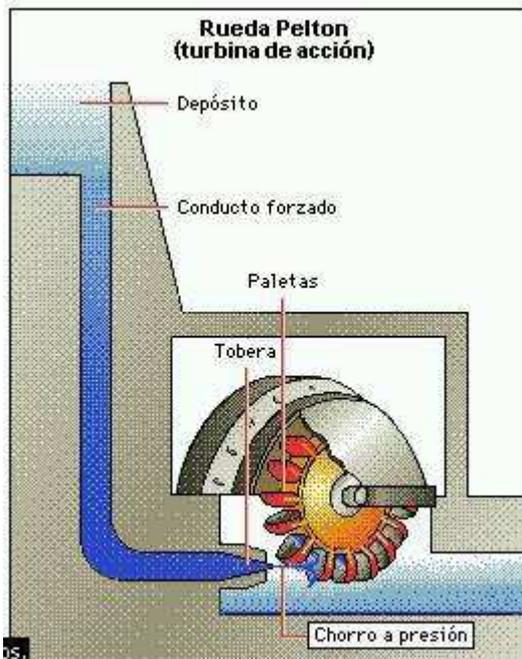


Ilustración 2.ih: Turbina Pelton in situ<sup>7</sup>

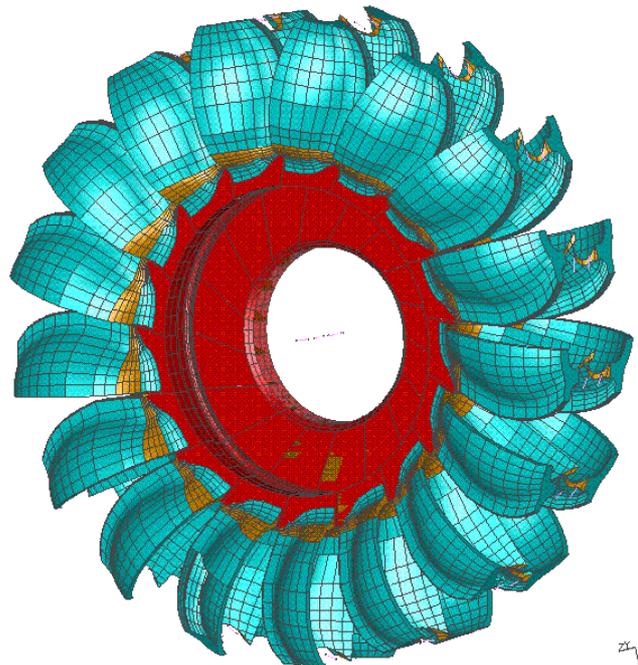


Ilustración 2.ii: Dibujo de una turbina Pelton<sup>8</sup>

#### 2.3.4.1.1.2. Turbina Turgo

- Rendimiento mecánico: hasta 85%
- Pequeñas a medianas caídas: 15-300 m
- Caudales débiles: 0.025-10 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 5-8000 kW
- Velocidad específica: 20-56 rpm

Puede ser una buena alternativa a una turbina Francis si el caudal presenta variaciones importantes o si la tubería de presión es muy larga.

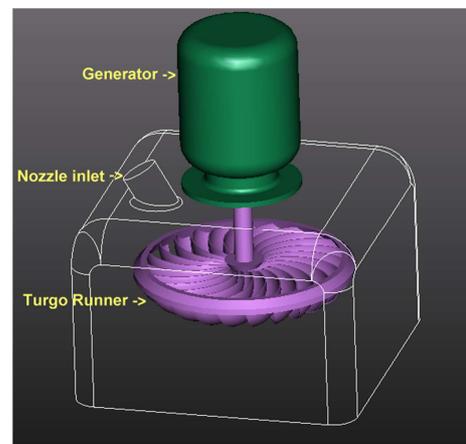


Ilustración 2.ji: Turbina Turgo y generador<sup>9</sup>

<sup>7</sup> [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/sel\\_turbinas/fondos/eleccion.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/sel_turbinas/fondos/eleccion.htm)

<sup>8</sup> <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas/turbinas.html>

<sup>9</sup> [http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Turgo\\_turbine.png?uselang=ja](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Turgo_turbine.png?uselang=ja)

### 2.3.4.1.1.3. Turbina Michell-Banki

Es una turbina de flujo cruzado (“cross-flow”). También llamada OSSBERGER (por el nombre del fabricante principal).

- Rendimiento mecánico: hasta 82%
- Muy pequeñas a medianas caídas: 1-200 m
- Caudales muy débiles: 0.025-5 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 1-750 kW
- Velocidad específica: 40-160 rpm

El agua entra en la rueda por arriba y la atraviesa una segunda vez antes de salir por la parte inferior, funcionamiento de lo cual tiene su nombre. Es de fabricación simple y poco costosa, por tanto fácil de mantenimiento.

El rendimiento es menor que el de las turbinas Pelton, pero tiene una mayor facilidad constructiva y una mejor adaptabilidad a las pequeñas alturas de caída.

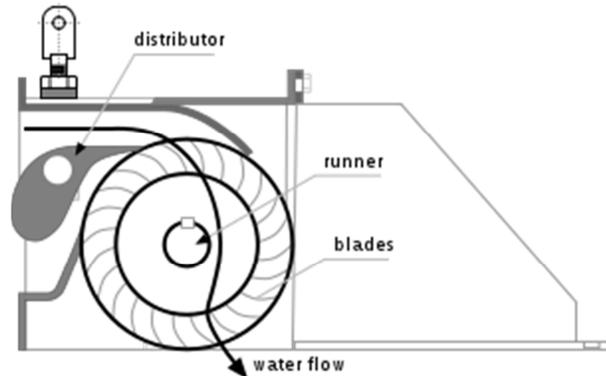


Ilustración 2.kk: Principio de una turbina Michell-Banki (5)

### 2.3.4.1.2. Turbinas a reacción

#### 2.3.4.1.2.1. Turbina Francis

- Rendimiento mecánico: hasta 92%
- Muy pequeñas a altas caídas: 2-750 m
- Caudales débiles a altos: 1-500 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 2 kW – 750 MW
- Velocidad específica: 60-150 rpm (lenta), 150-250 rpm (normal), 250-400 rpm (rápida)

Tiene una rueda a álabes fijos y un distribuidor a álabes móviles. Puede ser de eje horizontal o vertical, lo que es el más común en el caso de la mediana hidroelectricidad. Las ruedas están generalmente hechas de fundición o de acero inoxidable.

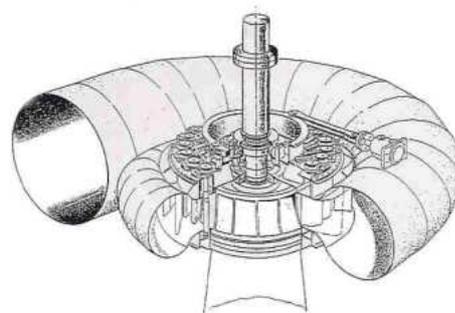


Ilustración 2.II: Turbina Francis

Aprovecha todo el salto disponible, hasta el desagüe. La construcción compleja, la fricción y el desgaste causados por la alta velocidad de rotación y algunos problemas de estanquidad hacen problemática su aplicación a pequeñas centrales. (13)

#### 2.3.4.1.2.2. Turbina Kaplan y hélices

Son turbinas a reacción axiales.

- Rendimiento mecánico: hasta 93%
- Pequeñas caídas: 5-80 m
- Altos caudales: 1000 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 2 kW – 200 MW
- Velocidad específica: 300-800 rpm

La turbina Kaplan conlleva una rueda con álabes móviles y acoplables, mientras que los álabes de hélices son fijos.

Las hélices son utilizadas en caso de flujo y de caída casi constantes, lo que no ocurre mucho en caso de pequeña hidroelectricidad.

La turbina Kaplan presenta una gran flexibilidad en relación con las variaciones de caudal. Es la que permite la mayor variabilidad de configuraciones. En caso de una caída muy baja, el modelo debe ser escogido con precaución porque necesitará altos caudales para garantizar la rentabilidad. Para caídas de 2 a 5 m y caudales de 10 a 100 m<sup>3</sup>/s, ruedas de diámetros incluidos entre 1.6 y 3.2 m son necesarias.

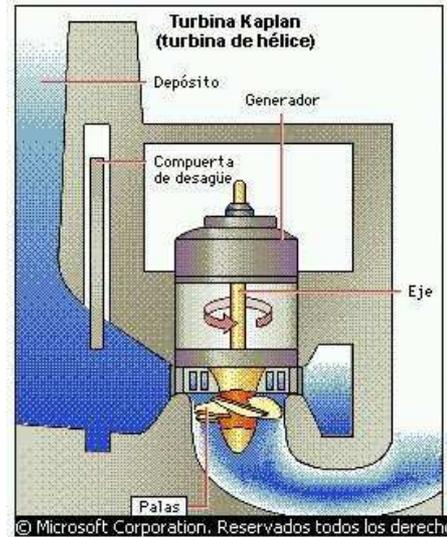


Ilustración 2.mm: Turbina Kaplan<sup>10</sup>

#### 2.3.4.1.3. Eficiencia de las turbinas

Se nota que la turbina Pelton ofrece poca variación de eficiencia cuando varía el caudal relativamente al caudal nominal, a la diferencia de los otros tipos de turbinas y sobre todo de las hélices.

#### 2.3.4.1.4. Resumen

Para pequeñas instalaciones, el tipo Pelton está muy difundido, por su buena relación costo / beneficio, porque acepta una gran variabilidad de caudales (véase Ilustración 2.nn) y porque trabaja en rangos de potencia (así, el mismo rodete vale para una potencia de 500 W a 2 kW). Para caídas muy pequeñas, la turbina de flujo cruzado resulta más adecuada y menos costosa que la Pelton, aunque un poco menos eficiente.

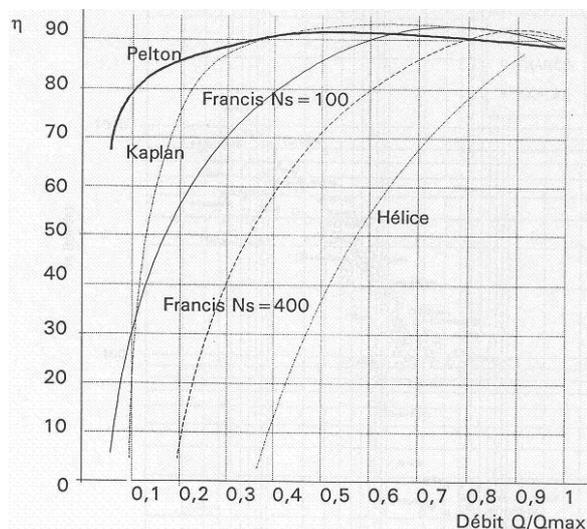


Ilustración 2.nn: Eficiencia de varios tipos de turbinas

Una turbina Francis necesita un caudal casi constante para ofrecer una buena eficiencia, mientras que una turbina Kaplan sólo conviene a caudales muy altos; entonces estas dos turbinas no son muy adecuadas para MCH. Véase también la Ilustración 2.oo y la Tabla 2.g.

Pequeña turbina	Caídas	Caudales	Eficiencia	Versatilidad	Costo	Nº fabricantes
-----------------	--------	----------	------------	--------------	-------	----------------

<sup>10</sup> [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/sel\\_turbinas/fondos/eleccion.htm](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/sel_turbinas/fondos/eleccion.htm)

Pelton	>>	<	++	+	+	+
Michell-Banki	<	<<	-	-	++	+
Francis	>	>	+	-		
Kaplan	<	>>	+	-		

Tabla 2.g: Resumen de características de turbinas

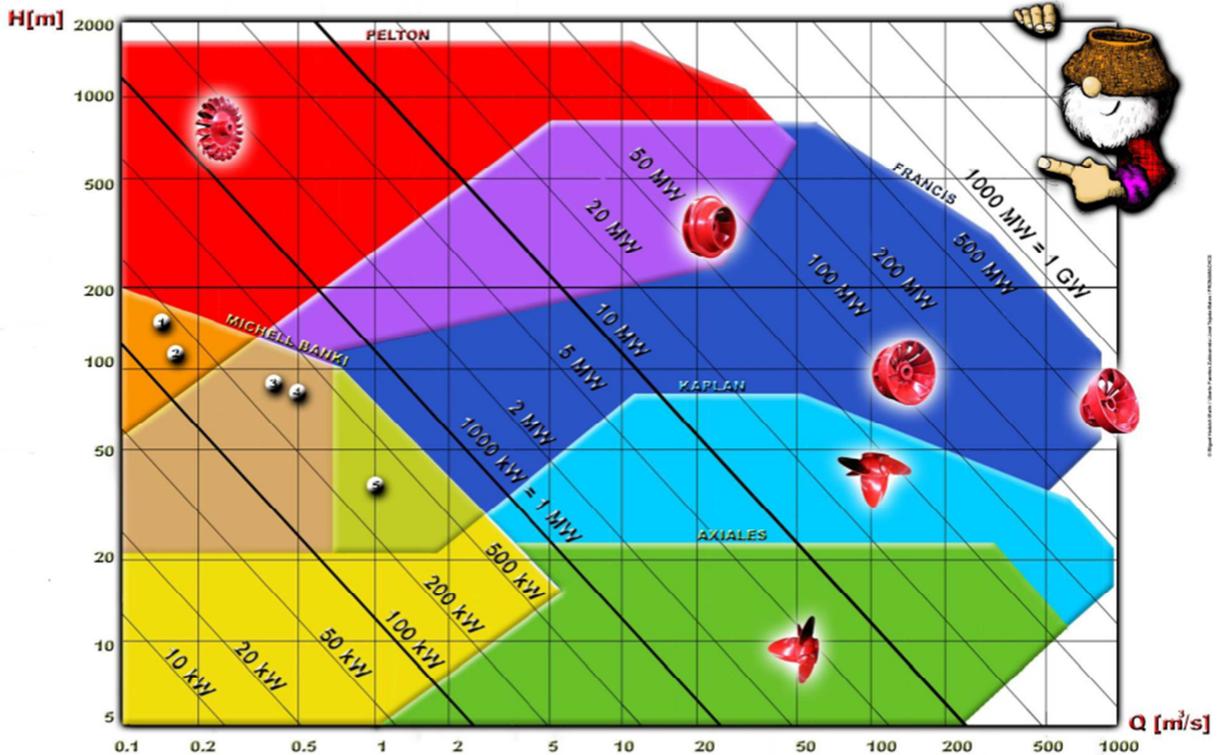


Ilustración 2.00: Selección de turbinas hidráulicas (GRUPO-PUCP) (14)

### 2.3.4.2. Multiplicador de velocidad

La velocidad de rotación y del generador son distintas, la del generador eléctrico estando en general más elevada que la de la turbina mecánica; esto no siempre es el caso, la velocidad de rotación de algunas pequeñas turbinas Pelton alcanzando 3000 rpm.

Para poder acoplar la turbina y el generador, si tienen velocidades de rotación distintas, ha de utilizar un multiplicador de velocidad. La manera más simple de realizarlo es de instalar un conjunto poleas y fajas. La velocidad siendo la misma a lo largo de la faja, la polea más pequeña gira más rápidamente. También se puede realizar la transmisión por cadenas de rodillos, ruedas de fricción o engranajes.

Se utiliza en general un multiplicador de velocidad, a fines de que el generador tenga una velocidad de giro adecuada a la generación de electricidad.

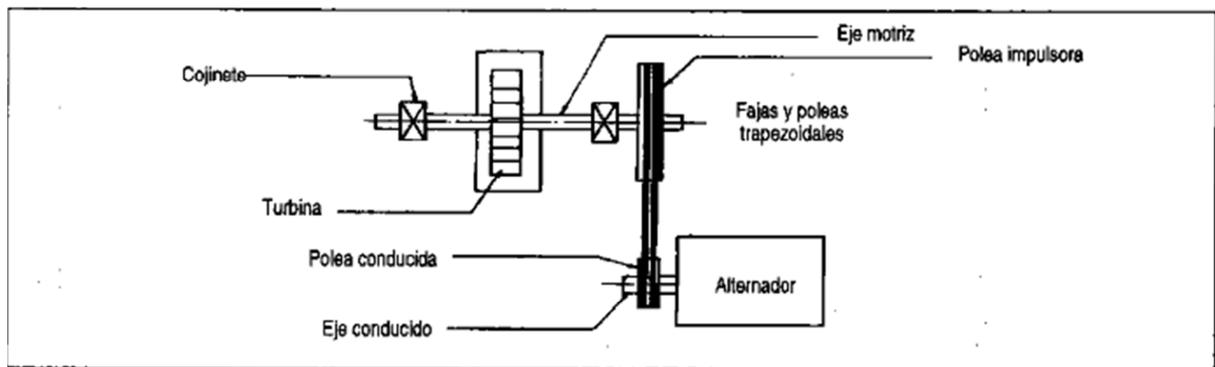


Ilustración 2.pp: Sistema de transmisión en una etapa, mediante fajas y poleas (9)

### 2.3.4.3. Generador eléctrico

Tipo de generador	Descripción	Aplicación
Generador síncrono	De eje vertical o horizontal. Corriente alterna.	De mayor aplicación en las MCH
Generador de inducción (o asíncrono)	Se puede utilizar un motor como generador (invertido). Alternativa interesante por su bajo costo: puede reducir los costos en más del 50%. Pero es necesario conectarlo a un banco de condensadores (que dan el arranque).	Adecuado para pequeñas potencias $\leq 10$ kW
Generador de imanes permanentes	Los imanes permanentes deben ser importados.	Adecuado a picosistemas, de potencia $\leq 1$ kW
Alternador automotriz	Generador síncrono de corriente continua ( $\approx 14$ V si de carro y 28 V si de camión)	Otra alternativa para la electrificación rural, especialmente para la carga de baterías

Tabla 2.h: Tipos de generadores (15)

En el ámbito de la pequeña hidroelectricidad, la utilización de un motor como generador permite reducir el costo hasta 60 o 70%. Se emplea un pequeño motor trifásico que se encuentra muy fácilmente. Al contrario, hay poca disponibilidad de pequeños generadores, luego se deben mandar fabricados. (2)

Para hacer funcionar es necesario un pequeño banco de condensadores que darán la excitación necesaria para encenderlo. Una tarjeta electrónica regula la corriente, desviándola hacia una resistencia que disipa la energía cuando baja la demanda, y puede apagar el generador si no agua fluya. A veces se instalan dispositivos que permiten recuperar la energía disipada por la resistencia, por ejemplo ollas para calentar agua.

Se suele usar generadores que producen corriente alterna monofásica hasta 20 kW, y trifásica por encima para reducir pérdidas de transmisión.

### 2.3.4.4. Control y protección de la generación

Es importante proteger el sistema de sobretensiones o sobrecorrientes, además de recibir informaciones sobre el funcionamiento de la MCH. Por ello es necesario un control y protección de la generación, pero que en el caso de pequeñas centrales se recomienda mantener sencillo para minimizar los costos y las tareas de mantenimiento, reparación y verificación. (8)

#### 2.3.4.4.1. Tablero eléctrico

El tablero eléctrico conlleva todos los instrumentos de medición (amperímetros, voltímetros, vatímetros), los interruptores y contactores y los mecanismos de protección como disyuntores y puestas a tierra.



Ilustración 2.qq: Tablero de control con mediciones de intensidades (corriente trifásica) y tensión (11)



Ilustración 2.rr: Interior del tablero de control (11)

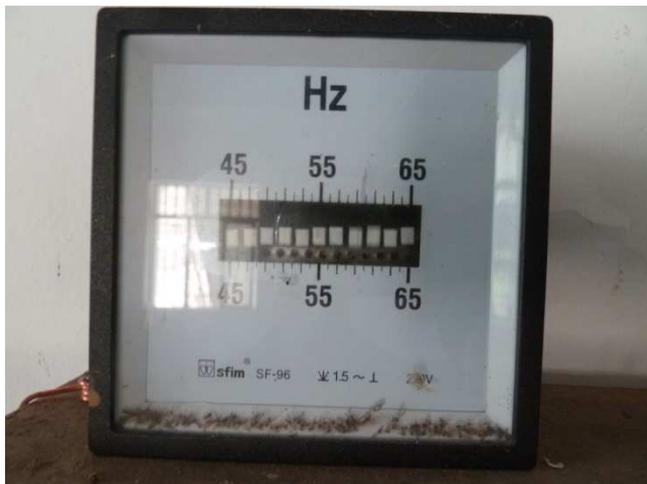


Ilustración 2.ss: Medidor de frecuencia (11)



Ilustración 2.tt: Mecanismo de evacuación del excedente de electricidad en forma de calor en una resistencia sumergida (11)

#### 2.3.4.4.2. Control de velocidad de la turbina

Es un equipo de accionamiento que regula el flujo de agua que atraviesa la turbina y que regula la velocidad de la unidad y la salida de potencia conectada al generador. Para unidades que no requieren ajustes de velocidad muy precisos, se utilizan dispositivos manuales de apertura-cierre del flujo de agua. (8)

#### 2.3.4.4.3. Regulador de tensión

##### *2.3.4.4.3.1. Sin conexión a una red comercial*

El sistema de control lógico para la secuencia de arranque, operación y parada de una MCH es obtenible mediante el cableado de relés electromagnéticos, controles programables, microprocesadores o combinación de estos elementos. (8)

##### *2.3.4.4.3.2. Con conexión a una red comercial*

#### Para generadores síncronos

En la mayoría de los casos, la MCH genera corriente alterna que será distribuida por una minired eléctrica. Para poder atender correctamente las diferentes necesidades (carga doméstica, iluminación pública y/o energía industrial), se debe controlar que el valor de la tensión siempre se mantenga entre estrechos valores. (9)

Se controla entonces la variación relativa de la tensión con respecto a la referencia del voltaje en circuito abierto.

Existen diferentes tipos de reguladores:

- Regulador automático de tensión (AVR) electrónico: es un dispositivo fabricado con elementos de estado sólido montados sobre una tarjeta impresa.
- Regulador de tensión automático "compuesto": este sistema de regulación antiguo es electromagnético sin realimentación de señal.
- Regulación manual de tensión: para casos de emergencia y si las magnitudes de corriente y tensión lo permiten.

#### Para generadores asíncronos

Cuando el generador está en régimen de funcionamiento, la tensión se estabiliza en un valor mayor que el nominal. El voltaje es fuertemente sensible a la velocidad de giro del generador.

- Controlador para el generador de inducción autoexcitado (CGI)

Para poder aprovechar la electricidad generada, la frecuencia y la tensión deben ser reguladas dentro de límites aceptables. El CGI permite cumplir las dos funciones.

El regulador mide el valor de tensión generada. Si la tensión es mayor que la calibrada, envía corriente a una carga auxiliar de regulación o lastre; esta carga puede ser una resistencia, donde se disipa la energía en forma de calor. Como consecuencia, disminuye la tensión generada, y viceversa.

### 2.3.5. Distribución de electricidad

---

La electricidad con fin de utilizaciones domésticas puede estar proporcionada:

- directamente a las casas mediante una red,
- o mediante baterías, periódicamente vueltas a la casa de fuerza para estar recargadas. Esto es común cuando las viviendas están aisladas o muy dispersas, porque en este caso el costo de construcción de una red estaría demasiado elevado.

En el primer caso (mediante una minired y no baterías), existen también dos medios de distribución de la electricidad:

En el caso de un abastecimiento mediante una minired, el transformador recibe la electricidad del generador y la adecua a las características de la red de transporte. Para transportar electricidad es necesario elevar su tensión.

- Hacia el centro poblado



Ilustración 2.uu: Transformador y principio de las líneas de



Ilustración 2.vv: Transformador al nivel de la escuela

transmisión, al nivel de la MCH (11)

de Yanacancha Baja (11)

- Mediante un transformador, la corriente resultante del generador está transformada en corriente trifásica de alta tensión para adecuarla a las características de la red de transporte. De hecho, para transportar electricidad sobre largas distancias, es necesario elevar su tensión. Luego está transportada hasta un nudo de líneas (distribución primaria), en de lo cual otro transformador baja la tensión y a partir de lo cual la corriente está transportada a las viviendas (distribución secundaria). Ahí, mediante otro transformador, la tensión se baja a la tensión nominal de la corriente trifásica 380 V, y luego la corriente se vuelve en corriente monofásica de tensión 220 V.

En la MCH de Yanacancha Baja, la tensión es elevada a 10000 V para ser transportada hacia la escuela. (11)

- Hacia casas aisladas

En este caso, la corriente monofásica (220 V) es transportada directamente a varias casas aisladas sin necesidad de elevar mucho su tensión. (11)

### 2.3.6. Resumen

---



Ilustración 2.ww: Equipo electromecánico de la MCH de Yanacancha Baja: turbina en el primer plano, fajas y poleas, generador atrás, equipo de control en la pared izquierda (11)

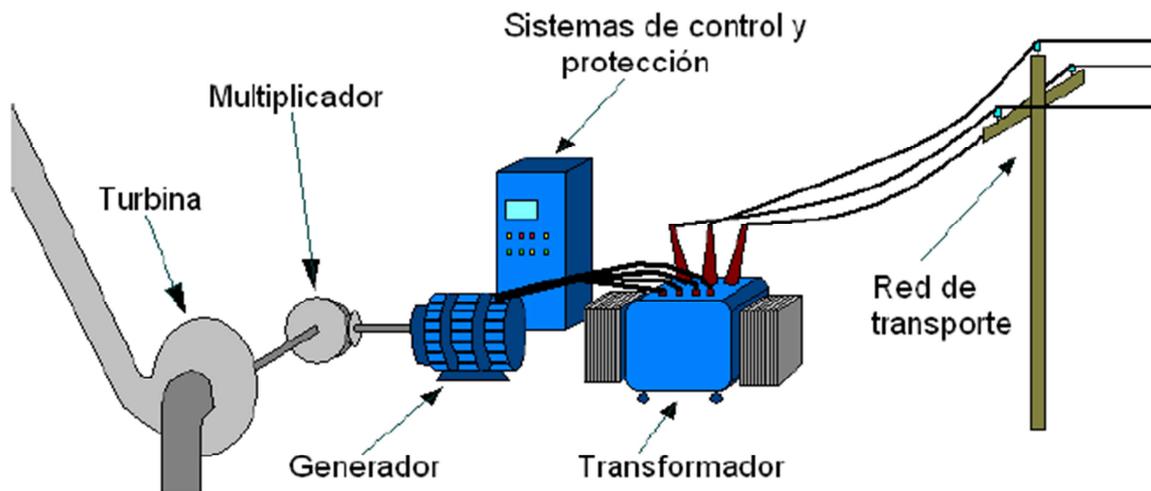


Ilustración 2.xx: Esquema global de la instalación (10)

En cuanto a los costos de instalación de una MCH, esos dependen de muchos factores, que son la altura, el caudal, la orografía, la preexistencia de obras civiles (como un canal), etc.

Un costo de unos US\$ 1000 por kW instalado es realmente interesante. (10)

La ONG Soluciones Prácticas utilizó un canal inicialmente previsto para riego para construir la MCH de Yanacancha Baja. (11)

### 2.3.7. Normas

Los aisladores deben cumplir con las normas técnicas IEE-NEMA, según la clase a la que pertenezcan. (9)

Las centrales son construidas de acuerdo a los requisitos de la red interconectada, incluso en el caso de MCH aisladas, por si acaso un día se conecten a la red.

Los valores de la tensión de generación obedecen a normas locales, que deben ser respetadas para poder hacer funcionar los aparatos comercializados en el país. Por ejemplo, en el Perú el sistema trifásico tiene 380 V entre líneas (para sistema de potencia máxima 100 kW) y el monofásico 220 V.

Las turbinas y generadores deben ser probados en laboratorio para garantizar los valores de eficiencia.

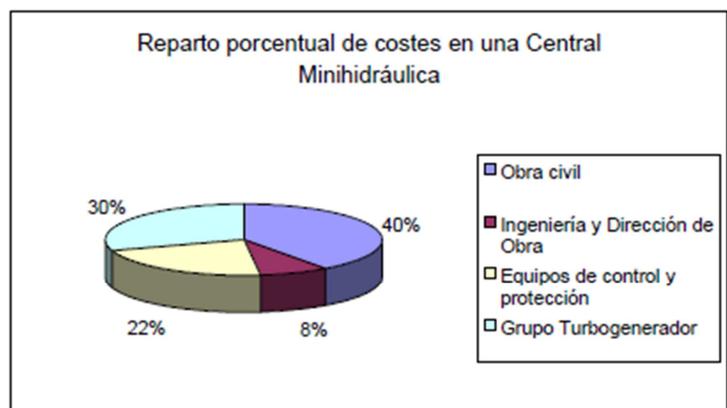


Ilustración 2.yy: Reparto porcentual de costes en una minicentral hidráulica (10)

## 3. Construcción, operación y mantenimiento

---

### 3.1. Construcción

---

#### 3.1.1. Obras civiles

---

La construcción de la mayoría de las obras civiles debe ser realizada o al menos supervisada por personas especializadas, según el diseño definido. La población puede ayudar por ejemplo a la construcción del canal o de la casa de máquinas.

#### 3.1.2. Pruebas del equipo electromecánico

---

Al recibir el equipo electromecánico, se deben realizar un número bastante importante de pruebas antes de la puesta en servicio de la central. (8)

- Prueba hidrostática
- Prueba de estanqueidad mediante llenado de agua de la tubería de presión y verificación de fugas
- Verificación de los datos técnicos del equipo turbina-generador
- Inspección ocular de los equipos y elementos auxiliares
- Mediciones y comprobaciones
- Operación en vacío del equipo turbina-generador
- Simulación de operación del sistema de protección
- Operación con carga del equipo turbina-generador
- Golpe de ariete por retiro de carga
- Funcionamiento del grupo a potencia nominal. Mediciones de temperatura
- Pruebas de sincronización
- Energización de redes. Puesta en servicio
- Registro del estado inicial y final en las pruebas

#### 3.1.3. Instalación de generadores eléctricos

---

En el ámbito de la instalación de generadores eléctricos, se debe considerar lo siguiente: (9)

- Cuidados durante el transporte
  - Evitar golpear la maquina o dejarla caer
  - Cubrir la maquina con mantas plásticas para protegerla de la lluvia y de la humedad. Sujetar el embalaje con protecciones de madera
- Recepción del equipo
  - Verificar que los elementos del generador tengan fácil acceso y el buen estado del equipo adicional. Anotar para reclamos llegado el caso.
  - Comprobar la presencia de humedad, polvo y elementos extraños.
- Cimentación

- Espaciamiento del generador de las paredes: la distancia con la entrada de aire de ventilación debe ser al menos 30 cm y con las salidas de aire debe alcanzar 50 cm.
- Aire de ventilación: el volumen mínimo de aire para ventilar el generador es de 15 m<sup>3</sup>/kWh
- Montaje al accionamiento: se trate de montaje directo o indirecto (por fajas), se debe realizar con mucha precisión.
- Cable de tierra: para la protección del personal, es imprescindible conectar la estructura metálica del generador a la tierra. La configuración de esta puesta a tierra se debe pensar durante la elaboración del proyecto.

## 3.2. Operación y mantenimiento

---

### 3.2.1. Operación

---

Es conveniente instruir una o dos personas para la operación de la MCH: enseñarles el funcionamiento de los equipos, los nombres de las partes, el modo de operación de los equipos y como llevar a cabo acciones de mantenimiento. (9)

Lo común es que el operador o los operadores sean personas que al participar a la construcción de las obras, han mostrado disciplina y voluntad.

Los siguientes requisitos se deben tomar en cuenta para la selección del operador: (9)

- Saber leer y escribir,
- Habilidades manuales para el manejo de herramientas,
- Capacidad de retención para memorizar secuencias,
- Iniciativa e imaginación para la resolución de problemas,
- Capacidad de deducción para distinguir causa y efecto,
- Alto sentido de responsabilidad,
- Gozar del respeto comunal.

El operador tiene generalmente las funciones siguientes: (9)

- Poner en marcha la turbina bajo condiciones normales
- Parar la turbina bajo condiciones normales
- Supervigilar el funcionamiento del grupo turbina-generador
- Llenar el registro diario de funcionamiento y ocurrencias
- Realizar maniobras para el reparto de energía eléctrica
- Paralizar la turbina en caso de anomalías, detectar la causa y proceder a eliminarla, cuando se trate de ocurrencias menores
- Conocer el funcionamiento de los sistemas de protección y desbloquear la turbina después de actuar
- Llevar a cabo acciones de mantenimiento periódicas y programar su repetición
- Realizar las maniobras para un adecuado llenado de la tubería de fuerza
- Saber regular la cantidad de agua necesaria en la bocatoma y en la cámara de carga
- Realizar inspecciones en los diferentes componentes de la microcentral para la detección de fallas o posible ocurrencia de las mismas

- Realizar instalaciones y reparaciones eléctricas menores en tomas de corriente, fusibles, focos e interruptores
- En caso de accidentes, saber proporcionar primeros auxilios.

Es aconsejable tener en la casa de máquinas el detalle del montaje y de las operaciones a realizar, como se ve en las ilustraciones siguientes, con paneles realizados por el operador sí mismo.



Ilustración 3.a: Esquema de la turbina Pelton (11)



Ilustración 3.b: Montaje de la turbina y del generador (11)



Ilustración 3.c: Lista de las operaciones de encendido y de apagado (11)

### 3.2.2. Mantenimiento

La instalación de una microcentral hidroeléctrica requiere una gran inversión de capital inicial. Para recuperar esta inversión en el plazo determinado durante la elaboración del proyecto, la central debe funcionar durante todo el tiempo previsto, o sea en general cada día del año, las 24 horas. Con respecto a eso, el programa de mantenimiento juega un papel muy importante, evitando fallas que podrían parar la producción de electricidad durante un cierto tiempo.

Lamentablemente, con frecuencia esto no se lleva a cabo, por varias razones, desde la ausencia de recursos financieros hasta la falta de conocimiento vía la inexistencia de programas claros de mantenimiento.

Épocas	Paralizar durante:
Durante el año	Meses de estiaje
Durante la semana	Días de fin de semana
Durante el día	Horas nocturnas o de madrugada

Tabla 3.a: Momentos favorables a la parada de la MCH en caso que sea necesario para mantenerla (9)

### 3.2.2.1. *Mantenimiento de las obras civiles*

#### 3.2.2.1.1. **Bocatoma**

- Ventana de captación: es importante inspeccionarla diariamente en época de avenida, para verificar que materiales flotantes no bloqueen el pasaje del agua
- Pequeño barraje: generalmente no necesita mantenimiento. Sólo en la época de avenidas se debe chequear que no haya grandes piedras u objetos que impidan la circulación del agua. En cuanto a la existencia de rajaduras o filtraciones se puede observar mejor en la época de estiaje, y si necesario, realizar los trabajos de resane.

#### 3.2.2.1.2. **Canal**

- Se debe vigilar la velocidad de circulación del agua, porque si ésta está mayor a la velocidad diseñada, el canal se puede erosionar y al revés, si está menor, habrá acumulación de sedimentos en el canal. La velocidad en un canal de tierra debe ser menor que en un canal revestido.
- Se deben prevenir fugas y repararlas pronto si aparecen.

#### 3.2.2.1.3. **Desarenadores**

Para limpiar los desarenadores, que es un proceso bastante tedioso, se debe abrir la compuerta y remover los sedimentos con palas, dirigiéndolos hacia un canal de limpia adyacente al desarenador. Un piso de depósito ligeramente inclinado facilitará la operación. El vaciado se debe realizar en periodos en los que no se necesite la energía de la turbina. Se deberá cerrar la compuerta de control de la bocatoma para que se pare la turbina. Para facilitar el trabajo y evitar la interrupción de la producción de energía, se pueden diseñar equipos de limpieza semiautomáticos. (8)

A parte de la limpieza, los desarenadores requieren poco mantenimiento, que se resume a la ocasional reparación de la mampostería en periodos de estiaje. La compuerta de purga puede requerir lubricación cada cierto tiempo, dependiendo del diseño.

#### 3.2.2.1.4. **Cámara de carga**

La rejilla en la entrada de la cámara de carga o antes de la tubería de fuerza necesita limpieza regular, dependiendo de la cantidad de materiales bloqueados en la reja. Se deben inspeccionar los soportes y estructura de los desfuegos y rebosaderos para detectar posibles daños, tipo rajaduras o deslizamientos de la cimentación.

#### 3.2.2.1.5. **Tubería de fuerza**

- Tuberías de acero: requieren poco mantenimiento. Se debe vigilar que las uniones de los tubos y las juntas de dilatación no goteen. Si ocurre corrosión, se debe limpiar la zona con cepillos de cerdas de acero, solventes químicos o arenado; se recomienda aplicar una capa de pintura anticorrosiva periódicamente.
- Tuberías de PVC: no deben ser expuestas a los rayos de sol, dado que la radiación UV daña este tipo de plástico. Por eso se suele enterrarlas. Se debe verificar el estado de los anclajes y soportes para prevenir la cavadura del terreno debido al drenaje de aguas de lluvia, lo que provoca inestabilidad, hasta deformación y rotura de la tubería.

#### **3.2.2.1.6. Válvulas**

Se debe verificar que las válvulas instaladas al final de la tubería no tengan fugas de agua y que estén en una posición abierta o cerrada, no intermedia.

### **3.2.2.2. *Mantenimiento del equipo electromecánico***

---

#### **3.2.2.2.1. Mantenimiento de las turbinas hidráulicas**

En el caso de mantenimiento o de reparación de las turbinas, se debe desviar el flujo de agua llegando al nivel de la cámara de carga mediante un vertedero de descarga lateral.

Es muy importante que el agua se quede limpia (gracias a bocatoma, desarenadores, rejilla...). Tanto como es el caso, la turbina necesita poco mantenimiento, pero si un objeto se incrusta en ella, habrá que desmontar los inyectores de una turbina Pelton o retirar la tapa de inspección de una turbina Francis o Michell-Banki para poder sacar este objeto. Ocurre comúnmente con las turbinas Francis.

Ruidos extraños o sobrecalentamientos son señales de que algo está mal en los rodamientos o apoyos del eje.

Una inspección anual es necesaria para chequear el avance del desgaste en el rodete y elementos directrices del agua (que ocurre a lo largo del tiempo), para estimar si la turbina necesita una reparación general.

#### **3.2.2.2.2. Acoplamientos, rodamientos y fajas**

- Acoplamiento directo: necesita poca atención
- Acoplamiento indirecto
  - Fajas: verificar el tensado
  - Rodamientos:
    - Antideslizantes (se observan con frecuencia en máquinas antiguas): hay que verificar que el área de asentamiento en la pista sea la mayor posible y revisar el estado del lubricante.
    - Por rodadura: requieren poca atención, periódicamente habrá que poner grasa.

#### **3.2.2.2.3. Mantenimiento de los generadores**

Como en las otras máquinas rotativas, el mantenimiento del generador casi se reduce a la lubricación de cojinetes y al cambio de los mismos. En caso esté instalado un generador de

inducción, los condensadores requieren más cuidado: se debe revisar su estado, chequeando si todavía mantienen su capacidad y corriente de fuga. Además se debe limpiar la sulfatación y protegerlos de la humedad hasta lo posible.

### *3.2.2.3. Diagnóstico de fallas*

---

Existen en la literatura diagnósticos de fallas extensivos; se recomienda referirse a ellos. Véase por ejemplo el documento (9), páginas 250 a 255.

### *3.2.3. Reemplazo*

---

De la turbina se cambian las fajas y los rodamientos cada 3 a 4 años. Si se elige un rodete de buena calidad, y que un desarenador está instalado, el rodete tendrá una vida útil de 20 años, así como el resto de la turbina.

El generador también tiene una duración de 20 años.

## 4. Turbinas de río y ruedas hidráulicas

En este documento, además de las microcentrales hidroeléctricas se evocarán a continuación las turbinas de río y las ruedas hidráulicas.

### 4.1. Turbinas de río

En cuanto a las turbinas de río, la problemática es diferente de las MCH, ya que las éstas aprovechan una caída y una corriente de fluido para generar electricidad, o sea la energía potencial y la energía cinética del flujo, mientras que las turbinas de río explotan sólo la energía cinética de la corriente de agua, instalándose en ríos planos, como lo pueden ser en la selva, por ejemplo.

El aprovechamiento de la energía cinética en ríos es muy antiguo. Sin embargo, siempre fue usado para generar energía mecánica, mientras que lo que se busca ahora es producir electricidad con eso.

El principio de funcionamiento de esta clase de turbinas siendo similar a las turbinas de viento, la mayoría de los principios se derivarán de la teoría eólica. (16)

Por tanto, la energía cinética de la cantidad de agua que entra a la turbina es:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (4.1)$$

Donde:  $m$  es la masa de esta cantidad de agua

$v$  es la velocidad de esta cantidad de agua, es decir la velocidad del río

El volumen de agua cruzando una superficie  $S$  a la velocidad  $v$  en 1 s es:  $V_{agua} = vS$ , y la masa de este volumen es  $\rho vS$ , donde  $\rho$  es la densidad del agua, que vale  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ .  $S$  representa la superficie barrida por las palas de la turbina:  $S = \pi d^2/4$ , donde  $d$  es el diámetro de la turbina. Reemplazando la expresión de la masa en la ecuación 4.1, viene que la potencia cinética de entrada a la turbina es:

$$P_{cin} = \frac{1}{2} \rho vS \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (4.2)$$

Aplicando esta fórmula se pueden calcular las potencias de entrada por  $\text{m}^2$  de superficie de la hélice para diferentes velocidades de agua.

Similarmente a lo que demostró el físico alemán Betz para las turbinas eólicas, sólo puede convertirse al máximo el  $\frac{16}{27}$  (59.3%) de la energía cinética en energía mecánica. Entonces:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cin} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} S v^3 = \frac{8}{27} \rho S v^3 \cong 296.3 \cdot S \cdot v^3 \quad (4.3)$$

Por fin, la potencia que puede producir la turbina de río es:

$$P_{elec} = \eta_{elec} \cdot C_p \cdot P_{cin} = \eta_{elec} \cdot C_p \cdot \frac{\rho}{2} S v^3 = 500 \cdot \eta_{elec} \cdot C_p \cdot S \cdot v^3 \quad (4.4)$$

Donde:  $\eta_{elec}$  es el producto de los rendimientos del generador, de la multiplicadora y de la transmisión [-]

$C_p$	es el coeficiente de potencia (rendimiento) de los alabes	[-]
$S$	es la superficie barrida por los alabes	[m <sup>2</sup> ]
$v$	es la velocidad del agua	[m.s <sup>-1</sup> ]

Según la ley de Betz, el valor máximo que puede tener  $C_p$  es  $\frac{16}{27}$ .

Las turbinas de río pueden ser clasificadas en dos grandes familias de diseño:

- con eje vertical: eje de rotación perpendicular a la corriente de agua

Son preferidas cuando es necesario tomar ventaja de la energía cinética del flujo que puede tener su dirección cambiada, como por ejemplo en los sistemas de marea. Estas turbinas están diseñadas de modo que la dirección de rotación es siempre la misma, independientemente de la dirección del flujo. (16)

- con eje horizontal (turbina axial): eje de rotación en la dirección del flujo.

Componentes	Características del diseño de Soluciones Prácticas
<b>Rotor</b>	3 alabes de fibra de vidrio Diámetro nominal 1.75 m Velocidad de giro: 45 rpm a 1m.s-1 de la velocidad del río 2 platos de sujeción de acero inoxidable para el montaje de los alabes
<b>Generador</b>	Generador de imanes permanentes que produce CA, luego rectificada en CC 12 V, de potencia 250 W a 360 rpm
<b>Árbol de transmisión</b>	Tubo galvanizado de 1.5" de diámetro nominal
<b>Otros</b>	Multiplicador de velocidad: fajas y poleas Tablero de control: instrumentos de medición básicos y diodos rectificadores para 12 V Balsa flotante

Tabla 4.a: Componentes de la turbina de río de Soluciones Prácticas (16)

Soluciones Prácticas realizó investigaciones en ríos de la selva peruana, en los ríos Napo, Amazonas y Huallaga. Concluyó como viable el uso de turbinas de río para muchas pequeñas comunidades selváticas, especialmente en el río Napo por tener una mayor gradiente. (17)

## 4.2. Ruedas hidráulicas

Las ruedas hidráulicas para la generación de electricidad son de diseño similar a las antiguas ruedas hidráulicas utilizadas en molinos para generar energía mecánica. Se encuentran en fase de investigación, quedando problemas en la transmisión y el generador. De hecho, tienen un movimiento muy lento, mientras que para generar electricidad se necesitan altas velocidades en el generador. Hay que mejorar el diseño de la transmisión entre la rueda y el generador, pero se dificulta encontrar rodamientos, fajas y veletas para velocidades tan bajas. Un punto importante es la durabilidad – se desean duraciones de 20 años – y un rodamiento clásico se malogra en pocos meses, eso debido a lo que un rodamiento tiene un número limitado de revoluciones posibles (por ejemplo un millón), y con 10-15 rpm (revoluciones por minuto) en 3,5-4 meses alcanzamos un millón de revoluciones. (18)

Existen dos tipos principales de ruedas hidráulicas:

- Overshot: el agua viene por arriba
- Undershot: el agua llega a la parte mediana de la rueda

## Conclusión

---

Un microcentral hidroeléctrica que utiliza la energía potencial del agua para producir energía eléctrica que será distribuida a los usuarios mediante una minired (se puede también conectar a la red nacional, aunque no sea el asunto de este documento), o para las potencias las más bajas, ser utilizada para la carga de baterías para una utilización simultánea o diferida de la energía.

Al contrario de las centrales de gran tamaño, ya muy utilizadas en el Perú para la producción de energía nacional, las MCH afectan poco el medio ambiente, ya que no necesitan obras civiles muy amplias como la construcción de un reservorio. Se pueden construir y operar con tecnologías y capacidades locales. La potencia máxima de diseño se calcula según el mínimo caudal del río y quebrada. Por tanto, es necesario el estudio del recurso hidráulico a lo largo de un año o de varios años.

Mediante el suministro de electricidad, sea vía baterías o vía una minired, los usuarios tienen una iluminación de mejor calidad, pueden utilizar aparatos de pequeña potencia como radios, TVs, DVDs o cargadores de celulares. Además si el sistema tiene dimensiones suficientes para ello, pueden aprovechar esta energía para crear nuevas posibilidades de ingresos para ellos: cargas de las baterías de sus vecinos (lo más fácil de implementar), sala de televisión, pequeños talleres, juguería, peluquería, etc.

## Bibliografía

---

1. **Castro, Adriana.** *Minicentrales hidroeléctricas*. Madrid : IDAE, 2006.
2. **Prácticas, Soluciones.** *Visita del Centro de demostración y capacitación en tecnologías apropiadas CEDECAP en Cajamarca*. Cajamarca, 14 de marzo de 2011.
3. **MHyLab.** *FAQ*. Bruxelles : European Small Hydropower Association (ESHA), 2005.
4. **Levet, Jérôme.** Réseau International d'Accès aux Energies Durables (RIAED). [En línea] 6 de setiembre de 2007. <http://www.riaed.net/spip.php?article917>.
5. **Thematic Network on Small Hydropower (TNSP).** *Petite hydroélectricité : Guide technique pour la réalisation de projets (Guide on how to develop a small hydropower plant - update of Layman's Guidebook, by Celso Penche, 1998)*. Bruxelles : European Small Hydropower Association (ESHA), 2005.
6. **Her Majesty the Queen in Right of Canada.** *Micro-Hydropower Systems - A Buyer's Guide*. 2004. ISBN 0-662-35880-5.
7. **Sánchez, Teodoro, y otros.** *Evaluación de recursos hidroenergéticos*. Lima : Soluciones Prácticas, 2010. ISBN: 978-9972-47-206-0.
8. **Dávila, C., y otros.** *Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas*. Lima : Soluciones Prácticas, 2010. ISBN: 978-9972-47-210-5.
9. **Coz, Federico y al., et.** *Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos*. Lim : ITDG, 1995.
10. **Bayod Rújula, Ángel Antonio, y otros.** *Guía de energías renovables aplicadas a las PyMEs*. s.l. : CEPyME ARAGÓN.
11. **Prácticas, Soluciones.** *Visita de la microcentral hidroeléctrica en Yanacancha Baja, Cajamarca*. Cajamarca, 15 de marzo de 2011.
12. **Ing. Rodríguez Sánchez, Luis.** *Obras civiles en microcentrales hidráulicas*. diciembre 2000.
13. **C.E.C.U.** *Energía Mini-Hidráulica*. [En línea] <http://www.cec.u.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/guia/minidraulica.htm>.
14. *Ruedas hidráulicas de corriente libre para generación de electricidad, bombeo y potencia mecánica. Ganador del Primer Concurso de Innovación Energética GVEP 2010.* **Ing. Hadzich, Miguel.** Lima : s.n., 2010.
15. **Ramos, Graciela Prado.** *Estudio de scaling up en microcentrales hidroeléctricas: experiencias de Soluciones Prácticas - ITDG*. Lima : Soluciones Prácticas, 2006.
16. **Soluciones Prácticas.** *Ficha técnica: turbinas de río*. s.l. : Soluciones Prácticas.
17. **Maldonado Quispe, Francisco.** *Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán, región Loreto*. Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, EAP. de Ingeniería Mecánica de Fluido, 2005.
18. **Hadzich, Miguel.** *Entrevista con M. Hadzich, coordinador del GRUPO-PUCP*. Lima, 3 de marzo de 2011.

---

# Anexos

---

## A. Principios básicos de electricidad

---

### A.1. Cargas eléctricas

---

La electricidad es una energía provocada por el movimiento de cargas eléctricas. No resulta visible, pero es claramente existente por los efectos que produce.

La partícula elemental de la electricidad es el electrón, la mínima expresión de carga eléctrica, que es negativa. La carga eléctrica llevada por un electrón vale el opuesto de la carga eléctrica elemental, o sea  $-1.6 \cdot 10^{-19}$  C (C: coulomb / colombio). Los electrones son partículas subatómicas, junto con los protones y neutrones, que forman el núcleo del átomo, mientras que los electrones se encuentran en torno a este núcleo.

### A.2. Corriente eléctrica

---

#### A.2.1. Definiciones

---

La corriente eléctrica es la circulación ordenada de electrones a través de un conductor.

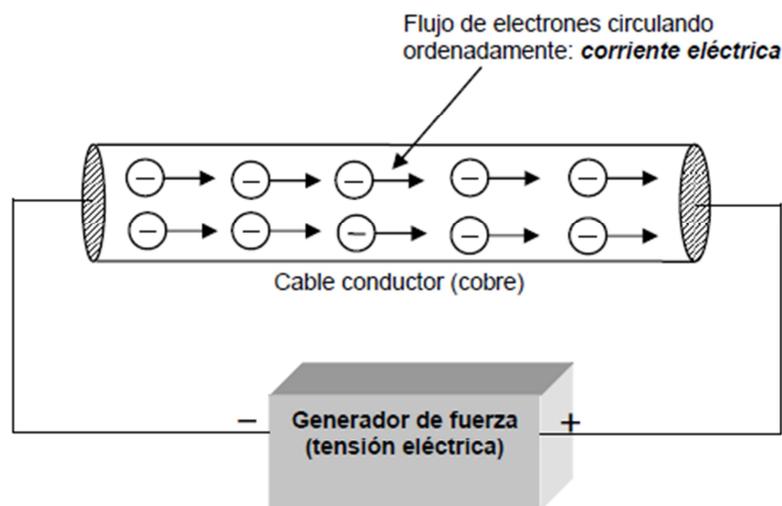


Ilustración A.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones<sup>11</sup>

La intensidad de la corriente es la cantidad de carga eléctrica que circula por un conductor en la unidad de tiempo. Se mide en amperios (A). De manera convencional, la corriente eléctrica circula en

---

<sup>11</sup> <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

el sentido opuesto al movimiento real de los electrones; se debe a lo que cuando se definió la corriente eléctrica, se pensaba que era debida a un movimiento de cargas positivas.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Donde:  $I$  es la intensidad de la corriente eléctrica [A]  
 $Q$  es la cantidad de carga eléctrica circulando en el tiempo [C]  
 $t$  es el tiempo [s]

La tensión eléctrica en los bornes de un dipolo es la circulación del campo eléctrico en este dipolo. Entonces representa el trabajo de la fuerza eléctrica en el dipolo, originada por el campo eléctrico, sobre una carga eléctrica que lo atraviesa, dividido por el valor de la carga: es una energía por unidad de carga, expresada en voltios (V). Este trabajo permite poner en movimiento las cargas eléctricas y provocar la corriente eléctrica. En régimen estacionario, la tensión está asimilada a una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

La corriente eléctrica puede ser continua (CC) o alterna (CA) según el tipo de generador utilizado. Las corrientes continuas se caracterizan por una polaridad de la tensión y un sentido de la corriente constantes a lo largo del tiempo; al contrario, la polaridad de una tensión alterna y el sentido de una corriente alterna van cambiando periódicamente.

Por ejemplo, en el caso de la red eléctrica, la polaridad de la tensión cambia 50 a 60 veces por segundo (dependiendo si la frecuencia característica de la red es 50 o 60 Hz); y el valor eficaz de la tensión es de 220 o 230 V.

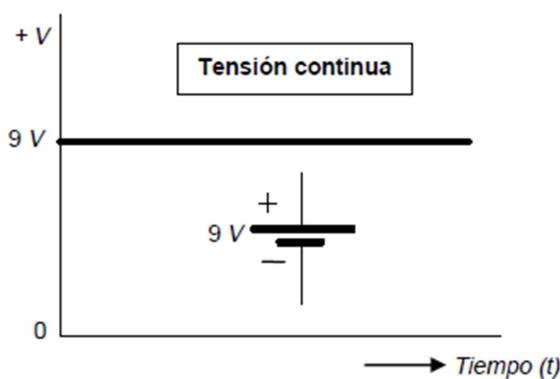


Ilustración A.b: Tensión de corriente continua<sup>12</sup>

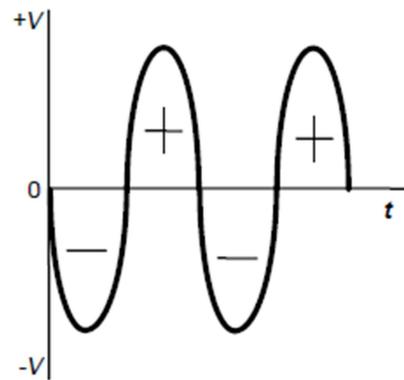


Ilustración A.c: Tensión de corriente alterna<sup>13</sup>

La resistencia eléctrica es la menor o mayor oposición de un cuerpo al paso de la corriente eléctrica. Los materiales que presentan una gran oposición al paso de la electricidad son llamados aislantes y en consecuencia tienen una resistencia eléctrica elevada. Al contrario, los cuerpos que apenas se oponen al paso de la corriente eléctrica son llamados conductores y tienen una resistencia eléctrica muy baja. La resistencia eléctrica se mide en ohmios ( $\Omega$ ).

El valor de la resistencia depende de la longitud, la sección y la resistividad del conductor; la resistividad es característica de un material.

<sup>12</sup> <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

<sup>13</sup> *Ibid.*

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

Donde:	$R$	es la resistencia del conductor eléctrico	$[\Omega]$
	$\rho$	es la resistividad del material constituyendo el conductor	$[\Omega.m]$
	$L$	es la longitud del conductor eléctrico	$[m]$
	$S$	es la sección del conductor eléctrico	$[m^2]$

Por tanto, a mayor longitud de un conductor eléctrico, mayor resistencia, y a mayor sección, menor resistencia.

### A.2.2. Analogía hidráulica

---

Para poder representarse la corriente eléctrica, que es invisible, se suele compararla con un flujo de agua. La corriente eléctrica equivale a la corriente de fluido que circula por una tubería, que es la imagen de la circulación de cargas eléctricas por un conductor eléctrico.

En este símil hidráulico, la intensidad es comparable al caudal, o sea a la cantidad de agua que pasa por la tubería en la unidad de tiempo.

La fuerza que presiona para que los electrones se muevan es la tensión eléctrica. Considerando una cantidad de agua entre dos puntos de niveles diferentes (caída de agua), el agua en el punto más alto tiene una energía potencial gravitatoria. Esta energía es la que permite la puesta en movimiento del agua, convirtiéndose en energía cinética. Similarmente, la tensión, que es una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, permite la puesta en movimiento de los electrones. En lugar de la diferencia de energía potencial debida al desnivel, también se puede comparar con el trabajo realizado por una bomba.

## A.3. Circuitos eléctricos

---

Un circuito eléctrico es una red eléctrica que contiene al menos una trayectoria cerrada.

### A.3.1. Circuito en serie

---

En un circuito en serie, los bornes de los diferentes dispositivos se conectan secuencialmente: el borne de salida de un dispositivo se conecta al borne de entrada del dispositivo siguiente.

Si el circuito en serie conecta  $n$  dispositivos, la intensidad de corriente circulando en el circuito es la misma en cada punto, mientras que las tensiones se adicionan.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4)$$

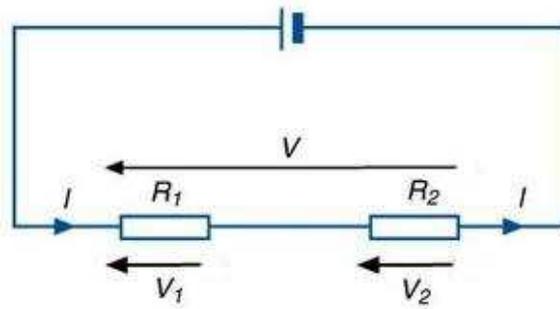


Ilustración A.d: Circuito en serie<sup>14</sup>

### A.3.2. Circuito en paralelo

En un circuito en paralelo, los bornes de entrada de los diferentes dispositivos eléctricos coincidan en un mismo punto. Lo mismo vale para los bornes de salida.

Si el circuito en serie conecta  $n$  dispositivos, la tensión en los bornes de cada dispositivo es la misma, mientras que las intensidades de corriente se adicionan.

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (5)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (6)$$

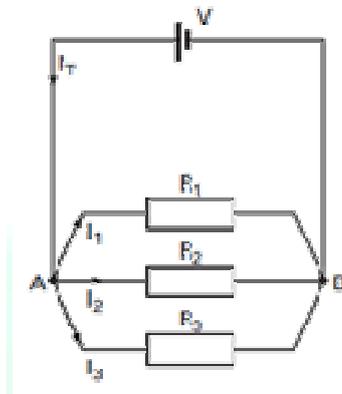


Ilustración A.e: Circuito en paralelo<sup>15</sup>

En una vivienda conectada a la red, los aparatos eléctricos son conectados en paralelo, para que puedan funcionar de manera independiente. Si fueran conectados en serie, la desconexión de sólo un aparato impediría los otros de funcionar, ya que eso abriría el circuito.

### A.3.3. Ley de Ohm

La ley de Ohm permite vincular tensión, intensidad y resistencia en un circuito eléctrico. Afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la tensión e

<sup>14</sup> [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/series\\_circuit.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/series_circuit.html)

<sup>15</sup> <http://www.portalelectricos.com/cursos/fundamentoselectricidad5.php>

inversamente proporcional a la resistencia, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante.

$$I = \frac{V}{R} \text{ o } V = RI \quad (7)$$

Donde:  $I$  es la intensidad de la corriente eléctrica [A]  
 $V$  es la tensión en los bornes del conductor eléctrico [V]  
 $R$  es la resistencia del conductor eléctrico [ $\Omega$ ]

#### A.4. Potencia y energía eléctricas

---

La potencia eléctrica es la energía eléctrica consumida o liberada en la unidad de tiempo. Se expresa en vatios (W).

$$P = \frac{E}{t} \quad (8)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $E$  es la energía consumida o liberada [J], o [Wh]  
 $t$  es el tiempo en el cual la energía es consumida o liberada [s], o [h]

El elemento que libera energía es un generador y el que consume energía es un receptor. Del punto de vista receptor, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía; cuanto más rápido sea capaz de realizar esta transformación, mayor será la potencia del mismo. Viceversa, del punto de vista generador, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar otro tipo de energía en energía eléctrica.

Aunque la unidad del tiempo y la de la energía sean en el sistema internacional de unidades (S.I.) respectivamente el segundo (s) y el julio o joule (J), se suele en el ámbito de instalaciones eléctricas en viviendas y otros expresar el tiempo en horas (h) y por tanto la energía en vatios-horas (Wh).

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \quad (9)$$

En corriente continua, la potencia de un dispositivo es el producto de la tensión en sus bornes por la intensidad de la corriente que lo atraviesa.

$$P = V \cdot I \quad (10)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $V$  es la tensión en los bornes del dispositivo [V]  
 $I$  es la intensidad de la corriente en el dispositivo [A]

Por tanto, utilizando la ley de Ohm, se puede calcular la potencia perdida en forma de calor en una resistencia eléctrica, eso siendo llamado el efecto Joule:

$$P = V \cdot I = RI^2 \quad (11)$$

En corriente alterna sinusoidal monofásica, la potencia es el producto de los valores eficaces de la tensión y de la intensidad con el coseno de la desfase entre la tensión y la intensidad.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (12)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $V_{ef}$  es la tensión eficaz en los bornes del dispositivo [V]  
 $I_{ef}$  es la intensidad eficaz de la corriente en el dispositivo [A]

Puesto que un valor eficaz se define en régimen sinusoidal como el valor máximo dividido por la raíz cuadrada de 2,

$$P = \frac{1}{2} V_{max} \cdot I_{max} \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

Donde:  $V_{max}$  es la tensión máxima en los bornes del dispositivo [V]  
 $I_{max}$  es la intensidad máxima de la corriente en el dispositivo [A]  
 $\varphi$  es la desfase de la intensidad relativamente a la tensión [rad] o [°]